



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

**Βέλτιστος Προγραμματισμός της Λειτουργίας των  
Μπαταριών των Prosumers για Εξοικονόμηση και  
Συμμετοχή στις Peer-to-Peer Αγορές**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Βασίλειος Γ.Καμπουράκης

Επιβλέπων : Κορρές Γεώργιος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2023





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

**Βέλτιστος Προγραμματισμός της Λειτουργίας  
των Μπαταριών των Prosumers για  
Εξοικονόμηση και Συμμετοχή στις Peer-to-  
Peer Αγορές**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Καμπουράκης Γ. Βασίλειος

Επιβλέπων : Κορρές Γεώργιος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9 Μαρτίου 2023:

(Υπογραφή)

.....  
...

Κορρές Γεώργιος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
.....

Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
.....

Πάυλος Γεωργιλάκης

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2023

(Υπογραφή)

.....  
Καμπουράκης Γ. Βασίλειος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Καμπουράκης Γ. Βασίλειος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι Peer-to-Peer αγορές ενέργειας αποτελούν μια ριζοσπαστική δομή στην οποία οι συμμετέχοντες μπορούν να αγοράζουν και να πουλάνε ενέργεια σε διακριτά χρονικά βήματα απευθείας μεταξύ τους χωρίς να χρειάζονται κάποιον μεσάζοντα. Οι αγορές αυτές εμφανίζουν μεγάλο ενδιαφέρον και πολλά οφέλη δύναται να προκύψουν για τους καταναλωτές και το δίκτυο εάν εφαρμοστούν σε ευρεία κλίμακα. Νέες ψηφιακές τεχνολογίες όπως το Blockchain και τα Big Data, σε συνδυασμό με την ραγδαία εξάπλωση των Διασπαρμένων Μονάδων Παραγωγής και των Ηλεκτρικών Οχημάτων έχουν δημιουργήσει ένα πλαίσιο στο οποίο οι Peer-to-Peer αγορές δύναται να ευδοκιμήσουν.

Οι αγορές ενέργειας που σήμερα υπάρχουν λειτουργούν με πολύ διαφορετικό τρόπο. Υπεύθυνοι για την λειτουργία της αγοράς είναι πολύ συγκεκριμένοι φορείς με σαφώς καθορισμένους ρόλους και αρμοδιότητες ενώ οι καταναλωτές δεν έχουν κανέναν ρόλο, βαθμό ελευθερίας ή έλεγχο στην τιμή της ενέργειας που χρειάζεται να αγοράσουν. Με την αύξηση, όμως, των Διεσπαρμένων Μονάδων Παραγωγής, πολλοί καταναλωτές παράγουν δική τους ενέργεια και πλέον μπορούν είτε να την καταναλώσουν είτε όμως και να την πουλήσουν. Οι καταναλωτές αυτοί είναι γνωστοί με τον όρο Prosumers και κατέχουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στο πλαίσιο των Peer-to-Peer αγορών που εξετάζομαι.

Για την εκκαθάριση κάθε Peer-to-Peer αγοράς, κρίνεται απαραίτητο οι Prosumers και οι λοιποί συμμετέχοντες να αποφασίσουν για την ποσότητα της ενέργειας που επιθυμούν να αγοράσουν ή να πουλήσουν και να την κοινοποιήσουν στην πλατφόρμα ή τον λειτουργό της αγοράς. Καθώς ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνεται αυτή η απόφαση επηρεάζει άμεσα το συνολικό όφελος που έχει ο Prosumer από την συμμετοχή του στην Peer-to-Peer αγορά, η εν λόγω απόφαση θα πρέπει κάθε φορά να λαμβάνεται με σύνεση.

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία, προσπαθήσαμε να βρούμε έναν καλό και εύχρηστο τρόπο ένας Prosumer που συμμετέχει σε μια Peer-to-Peer αγορά να αποφασίζει για την ενέργεια που επιθυμεί να αγοράσει ή να πουλήσει στο επόμενο χρονικό βήμα. Για τον λόγο αυτό, επιθυμώντας να μεγιστοποιήσουμε το κέρδος του Prosumer που εξετάζουμε καταφύγαμε στην κατάστρωση και επίλυση ενός στοχαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης στο οποίο οι υπάρχουσες αβεβαιότητες που σχετίζονται με το φορτίο λαμβάνονται υπόψιν και προσομοιώνονται μέσω σεναρίων. Πιο συγκεκριμένα, ένα μοντέλο πρόβλεψης χρονοσειρών *SARIMA* εκπαιδεύεται σε ιστορικά δεδομένα και κατασκευάζει σεναρία τα οποία μετέπειτα τροφοδοτούνται στο στοχαστικό πρόβλημα και η απόφαση για την πιο συμφέρουσα ποσότητα ενέργειας λαμβάνεται. Η απόφαση όμως αυτή, σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό και με την τιμή της ενέργειας στην Peer-to-Peer αγορά, για τον λόγο αυτό, στην εργασία αυτή αντί να υπολογίσουμε μια μοναδική ποσότητα ενέργειας που ο Prosumer επιθυμεί να εμπορευθεί στην Peer-to-Peer αγορά, υπολογίζουμε ένα πλήθος τέτοιων ζευγών τιμής-ενέργειας και τα χρησιμοποιούμε για να κατασκευάσουμε μια συνάρτηση που περιγράφει πλήρως τις αποφάσεις του Prosumer. Η Συνάρτηση αυτή, είναι μια Συνάρτηση Οριακής Χρησιμότητας και στο πλαίσιο των Peer-to-Peer αγορών μπορεί να έχει ιδιαίτερη αξία αφού εκφράζει πλήρως αριθμητικά την επιθυμία του Prosumer να εμπορευθεί ενέργεια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκκαθάριση της αγοράς. Στο τελευταίο σκέλος της παρούσας εργασίας, για να αξιολογήσουμε την ποιότητα της μεθοδολογίας μας, γίνεται μια σύγκριση του αναμενόμενου κόστους που έχουμε προβλέψει και του βέλτιστου κόστους που μπορεί να επιτευχθεί.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Μαθηματική Βελτιστοποίηση, Μπαταρίες, Prosumers, Python, Peer-2-Peer, Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας, Μπαταρίες, Αυτοκαταναλωτές, Συναρτήσεις Χρησιμότητας, Χρονοσειρές, Blockchain



## ABSTRACT

Peer-to-Peer energy markets are a radical framework in which participants are able to procure and sell energy directly with each other at discrete time steps without the need of a central organizer. There is a huge interest around these markets and many benefits could occur for both the consumers and the electrical grid should they be implemented on a large scale. New digital technologies such as Blockchain and Big Data, along with the fast growth of Distributed Energy Sources and Electrical Vehicles have enabled Peer-to-Peer energy trading.

Today's energy markets function in a very different way. Responsible for the functioning of the markets are specific authorities with well-defined roles and responsibilities, while consumers have no role, degree of freedom or control over the energy or the price they are procuring. Nevertheless, the increase of Distributed Energy Sources has made many consumers to produce their own energy and as a result they can self-consume that energy or even trade it. Those consumers are known as Prosumers and their role in Peer-to-Peer markets is of high importance.

For the clearing of every Peer-to-Peer market, Prosumers and other participants have to decide for the quantity of energy they are willing to sell or buy and inform the platform or the market regulator. The way that this decision is made strongly affects the overall benefit that the prosumers have for participating in the Peer-to-Peer trading and as a result this decision should be taken very carefully.

In this Master Thesis, we tried to find a good way for a Prosumer participating in a Peer-to-Peer market to decide on the energy he wishes to buy or sell in the next time step. For that reason, wanting to maximize profit of the Prosumer we are studying we constructed and solved a stochastic optimization problem in which the existing uncertainties for the load are modelled through scenarios. More specifically, a time series forecasting *SARIMA* model is trained based on historical data and it generates scenarios and those are fed in the stochastic problem. That way the optimal decision for the quantity of the energy is taken. This decision, however, is directly linked to the energy price in the Peer-to-Peer market and this price is not known at the time step in which we are called to decide, for that reason, in this thesis instead of only calculating one value for the quantity of energy that the consumer is willing to trade we calculate a set of price-energy pairs which are used to construct a function that describes fully the Prosumers' decisions. This function is called Marginal Utility Function and it can be very useful for Peer-to-Peer trading since it numerically expresses the willingness of the Prosumer to trade energy and therefore it can be used for the clearing of the market. As the last part of this thesis, in order to evaluate the quality of our methodology, a comparison of our expected cost and the expected cost of the optimal solution is done.

Key words: Mathematical Optimization, Python, Peer-to-Peer, Batteries, Electricity Energy Markets, Prosumers, Marginal Utility Functions, Blockchain





## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας σηματοδοτεί την λήξη των σπουδών μου στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στα χρόνια αυτά που υπήρξα φοιτητής είχα την τύχη να μορφωθώ από καταρτισμένους και πρόθυμους παιδαγωγούς δίπλα σε πολύ ικανούς ανθρώπους, αρκετοί εκ των οποίων γίνανε και παραμένουν στενοί φίλοι μου. Οι πολλές γνώσεις και δεξιότητες που μου προσέφερε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, και για τις οποίες είμαι βαθιά περήφανος και ευγνώμων, αποτελούν μόνο ένα κομμάτι της παρακαταθήκης των τελευταίων πέντε ετών. Στα φοιτητικά μου χρόνια γέμισα με πολλές και πολύ όμορφες εμπειρίες, γνώρισα και ξεπέρασα σημαντικές δυσκολίες, έλαβα μαθήματα που θα με συνοδεύουν για την υπόλοιπη ζωή μου και έκανα ισχυρές και όμορφες φιλίες. Για αυτούς τους λόγους, τα τελευταία χρόνια και η επιτυχής περάτωση των σπουδών μου με γεμίζουν ευγνωμοσύνη, χαρά και ελπίδα για το μέλλον.

Για όλα αυτά και για ακόμα περισσότερα νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους των οποίων η συνεισφορά ήταν καθοριστική για την περάτωση των σπουδών μου. Καταρχάς, ευχαριστώ θερμά τους καθηγητές της σχολής μας κύριο Κορρέ Γεώργιο και κύριο Χατζηαργυρίου Νικόλαο που με εμπιστεύτηκαν και μου δώσανε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα της επιστήμης του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού. Ευχαριστώ επίσης θερμά, την Διδάκτορα Ερευνήτρια κυρία Συρρή Αντζελίνα και τον Υποψήφιο Διδάκτορα κύριο Πεδιαδίτη Παναγιώτη των οποίων οι πολύτιμες συμβουλές, η καθοδήγηση και η προθυμία να με βοηθήσουν υπήρξε καθοριστικής σημασίας για την επιτυχή συγγραφή αυτής της εργασίας. Με όλη μου την καρδιά, ευχαριστώ την οικογένεια μου, τον πατέρα μου Γιώργο, την μητέρα μου Κωνσταντίνα και τον αδερφό μου Σταμάτη που βρισκόντουσαν και βρίσκονται στο πλευρό μου σε κάθε χαρά και κάθε λύπη. Ευχαριστώ επίσης και την λοιπή οικογένεια μου που μέχρι σήμερα έχει συμβάλλει πολύ στην ανάπτυξη και την καλλιέργεια μου. Ευχαριστώ θερμά τον κύριο Βαγγέλη, έναν ξεχωριστό άνθρωπο του οποίου οι συμβουλές με καθοδηγούν εδώ και χρόνια. Ευχαριστώ επίσης, όλους τους ανθρώπους που εργάζονται στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών και στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και είτε μέσα είτε έξω από τα αμφιθέατρα μας δίνουν την ευκαιρία να μορφωθούμε, να κοινωνικοποιηθούμε και να προοδεύσουμε. Ευχαριστώ επίσης, για ό,τι όμορφο μοιραστήκαμε και ό,τι μαθήματα πήραμε, όλους τους ανθρώπους που περάσανε από την ζωή μου. Τέλος, για όλες τις όμορφες στιγμές που ζήσαμε και για όλες τις δυσκολίες που από κοινού ξεπεράσαμε ευχαριστώ με όλη μου την καρδιά τους φίλους μου και τους εύχομαι ο δρόμος τους να είναι γεμάτος επιτυχίες και χαρές.



<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>8</b>
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	<b>10</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ</b> .....	<b>14</b>
<b>ΝΟΜΕΝCLATURE</b> .....	<b>15</b>
<b>ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΟΡΩΝ</b> .....	<b>16</b>
<b>ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ ΑΓΓΛΙΚΩΝ ΟΡΩΝ</b> .....	<b>17</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>19</b>
1.1 ΧΡΗΣΙΜΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ.....	19
1.2 ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	21
1.3 ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΟΝ ΧΩΡΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	22
1.4 ΤΑ ΝΕΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	22
1.5 PEER-TO-PEER ΑΓΟΡΕΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΡΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΓΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ.....	23
1.6 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ.....	24
1.7 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	24
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ</b> .....	<b>26</b>
2.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	26
2.2 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΥΟ ΣΤΑΔΙΩΝ.....	27
2.3 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΤΩΝ ΜΕΓΑΛΩΝ ΑΡΙΘΜΩΝ.....	28
2.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ.....	29
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ</b> .....	<b>30</b>
3.1 Η ΈΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ.....	30
3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ.....	30
3.3 ΣΤΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ.....	32
3.4 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ.....	34
3.4.1 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΟΡΩΝ $AR(p)$ , $MA(q)$ ΚΑΙ $I$ .....	34
3.4.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	35
3.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΦΑΝΕΙΑΣ.....	36
3.6 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΑΚΑΙΚΕ.....	36
3.7 ΕΠΟΧΙΚΗ ΑΥΤΟΠΑΛΙΝΔΡΟΜΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ.....	37
3.8 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ.....	38
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b> .....	<b>40</b>
4.1 TARGET MODEL.....	40
4.2 ΟΙ ΒΑΣΙΚΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΟΙ ΚΑΙ ΦΟΡΕΙΣ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	40
4.3 Η ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΑΓΟΡΑΣ.....	43
4.3.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΧΡΗΜΑΤΟΠΙΣΤΩΤΙΚΗ ΑΓΟΡΑ ('FORWARD MARKET').....	43
4.3.2 ΑΓΟΡΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ('DAY-AHEAD MARKET').....	44
4.3.3 ΕΝΔΟΗΜΕΡΗΣΙΑ ΑΓΟΡΑ ('INTRA-DAY MARKET').....	45
4.3.4 ΑΓΟΡΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ('BALANCING MARKET').....	45
4.4 PEER-TO-PEER ΑΓΟΡΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	46
4.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	46
4.4.2 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ.....	46
4.5 ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΟΡΙΑΚΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ.....	47
4.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	48
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ</b> .....	<b>52</b>
5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	52
5.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	52
5.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	54
5.4 ΣΕΝΑΡΙΑ.....	56

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b>	<b>ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>57</b>
6.1	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ .....	57
6.2	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ .....	57
6.3	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΒΗΜΑΤΩΝ.....	58
6.4	ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΟΦΕΛΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ .....	59
6.5	ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ .....	61
6.6	ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΛΗΡΟΥΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΟΡΙΑΚΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ .....	65
6.6.1	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ .....	65
6.6.2	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ .....	66
6.7	ΡΕΑΛΙΖΑΤΙΟΝ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	72
6.8	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	74
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>75</b>
7.1	ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ.....	75
7.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	76
7.3	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ .....	76
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>		<b>78</b>

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-Τυπική Μορφή Παραδοσιακού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	21
Εικόνα 2-Νέα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	22
Εικόνα 3-Παράδειγμα Χρονοσειράς που Εμφανίζει Ανοδική Τάση .....	30
Εικόνα 4-Παράδειγμα Χρονοσειράς που Εμφανίζει Εποχικότητα.....	31
Εικόνα 5-Παράδειγμα Χρονοσειράς με Έντονη Ύπαρξη Θορύβου.....	31
Εικόνα 6-Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης Σταθερής Χρονοσειράς .....	32
Εικόνα 7-Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης μη Σταθερής Χρονοσειράς .....	33
Εικόνα 8-Παράδειγματα Συναρτήσεων Συνολικής και Οριακής Χρησιμότητας .....	48
Εικόνα 9-Εμπόριο Περίσσειας Ενέργειας στις Παραδοσιακές Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	49
Εικόνα 10-Εμπόριο Περίσσειας Ενέργειας στις P2P Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	49
Εικόνα 11-Διάγραμμα Ροής Κεφαλαίου 6.....	58
Εικόνα 12-Τιμή Εκκαθάρισης Αγοράς .....	59
Εικόνα 13-Προφίλ φορτίου.....	59
Εικόνα 14-Φόρτιση και Εκφόρτιση μπαταρίας ανά ώρα.....	60
Εικόνα 15-Ημερήσιο Κόστος με και χωρίς Μπαταρία .....	60
Εικόνα 16-Καμπύλη Φορτίου Οικιακών Καταναλώσεων για τις πρώτες 15 μέρες του Ιανουαρίου .....	61
Εικόνα 17-Διαγράμματα Αξιολόγησης Μοντέλου .....	62
Εικόνα 18-Πρόβλεψη Φορτίου Επόμενης Ημέρα .....	63
Εικόνα 19-Forecast Επόμενης Ημέρας και Κατασκευή Σεναρίων.....	64
Εικόνα 20-Διάγραμμα Ροής για την Κατασκευή της MUF.....	65
Εικόνα 21-Συνάρτηση Οριακής Χρησιμότητας για $t_0 = 0$ και $C_{initial} = 7 kWh$ χωρίς tariff .....	66
Εικόνα 22-Αποτελέσματα για $t_0 = 0$ και $C_{initial} = 1 kWh$ με και χωρίς tariff .....	67
Εικόνα 23-Αποτελέσματα για $t_0 = 0$ και $C_{initial} = 5 kWh$ με και χωρίς tariff .....	68
Εικόνα 24-Αποτελέσματα για $t_0 = 0$ και $C_{initial} = 7 kWh$ με και χωρίς tariff .....	68
Εικόνα 25-Αποτελέσματα για $t_0 = 0$ και $C_{initial} = 9 kWh$ με και χωρίς tariff .....	68
Εικόνα 26-Αποτελέσματα για $t_0 = 0$ και $C_{initial} = 13 kWh$ με και χωρίς tariff .....	69
Εικόνα 27-Αποτελέσματα για $t_0 = 4$ και $C_{initial} = 1 kWh$ με και χωρίς tariff .....	69
Εικόνα 28-Αποτελέσματα για $t_0 = 4$ και $C_{initial} = 5 kWh$ με και χωρίς tariff .....	69
Εικόνα 29-Αποτελέσματα για $t_0 = 4$ και $C_{initial} = 7 kWh$ με και χωρίς tariff .....	70
Εικόνα 30-Αποτελέσματα για $t_0 = 4$ και $C_{initial} = 9 kWh$ με και χωρίς tariff .....	70
Εικόνα 31-Αποτελέσματα για $t_0 = 4$ και $C_{initial} = 13 kWh$ με και χωρίς tariff .....	70
Εικόνα 32-Αποτελέσματα για $t_0 = 19$ και $C_{initial} = 1 kWh$ με και χωρίς tariff .....	71
Εικόνα 33-Αποτελέσματα για $t_0 = 19$ και $C_{initial} = 5 kWh$ με και χωρίς tariff .....	71
Εικόνα 34-Αποτελέσματα για $t_0 = 19$ και $C_{initial} = 7 kWh$ με και χωρίς tariff .....	71
Εικόνα 35-Αποτελέσματα για $t_0 = 19$ και $C_{initial} = 9 kWh$ με και χωρίς tariff .....	72
Εικόνα 36-Αποτελέσματα για $t_0 = 19$ και $C_{initial} = 13 kWh$ με και χωρίς tariff.....	72
Εικόνα 37-Σύγκριση Realization (αριστερά) και Εκτίμησης (δεξιά) .....	73
Εικόνα 38-Ποσοστιαίο Σφάλμα Μεταξύ Μοντέλου και Realization .....	73

## NOMENCLATURE

### Δείκτες και σύνολα:

$t \in T$	Χρονικές περιόδου
$w \in W$	Σενάρια

### Παράμετροι:

$E$	Η απόδοση της μπαταρίας
$C_{max}$	Η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας
$C_{min}$	Η ελάχιστη ενέργεια που επιθυμούμε να διατηρείται στην μπαταρία στο τέλος κάθε χρονικού βήματος
$C_{initial}$	Η φόρτιση της μπαταρίας στην αρχή της περιόδου μελέτης
$C_{final}$	Η φόρτιση της μπαταρίας στο τέλος της περιόδου μελέτης
$P_N$	Η μέγιστη ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας
$\lambda_t^b$	Τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τον πάροχο του δικτύου
$\lambda_t^s$	Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στον πάροχο του δικτύου
$t_0$	Πρώτο βήμα περιόδου μελέτης
$n_T$	Τελευταίο βήμα περιόδου μελέτης
$\lambda_n$	Τιμή της ενέργειας στην p2p αγορά για $t = t_0$
$\lambda_{t,w}$	Τιμή της ενέργειας στη p2p αγορά για $t \neq t_0$
$p_{t,w}^l$	Φορτίο του Prosumer όταν αφαιρεθεί η παραγωγή του Φωτοβολταϊκού Συστήματος

### Μεταβλητές:

$p_{t,w}^c$	Η ισχύς με την οποία θα φορτίσει η μπαταρία (στη πλευρά του δικτύου)
$p_{t,w}^d$	Η ισχύς με την οποία θα εκφορτιστεί η μπαταρία (προ απωλειών)
$C_{t,w}$	Η αποθηκευμένη στη μπαταρία ενέργεια
$p_{t,w}^b$	Η ενέργεια που αγοράζει ο prosumer από το δίκτυο
$p_{t,w}^s$	Η ενέργεια που πουλάει ο prosumer στο δίκτυο
$p_n^{p2p}$	Η ενέργεια που διατίθεται να ανταλλάξει ο prosumer στην p2p αγορά στο υπό μελέτη χρονικό βήμα
$p_{t,w}^{p2p}$	Η ενέργεια που διατίθεται να ανταλλάξει ο prosumer στην p2p αγορά στα μελλοντικά χρονικά βήματα
$x_{t,w}^+$	Η ενέργεια που εισάγεται από το δίκτυο
$x_{t,w}^-$	Η ενέργεια που εξάγεται στο δίκτυο
$c_t$	Η φορολογία που εφαρμόζεται στην εισαγόμενη ενέργεια
$u_{t,w}$	Δυαδική μεταβλητή που λαμβάνει την τιμή 1 ή 0
$g_{t,w}$	Δυαδική μεταβλητή που λαμβάνει την τιμή 1 ή 0

## ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΟΡΩΝ

ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΣΜ	Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς
ΔΣΔ	Διαχειριστής Συστήματος Διανομής
ΕΧΕ	Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας
ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΔΕΔΔΗΕ	Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΡΑΕ	Ελληνική Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας
ΛΑΓΗΕ	Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΔΑΠΕΕΠ	Διαχειριστής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Εγγυήσεων Προέλευσης
ΟΔΑΗΕ	Ορισθείς Διαχειριστής Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΜΔΝ	Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά
ΣΗΘΥΑ	Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Αυξημένης Απόδοσης
ΦΟΣΕ	Φορέας Σωρευτικής Εκπροσώπησης
ΜΜΒΑΠ	Μεταβατικού Μηχανισμού Βέλτιστης Ακρίβειας Πρόβλεψης
ΗΕΠ	Ημερήσιος Ενεργειακός Προγραμματισμός
ΣΜΕ	Συμβόλαια Μελλοντικής Εκπλήρωσης
ΔΕΠ	Διαδικασίες Ενοποιημένου Προγραμματισμού



## ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ ΑΓΓΛΙΚΩΝ ΟΡΩΝ

BESS	Battery Energy Storage System
EV	Electrical Vehicle
V2G	Vehicle-to-Grid
P2P	Peer-to-Peer
ARMA	Autoregressive Moving Average
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average
SARIMA	Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average
AIC	Akaike Information Criterion
SAA	Sample Average Approximation
ADF	Augmented Dickey-Fuller
KPSS	Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin
ACF	Autocorrelation Function
AR	Autoregressive
MA	Moving Average
OTC	Over-the-Counter
RES	Renewable Energy Sources
MUF	Marginal Utility Function
DES	Distributed Energy Sources



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή

## 1.1 Χρήσιμοι Ορισμοί

Τα τελευταία χρόνια η φύση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας αλλάζει ριζικά, το μοντέλο των παραδοσιακών ΣΗΕ αντικαθίσταται από ένα διαφορετικό αλλά και πιο σύνθετο μοντέλο. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, κρίνεται σκόπιμο, προκειμένου να ενημερωθεί ο αναγνώστης για την τωρινή πραγματικότητα στον χώρο της ενέργειας, να γίνει μια σύντομη αναφορά στην μετάβαση αυτήν αλλά και τις τεχνολογίες που την καθιστούν εφικτή. Αρχικά λοιπόν, εισάγουμε κάποιες έννοιες που είναι απαραίτητες για την κατανόηση των ΣΗΕ και της παρούσας εργασίας.

### 1. Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ο όρος αναφέρεται σε όλο το δίκτυο που χρησιμοποιείται για την ηλεκτροδότηση. Ένα ΣΗΕ αποτελεί ένα σύνθετο σύστημα που απαρτίζεται από πολλές συνιστώσες (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, διακόπτες κ.α.) οι οποίες συνδυαστικά διασφαλίζουν την παραγωγή, την μεταφορά και την διανομή της Ηλεκτρικής Ενέργειας. Η διασφάλιση της εύρυθμης λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα αλλά και περίπλοκη διαδικασία καθώς στα συστήματα αυτά η παραγωγή και η κατανάλωση ενέργειας πρέπει να βρίσκεται πάντα σε απόλυτη ισορροπία, όταν η απαίτηση αυτή δεν ικανοποιείται η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος παρεκκλίνει από την ονομαστική και μια πληθώρα πολύ σοβαρών προβλημάτων δύναται να προκύψουν. Η ανθρωπότητα χρειάζεται και επιδιώκει την πλήρη απανθρακοποίηση των ΣΗΕ. Στο πλαίσιο αυτό, η μεγαλύτερη πρόκληση που καλούμαστε, ως ηλεκτρολόγοι μηχανικοί, να αντιμετωπίσουμε είναι η διασφάλιση της αδιάλειπτης και οικονομικής πρόσβασης στην ενέργεια σε ένα σύστημα στο οποίο ο έλεγχος στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ περιορισμένος.

### 2. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Πρόκειται για μονάδες παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς συμβατικούς, και ως επί το πλείστον, θερμικούς σταθμούς παραγωγής εκμεταλλεύονται πηγές ενέργειας που βρίσκονται στην φύση σε αφθονία για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Πιο γνωστές και ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες ΑΠΕ είναι τα Φωτοβολταϊκά, οι Ανεμογεννήτριες και οι Υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής. Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογική πρόοδος έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της απόδοσης και σημαντική μείωση του κόστους των ΑΠΕ με αποτέλεσμα την όλο και πιο εντατική ανάπτυξη τους. Οι ΑΠΕ αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο των μελλοντικών ΣΗΕ.

### 3. Συστήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής Ενέργειας

Πρόκειται για τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας μικρής κλίμακας (συνήθως φωτοβολταϊκά) που βρίσκονται κοντά στο σημείο της κατανάλωσης και συχνά συνδυάζονται με συστήματα αποθήκευσης. Οι τεχνολογίες αυτές πέραν του ότι παρέχουν οικονομική και πράσινη ενέργεια έχουν τεράστια αξία γιατί ενισχύουν την ιδιοκατανάλωση και οδηγούν σε λιγότερες απώλειες ενέργειας και μείωση της ανάγκης επέκτασης του υπάρχοντος ΣΗΕ.

#### 4. Οι Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας

Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (BESS), η αντλησιοταμίευση και το υδρογόνο. Η ευρεία εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών κρίνεται καίριας σημασίας για την μετάβαση στα ΣΗΕ του μέλλοντος καθώς επιτρέπουν την αποθήκευση της ενέργειας στις ώρες που η παραγωγή υπερβαίνει την ζήτηση και διασφαλίζουν έτσι την επάρκεια ισχύος στις ώρες αιχμής που οι ΑΠΕ αδυνατούν να καλύψουν πλήρως την ζήτηση.

#### 5. Ευέλικτα Φορτία και Υπηρεσίες Απόκρισης Φορτίου

Καθώς στα νέα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας δεν έχουμε τόσο έλεγχο στην παραγωγή αφού οι ΑΠΕ δεν είναι ελέγξιμες αλλά έχουμε στην ζήτηση, η βέλτιστή λοιπόν απόκριση του φορτίου στη παραγωγή κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για την αξιοπιστία του συστήματος, την διασφάλιση της συνεχόμενης λειτουργίας του και για την διατήρηση ενός χαμηλού κόστους ενέργειας. Τα φορτία που έχουν την δυνατότητα να μεταβάλλουν τις ανάγκες του όταν χρειάζεται καλούνται ευέλικτα.

#### 6. Ηλεκτρικά Οχήματα

Είναι οχήματα που τροφοδοτούνται από Ηλεκτρική Ενέργεια και αποτελούν την λύση για την ανθρακοποίηση των μεταφορών. Οι τεχνολογίες των Ηλεκτρικών Οχημάτων (EV) πέραν του ότι οδηγούν σε σημαντική μείωση προσφέρουν επίσης σημαντικότερες υπηρεσίες απόκρισης φορτίου, τις V1G και V2G, που κρίνονται νευραλγικής σημασίας για την λειτουργία των Μελλοντικών ΣΗΕ.

#### 7. Μικροδίκτυα

Τα μικροδίκτυα είναι μικρής κλίμακας, τοπικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούν είτε να λειτουργούν είτε να μην λειτουργούν ανεξάρτητα από το κύριο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Στα μικροδίκτυα συνήθως συναντώνται διάφορες πηγές ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες και εφεδρικές γεννήτριες, επίσης τα μικροδίκτυα, για να διασφαλίσουν την αδιάλειπτη παροχή ενέργειας και την ύπαρξη εφεδρειών συχνά εφοδιάζονται συχνά με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Η βασικότερη κατηγοριοποίηση μικροδικτύων μπορεί να γίνει με κριτήριο το εάν αυτά συνδέονται ή όχι στο δίκτυο και οι κατηγορίες που συναντάμε είναι τα

1. Απομονωμένα Μικροδίκτυα (Stand-Alone Microgrids) που δεν συνδέονται καθόλου στο κεντρικό ΣΗΕ
2. τα Διασυνδεδεμένα Μικροδίκτυα (Grid-Connected Microgrids) που συνδέονται στο κεντρικό ΣΗΕ μόνιμα
3. Υβριδικά Μικροδίκτυα (Islandable Microgrids).

Τα μικροδίκτυα παρουσιάζουν μεγάλη ευελιξία και ταυτόχρονα δύναται να λειτουργήσουν και σαν παραγωγοί ενέργειας και συνεπώς εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και αξία για τα ΣΗΕ του μέλλοντος. Επιπλέον, μεγάλο πλεονέκτημα των μικροδικτύων αποτελεί η δυνατότητα ηλεκτροδότησης απομονωμένων και απομακρυσμένων περιοχών στις οποίες το κεντρικό ΣΗΕ αδυνατεί είτε για τεχνικούς είτε για οικονομικούς λόγους να εξυπηρετήσει.

## 8. Ψηφιακές Τεχνολογίες

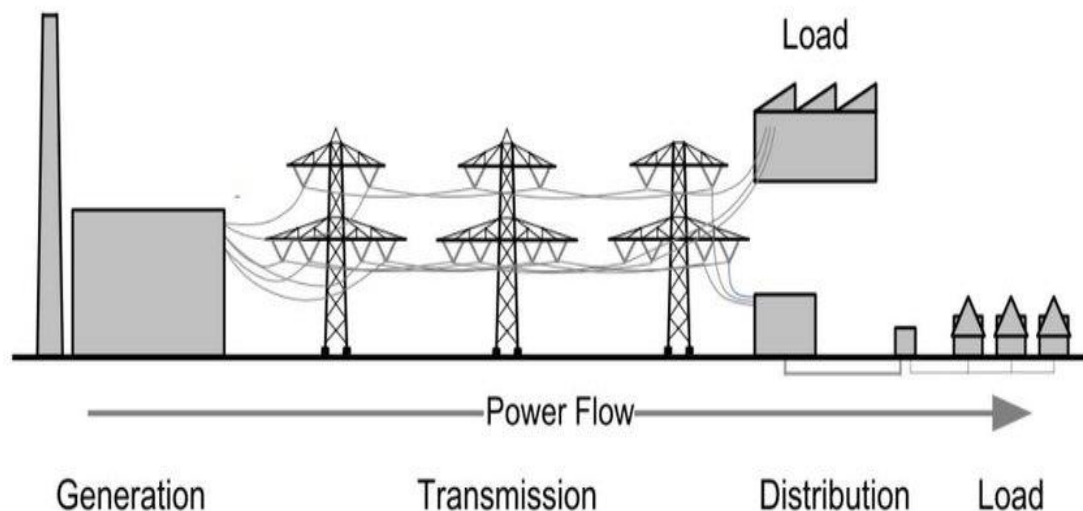
Πρόκειται για πραγματικά σύγχρονες και ριζοσπαστικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούν σύγχρονους αισθητήρες και συστήματα επικοινωνίας για να διασφαλίσουν τον έλεγχο και την βελτιστοποίηση των δικτύων, ενώ επίσης παρέχουν δυνατότητες για ριζοσπαστική αναθεώρηση του εμπορείου ενέργειας . Οι ψηφιακές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα Έξυπνα δίκτυα βασίζονται σε πολύ σύγχρονες καινοτομίες όπως τα Big-Data, η Τεχνητή Νοημοσύνη, η Μηχανική Μάθηση, το Cloud και βεβαίως, το Blockchain.

## 9. Έξυπνα Δίκτυα

Ο όρος αυτός ουσιαστικά αναφέρεται στα δίκτυα που αξιοποιούν όλες τις ψηφιακές και μη τεχνολογίες που αναφέραμε ως τώρα. Ένα δίκτυο με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στο χρησιμοποιούνται υπηρεσίες απόκρισης ζήτησης και το οποίο αξιοποιεί τις ψηφιακές τεχνολογίες που αναφέραμε πριν για επικοινωνία, έλεγχο και βελτιστοποίηση των λειτουργιών του, είναι ένα έξυπνο δίκτυο.

## 1.2 Παραδοσιακά Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στα παραδοσιακά Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας(ΣΗΕ) η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για να καλυφθεί η ζήτηση παράγεται κεντρικά και κατά το δυνατόν πλησιέστερα σε βιομηχανικές τοποθεσίες με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες κατά την μεταφορά της. Εν συνεχεία, η ενέργεια αυτή που παράγεται στους μεγάλους κεντρικούς σταθμούς διανέμεται σε μικρότερους καταναλωτές μέσω εκτενούς δικτύου γραμμών μεταφοράς. Στα συστήματα αυτά υπεύθυνοι για την λειτουργία και την συντήρηση είναι ο Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς(ΔΣΜ) και οι Διαχειριστές Συστημάτων Διανομής.(ΔΣΔ).



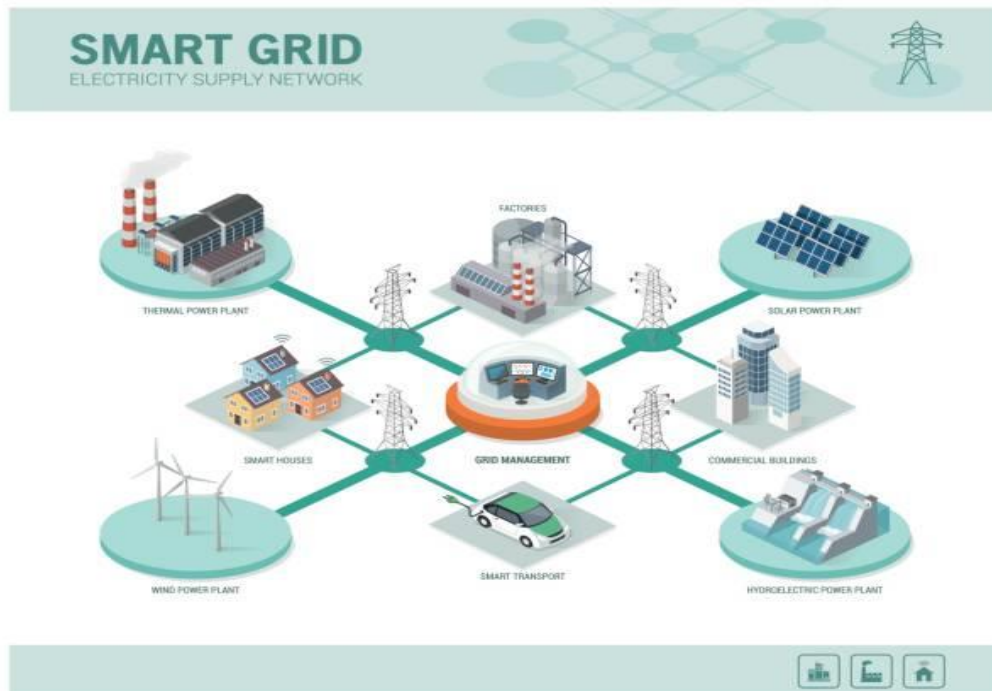
*Εικόνα 1-Τυπική Μορφή Παραδοσιακού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας*

### 1.3 Αλλαγές Στον Χώρο της Ενέργειας

Αρκετές εξελίξεις στον ενεργειακό τομέα αποτελούν πρόκληση για αυτό το παραδοσιακό μοντέλο. Αρχικά, σημαντικός παράγοντας είναι η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην καθημερινή ζωή, οι ανάγκες για μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας προκύπτουν τόσο από την οικονομική ανάπτυξη των χωρών όσο και από την ευρεία υιοθέτηση νέων τεχνολογιών όπως ο εξηλεκτρισμός των μεταφορών, που δημιουργεί την ανάγκη για αυξημένη παραγωγή σε περιφερειακές περιοχές του συστήματος. Μια άλλη σημαντική εξέλιξη, που θέτει σε αμφισβήτηση την παραδοσιακή δομή των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, είναι η αύξηση της διεσπαρμένης παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές,. Ενώ δηλαδή η αφομοίωση των ΑΠΕ έχει αδιαμφισβήτητα θετική επίδραση στην οικονομία και το περιβάλλον, σε τεχνικό και ρυθμιστικό επίπεδο δημιουργεί νέες δυσκολίες που ποικίλουν από την δημιουργία αντίστροφης ροής ισχύος[1] και τις υπερτάσεις [2]έως την άδικη αγορά και πώληση ενέργειας[3]. Το υπάρχον Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας αγωνίζεται να αντιμετωπίσει αυτές τις εξελίξεις, με αποτέλεσμα υψηλότερους λογαριασμούς ενέργειας, αυξημένο επενδυτικό κόστος και ολοένα και πιο περίπλοκες προκλήσεις για τους ΔΣΜ[4], [5] και τους ΔΣΔ[6].

### 1.4 Τα Νέα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η απανθρακοποίηση των ΣΗΕ είναι αναντίρρητα απαραίτητη και έχει ήδη αρχίσει να συμβαίνει. Στα νέα ΣΗΕ αυτό το δίπολο παραγωγής σέ ένα σημείο και κατανάλωσης σε ένα άλλο καταργείται, τόσο η παραγωγή όσο και η κατανάλωση συμβαίνουν σε διάφορα σημεία του συνολικού συστήματος. Ακολουθεί ένα απλοποιημένο παράδειγμα ενός μελλοντικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.



*Εικόνα 2-Νέα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*

Όπως ήδη αναφέραμε και παρατηρούμε στην παραπάνω εικόνα, στα νέα ΣΗΕ υπάρχει ισχυρή διείδυση ΑΠΕ τόσο από μεγάλους κεντρικούς σταθμούς όσο και από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Επιπλέον, εμφανίζονται ευέλικτα φορτία όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που προσαρμόζουν τις ανάγκες τους στην διαθέσιμη παραγωγή και τις υποδείξεις των αρμόδιων λειτουργούν ή εκπροσώπων με σκοπό να προσαρμόσουν την ζήτηση στην παραγωγή. Εάν και μέχρι σήμερα η παραγωγή ήταν αυτή που σχεδόν αποκλειστικά «κυνηγούσε» την κατανάλωση [6], [7], στα νέα ΣΗΕ οι υπηρεσίες απόκριση ζήτησης που παρέχουν τα ευέλικτα φορτία είναι νευραλγικής σημασίας καθώς ο έλεγχος στην παραγωγή είναι πολύ περιορισμένος. Τέλος, στα Έξυπνα ΣΗΕ πολύ σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο συνολικός έλεγχος του δικτύου που επιτυγχάνεται μέσω των τεχνολογιών που προαναφέρθηκαν.

## 1.5 Peer-to-Peer αγορές και Κίνητρο για την Συγγραφή της Διπλωματικής

Οι Peer-to-Peer (P2P) αγορές ενέργειας είναι αγορές που συνήθως λειτουργούν μέσω κάποιας ηλεκτρονικής πλατφόρμας και επιτρέπουν σε ιδιώτες και επιχειρήσεις να αγοράζουν και να πωλούν ενέργειας απευθείας μεταξύ τους.

Σε μία P2P αγορά οι Prosumers (καταναλωτές που έχουν και δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας) και οι Παραγωγοί μπορούν να πουλήσουν την ενέργεια από τις μονάδες παραγωγής τους απευθείας σε άλλους Prosumers ή καταναλωτές. Αντίστοιχα, οι Prosumers ή οι καταναλωτές μπορούν να αγοράσουν ενέργεια από πολλαπλές πηγές επιλέγοντας κάθε φορά την πιο οικονομική επιλογή. Οι αγορές ενέργειας P2P επιτρέπουν στους συμμετέχοντες να ορίζουν τις δικές τους τιμές, παρέχοντας μεγαλύτερο έλεγχο στο κόστος της ενέργειας. Η εκκαθάριση της αγοράς γίνεται αντιστοιχίζοντας την προσφορά και την ζήτηση μεταξύ των παραγωγών ενέργειας και των καταναλωτών.

Ανάλογα με τον σχεδιασμό της αγοράς, η διαδικασία της εκκαθάρισης μπορεί να γίνεται σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα είτε από κάποιον ρυθμιστή είτε από κάποια ηλεκτρονική πλατφόρμα Blockchain. Έτσι, παραδείγματος χάριν, σε μια P2P αγορά οι παραγωγοί δύναται να ανεβάζουν ανά ώρα τα δεδομένα παραγωγής τους στην πλατφόρμα και οι καταναλωτές να υποβάλλουν αντίστοιχα ανά ώρα τις προσφορές ζήτησης τους για ενέργεια σε συγκεκριμένη τιμή. Αφού η διαδικασία αυτή ολοκληρωθεί, μια πλατφόρμα Blockchain μπορεί να χρησιμοποιείται για την σύναψη ενός έξυπνου συμβολαίου που διασφαλίζει ότι ο καταναλωτής θα πάρει την ενέργεια που συμφώνησε και ο παραγωγός τα αντίστοιχα χρήματα. Τέλος, η διαδικασία ολοκληρώνεται και περνώντας στο επόμενο χρονικό βήμα επαναλαμβάνεται.

Οι αγορές αυτές ενθαρρύνουν την τοπική παραγωγή και κατανάλωση και δημιουργούν οφέλη που ποικίλουν από την πρόσβαση σε φτηνότερη ενέργεια μέχρι τον περιορισμό της ανάγκης για αναβάθμιση του συστήματος μεταφοράς και για τον λόγο αυτό μπορούν να αποτελέσουν καταλύτη στην μετάβαση στα νέα, ανθρακοποιημένα, Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Τα οφέλη αυτά, μπορούν να αναδειχθούν παρατηρώντας το παράδειγμα της λειτουργίας των P2P αγορών σε μικροδίκτυα [8].

Εάν και η αξία των P2P αγορών τόσο για τους καταναλωτές όσο και για τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι αναντίρρητη, η υιοθέτηση και η ευρεία εφαρμογή μιας τόσο νέας και ριζοσπαστικής δομής αγοράς αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις. Στο πλαίσιο αυτό, η ανάγκη για επίλυση των επιμέρους τεχνικών και ρυθμιστικών προβλημάτων που εμφανίζονται αποτέλεσε και το κίνητρο για την συγγραφή της παρούσας διπλωματικής.

## 1.6 Στόχος της Παρούσας Διπλωματικής

Στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται η περίπτωση ενός Prosumer που κατέχει σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και συμμετέχει σε μια Peer-to-Peer αγορά. Στόχος της εργασίας είναι αφενός η εύρεση της πιο συμφέρουσας στρατηγικής αγοράς και πώλησης ενέργειας σε κάθε ώρα του εικοσιτετράωρου και αφετέρου κατασκευή ενός εργαλείου που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκφράσει αριθμητικά και σύντομα την επιθυμία ενός Prosumer να αγοράσει ή να πουλήσει ενέργεια σε μία P2P αγορά ανάλογα με την τιμή της ενέργειας στην αγορά αυτή.

## 1.7 Δομή της Εργασίας

Η εργασία οργανώνεται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια πολύ σύντομη περιγραφή και σύγκριση των παραδοσιακών και των νέων ενεργειακών συστημάτων, καθώς επίσης αναλύονται οι κυριότερες τεχνολογίες και υπηρεσίες που καθιστούν την μετάβαση αυτή εφικτή. Στο πλαίσιο αυτό γίνεται μία πρώτη αναφορά στις P2P αγορές που αποτελούν κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας και αναφέρεται τόσο το κίνητρο για την συγγραφή της όσο και ο στόχος της. Το Κεφάλαιο 1 ολοκληρώνεται με την παρούσα ενότητα που παρέχει στον αναγνώστη την δυνατότητα να δει πως οργανώνεται η εργασία και να επικεντρωθεί στα σημεία που τον ενδιαφέρουν.

Το Κεφάλαιο 2, όπως και τα ακόλουθα 2, είναι αφιερωμένο στο να παρέχει στον αναγνώστη απαραίτητες θεωρητικές γνώσεις που είναι σημαντικές για την κατανόηση της Μεθοδολογίας που ακολουθείται στη συνέχεια. Πιο συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η Μαθηματική Βελτιστοποίηση και δίνεται έμφαση στα Στοχαστικά Προβλήματα Δύο Σταδίων. Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται και εξηγούνται σύντομα θεμελιώδεις έννοιες των παραπάνω θεωριών όπως αυτή της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, ενώ επίσης γίνεται μία παρουσίαση βασικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για κατασκευή του συνόλου σεναρίων που απαιτείται για την επίλυση οποιουδήποτε στοχαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης.

Στο Κεφάλαιο 3 αρχικά εισάγεται η έννοια της χρονοσειράς και παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά που μπορεί να εμφανίζει μια χρονοσειρά. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην έννοια της στατικότητας των χρονοσειρών καθώς και της διαφοροποίησης των δεδομένων, ο λόγος που αφιερώνεται ειδική ενότητα στις δυο αυτές έννοιες είναι πως αποτελούν προϋπόθεση για την χρήση των κυριότερων μοντέλων πρόβλεψης χρονοσειρών. Εν συνεχεία, γίνεται μια αναφορά στα μοντέλα *ARMA*, *ARIMA* και *SARIMA* που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό. Τέλος, δίνονται λίγες πληροφορίες για το *AIC* κριτήριο που αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την επιλογή των παραμέτρων των προαναφερθέντων μοντέλων καθώς επίσης παρατίθενται και κάποιες μετρήσεις για την αξιολόγηση των μοντέλων πρόβλεψης.

Το Κεφάλαιο 4, είναι αφιερωμένο τόσο στην σύντομη, θεωρητική, παρουσίαση του αντικείμενου της παρούσας διπλωματικής εργασίας που δεν είναι άλλο από τις Peer-to-Peer αγορές ηλεκτρικής ενέργειας και τις Συναρτήσεις Οριακής Χρησιμότητας, όσο και στην παρουσίαση της υπάρχουσας πραγματικότητας στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Για τον σκοπό αυτό, στο Κεφάλαιο 4, αρχικά παρουσιάζεται εν συντομία το γνωστό Ευρωπαϊκό Target Model που έχει καθορίσει το ρυθμιστικό πλαίσιο των αγορών στην Ελλάδα και σε πολλές άλλες Ευρωπαϊκές χώρες. Εν συνεχεία, γίνεται αναφορά στους βασικούς φορείς και



λειτουργούς της αγοράς ενέργειας στην χώρα μας καθώς επίσης παρουσιάζονται και οι διαφορετικές αγορές που ορίζονται από το Ευρωπαϊκό Μοντέλο και συνθέτουν το πλαίσιο στο οποίο η ενέργεια εμπορεύεται. Έχοντας παρέχει όλες τις γνώσεις που απαιτούνται για την εξοικειώσει του αναγνώστη με την λειτουργία των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, εισάγεται και εξηγείται πιο αναλυτικά το μοντέλο των P2P αγορών ενέργειας που παρουσιάζει θεμελιώδεις διαφορές με τα προαναφερθέντα. Εν συνεχεία, παρουσιάζεται η έννοια της οριακής χρησιμότητας και τονίζεται ο σημαντικός ρόλος που μπορεί να διαδραματίσει στο πλαίσιο μιας P2P αγοράς. Τέλος, παρατίθεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση του state-of-the-art γύρω από τους τομείς των P2P αγορών και των εφαρμογών των συναρτήσεων οριακής χρησιμότητας σε τέτοιες αγορές.

Ακολουθούν έπειτα, τα Κεφάλαια 5 και 6 στα οποία γίνεται η διατύπωση και η επίλυση του προβλήματος που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική καθώς και το κεφάλαιο 7 το οποίο είναι αφιερωμένο στα Συμπεράσματα και τις Μελλοντικές επεκτάσεις της διπλωματικής. Πιο συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζεται το πρόβλημα που επιθυμούμε να επιλύσουμε και γίνεται η μαθηματική διατύπωση του. Πιο συγκεκριμένα, διατυπώνοντας τα μαθηματικά που ορίζουν ένα απλό ντετερμινιστικό πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού που περιγράφει την βέλτιστη στρατηγική αγοράς και πώλησης ενέργειας σε ορίζοντα εικοσιτεσσάρων ωρών, η διατύπωση του προβλήματος αυτού συνιστά σκαλοπάτι για την επίλυση του συνολικού προβλήματος. Ακολούθως, γίνεται η διατύπωση του στοχαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης και παρουσιάζονται αναλυτικά οι περιορισμοί και η αντικειμενική συνάρτηση του. Τέλος, γίνεται άλλη μια φορά αναφορά στη σημασία της κατασκευής των σεναρίων η οποία όμως παρουσιάζεται πιο αναλυτικά μετά την αποκάλυψη των δεδομένων εισόδου μας στο Κεφάλαιο 6.

Στο Κεφάλαιο 6 αφού γίνει μία σύντομη αναφορά στο λογισμικό και στα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, χρησιμοποιείται η θεωρία που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα Κεφάλαια καθώς και το πρόβλημα που διατυπώθηκε αφενός για να παρουσιαστούν τα οικονομικά οφέλη που δύναται να προκύψουν από την χρήση οικιακών μπαταριών από του Prosumers και αφετέρου για να κατασκευαστούν οι Συναρτήσεις Οριακής Χρησιμότητας υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται επίσης οι παράγοντες που επηρεάζουν το σχήμα των Συναρτήσεων αυτών και αξιολογείται η ποιότητα τους σε σχέση με την πραγματικά βέλτιστη προσέγγιση, η οποία όμως, κάθε φορά γίνεται γνωστή μετά το πέρας της περιόδου μελέτης αφού τα δεδομένα που παρουσιάζουν αβεβαιότητα αποκαλυφθούν.

Στο Κεφάλαιο 7, αφού γίνει μια σύντομη Ανακεφαλαίωση των όσων συζητήθηκαν, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μεθοδολογία που περιεγράφηκε και το αριθμητικό παράδειγμα που μελετήθηκε. Τέλος, γίνεται αναφορά σε ενδεχόμενες επεκτάσεις και σημεία που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για εκτενέστερη και πιο εντατική έρευνα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Στοχαστική Βελτιστοποίηση

### 2.1 Μαθηματική Βελτιστοποίηση

Η μαθηματική βελτιστοποίηση είναι η διαδικασία εύρεσης της καλύτερης λύσης από ένα σύνολο εφικτών λύσεων, δεδομένου ενός συνόλου περιορισμών και μιας αντικειμενικής συνάρτησης. Η αντικειμενική συνάρτηση αποτελεί την ποσότητα που επιθυμούμε να μεγιστοποιήσουμε ή ελαχιστοποιήσουμε και οι περιορισμοί είναι μαθηματικές εκφράσεις που περιορίζουν τις εφικτές λύσεις. Η τυπική μορφή ενός προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η ακόλουθη:

$$\min_x f_0(x) \quad (2.1)$$

$$s. t. f_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (2.2)$$

$$h_j(x) = 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (2.3)$$

Όπου  $x \in R^n$  είναι η μεταβλητή βελτιστοποίησης,  $f_0: R \rightarrow R^n$ , είναι η αντικειμενική συνάρτηση,  $f_i: R^n \rightarrow R$ ,  $i = 1, \dots, m$  είναι περιορισμοί ανισότητας και  $h_j: R^n \rightarrow R$ ,  $j = 1, \dots, n$  είναι περιορισμοί ισότητας.

Μια κατηγοριοποίηση των προβλημάτων βελτιστοποίησης μπορεί να γίνει σύμφωνα με το είδος της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών του προβλήματος, οι πιο συνήθεις, εάν και όχι οι μοναδικές, κατηγορίες που συναντώνται είναι:

1. Γραμμικός προγραμματισμός (Linear Programming): Ο γραμμικός προγραμματισμός περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση μιας γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης που υπόκειται σε γραμμικούς περιορισμούς. Χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές όπως η κατανομή πόρων, ο σχεδιασμός παραγωγής και η βελτιστοποίηση χαρτοφυλακίου.
2. Μη γραμμικός προγραμματισμός (Non- Linear Programming): Ο μη γραμμικός προγραμματισμός είναι η βελτιστοποίηση μιας μη γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης που υπόκειται σε μη γραμμικούς περιορισμούς.
3. Ακέραιος προγραμματισμός (Integer Programming): Ο ακέραιος προγραμματισμός περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης με ακέραιες μεταβλητές.
4. Κυρτή βελτιστοποίηση (Convex Optimization): Η κυρτή βελτιστοποίηση περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση μιας κυρτής αντικειμενικής συνάρτησης που υπόκειται σε κυρτούς περιορισμούς.
5. Τετραγωνικός προγραμματισμός (Quadratic Optimazation): Ο τετραγωνικός προγραμματισμός περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση μιας τετραγωνικής αντικειμενικής συνάρτησης που υπόκειται σε γραμμικούς περιορισμούς.

Τέλος, ανάλογα με το εάν εμφανίζεται ή όχι αβεβαιότητα στις παραμέτρους ενός προβλήματος βελτιστοποίησης το πρόβλημα αυτό χαρακτηρίζεται ως ντετερμινιστικό ή στοχαστικό ανεξάρτητα από την μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών του προβλήματος. Στα ντετερμινιστικά προβλήματα βελτιστοποίησης, η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί είναι γνωστά και σταθερά και στόχος είναι να βρεθεί η βέλτιστη λύση που μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση που υπόκειται στους περιορισμούς. Οι λύσεις σε αυτά τα προβλήματα είναι ντετερμινιστικές και μοναδικές. Αντίθετα, τα προβλήματα στοχαστικής βελτιστοποίησης είναι μαθηματικά προβλήματα που περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης που υπόκειται σε περιορισμούς, όπου κάποια από τα δεδομένα και τις παραμέτρους είναι αβέβαια και μοντελοποιούνται ως τυχαίες μεταβλητές με γνωστές κατανομές πιθανοτήτων. Τέτοια προβλήματα συναντώνται συχνά σε πραγματικές καταστάσεις όπου τα δεδομένα και οι παράμετροι υπόκεινται σε διακυμάνσεις και μπορεί να είναι δύσκολο να προβλεφθούν με βεβαιότητα. Τα προβλήματα στοχαστικού προγραμματισμού συναντώνται σε διάφορους τομείς της καθημερινότητας όπως αυτός των οικονομικών, οι μεταφορές και φυσικά η ενέργεια [9].

## 2.2 Στοχαστικά Προβλήματα Δύο Σταδίων

Σε πολλές περιπτώσεις, τα μοντέλα SP λαμβάνουν τη μορφή ενός προβλήματος δύο σταδίων όπου οι μεταβλητές χωρίζονται σε δύο σύνολα, τις μεταβλητές πρώτου και τις μεταβλητές δευτέρου σταδίου. Στα προβλήματα αυτά, οι αποφάσεις που αφορούν τις μεταβλητές πρώτου σταδίου λαμβάνονται πριν από την αποκάλυψη των τυχαίων μεταβλητών. Μετά την αποκάλυψη της αβεβαιότητας του προβλήματος, οι αποφάσεις που εμπεριέχουν αβεβαιότητα (recourse decisions), λαμβάνονται για τις μεταβλητές δευτέρου σταδίου δεδομένων των αποφάσεων που λάβαμε στο πρώτο στάδιο. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της ζημίας (ή στη μεγιστοποίηση του κέρδους) που προκύπτει από την απόφαση του πρώτου σταδίου συν την αναμενόμενη απώλεια που προκύπτει από την απόφαση του δεύτερου σταδίου. Μαθηματικά, η κλασική μορφή ενός τέτοιου προβλήματος είναι η ακόλουθη:

$$\min_{x \in X} \{g(x) = f(x) + E[Q(x, \xi)]\} \quad (2.4)$$

όπου  $Q(x, \xi)$  η βέλτιστη τιμή του προβλήματος δευτέρου σταδίου:

$$\min_y \{q(y, \xi) = T(\xi)x + W(\xi)y\} \quad (2.5)$$

όπου  $x \in R^n$  και  $y \in R^n$  τα διανύσματα των μεταβλητών απόφασης πρώτου και δευτέρου σταδίου αντίστοιχα. Το πρόβλημα δευτέρου σταδίου εξαρτάται από τα δεδομένα  $\xi=(q,h,T,W)$  όπου κάποιο ή όλα μπορούν να είναι τυχαία.

Όπως προαναφέρθηκε, για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος σε πρώτο στάδιο παίρνουμε μια «here-and-now» απόφαση για την μεταβλητή πρώτου σταδίου  $x$ , πριν την αποκάλυψη του διανύσματος  $\xi$  το οποίο προς το παρόν θεωρείται τυχαίο διάνυσμα με γνωστή κατανομή. Σε δεύτερο στάδιο, όταν κάποια αποκάλυψη για το  $\xi$  είναι διαθέσιμη,

κάνοντας διορθώσεις μέσα από τα τις μεταβλητές δευτέρου σταδίου καταλήγουμε στην βέλτιστη λύση.

Για να διατυπωθεί το παραπάνω πρόβλημα υποτέθηκε ότι το διάνυσμα  $\xi$  είναι τυχαίο διάνυσμα με γνωστή κατανομή, μια τέτοια υπόθεση μπορεί να δικαιολογηθεί σε διάφορες περιπτώσεις. Παραδείγματος χάριν, η κατανομή του  $\xi$  μπορεί να υπολογιστεί από ιστορικά δεδομένα εάν υποτεθεί ότι δεν μεταβάλλεται σημαντικά στο υπό εξέταση χρονικό διάστημα.

### 2.3 Προσέγγιση με χρήση του Νόμου των Μεγάλων Αριθμών

Εάν και το διάνυσμα  $\xi$  μπορεί να έχει άπειρο ή πάρα πολύ μεγάλο αριθμό πιθανών αποκαλύψεων (realisations), για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων βελτιστοποίησης, συχνά υποθέτουμε ότι έχει ένα πεπερασμένο πλήθος, τα επονομαζόμενα σενάρια, έστω  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$ . Έστω λοιπόν ότι έχουμε ένα τέτοιο δείγμα από  $N$  ισοπίθανες εκδοχές του διανύσματος  $\xi$ , τότε ο όρος:

$$q(x) = \frac{1}{N} * \sum_{k=1}^N Q(x, \xi_k) \quad (2.6)$$

Σύμφωνα με το Νόμο των μεγάλων αριθμών προκύπτει ότι συγκλίνει με πιθανότητα 1 στη μέση τιμή  $E[Q(x, \xi)]$  καθώς το  $N$  τείνει στο άπειρο ( $N \rightarrow \infty$ ). Οπότε το πρόβλημα πρώτου σταδίου μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\min_{x \in X} \{g(x) = f(x) + \frac{1}{N} * \sum_{k=1}^N Q(x, \xi_k)\} \quad (2.7)$$

Και εάν το πρόβλημα είναι γραμμικό τότε:

$$\min_{x \in X} \{g(x) = c^T x + \frac{1}{N} * \sum_{k=1}^N Q(x, \xi_k)\} \quad (2.8)$$

$$s. t. \quad Ax = b \quad (2.9)$$

$$x \geq 0 \quad (2.10)$$

Αυτή η διατύπωση είναι γνωστή ως Sample Average Approximation (SAA), [10]

Σημαντικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι ότι παρότι οδηγεί σε υψηλής ακρίβειας λύσεις, όσο ο αριθμός των σεναρίων που υποθέτουμε και χρησιμοποιούμε αυξάνει, ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται αυξάνεται επίσης και μάλιστα σημαντικά και για αυτό είναι απαραίτητο να επιλέγεται ένα δείγμα σεναρίων το οποίο είναι αντιπροσωπευτικό αλλά ταυτόχρονα διαχειρίσιμο.

## 2.4 Κατασκευή Σεναρίων

Το δείγμα των σεναρίων  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$  που θα επιλέξουμε για την επίλυση του προβλήματος είναι ζωτικής σημασίας για την ποιότητα των αποτελεσμάτων μας, παρότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές για την κατασκευή του οι βασικότερες που συναντώνται είναι δύο οι Historical και η Monte Carlo simulation. Οι δύο αυτές μέθοδοι παρουσιάζουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και η επιλογή της ορθότερης αποτελεί απόφαση που βασίζεται κυρίως στα χαρακτηριστικά του προβλήματος που μελετάται. Όταν χρησιμοποιείται η Historical Simulation, πραγματικά δεδομένα από το παρελθόν για τις μεταβλητές που εμφανίζουν αβεβαιότητα χρησιμοποιούνται ως σεσάρια για να προσομοιωθεί η αβεβαιότητα που εμφανίζει το πρόβλημα μας, η προσομοίωση αυτή βασίζεται στην ιδέα ότι η παρελθοντική συμπεριφορά της υπό εξέταση ποσότητας αποτελεί αξιόπιστο δείκτη για την μελλοντική συμπεριφορά και ενώ αυτό συχνά είναι αληθές παρουσιάζει το βασικό μειονέκτημα του ότι δεν προσομοιώνει επαρκώς τα ακραία ή απρόβλεπτα σεσάρια καθώς είναι πολύ πιθανό τέτοια συμβάντα να μην εμφανίζονται καθόλου εντός της χρονικής περιόδου που επιλέχθηκε για τους σκοπούς της προσομοίωσης.

Από την άλλη, μία προσομοίωση Monte Carlo αντικαθιστά τη μεταβλητή ή τις μεταβλητές του προβλήματος που περιέχουν την αβεβαιότητα με μία τυχαία τιμή που ακολουθεί μια συγκεκριμένη κατανομή και στη συνέχεια το μοντέλο προσομοίωσης παράγει τα αποτελέσματα με βάση τη συγκεκριμένη τιμή. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για διάφορες τιμές της τυχαίας μεταβλητής και οδηγεί στην κατασκευή ενός δείγματος σεναρίων  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$  από  $N$  διαφορετικές εκδοχές του τυχαίου διανύσματος  $\xi$ . Όταν η προσομοίωση αυτή χρησιμοποιείται απαιτείται μεγάλη προσοχή καθώς το είδος και οι παράμετροι της κατανομής που θα θεωρηθούν επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα των αποτελεσμάτων, έτσι, μια σωστή θεώρηση για την κατανομή μπορεί να οδηγήσει σε πολύ εύστοχα αποτελέσματα και μία άστοχη μπορεί να οδηγήσει στο αντίθετο αποτέλεσμα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Χρονοσειρές και Μοντέλα Πρόβλεψης

### 3.1 Η Έννοια της Χρονοσειράς

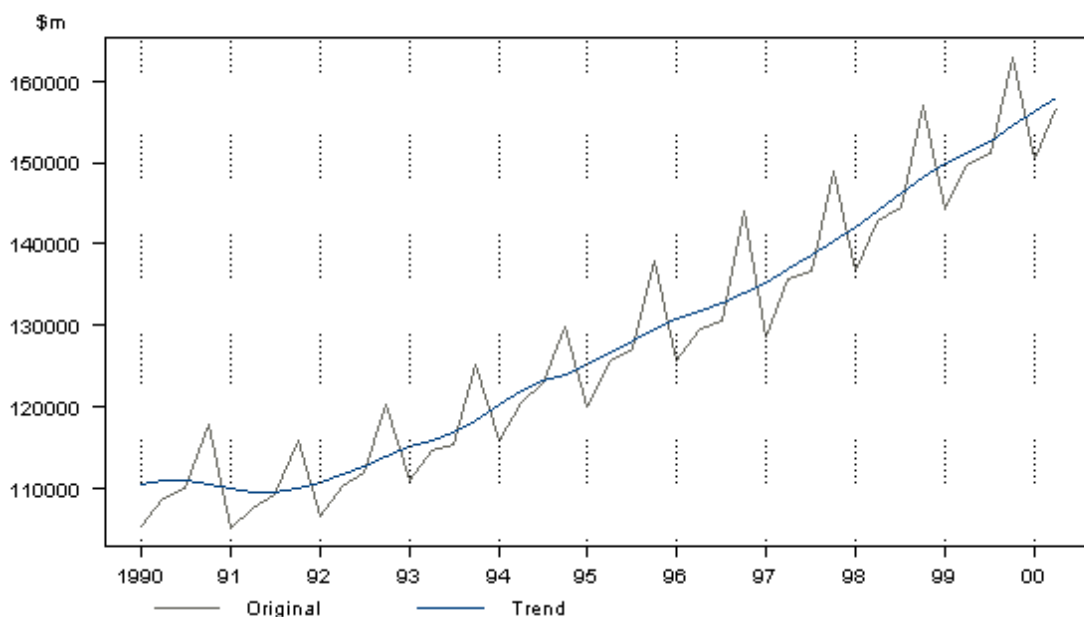
Χρονοσειρά καλείται ένα σύνολο παρατηρήσεων που λαμβάνονται διαδοχικά στο χρόνο, συνήθως με σταθερό βήμα παρατήρησης. Η ανάλυση χρονοσειρών είναι μια πολύ χρήσιμη στατιστική μέθοδος που περιλαμβάνει την ανάλυση δεδομένων για την εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών, τάσεων και χαρακτηριστικών που εμφανίζονται. Κύριος στόχος της ανάλυσης χρονοσειρών είναι η εξαγωγή τεκμηριωμένων προβλέψεων σχετικά με την μελλοντική συμπεριφορά του υπό εξέταση μεγέθους. Οι χρονοσειρές συναντώνται σε πολλές επιστήμες όπως την οικονομία (δεδομένα πωλήσεων και μετοχών), την μετεωρολογία και την ενέργεια.

### 3.2 Χαρακτηριστικά Χρονοσειρών

Σκοπός της μελέτης των χρονοσειρών είναι, όπως ήδη αναφέρθηκε, η πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός μεγέθους στο μέλλον. Στην προσπάθεια να κατασκευαστεί ένα μοντέλο πρόβλεψης μπορεί να βοηθήσει πολύ η παρατήρηση των χαρακτηριστικών που εμφανίζονται στα δεδομένα μας, κυριότερα λοιπόν στοιχεία που μπορεί να έχει μια χρονοσειρά είναι:

#### 1. Τάση (trend)

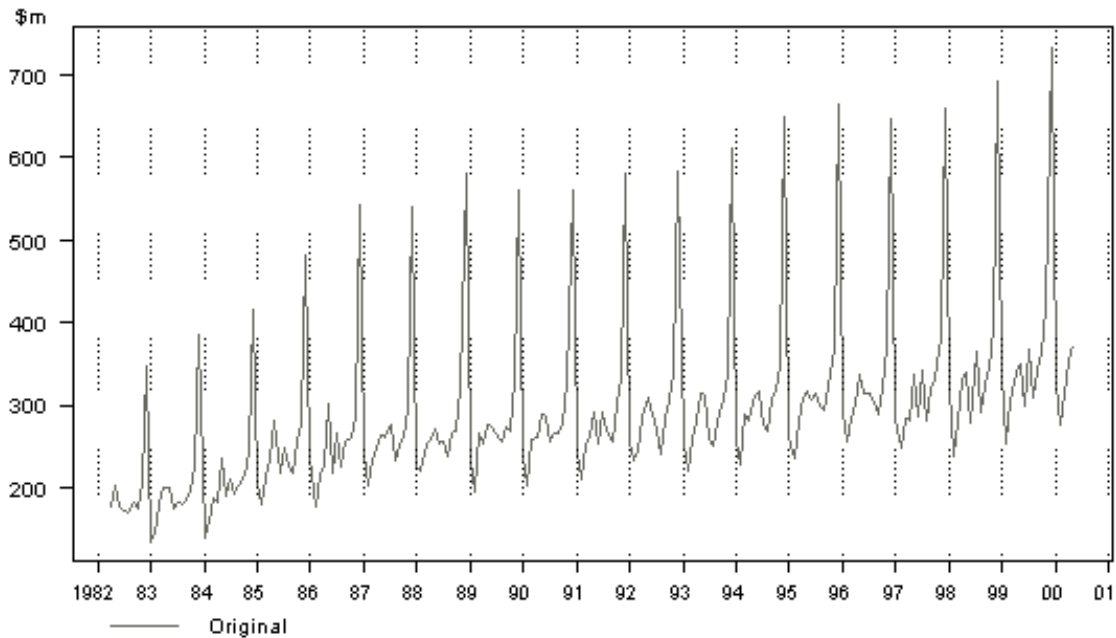
Η τάση είναι το μακροπρόθεσμο μοτίβο μιας χρονοσειράς. Οι τάσεις μπορεί να είναι θετικές (upward trend) ή αρνητικές (downward trend) ανάλογα με το ένα η χρονοσειρά παρουσιάζει ένα αυξανόμενο μακροπρόθεσμο μοτίβο ή ένα φθίνον μακροπρόθεσμο μοτίβο.



*Εικόνα 3-Παράδειγμα Χρονοσειράς που Εμφανίζει Ανοδική Τάση*

## 2. Εποχικότητα (Seasonality)

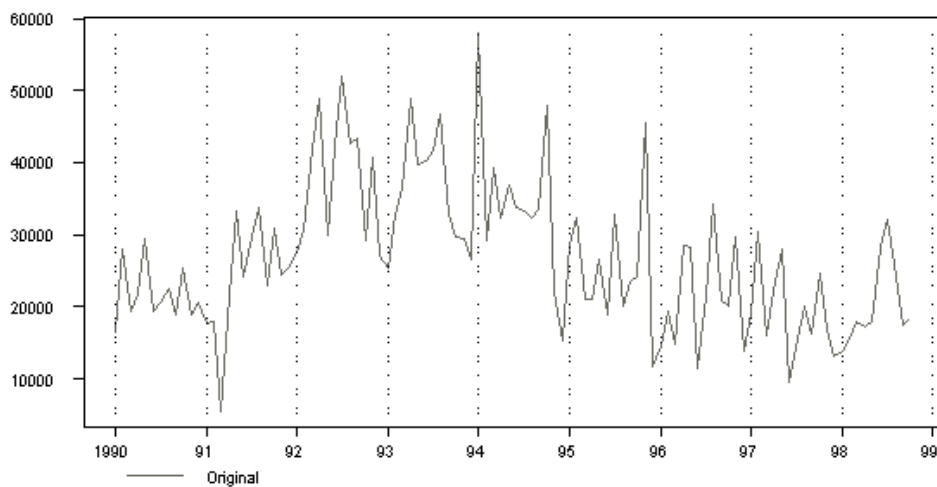
Η εποχικότητα εμφανίζεται όταν η χρονοσειρά παρουσιάζει τακτικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του ίδιου μήνα (ή μηνών) κάθε χρόνο. Για παράδειγμα, οι λιανικές πωλήσεις κορυφώνονται κατά τη διάρκεια του μήνα



*Εικόνα 4-Παράδειγμα Χρονοσειράς που Εμφανίζει Εποχικότητα*

## 3. Θόρυβος (Noise):

Ο θόρυβος είναι η απρόβλεπτη συνιστώσα μίας χρονοσειράς και προκαλεί βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις που δεν είναι ούτε συστηματικές ούτε προβλέψιμες. Εάν μια χρονοσειρά εμφανίζει πάρα πολύ θόρυβο τότε η δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη.



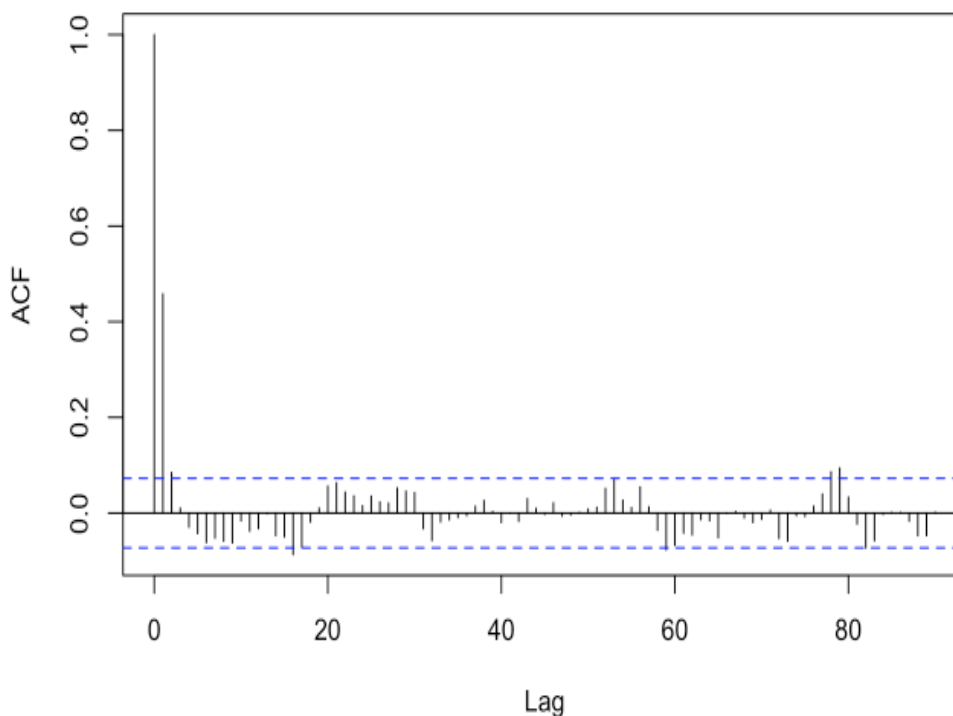
*Εικόνα 5-Παράδειγμα Χρονοσειράς με Έντονη Ύπαρξη Θορύβου*

### 3.3 Στατικότητα και Διαφοροποίηση

Μια πολύ σημαντική ιδιότητα των χρονοσειρών είναι η στατικότητα(stationarity) και αυτό γιατί πολλά μοντέλα όπως αυτά που θα περιγράψουν στην επόμενη ενότητα και που έχουν χρησιμοποιηθεί στη παρούσα διπλωματική είναι στατικά μοντέλα, αυτό σημαίνει πως για να λειτουργήσουν θα πρέπει τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται να είναι στατικά.

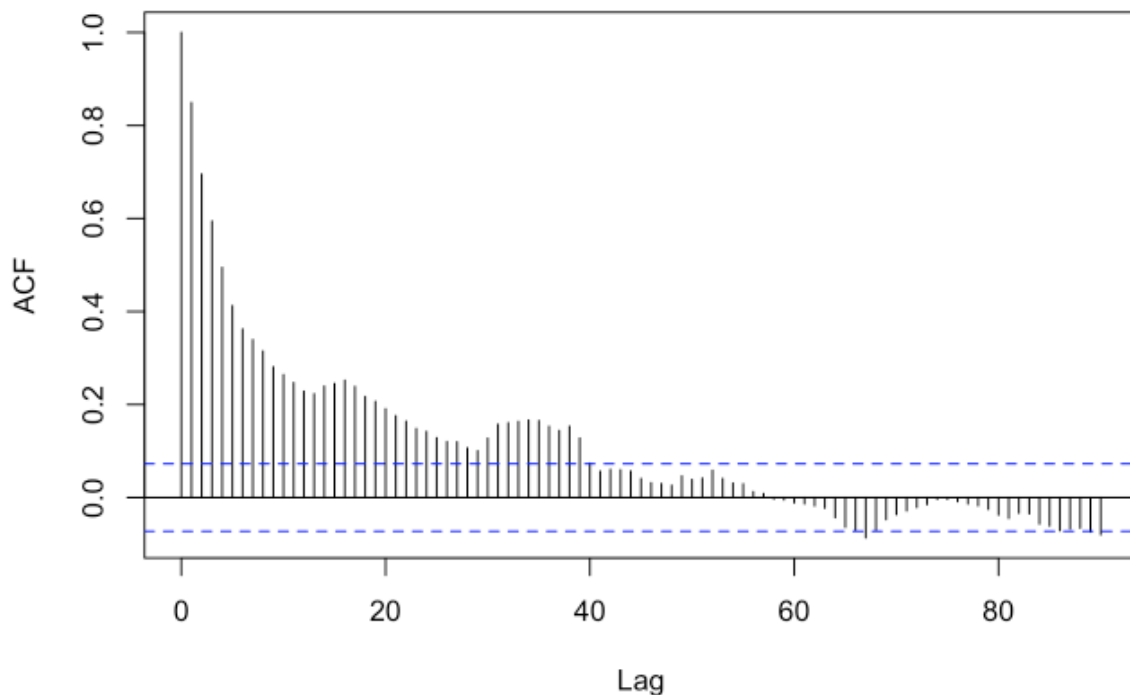
Στατική χρονοσειρά είναι εκείνη της οποίας η μέση τιμή και η διακύμανση παραμένουν αναλλοίωτες στο χρόνο, δηλαδή οι στατιστικές ιδιότητες δεν εξαρτώνται από το χρόνο στον οποίο παρατηρείται η σειρά. Μερικές φορές είναι πολύ εύκολο να προσδιοριστεί ένα τα δεδομένα που εξετάζονται είναι στατικά ή όχι κοιτώντας τις γραφικές παραστάσεις και μόνο και άλλες φορές περαιτέρω τεχνικές χρειάζεται να εφαρμοστούν για να γίνει ο εν λόγω έλεγχος, οι πιο γνωστές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να γίνει ο έλεγχος αυτός είναι τα τεστ Augmented Dickey-Fuller(ADF) και Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin(KPSS)[11] Επιπλέον, ένας πολύ συνηθισμένος τρόπος να γίνεται έλεγχος για την στατικότητα είναι η χρήση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης (Autocorrelation Function, ACF), σε μια στατική χρονοσειρά οι τιμές του ACF μειώνονται και τελικά πλησιάζουν το μηδέν πολύ σύντομα. Αυτό δείχνει ότι δεν υπάρχει σημαντική συσχέτιση μεταξύ τιμών σε διαφορετικές υστερήσεις και οι στατιστικές ιδιότητες των χρονοσειρών δεν αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Από την άλλη πλευρά, εάν η γραφική παράσταση ACF δείχνει σημαντική συσχέτιση μεταξύ τιμών σε διαφορετικές υστερήσεις, ειδικά για μεγάλες καθυστερήσεις, τότε αυτό μπορεί να υποδηλώνει ότι η χρονοσειρά είναι μη στατική.

Στις ακόλουθες εικόνες δίνεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης για στατικές και μη χρονοσειρές[12]:



**Εικόνα 6-**Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης Σταθερής Χρονοσειράς





*Εικόνα 7-Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης μη Σταθερής Χρονοσειράς*

Επειδή η στατικότητα είναι απαραίτητη ιδιότητα των δεδομένων για να γίνει η χρήση των πιο συνηθισμένων μοντέλων πρόβλεψης χρονοσειράς, δημιουργείται η ανάγκη εύρεσης ενός εργαλείου που θα επιτρέψει τον μετασχηματισμό των μη στατικών δεδομένων σε στατικά, το εργαλείο αυτό το εργαλείο είναι η διαφοροποίηση (differencing). Όταν εφαρμόζεται η διαφοροποίηση, αντί να χρησιμοποιηθεί η τιμή της χρονοσειράς απευθείας (η οποία είναι μη στατική) χρησιμοποιείται η διαφορά δυο διαδοχικών παρατηρήσεων η οποία (συνήθως) είναι στατική. Αρκετές φορές εφαρμόζεται διαφοροποίηση μεγαλύτερης τάξης, π.χ. δεύτερης. Παρακάτω ακολουθούν οι αντίστοιχες εξισώσεις:

Έστω  $y_t$  η τιμή της χρονοσειράς στο χρονικό βήμα  $t$ .

Διαφοροποίηση πρώτης τάξης έχουμε όταν για την κατασκευή του μοντέλου αντί για την μεταβλητή αυτή χρησιμοποιείται η:

$$y'_t = y_t - y_{t-1} \quad (3.1)$$

Αντίστοιχα διαφοροποίηση δεύτερης τάξης έχουμε όταν αντί για την  $y_t$  χρησιμοποιείται η:

$$y''_t = y'_t - y'_{t-1} \quad (3.2)$$

Αντίστοιχα ορίζεται και η εποχιακή διαφοροποίηση που συνίσταται στην χρήση της διαφοράς μιας παρατήρησης και της προηγούμενης παρατήρησής από την ίδια εποχή.

## 3.4 Μοντέλα Πρόβλεψης Χρονοσειρών

### 3.4.1 Ερμηνεία των όρων $AR(p)$ , $MA(q)$ και $I$

Δύο από τα πιο συνηθισμένα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη χρονοσειρών είναι τα μοντέλα  $ARMA(p,q)$  και τα  $ARIMA(p,d,q)$ . Τα μοντέλα αυτά είναι συνδυασμός δύο διαφορετικών μοντέλων, του  $AR$  (Autoregressive Model) και του  $MA$  (*Moving Average Model*), μεταξύ τους, η βασική διαφορά που εμφανίζουν είναι ο όρος « $I$ » που αναφέρεται στην αγγλική λέξη *Integrated* και η τάξη του οποίου μας δίνει το πόσες φορές εφαρμόστηκε differencing στα δεδομένα προκειμένου αυτά να γίνουν στατικά όπως περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα. Μπορούμε να σκεφτούμε ένα μοντέλο  $ARIMA$  ως ένα «φίλτρο» που προσπαθεί να διαχωρίσει το σήμα από το θόρυβο και στη συνέχεια προεκτείνει το σήμα στο μέλλον για να ληφθούν αποφάσεις. Πιο συγκεκριμένα, στα μοντέλα  $ARIMA$  οι όροι που εμφανίζονται ερμηνεύονται ως εξής:

1.  $AR$ : Αναφέρεται στην χρήση *Autoregression models* στα οποία η τιμή της χρονοσειράς σε κάποιο χρονικό βήμα εξαρτάται από έναν αριθμό παρατηρήσεων που έχουν γίνει σε προηγούμενα χρονικά βήματα (ανάλογα με την τάξη του μοντέλου), σε συνδυασμό με κάποιο θόρυβο.
2.  $I$ : Ο όρος αυτός αναφέρεται στην εφαρμογή διαφοροποίησης προκειμένου να καθιστούν τα δεδομένα της χρονοσειράς στατικά και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δύο άλλα γραμμικά μοντέλα.
3.  $MA$ : Πρόκειται για μοντέλα στα οποία η τιμή σε κάποιο χρονικό βήμα προκύπτει λαμβάνοντας υπόψιν τον θόρυβο που υπήρξε σε έναν αριθμό προηγούμενων χρονικών βημάτων (ανάλογα με την τάξη του μοντέλου), σε συνδυασμό με τον θόρυβο στο παρόν χρονικό βήμα

Όπως ήδη αναφέραμε, συχνά χρησιμοποιείται ο όρος  $ARIMA(p,d,q)$ . Οι παράμετροι αυτοί αντικαθίστανται από ακέραιες τιμές για να ορίσουν επακριβώς το μοντέλο που χρησιμοποιούμε. Έτσι έχουμε ότι:

1.  $p$ : Είναι ο αριθμός των παρελθοντικών παρατηρήσεων που θα χρησιμοποιήσουμε στο  $AR$  μοντέλο, η παράμετρος αυτή καλείται και τάξη καθυστέρησης (lag order)
2.  $d$ : Είναι ο αριθμός των φορών που εφαρμόστηκε διαφοροποίηση στα δεδομένα, η παράμετρος αυτή καλείται και τάξη διαφοροποίησης (degree of differencing)
3.  $q$ : Είναι ο αριθμός των προηγούμενων σφαλμάτων (θορύβων) που παρατηρούνται, η παράμετρος αυτή καλείται και τάξη κινουμένου μέσου (moving average order)

Όταν μια από τις παραπάνω μεταβλητές πάρει την τιμή 0, τότε το συγκεκριμένο μοντέλο δεν χρησιμοποιείται, έτσι, ένα  $ARIMA$  μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα  $ARMA$  μοντέλο ή ακόμα και ως ένα απλό  $AR$ ,  $MA$  ή  $I$  μοντέλο.

### 3.4.2 Μαθηματικές Εξισώσεις των Μοντέλων

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τα προαναφερθέντα μοντέλα και επεξηγείται η σημασία των επιμέρους όρων.

#### 1. Autoregressive models

Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στην ιδέα ότι η τωρινή τιμή της χρονοσειράς  $X_t$  μπορεί να εκφραστεί ως ένας γραμμικός συνδυασμός  $p$  παρελθοντικών τιμών σε συνδυασμό με ένα τυχαίο σφάλμα, οπότε ένα τέτοιο μοντέλο τάξης  $p$  έχει την μορφή

$$X_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + w_t \quad (3.3)$$

Το  $p$  είναι η τάξη του μοντέλου και μας δίνει το πόσο πίσω στον χρόνο κοιτάμε, η μεταβλητή  $X_t$  είναι στατική, το σφάλμα  $w_t \sim N(0, \sigma_w^2)$  και τα  $\varphi_i$  είναι παράμετροι του μοντέλου. Τόσο η επιλογή του  $p$  όσο και η επιλογή των βαρών  $\varphi_i$  επηρεάζει σημαντικά το μοντέλο, για παράδειγμα, όπως προκύπτει από τον ορισμό ένα μοντέλο  $AR(0)$  είναι απλά ένα μοντέλο λευκού θορύβου και αντίστοιχα σε ένα μοντέλο  $AR(1)$  μόνο ο τελευταίος ο όρος συνεισφέρει στην διαμόρφωση του επόμενου σύμφωνα με την τιμή του  $\varphi_1$ .

Για να κατανοηθεί το πως οι παράμετροι  $\varphi_i$  επηρεάζουν την συμπεριφορά του μοντέλου μπορούμε να σκεφτούμε ένα μοντέλο  $AR(1)$  διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις

1. Εάν το μέτρο του  $\varphi_1$  είναι κοντά στο 0 τότε η χρονοσειρά μας φαίνεται σχεδόν σαν λευκός θόρυβος
2. Εάν το  $\varphi_1$  είναι μικρότερο του 0 τότε η χρονοσειρά μας ταλαντώνεται μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών

Είναι προφανές ότι η εκτίμηση των παραμέτρων αυτών διαδραματίζει καίριο ρόλο στην συμπεριφορά του μοντέλου. Περισσότερα για την εκτίμηση τους δίνονται στην ακόλουθη ενότητα.

#### 2. Moving Average models

Στα μοντέλα αυτά ένας γραμμικός συνδυασμός των προηγούμενων σφαλμάτων χρησιμοποιείται για να εκφράσει την τιμή της χρονοσειράς στο υπό μελέτη χρονικό βήμα  $t$ . Η εξίσωση που περιγράφει ένα τέτοιο μοντέλο είναι:

$$X_t = w_t + \sum_{j=1}^q \theta_j w_{t-j} \quad (3.4)$$

Το  $q$  είναι η τάξη του μοντέλου και μας δίνει το πόσο πίσω στον χρόνο κοιτάμε, η μεταβλητή  $X_t$  είναι στατική, το σφάλμα  $w_t \sim N(0, \sigma_w^2)$  και τα  $\theta_j$  είναι παράμετροι του μοντέλου. Τα όσα εξηγήσαμε στο AR μοντέλο για τα  $p$  και  $\varphi$  ισχύουν κατά αντιστοιχία εδώ για τα  $q$  και  $\theta$ .

### 3. Autoregressive Moving Average models

Τα μοντέλα αυτά αποτελούν τον συνδυασμό των προηγούμενων δύο μοντέλων και η εξίσωση που τα περιγράφει είναι η:

$$X_t = w_t + \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j w_{t-j} \quad (3.5)$$

Όπου η  $X_t$  είναι στατική,  $p \neq 0$ ,  $q \neq 0$  και  $w_t \sim N(0, \sigma_w^2)$ .

### 4. Autoregressive Integrated Moving Average models

Τα μοντέλα είναι παρόμοια με τα ARMA μόνο που αντί για την μεταβλητή  $X_t$  χρησιμοποιούν την διαφοροποιημένη μεταβλητή  $X_t'$ , η οποία συχνά είναι στατική όταν η  $X_t$ , αξίζει να τονιστεί ότι η διαφοροποίηση μπορεί να είναι παραπάνω από μία φορές (ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου  $d$ ). Και σε αυτήν περίπτωση έχουμε την μεταβλητή  $X_t''$ .

## 3.5 Εκτίμηση Μέγιστης Πιθανοφάνειας

Όπως προαναφέρθηκε οι τιμές των παραμέτρων  $\varphi_i$  και  $\theta_j$  είναι πολύ σημαντικές για την συνολική επιτυχία του μοντέλου πρόβλεψης χρονοσειρών που έχει κατασκευαστεί. Προκειμένου να τις εκτιμήσουμε, όταν πια έχει επιλεγεί η τάξη του μοντέλου, δηλαδή οι παράμετροι  $p$ ,  $d$  και  $q$ , χρησιμοποιούμε μια τεχνική που καλείται Εκτίμηση Μέγιστης Πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Estimation). Η εφαρμογή της τεχνικής αυτής μας βοηθάει να βρούμε τις τιμές των παραμέτρων που μεγιστοποιούν την πιθανότητα ορθής πρόβλεψης των δεδομένων που έχουμε παρατηρήσει [13]. Η χρήση της συγκεκριμένης τεχνικής εμπεριέχει της εφαρμογή των παρακάτω βημάτων

1. Καθορισμός της συνάρτησης πιθανότητας για το μοντέλο ARIMA
2. Επιλογή ενός αρχικού συνόλου εκτιμήσεων παραμέτρων
3. Επαναληπτική προσαρμογή των εκτιμώμενων παραμέτρων για μεγιστοποίηση της συνάρτησης πιθανότητας,

## 3.6 Κριτήριο Πληροφόρησης του Akaike

Για την επιλογή της κατάλληλης τάξης, δηλαδή για την επιλογή του κατάλληλου συνόλου παραμέτρων  $p$ ,  $d$  και  $q$  μπορεί να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές, μια από τις πιο διαδεδομένες είναι το Akaike Information Criterion (AIC).

Το κριτήριο AIC μετράει την σχετική ποιότητα ενός στατιστικό μοντέλου σε συνδυασμό Με τον αριθμό των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται και την επιτυχημένη προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα. Το κριτήριο αυτό «τιμωρεί τα μοντέλα που έχουν πολλές παραμέτρους» καθώς η αύξηση της τιμής των παραμέτρων αυξάνει την πολυπλοκότητα των μοντέλων και πολλές φορές οδηγεί σε υπερπροσαρμογή (overfitting), δηλαδή οδηγεί το μοντέλο στο να ανιχνεύει και προσομοιώνει τον θόρυβο των δεδομένων και όχι τα χαρακτηριστικά τους.

Το εν λόγω κριτήριο περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$AIC = -2 \log(L) + 2k \quad (3.6)$$

όπου  $k$  είναι ο αριθμός των παραμέτρων στο μοντέλο και  $L$  είναι η πιθανότητα των δεδομένων που δίνονται στο μοντέλο.

Η τιμή AIC είναι ένα σχετικό μέτρο της ποιότητας του μοντέλου. Τα μοντέλα με χαμηλότερη τιμή AIC θεωρούνται καλύτερα από τα μοντέλα με υψηλότερη τιμή AIC, καθώς έχουν καλύτερη ισορροπία μεταξύ προσαρμογής μοντέλου και πολυπλοκότητας. Κατά τη σύγκριση δύο μοντέλων, αυτό με τη χαμηλότερη τιμή AIC θεωρείται γενικά ως το καλύτερο μοντέλο, καθώς έχει την υψηλότερη πιθανότητα δεδομένων των δεδομένων και τη χαμηλότερη πολυπλοκότητα.

### 3.7 Εποχική Αυτοπαλινδρομική Διαδικασία Κινούμενου Μέσου

Τα μοντέλα Εποχικής Αυτοπαλινδρομικής Διαδικασίας Κινούμενου Μέσου (Seasonal Autoregressive Moving Average Models),  $SARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q, S)$  είναι απλώς μία επέκταση των μοντέλων  $ARIMA$  που περιγράψαμε προηγουμένως. Τα μοντέλα αυτά, σε αντίθεση με τα  $ARIMA$ , έχουν την δυνατότητα να ανιχνεύουν και να προσομοιώνουν την εποχικότητα που εμφανίζεται στα δεδομένα. Λόγω της δυνατότητας αυτής, με την χρήση των μοντέλων  $SARIMA$  μπορεί να αποφευχθεί η εκτενής προεπεξεργασία που απαιτείται όταν γίνεται χρήση άλλων γραμμικών μοντέλων που όμως δεν μπορούν να προσομοιώσουν την εποχικότητα. Όσον αφορά τις παραμέτρους των μοντέλων αυτών, όπως και στα απλά  $ARIMA$  εμφανίζεται το σύνολο  $(p, d, q)$  που περιγράψαμε σε προηγούμενη ενότητα και επιπλέον εμφανίζεται το σύνολο  $(P, D, Q, S)$ . Στο σύνολο αυτό οι πρώτες 3 από αυτές τις 4 παραμέτρους είναι οι εποχικές εκδόσεις των αντίστοιχων παραμέτρων των  $ARIMA$  μοντέλων και η τέταρτη είναι η παράμετρος που συμβολίζει την περίοδο του φαινομένου. Όταν δηλαδή χρησιμοποιηθεί το μοντέλο  $SARIMA$  κάθε τιμή της χρονοσειράς υπολογίζεται τόσο με βάση τα αμέσως προηγούμενα χρονικά βήματα, όσο και με βάση τις αντίστοιχες τιμές της χρονοσειράς και των σφαλμάτων στα προηγούμενα ακέραια πολλαπλάσια της περιόδου, παρακάτω δίνεται η εξίσωση που περιγράφει το μοντέλο  $SARIMA$ .

$$X_t = w_t + \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j w_{t-j} + \sum_{i=1}^P a_i X_{t-si} + \sum_{j=1}^Q b_j w_{t-si} \quad (3.7)$$

Στην περίπτωση αυτή η  $X_t$  δεν χρειάζεται να είναι στατική και ανάλογα με τις τιμές των  $d$  και  $D$  μπορεί να χρησιμοποιείται είτε απευθείας η τιμή της χρονοσειράς είτε η διαφοροποιημένη τιμή, σημειώνεται πως το  $D$  αντιστοιχεί σε εποχική διαφοροποίηση,

δηλαδή στον υπολογισμό της διαφοράς μεταξύ δύο ή περισσότερων τιμών που απέχουν ακριβώς μια περίοδο.

### 3.8 Αξιολόγηση Μοντέλων Πρόβλεψης Χρονοσειρών

Προκειμένου να αξιολογήσουμε κάποιο μοντέλο και να αποφασίσουμε άμα κάνει καλές προβλέψεις και εάν έχει προσαρμοστεί καλά πάνω στα δεδομένα στα οποία έχει εκπαιδευτεί μπορούμε αφενός να κοιτάζουμε συγκεκριμένους δείκτες όπως το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) και το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE) και αφετέρου να χρησιμοποιήσουμε παραστάσεις για να οπτικοποιήσουμε τα όσα αποτελέσματα μας και να δούμε την συμπεριφορά του μοντέλου και των υπολοίπων (residuals) που υπάρχουν στις προβλέψεις μας. Οι παραστάσεις που συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότερο για αυτόν τον σκοπό είναι οι Τυποποιημένα Υπόλοιπα (Standardized residual), Ιστόγραμμα (Histogram), Διάγραμμα Αυτοσυσχέτισης (Correlogram) και ο γραφικός έλεγχος της κανονικής κατανομής (Normal Q-Q plot), [14]. Πιο αναλυτική επεξήγηση των δεικτών και παραστάσεων αυτών δίνεται από κάτω.

Τα MAE και MAPE είναι δείκτες που υπολογίζουν την μέση, και αντίστοιχα την ποσοστιαία μέση, διαφορά μεταξύ των τιμών που προέβλεψε το μοντέλο που εκπαιδεύτηκε πάνω σε κάποια δεδομένα και των πραγματικών τιμών των δεδομένων αυτών. Μαθηματικά οι εν λόγω δείκτες δίνονται από τις σχέσεις:

$$MAE = \frac{1}{N} * \sum_{i=0}^N |y_{pred,i} - y_{real,i}| \quad (3.8)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} * \sum_{i=0}^N |y_{pred,i} - y_{real,i}| * 100\% \quad (3.9)$$

Όπου  $N$  είναι το συνολικό πλήθος των παρατηρήσεων που έχουμε χρησιμοποιήσει για την εκπαίδευση του μοντέλου,  $y_{pred,i}$  είναι η τιμή που το μοντέλο έχει προβλέψει στην παρατήρηση  $i$  και  $y_{real,i}$  είναι η πραγματική τιμή των δεδομένων στην παρατήρηση  $i$ . Αξίζει να τονιστεί πως για την αξιολόγηση των μοντέλων χρησιμοποιούνται και άλλοι δείκτες όπως το Mean Squared Error (MSE) και το Root Mean Squared Error (RMSE), που είναι επίσης ικανοί να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για το μοντέλο και την ποιότητα του, η επιλογή του κατάλληλου δείκτη σχετίζεται με την εκάστοτε περίπτωση που μελετάμε.

#### 1. Standardized Residuals

Το γράφημα των Standardized residuals είναι απλά ένα γράφημα στο οποίο σχεδιάζεται, για κάθε σημείο της χρονοσειράς, η διαφορά μεταξύ του μοντέλου μας και του μοντέλου πρόβλεψης. Ένα μοντέλο, μπορούμε να πούμε ότι έχει εφαρμοστεί καλά πάνω στα δεδομένα μας, όταν δεν υπάρχουν εμφανή μοτίβα στα υπολείμματα, με τις τιμές να έχουν μέσο όρο μηδέν και να έχουν ομοιόμορφη διακύμανση.

## 2. Histogram

Το ιστόγραμμα είναι ένα γράφημα που δείχνει την κατανομή ενός συνόλου δεδομένων. Είναι μια γραφική αναπαράσταση της κατανομής συχνότητας των δεδομένων, όπου τα δεδομένα χωρίζονται σε διαστήματα ή θέσεις και ο αριθμός των παρατηρήσεων που εμπίπτουν σε κάθε διάστημα αντιπροσωπεύεται από το ύψος της κάθε μπάρας, Η (KDE) είναι ένας μη παραμετρικός τρόπος εκτίμησης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας μιας τυχαίας μεταβλητής, πρόκειται για μια εξομαλυνόμενη έκδοση ενός ιστογράμματος και παρέχει μια συνεχή εκτίμηση της κατανομής. Για να είναι καλή η εφαρμογή του μοντέλου μας στα δεδομένα θα πρέπει η καμπύλη KDE θα πρέπει να είναι πολύ παρόμοια με την κανονική κατανομή.

## 3. Q-Q plot

Το Q-Q γράφημα είναι συντομογραφία του όρου quantile-quantile και είναι μια γραφική μέθοδος για την σύγκριση δύο κατανομών πιθανοτήτων. Το γράφημα αυτό χρησιμοποιείται συνήθως για να εξεταστεί ένα σύνολο δεδομένων ακολουθεί μια συγκεκριμένη κατανομή. Για να είναι καλή η εφαρμογή ενός μοντέλου θα πρέπει η πλειοψηφία των σημείων του γραφήματος να βρίσκονται πάνω σε μια ευθεία γραμμή.

## 4. Correlogram

Τα διαγράμματα αυτά τα αναφέραμε εκτενώς και στις προηγούμενες ενότητες. Για να είναι καλό ένα μοντέλο θα πρέπει οι συσχετίσεις για υστέρηση μεγαλύτερη του μηδενός να μην είναι σημαντικές.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Υπόβαθρο και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 4.1 Target Model

Η συνεχής περιβαλλοντικές προκρίσεις καθώς και η επιθυμία της Ευρωπαϊκής ένωσης για απελευθέρωση και δημιουργία μιας ενιαίας ανταγωνιστικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας έχει επιφέρει τα τελευταία χρόνια έντονες μεταρρυθμίσεις στις αγορές ενέργειας. Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος για την σύζευξη (coupling) των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, [15], τα παραδοσιακά μοντέλα αγορών ενέργειας εγκαταλείπονται και υιοθετούνται ολοένα και περισσότερα καινούρια. Στην χώρα μας, ήδη από την 1<sup>η</sup> Νοέμβριου 2020 ακολουθείται πλήρως το Ευρωπαϊκό μοντέλο για την ενέργεια (Target Model), το οποίο έχει αλλάξει ριζικά την λειτουργία και την οργάνωση της αγοράς.

Το μοντέλο-στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης αποσκοπεί στην δημιουργία και λειτουργία μιας ενοποιημένης αγοράς ενέργειας, η οποία, θα επιτυγχάνεται από την εφαρμογή κοινών κανόνων οργάνωσης και λειτουργίας της αγοράς σε όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι αγορές θα πρέπει να οργανώνονται κατά τρόπο που να διευκολύνει την αποτελεσματική μετάδοση ενέργειας μέσω των διασυνδέσεων και την διασυνοριακή ανταλλαγή ενέργειας, έτσι δύναται να επιτευχθεί η σύζευξή της αγοράς και η σύγκλιση των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας σε όλη την Ευρώπη.

Οι κυριότεροι στόχοι του μοντέλου είναι, [16]:

1. Να παρέχει σταθερές τιμές
2. Να ενισχύσει τη ρευστότητα
3. Να υποστηρίξει τις διασυνοριακές συναλλαγές
4. να διευκολύνει τις διασυνδέσεις και να συντονίσει τη χρήση της χωρητικότητας του συστήματος μεταφοράς

Εάν και το ευρωπαϊκό μοντέλο-στόχος φαίνεται να υιοθετείται από ολοένα και περισσότερες χώρες, γίνεται ακόμα συζήτηση για το ένα είναι κατάλληλο για την διαμόρφωση των αγορών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που έχουν τόσο υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, [17]

### 4.2 Οι Βασικοί Λειτουργοί και φορείς της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα

Στην χώρα μας σημαντικότεροι λειτουργοί των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας είναι το Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας (EXE), ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) και ο Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ). Το Ελληνικό Χρηματιστήριο είναι υπεύθυνο για την λειτουργία της Ενεργειακής Χρηματοπιστωτικής Αγοράς ('Forward Market'), της Αγοράς της Επόμενης Ημέρας ('Day-ahead Market') και της Ενδοημερήσιας Αγοράς ('Intra-day Market'), ενώ ο ΑΔΜΗΕ είναι υπεύθυνος για την λειτουργία της Αγοράς Εξισορρόπησης και



ο ΔΕΔΔΗΕ είναι υπεύθυνος για την λειτουργία της αγοράς των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών (ΜΔΝ)[18].

Πιο συγκεκριμένα, η ΕΧΕ Α.Ε. ορίστηκε από την Ελληνική Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) ως Ορισθείς Διαχειριστής Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΟΔΑΗΕ) για τη λειτουργία της Αγοράς Επόμενης Ημέρας και της Ενδοημερήσιας Αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Από την 16.3.2020 κατόπιν έγκρισης της Επιτροπής Κεφαλαιαγοράς λειτουργεί την Ενεργειακή Χρηματοπιστωτική Αγορά ως Διαχειριστής Αγοράς Παραγώγων Ενέργειας. Επιπλέον, Η θυγατρική εταιρεία EnExClear, η οποία ιδρύθηκε στις 02.11.2018, είναι υπεύθυνη για την εκκαθάριση και το διακανονισμό των συναλλαγών της Αγοράς Επόμενης Ημέρας και Ενδοημερήσιας Αγοράς, καθώς και για την εκκαθάριση των θέσεων της Αγοράς Εξισορρόπησης[19]. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ΕΧΕ Α.Ε. ιδρύθηκε στις 18.6.2018 μετά την απόσχιση του κλάδου της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας από τη ΛΑΓΗΕ Α.Ε που ακολούθως μετονομάστηκε σε ΔΑΠΕΕΠ Α.Ε..

Άλλοι συμμαρτικοί φορείς που συνδράμουν στην εύρυθμη λειτουργία και ρύθμιση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα είναι:

1. η Ρυθμιστική Αρχή ενέργειας (ΡΑΕ), [20]

Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) είναι ανεξάρτητη ρυθμιστική αρχή. Αρχικά η κύρια αρμοδιότητά της ΡΑΕ ήταν να εποπτεύει την εγχώρια αγορά ενέργειας, με τις μετέπειτα όμως τροποποιήσεις του ν.2773/1999, ο οποίος ήταν και ο νόμος με τον οποίον η ΡΑΕ αρχικά συστάθηκε, και με την έκδοση του ν.3851/2010, που επέφερε ουσιώδεις αλλαγές στο νομοθετικό πλαίσιο που διέπει τις ΑΠΕ, ανατέθηκαν στην ΡΑΕ επιπλέον αρμοδιότητες. Σήμερα, η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, είναι κατέχει αποφασιστικό ρόλο στην:

1. Χορήγηση αδειών παραγωγής
2. Παρακολούθηση και εποπτεία της αγοράς ενέργειας
3. Προστασία των καταναλωτών
4. Παρακολούθηση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού της χώρας
5. Χορήγηση αδειών
6. Εποπτεία επί των Ανεξάρτητων Διαχειριστών Μεταφοράς
7. Έγκριση τιμολογίων μη ανταγωνιστικών δραστηριοτήτων
8. Χορήγηση εξαίρεσης από υποχρεώσεις παροχής πρόσβασης τρίτων
9. Παρακολούθηση πρόσβασης στις ενεργειακές διασυνδέσεις
10. Λήψη ρυθμιστικών μέτρων για την εύρυθμη λειτουργία των ενεργειακών αγορών

2. το Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος, [21]

Το υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος αποτελεί το θεσμικό όργανο του κράτους που αποφασίζει για την ενεργειακή πολιτική της χώρας, εντός των αρμοδιοτήτων του είναι και η εποπτεία της εύρυθμης λειτουργίας των αγορών που συντονίζονται από τους υπόλοιπους φορείς. Το υπουργείο Περιβάλλοντος οφείλει να διασφαλίσει την αξιόπιστη και οικονομική πρόσβαση των πολιτών στην Ηλεκτρική ενέργεια, καθώς και την εναρμόνισή με τις ευρωπαϊκές νομοθεσίες για την ενέργεια.

3. ο Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ), [22], [23]

Ο Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι ο αποκλειστικός υπεύθυνος για την ανάπτυξη, τη λειτουργία και συντήρηση υπο οικονομικούς όρους του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας. Εντός των αρμοδιοτήτων του ΔΕΔΔΗΕ, εμπίπτει και η διαχείριση των Ηλεκτρικών Συστημάτων των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών, που περιλαμβάνει τη διαχείριση της παραγωγής, τη λειτουργία της αγοράς και των συστημάτων των νησιών αυτών.

Η διαχείριση των ΜΔΝ πραγματοποιείται, από την ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε., σύμφωνα με τον «Κώδικα Διαχείρισης Ηλεκτρικών Συστημάτων Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών». που προβλέπεται στο άρθρο 130 του Ν. 4001/2011.

Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών (ΜΔΝ) αποτελείται από είκοσι οκτώ (28) αυτόνομα συστήματα διαφόρων μεγεθών. Ορισμένα εξ αυτών των συστημάτων αποτελούνται από περισσότερα νησιά (συμπλέγματα νησιών).

4. Διαχειριστής ΑΠΕ και Εγγυήσεων Προέλευσης (ΔΑΠΕΕΠ), [24]

Ο ΔΑΠΕΕΠ είναι υπεύθυνος για την διαχείριση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και της Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (ΣΗΘΥΑ) του Διασυνδεδεμένου Συστήματος καθώς και τις Εγγυήσεις προέλευσης ηλεκτρικής ενέργειας που έχουν παραχθεί από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ. Εντός των αρμοδιοτήτων του ΔΑΠΕΕΠ εμπίπτει και ο πλειστηριασμός των δικαιωμάτων ρύπων στην Ελλάδα, ενώ επίσης λειτουργεί ως Φορέας Συσσωρευτικής Εκπροσώπησης (ΦΟΣΕ) παραγωγών ΑΠΕ.

Συνοπτικά οι αρμοδιότητες του ΔΑΠΕΕΠ είναι οι ακόλουθες :

1. Υπολογισμός της μηνιαίας Ειδικής Τιμής Αγοράς (ΕΤΑ) ανά τεχνολογία ΑΠΕ.
2. Υπολογισμός, εκκαθάριση και τιμολόγηση του Μεταβατικού Μηχανισμού Βέλτιστης Ακρίβειας Πρόβλεψης (ΜΜΒΑΠ) στους υπόχρεους Σταθμούς ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ και Φο.Σ.Ε..
3. Υπολογισμός, εκκαθάριση και έκδοση ενημερωτικών σημειωμάτων για την Προσαύξηση Ανάπτυξης Ετοιμότητας Συμμετοχής στην Αγορά (ΠΑΕΣΑ) στους δικαιούχους Σταθμούς ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ.

4. Υποβολή στο Σύστημα Συναλλαγών Αγορών Ενέργειας (ΣΣΑΕ) των Προσφορών Έγχυσης ΣΠΗΕ και ΣΕΣΤ και των Φωτοβολταϊκών Στεγών.
5. Παρακολούθηση της ημερήσιας εκκαθάρισης των ανωτέρω Προσφορών Έγχυσης.

### 4.3 Η Οργάνωση της Ελληνικής Αγοράς

Με τον ν. 4425/2016, και με τις μετέπειτα αλλαγές που προσέθεσε ο ν. 4512/2018, προβλέφθηκε, αφενός η κατάργηση του Συστήματος Συναλλαγών Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού (ΗΕΠ) και του μοντέλου της Υποχρεωτικής Κοινοπραξίας (Mandatory Pool), αφετέρου η λειτουργία διακριτών αγορών Ηλεκτρικής Ενέργειας. Ειδικότερα, σύμφωνα με το άρθρο 7 του ν. 4425/2016 «*Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας*» του ν. 4425/2016 «*Οι συναλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διενεργούνται στις ακόλουθες Αγορές: Αγορά Επόμενης Ημέρας, Ενδοημερήσια Αγορά, Αγορά Εξισορρόπησης ή και Ενεργειακή Χρηματοπιστωτική Αγορά, ...*»[18], [25].

Ακολούθως παρατίθενται περισσότερες πληροφορίες για την λειτουργία των τεσσάρων αυτών αγορών όπως περιγράφονται από την ΡΑΕ[25].

#### 4.3.1 Ενεργειακή χρηματοπιστωτική αγορά ('Forward Market')

Η Χρηματοπιστωτική Αγορά Ενέργειας ή Προθεσμιακή αγορά (Future/Forward Market) στην Ελλάδα ιδρύθηκε το 2020 με την έγκριση της Επιτροπής Κεφαλαιαγοράς. Η EXE Α.Ε. διαχειρίζεται και υποστηρίζει τις συναλλαγές της αγοράς, ενώ η ATHEXClear, εταιρεία μέλος του Ομίλου Ελληνικών Χρηματιστηρίων, έχοντας τον ρόλο του Κεντρικού Αντισυμβαλλόμενου, αναλαμβάνει την εκκαθάριση των συναλλαγών.

Στην Χρηματοοικονομική Αγορά Ενέργειας, διαπραγματεύονται Συμβόλαια Μελλοντικής Εκπλήρωσης (ΣΜΕ). Αυτές οι συμβάσεις περιλαμβάνουν ανταλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας με τον καθορισμό του χρόνου, της ποσότητας και της τιμής της συναλλαγής και μπορούν να γίνουν είτε διμερώς (Over-The-Counter) είτε μέσω Χρηματιστηρίου Ενέργειας (Forward Market).

Η Χρηματοπιστωτική Αγορά ασχολείται με την εμπορία ηλεκτρικής ενέργειας μεσοπρόθεσμα. Σε μια μελλοντική ή προθεσμιακή σύμβαση, συμφωνείτε μια τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στο μέλλον. Τα συμβόλαια μελλοντικής εκπλήρωσης είναι τυποποιημένα συμβόλαια που μπορούν να τύχουν περαιτέρω διαπραγμάτευσης, στη ελληνική αγορά διαπραγματεύονται τα ΣΜΕ Φορτίου Βάσης και τα ΣΜΕ Φορτίου Αιχμής τα οποία διακανονίζονται χρηματικά με δυνατότητα επιλογής φυσικού διακανονισμού [26]. Αντίθετα, τα προθεσμιακά συμβόλαια (Forwards) είναι κυρίως διμερή συμβόλαια που συνήθως δεν διαπραγματεύονται περαιτέρω.

Οι προθεσμιακές αγορές επιτρέπουν στους συμμετέχοντες στην αγορά να διαχειρίζονται τους κινδύνους τιμών τους. Τα συμβόλαια μελλοντικής εκπλήρωσης (ΣΜΕ) μπορούν να διαπραγματεύονται εντός και μεταξύ των ζωνών της αγοράς. Στη προθεσμιακή αγορά, οι συμμετέχοντες μπορούν να περιορίσουν την έκθεσή τους στην -συνήθως πιο ασταθή-

ενδοημερήσια αγορά ασφαρίζοντας τη θέση τους. Η αγορά αυτή ενισχύει μακροπρόθεσμους σχεδιασμούς, όπως συστήματα προγραμματισμού για την παραγωγή, τη μεταφορά, τη διανομή και τις επενδύσεις απόκρισης στη ζήτηση, υποδεικνύοντας μακροπρόθεσμες μελλοντικές προσδοκίες για τις ωριαίες τιμές της αγοράς.

Η αγορά συμβολαίων μελλοντικής εκπλήρωσης είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τους συμμετέχοντες προκειμένου να μετριάσουν την έκθεσή τους στην αστάθεια των τιμών σε αγορές όπου υπάρχει φυσική υποχρέωση παράδοσης.

### **4.3.2 Αγορά επόμενης ημέρας ('Day-ahead Market')**

Η Αγορά Επόμενης Ημέρας (Day-Ahead Market) αφορά σε συναλλαγές αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας με υποχρέωση φυσικής παράδοσης την ημέρα D.

Σε αυτήν την αγορά, η ηλεκτρική ενέργεια ανταλλάσσεται τόσο με διμερή συμβόλαια OTC (Over The Counter), όσο και με ανταλλαγή ισχύος. Οι συναλλαγές για αγορά ή πώληση ηλεκτρικής ενέργειας με φυσική υποχρέωση παράδοσης την ημέρα (D) δημοπρατούνται την ημέρα D-1 όπου δηλώνονται επίσης όλες οι συναλλαγές χρηματοοικονομικών προϊόντων ενέργειας με φυσική παράδοση με σκοπό τη φυσική παράδοση των προϊόντων για κάθε Αγοραία Χρονική Μονάδα της Ημέρας Εκπλήρωσης Φυσικής Παράδοσης D. Οι παραγωγοί είναι υποχρεωμένοι να συμμετάσχουν ενώ η συμμετοχή για όλους τους υπόλοιπους συμμετέχοντες είναι προαιρετική. Οι παραγωγοί είναι υποχρεωμένοι να υποβάλλουν παραγγελίες πώλησης για τη διαθέσιμη χωρητικότητα των μονάδων τους που δεν έχουν ήδη εκχωρηθεί μέσω συναλλαγών ενεργειακών χρηματοοικονομικών προϊόντων ή άλλων συναλλαγών που αφορούν ενεργειακά προϊόντα χονδρικής με υποχρέωση φυσικής παράδοσης.

Η Αγορά Day-Ahead λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο. Με το κλείσιμο της ημέρας, κάθε αγορά πρέπει να είναι ισορροπημένη, αυτό σημαίνει ότι η προγραμματισμένη παραγωγή πρέπει να ισούται με την ζήτηση που έχει προβλεφθεί συν / μείον τις καθарές εξαγωγές ή εισαγωγές από άλλες ζώνες αγοράς. Στην αγορά DAM, οι ζώνες της αγοράς μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους. Οι DAM αγορές παρουσιάζουν τα παρακάτω οφέλη:

1. Αυξάνει την αξιοπιστία του συστήματος παρέχοντας επαρκή προειδοποίηση για προγραμματισμό
2. Μειώνει τον αντίκτυπο της αβεβαιότητας στις τιμές της αγοράς σε πραγματικό χρόνο επειδή ένα μικρότερο ποσοστό παραγωγής εκτίθεται σε πραγματικό χρόνο στη μεταβλητότητα των τιμών
3. Αυξάνει τη ρευστότητα καθώς οι συναλλαγές μπορεί να είναι χρηματοοικονομικές συμβάσεις και όχι συμβάσεις για φυσική παράδοση.

Στην Αγοράς της Επόμενης Ημέρας δηλώνονται επίσης οι ποσότητες ενέργειας όπως προκύπτουν από τις διμερείς συμβάσεις και την Προθεσμιακή Αγορά του EXE για τα προϊόντα με υποχρέωση φυσικής παράδοσης.

### 4.3.3 Ενδοημερήσια αγορά ('Intra-day Market')

Στην Ενδοημερήσια Αγορά (Intra-Day Market) οι συμμετέχοντες έχουν την ευκαιρία να υποβάλλουν προσφορές αγοράς και πώλησης κατά την διάρκεια της ημέρας φυσικής παράδοσης D. Η Ενδοημερήσια Αγορά αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τους συμμετέχοντες καθώς μέσω αυτής δύνανται οι συμμετέχοντες να διορθώνουν τις θέσεις τους όταν προκύπτουν αποκλίσεις από τις προσφορές που είχαν υποβάλλει στην Αγορά Επόμενης Ημέρας, μετριάζοντας έτσι τις αποκλίσεις της πραγματικής παραγωγής/ζήτησης σύμφωνα με τις συνθήκες που επικρατούν πλησιέστερα στον πραγματικό χρόνο παράδοσης.

Η Ενδοημερήσια Αγορά επιτρέπει τη διόρθωση της θέσης διαπραγμάτευσης καθώς πλησιάζει σε πραγματικό χρόνο σε περίπτωση αλλαγών στη ζήτηση ή διακοπή του σταθμού παραγωγής ενέργειας και την υποβολή ακριβέστερων βραχυπρόθεσμων προβλέψεων για ανανεώσιμες πηγές. Οι συναλλαγές όγκων με υποχρέωση φυσικής παράδοσης δημοπρατούνται μετά το κλείσιμο της αγοράς Day-Ahead, (D-1 και D), ενώ για τις φυσικές δημοπρασίες παράδοσης πραγματοποιούνται την ημέρα D. Στην Ενδοημερήσια Αγορά, η συμμετοχή είναι προαιρετική για όλους τους συμμετέχοντες.

### 4.3.4 Αγορά Εξισορρόπησης ('Balancing Market')

Η ακριβής πρόβλεψη των ενεργειακών αναγκών αποτελεί σημαντική πρόκληση για τους διαχειριστές των αγορών αφού εξαρτάται από πολυάριθμους παράγοντες. Σκοπός της Αγοράς Εξισορρόπησης είναι η διόρθωση της ανισορροπίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης σε πραγματικό χρόνο, διατηρώντας την αδιάλειπτη και αξιόπιστη παροχή ενέργειας από το σύστημα και λαμβάνοντας υπόψη τα προγράμματα αγοράς των συμμετεχόντων στις προηγούμενες αγορές. Η Αγορά Εξισορρόπησης (Balancing Market) διακρίνεται στην Αγορά Ισχύος Εξισορρόπησης, την Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης και τη Διαδικασία Εκκαθάρισης Αποκλίσεων.

Στην Αγορά Εξισορρόπησης της Ελλάδας έχει υιοθετηθεί το μοντέλο της κεντρικής κατανομής (Central-Dispatch) των μονάδων από τον Διαχειριστή του Συστήματος Μεταφοράς μέσω της εκτέλεσης Διαδικασιών Ενοποιημένου Παραγραμματισμού (ΔΕΠ). Οι Συμμετέχοντες στην αγορά Εξισορρόπησης χαρακτηρίζονται ως εκπρόσωποι Οντοτήτων με Ευθύνη Εξισορρόπησης (Balancing Responsible Parties) ή/και Οντοτήτων Υπηρεσιών Εξισορρόπησης (Balancing Services Providers). Οι Πάροχοι Υπηρεσιών Εξισορρόπησης στο πλαίσιο της συμμετοχής τους στην Αγορά Εξισορρόπησης δύνανται να υποβάλλουν τις παρακάτω προσφορές για τις Οντότητες Υπηρεσιών Εξισορρόπησης που εκπροσωπούν:

1. Ανοδικές και καθοδικές Προσφορές Εφεδρείας Διατήρησης Συχνότητας (ΕΔΣ)
2. Ανοδικές και καθοδικές Προσφορές Χειροκίνητης Εφεδρείας Αποκατάστασης Συχνότητας (χΕΑΣ)
3. Ανοδικές και καθοδικές Προσφορές Αυτόματης Εφεδρείας Αποκατάστασης Συχνότητας (αΕΑΣ)
4. Ανοδικές και καθοδικές Προσφορές Ενέργειας Εξισορρόπησης

Η διαδικασία Εκκαθάρισης Αποκλίσεων αφορά στον μηχανισμό οικονομικής εκκαθάρισης για την επιβολή χρεώσεων ή την καταβολή πληρωμών στα Συμβαλλόμενα Μέρη με Ευθύνη Εξισορρόπησης για τις Αποκλίσεις τους.

Αυτές οι τέσσερις αγορές είναι διασυνδεδεμένες και χρησιμοποιούνται για τη διασφάλιση της συνέχειας του ενεργειακού εφοδιασμού και για την εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Επιπλέον, αυτές οι αγορές συντονίζονται συχνά από συστήματα σύζευξης αγοράς που είναι σε θέση να βελτιστοποιήσουν τη χρήση των πόρων και τις δυνατότητες μεταφοράς για να ελαχιστοποιήσουν το κόστος και να μεγιστοποιήσουν την ενοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

## **4.4 Peer-to-Peer Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας**

### **4.4.1 Εισαγωγή**

Οι P2P αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, είναι μία μορφή αγορών στην οποία, παραγωγοί, καταναλωτές και Prosumers δύναται να συναλλάσσονται ηλεκτρική ενέργεια απευθείας μεταξύ τους, χωρίς να παρεμβάλλεται κάποιος κεντρικός πάροχος. Εάν και η ιδέα δημιουργίας τέτοιων αγορών δεν είναι νέα η, η αύξηση των Διεσπαρμένων Μονάδων Παραγωγής (DES), των Ηλεκτρικών Οχημάτων (EV) και των Συστημάτων Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας (BESS) στα Συστήματα Διανομής, σε συνδυασμό με την δημιουργία νέων τεχνολογιών και κυρίως του Blockchain και των Έξυπνων συμβολαίων έχουν δημιουργήσει νέες δυνατότητες εφαρμογής των P2P αγορών και έχουν αναζωπυρώσει το ενδιαφέρον γύρω από αυτές.

### **4.4.2 Προκλήσεις και Ευκαιρίες**

Όπως αναφέρθηκε περιληπτικά στην εισαγωγή, η ευρεία εφαρμογή αγορών P2P δύναται να προσφέρει πολλά οφέλη τόσο για τα ΣΗΕ όσο και για τους καταναλωτές[27]. Κυριότερα τέτοια οφέλη είναι:

#### **1. Μείωση Κόστους Ενέργειας**

Η ενέργεια στις P2P αγορές παράγεται ως επί το πλείστον από ΑΠΕ οι οποίες έχουν σχεδόν μηδενικό λειτουργικό κόστος, έτσι, η εμπορεία ενέργειας στο πλαίσιο μιας τέτοιας αγοράς δύναται να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση.

#### **2. Η Υιοθέτηση Βιώσιμων Λύσεων**

Η λειτουργία P2P αγορών και τα άμεσα οικονομικά οφέλη που απορρέουν για τους συμμετέχοντες σε αυτές, προσφέρουν κίνητρο στους καταναλωτές για επενδύσεις σε ΑΠΕ και για χρήση Ηλεκτρικών Οχημάτων και επιταχύνουν έτσι την απανθρακοποίηση του Συστήματος.

#### **3. Μείωση των Απωλειών Ενέργειας**

Οι P2P αγορές ενθαρρύνουν την τοπική παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας και μειώνουν την ανάγκη μεταφοράς ενέργειας, με αποτέλεσμα να μειώνονται και οι

απώλειες ενέργειας που οφείλονται στις μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των σταθμών παραγωγής και τα σημεία κατανάλωσης

#### 4. Περιορισμός της Ανάγκης για Αναβάθμιση του Δικτύου

Μέσω των P2P αγορών προσφέρονται οικονομικά οφέλη που προμοτάρουν την καλύτερη διαχείριση των Διεσπαρμένων Μονάδων Παραγωγής και δημιουργούν μείωση του φορτίου αιχμής και συνεπώς των επενδύσεων που χρειάζονται για αναβάθμιση του δικτύου.

#### 5. Παροχή Επικουρικών Υπηρεσιών

Οι συμμετέχοντες στις πλατφόρμες P2P δύναται ομαδικά να προσφέρουν επικουρικές υπηρεσίες και να βοηθήσουν έτσι στην εύρυθμη λειτουργία του συνολικού δικτύου.

Εάν και η ωρίμανση του Blockchain έχει δώσει απάντηση στην κυριότερη πρόκληση που αντιμετώπιζαν οι P2P αγορές και η οποία αφορούσε στην εύρεση ενός τρόπου διασφάλισης και επικύρωσης των συναλλαγών, υπάρχουν ακόμα σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν για να εφαρμοστούν οι P2P αγορές σε ευρεία κλίμακα. Οι βασικότερες τέτοιες προκλήσεις είναι:

##### 1. Έλλειψη ρυθμιστικών πλαισίων που ενθαρρύνουν την P2P ανταλλαγή ενέργειας

Στις περισσότερες χώρες, η προμήθεια της ενέργειας πρέπει να γίνεται αποκλειστικά από πιστοποιημένους παρόχους [28] και συνεπώς η εγκαθίδρυση P2P αγορών ενέργειας είναι αδύνατη.

##### 2. Πολυπλοκότητα της Αγοράς

Οι P2P αγορές ηλεκτρικής ενέργειας παραμένουν προς το παρόν ιδιαίτερα πολύπλοκες και η συμμετοχή σε αυτές απαιτεί αφενός εξοικείωση με τις αγορές ενέργειας και αφετέρου υψηλή ευχέρεια με τις νέες τεχνολογίες.

##### 3. Τεχνικοί Περιορισμοί

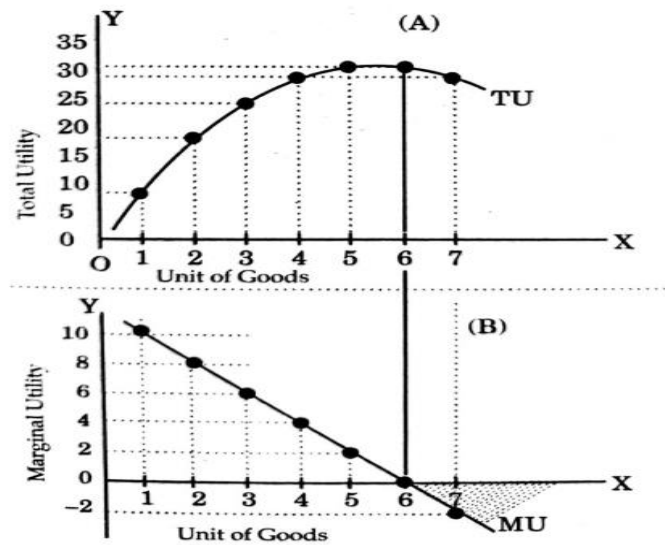
Για την εύρυθμη λειτουργία των P2P αγορών αφενός οι συμμετέχοντες πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με σύγχρονα Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας(EMS) και αφετέρου το δίκτυο πρέπει να είναι αξιόπιστο και ικανό να διαχειριστεί την υψηλή διείσδυση Διεσπαρμένων Μονάδων. Το υψηλό κόστος που απαιτείται για να διασφαλιστούν αυτές οι προϋποθέσεις μπορεί να αποτελέσει τροχοπέδη στην εφαρμογή των P2P αγορών.

## 4.5 Συνάρτηση Οριακής Χρησιμότητας

Στην επιστήμη των οικονομικών, μια συνάρτηση Οριακής Χρησιμότητας (Marginal Utility Function) εκφράζει την πρόσθετη ικανοποίηση (Utility) που αποκομίζει ένας καταναλωτής από την κατανάλωση μιας ακόμη μονάδας ενός αγαθού ή μιας υπηρεσίας. Η έννοια της Οριακής Χρησιμότητας χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί πως μεταβάλλεται η επιθυμία ενός καταναλωτή να αγοράσει ένα προϊόν (ή μια υπηρεσία), καθώς μεταβάλλεται η τιμή.

Μαθηματικά η έννοια της Οριακής Χρησιμότητας προκύπτει από την παράγωγο της συνολικής χρησιμότητας, έτσι στα διαστήματα στα οποία η συνολική χρησιμότητα (Total Utility) αυξάνει η οριακή χρησιμότητα είναι θετική ενώ στα διαστήματα στα οποία η συνολική χρησιμότητα μικραίνει η οριακή χρησιμότητα είναι αρνητική. Τέλος, η Οριακή Χρησιμότητα δύναται να είναι και μηδενική όταν η πρόσθετη κατανάλωση κάποιου αγαθού ή υπηρεσίας δεν επιφέρει αλλαγή στην ικανοποίηση του καταναλωτή.

Στην ακόλουθη εικόνα δίνονται ένα παράδειγμα των εν λόγω συναρτήσεων, όπως είναι αναμενόμενο η Οριακή Χρησιμότητα είναι Γραμμική όταν η Συνολική Χρησιμότητα είναι τετραγωνική.



*Εικόνα 8-Παράδειγματα Συναρτήσεων Συνολικής και Οριακής Χρησιμότητας*

Στον τομέα της ενέργειας οι συναρτήσεις χρησιμότητας έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για να εκφράσουν την επιθυμία ενός Prosumer να αγοράσει ή να πουλήσει ενέργεια ανάλογα με την τιμή της[29]. Στις εφαρμογές τις ενέργειας, ορίζουμε την χρησιμότητα ως το κέρδος ενός prosumer όταν συναλλάσσεται ενέργεια, σε αυτό το πλαίσιο η χρησιμότητα θα είναι θετική όταν ο prosumer διατίθεται να πουλήσει ενέργεια και αρνητική όταν διατίθεται να την αγοράσει.

## 4.6 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

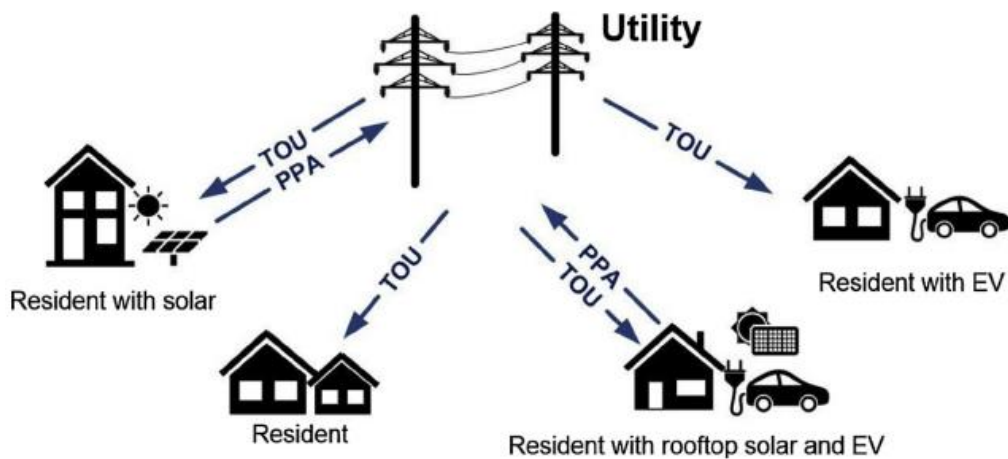
Στην ενότητα αυτή παρατίθενται οι κυριότερες πηγές που αποτελέσαν ερέθισμα για την συγγραφή της παρούσας διπλωματικής. Στις αναφορές αυτές, ο αναγνώστης μπορεί να βρει πληροφορίες τόσο για τις αγορές P2P γενικότερα όσο και πιο συγκεκριμένα για τις Συναρτήσεις Χρησιμότητας και για το πως έχουν μέχρι σήμερα χρησιμοποιηθεί στον τομέα της ενέργειας.

Στο [30], αφού παρουσιαστεί η σημερινή πραγματικότητα στα Συστήματα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας και επεξηγηθεί γιατί στο πλαίσιο αυτό η αγοράς P2P δύναται να ευδοκιμήσουν και να συνεισφέρουν θετικά στην κοινωνία και την οικονομία, δύο τρόποι εμπορίας Ηλεκτρικής Ενέργειας σε μία P2P αγορά παρουσιάζονται. Ένας τρόπος είναι η λειτουργία ενός συστήματος δημοπρασίας στο οποίο οι prosumers υποβάλλουν τις

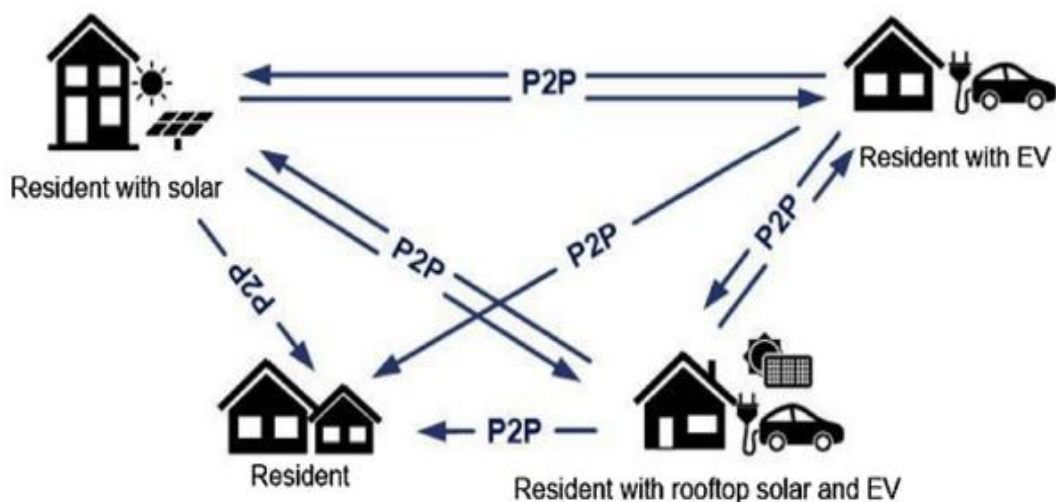


προσφορές τους και ο Διαχειριστής του Δικτύου Διανομής επιμελείται της εκκαθάρισης της αγοράς και δεύτερος τρόπος είναι η λειτουργία, πάλι από τον διαχειριστή, μίας πλατφόρμας στην οποία οι αγοραστές θα μπορούν να υποβάλλουν προσφορές και να έρθουν σε απευθείας συμφωνία μεταξύ τους. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται δύο εναλλακτικές που δύναται να προωθήσουν τις P2P αγορές, η μία περιλαμβάνει την παρουσία εκπροσώπων και η άλλη την χρήση τεχνολογίας Blockchain και τα πλεονεκτήματα αλλά και οι προβληματισμοί που σχετίζονται με αυτές αναλύονται. Οι συγγραφείς καταλήγουν στο ότι εν λόγω αγορές εμφανίζουν μεγάλη ποικιλομορφία και πιθανότατα χρειάζεται να προσαρμοστούν ανάλογα με τους στόχους της τις ιδιομορφίες της κάθε εφαρμογής.

Στην ίδια δημοσίευση μας δίνονται δυο εικόνες στις οποίες παρουσιάζεται η εμπορία ενέργειας από ΑΠΕ, Συστήματα Αποθήκευσης και Ηλεκτρικά οχήματα σήμερα (πρώτη εικόνα) και η εμπορεία της ενέργειας αυτής σε μια P2P αγορά (δεύτερη εικόνα). Όπως φαίνεται, στις υπάρχουσες αγορές η ενέργεια πωλείται στο δίκτυο και μετά πίσω στους καταναλωτές ενώ στις P2P αγορές δε παρεμβάλλεται κάποιος άλλος. Οι όροι PPA και TOU που εμφανίζονται αντιστοιχούν σε Tariff-of-Use και Power-Purchasing-Agreement.



*Εικόνα 9-Εμπόριο Περίσσειας Ενέργειας στις Παραδοσιακές Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας*



*Εικόνα 10-Εμπόριο Περίσσειας Ενέργειας στις P2P Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας*

Στο [31] δίνεται μια πολύ πρόσφατη και διεξοδική μελέτη των P2P αγορών. Πιο συγκεκριμένα, οι συγγραφείς ξεκινάνε παραθέτοντας τα βασικά φυσικά και εικονικά στοιχεία που χρειάζονται για την λειτουργία μιας τέτοιας αγοράς, παραδείγματα τέτοιων είναι το σύστημα EMS που χρειάζονται οι prosumers για την διασφάλιση της κάλυψης των φυσικών ανάγων ενέργειας τους και τον υπολογισμό των προσφορών τους. Ακολουθεί έπειτα μια ανασκόπηση των προτεινόμενων δομών για της P2P αγορές και διακρίνονται τρία είδη αγορών, οι Decentralized-based market, η Community-based market και η Compositet-based market. Εν συνέχεια, παρατίθενται οι βασικότερες προκλήσεις που διαφαίνονται σε φυσικό και ρυθμιστικό επίπεδο, οι οποίες ποικίλουν από την διασφάλιση της εξισορρόπησης της αγοράς και ζήτησης ενέργειας στις P2P αγορές έως την ασφάλεια των συναλλαγών όταν αυτές δεν εποπτεύονται. Τέλος, δίνεται μια εκτενής ανασκόπηση των τεχνικών μεθόδων που δύναται να χρησιμοποιηθούν για την λειτουργία της αγοράς, οι συγγραφείς ξεχωρίζουν τέσσερις κύριες προσεγγίσεις οι οποίες είναι οι Auction-based, Game Theory, Constrained Optimization και Blockchain.

Στο [32], που αποτέλεσε και την βασική πηγή έμπνευσης για την συγγραφή της παρούσας διπλωματικής, οι συγγραφείς επιθυμούν να βρουν έναν μετρήσιμο και υπολογιστικά διαχειρίσιμο μέσο να εκφράσουν την επιθυμία των prosumer να αγοράσουν ή να πουλήσουν ενέργεια στο πλαίσιο κάποιας P2P αγοράς, λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν την διαδικασία λήψης της εν λόγω απόφασης. Αρχικά, αφού παραθέσουν τις κυριότερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εκκαθάριση των P2P αγορών αναφέρουν και επικεντρώνονται στις συναρτήσεις οριακής χρησιμότητας για τις οποίες όμως παρατηρούν ότι στην βιβλιογραφία συνήθως αυθαίρετα υποτίθεται ότι το σχήμα τους θα είναι τετραγωνικό ή γραμμικό. Θέλοντας να χρησιμοποιήσουν συναρτήσεις οριακής χρησιμότητας αλλά ταυτόχρονα θεωρώντας την παραπάνω υπόθεση ανακριβή, οι ίδιοι, προτείνουν την επίλυση ενός στοχαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης δυο σταδίων για την κατασκευή των συναρτήσεων οριακής χρησιμότητας και παρουσιάζουν την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς του εν λόγω προβλήματος. Καθώς πρόκειται για στοχαστικό πρόβλημα, δημιουργείται η ανάγκη κατασκευής σεναρίων, η οποία όμως διευθετείται με την χρήση ενός ARMA μοντέλου. Οι συγγραφείς, προκειμένου να κάνουν τις συναρτήσεις τους πιο υπολογιστικά διαχειρίσιμες τις γραμμικοποιούν και εν συνεχεία τις συγκρίνουν με τις γραμμικές συναρτήσεις που συνήθως χρησιμοποιούνται στην βιβλιογραφία. Συνολικά, καταλήγουν ότι όταν όλες οι παράμετροι ληφθούν υπόψιν οι συναρτήσεις οριακής χρησιμότητας δεν είναι γραμμικές και πως από το να υποτεθούν αυθαίρετα ως γραμμικές και να προσδιοριστούν οι παράμετροι τους με πολλές παραδοχές είναι προτιμότερη η επίλυση στοχαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης και η μετέπειτα γραμμικοποίηση τους είναι καλύτερη τακτική για την κατάστροψη των γραμμικών MUF που απαιτούνται για την εκκαθάριση κάποιας P2P αγοράς.

Στο [33] χρησιμοποιούνται επίσης συναρτήσεις οριακής χρησιμότητας με σκοπό να σχεδιαστούν καλύτερα συμβόλαια διαχείρισης ζήτησης (demand management contracts). Για τον σκοπό αυτό, οι συγγραφείς, υποθέτουν και συγκρίνουν δυο διαφορετικές συναρτήσεις κόστους, τετραγωνικές και εκθετικές. Στην αρχή, επεξηγούνται τα χαρακτηριστικά των εν λόγω συναρτήσεων και δίνεται η γενική τους έκφραση παρουσία συντελεστών. Εν συνέχεια, επεξηγείται πως μπορούν οι συντελεστές αυτοί να προσδιοριστούν με χρήση διαθέσιμων δεδομένων χρησιμότητας και ένα δείγμα 10 καταναλωτών χρησιμοποιείται για να επεξηγηθεί η διαδικασία προσδιορισμού των συντελεστών. Έχοντας διαθέσιμες τις συναρτήσεις κόστους, οι συγγραφείς επεξηγούν πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την σχεδίαση των

προαναφερθέντων συμβολαίων διαχείρισης ζήτησης και παραθέτουν αριθμητικά παραδείγματα. Τέλος, καταλήγουν ότι προκειμένου να σχεδιαστούν αποτελεσματικά συμβόλαια διαχείρισης ζήτησης είναι απαραίτητο να υπάρχει μια καλή εκτίμηση της συνάρτησης κόστους των καταναλωτών καθώς σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να βελτιστοποιηθεί η αποζημίωση που παρέχεται για την μείωση του φορτίου στους καταναλωτές και να μεγιστοποιηθεί το συνολικό κέρδος.

Στο [34] βλέπουμε πως μια P2P πλατφόρμα βασιζόμενη στην τεχνολογία blockchain μπορεί να μειώσει το συνολικό φορτίο αιχμής και να οδηγήσει σε μείωση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα σε αυτό το paper οι συγγραφείς χρησιμοποιούν το Blockchain για να εξετάσουν μια περίπτωση P2P ανταλλαγής ενέργειας στην οποία οι συμμετέχοντες μπορούν να υποβάλλουν συγκεκριμένες προσφορές για τις ευέλικτες μονάδες τους για διακριτά χρονικά βήματα. Η εκκαθάριση της αγοράς γίνεται αφού συλλεχθούν όλες οι προσφορές μέσα από ένα σύστημα διπλής δημοπρασίας που επικυρώνεται από ένα έξυπνο συμβόλαιο. Η συγκεκριμένη δημοσίευσή συμπεριλαμβάνει και την μελέτη περίπτωσης σε ένα πραγματικό μικροδίκτυο στο οποίο η χρήση της P2P πλατφόρμας οδήγησε σε 46% ζήτηση αιχμής και 6% εβδομαδιαία εξοικονόμηση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Μεθοδολογία

### 5.1 Περιγραφή Προβλήματος

Υποθέτουμε πως ο Prosumer του προβλήματος μας διαθέτει ένα μικρό φωτοβολταϊκό σύστημα και σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με χωρητικότητα  $C$  (σε kWh), βαθμό απόδοσης  $\eta$  και ονομαστική ισχύς  $P_N$  (σε kW). Ο Prosumer διαθέτει την δυνατότητα σε κάθε χρονικό βήμα  $t \in T$ , όπου  $T$  είναι το πλήθος όλων των χρονικών βημάτων και έχει μέγεθος  $|T| = n_t$ , να αγοράζει/πουλάει ενέργεια από/σε μία p2p αγορά σε τιμή  $\lambda_n$ , ενώ επίσης, μπορεί να αγοράσει ενέργεια σε τιμή  $\lambda_t^b$  από τον πάροχο ή να πουλήσει σε αυτόν σε τιμή  $\lambda_t^s$ .

Μελετάμε μια αγορά P2PP όπου οι αγοραστές συναλλάσσονται ενέργεια κοντά σε πραγματικό χρόνο αποκλειστικά για το επερχόμενο χρονικό βήμα  $t_0$ , και όχι για πολλαπλά χρονικά βήματα. Κάθε αγοραστής κατασκευάζει την MUF του για το επόμενο χρονικό βήμα και την προωθεί στον λειτουργό της P2P αγοράς. Μόλις η εκκαθάριση της αγοράς γίνει, κάθε Prosumer λαμβάνει το αποτέλεσμα της αγοράς. Τυχόν αναντιστοιχίες μεταξύ της ενέργειας που είναι διαθέσιμη από την αγορά P2P και των φυσικών ανάγων του καταναλωτή επιλύεται με προμήθεια ενέργειας από τον πάροχο του δικτύου. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η παράμετρος  $\lambda_n$ , που εκφράζει την τιμή της ενέργειας στη p2p αγορά για το επόμενο χρονικό βήμα, λαμβάνει τιμές ανάμεσα στις  $\lambda_t^s$  και  $\lambda_t^b$ .

Στη παρούσα διπλωματική επιθυμούμε να εκφράσουμε κατά το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά την επιθυμία του καταναλωτή να ανταλλάξει ενέργεια στην P2P αγορά. Έτσι, στόχος μας είναι χωρίς να αγνοήσουμε τις αβεβαιότητες που εμφανίζονται σε κάποιες παραμέτρους (όπως π.χ. το φορτίο), και συνυπολογίζοντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της μπαταρίας και τις μελλοντικές κινήσεις του καταναλωτή, να κατασκευάσουμε μια αντιπροσωπευτική Συνάρτηση Οριακής Χρησιμότητας. Για τον σκοπό αυτό, η επίλυση ενός στοχαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης που λαμβάνει υπόψιν όλα τα παραπάνω χρησιμοποιείται ως εργαλείο για τον υπολογισμό της ποσότητας της ενέργειας που πραγματικά θα επιθυμεί ο Prosumer να ανταλλάξει στην P2P αγορά.

### 5.2 Μαθηματική Διατύπωση Ντετερμινιστικού Προβλήματος

Σε πρώτο χρόνο, κατασκευάζεται ένα ντετερμινιστικό μοντέλο που επιλύει ένα υποπρόβλημα, αποφασίζει δηλαδή για την φόρτιση και την εκφόρτιση της μπαταρίας για δεδομένες τιμές ενέργειας με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ενέργειας που θα κληθεί να πληρώσει ο Prosumer. Το ντετερμινιστικό αυτό μοντέλο προτείνει την βέλτιστη συμπεριφορά της μπαταρίας (battery dispatch) στην περίπτωση που ο Prosumer μπορεί να εμπορευτεί ενέργεια μόνο από το δίκτυο, χωρίς να του επιβάλλονται επιπλέον χρεώσεις για την χρήση του δικτύου. Στο στάδιο αυτό, και εφόσον το μοντέλο που υλοποιούμε είναι ντετερμινιστικό, όλες οι παράμετροι λαμβάνουν μοναδική τιμή και δεν γίνεται κατασκευή σεναρίων. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως στο παράδειγμα του Ντετερμινιστικού μοντέλου έχουμε θεωρήσει πως η ενέργεια αγοράζεται και πωλείται στην ίδια τιμή, δηλαδή ισχύει:  $\lambda_t^b = \lambda_t^s = \lambda_t$

Για να μπορέσει να οριστεί το μοντέλο αυτό θα πρέπει να εκφράσουμε μαθηματικά τόσο την ποσότητα που επιθυμούμε να ελαχιστοποιήσουμε όσο και τα όρια στα οποία δύναται οι μεταβλητές μας να λάβουν τιμές. Στην πράξη, αυτό αποτελεί το πρώτο βήμα στην επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος βελτιστοποίησης και συνίσταται στον μαθηματικό προσδιορισμό της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών του προβλήματος. Επειδή επιθυμούμε να ελαχιστοποιήσουμε το κόστος χρησιμοποιώντας βέλτιστα την μπαταρία, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος θα είναι:

$$\min \left( \sum_{t=0}^T \lambda t * p_t^c + \lambda t * p_t^b - \lambda t * p_t^d \right) \quad (5.1)$$

Και οι περιορισμοί θα είναι:

$$C_t = C_{t-1} + p_t^c * E - p_t^d, \quad t \in T \quad (5.2)$$

$$C_{initial} = C_{final} \quad (5.3)$$

$$C_{min} \leq C_t \leq C_{max}, \quad \forall t \in T \quad (5.4)$$

$$0 \leq p_t^c * E \leq u_t * P_N, \quad \forall t \in T \quad (5.5)$$

$$0 \leq p_t^d \leq (1 - u_t) * P_N, \quad \forall t \in T \quad (5.6)$$

$$p_t^l + E * p_t^c = p_t^d + p_t^b, \quad \forall t \in T \quad (5.7)$$

Ο πρώτος περιορισμός διασφαλίζει πως η αποθηκευμένη στην μπαταρία ενέργεια την χρονική στιγμή  $t$  θα συσχετίζεται σωστά με αυτήν που ήταν αποθηκευμένη την προηγούμενη χρονική στιγμή.

Ο δεύτερος περιορισμός εξασφαλίζει πως η αποθηκευμένη ενέργεια στην μπαταρία στην αρχή και στο τέλος της περιόδου εξέτασης θα είναι ίδια.

Ο τρίτος περιορισμός διασφαλίζει πως η αποθηκευμένη στη μπαταρία θα βρίσκεται πάντα ανάμεσα στην ελάχιστη ενέργεια που επιθυμούμε να έχουμε (π.χ. 10% της ονομαστικής) και στην ονομαστική.

Ο τέταρτος και ο πέμπτος περιορισμός διαφυλάσσουν πως αφενός η μπαταρία θα φορτίζει και εκφορτίζει με ρυθμό (ισχύς) που δεν παραβιάζει τα φυσικά όρια της μπαταρίας και αφετέρου πως δεν θα υπάρχει ταυτόχρονη φόρτιση και εκφόρτιση της μπαταρίας. Το δεύτερο αυτό ζητούμενο επιτυγχάνεται με την χρήση δυαδικής μεταβλητής απόφασης που λαμβάνει την τιμή 0 ή 1.

Ο έκτος περιορισμός επιβάλλει πως σε κάθε χρονική στιγμή τηρείται η αρχή διατήρησης της ενέργειας.

### 5.3 Μαθηματική Διατύπωση Στοχαστικού Μοντέλου

Το μοντέλο που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο, εάν και αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο πρώτο βήμα στην μεθοδολογία της διπλωματικής αυτής, δεν επαρκεί για την επίλυση του πλήρους προβλήματος καθώς:

- Στα ντετερμινιστικά μοντέλα οι παράμετροι όλοι λαμβάνουν μοναδική τιμή και έτσι η αβεβαιότητα που ενδεχομένως να εμφανίζεται σε κάποιες παραμέτρους δεν προσομοιώνεται επαρκώς.
- Στο πλήρες πρόβλημα ο Prosumer (κάτοχος της μπαταρίας) δύναται να ανταλλάξει ενέργεια και με άλλους καταναλωτές σε κάποια P2P αγορά

Για την επίλυση, λοιπόν, του πλήρους προβλήματος, θα τροποποιήσουμε το αρχικό ντετερμινιστικό μοντέλο και θα χρησιμοποιήσουμε ένα στοχαστικό μοντέλο δυο σταδίων που ενδείκνυται για προβλήματα βελτιστοποίησης τέτοιου είδους (two stage optimization problems). Εφόσον το μοντέλο που θα κατασκευαστεί είναι στοχαστικό οι μεταβλητές απόφασης δευτέρου σταδίου θα εξαρτώνται πέραν από τον χρόνο και από τα σενάρια που παρακάτω συμβολίζονται με την χρήση του γράμματος  $w$ .

Στο μοντέλο που κατασκευάζεται η μεταβλητή απόφασης πρώτου σταδίου θα είναι η ενέργεια που επιθυμεί να ανταλλάξει ο Prosumer στην p2p αγορά για κάποια δεδομένη τιμή ενέργειας στην αγορά αυτή και όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές θα είναι οι μεταβλητές απόφασης δευτέρου σταδίου. Σημειώνεται ότι για την υλοποίηση του στοχαστικού προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον οι μεταβλητές  $x_{t,w}^+$  και  $x_{t,w}^-$ , ενώ επίσης χρησιμοποιήθηκε και η παράμετρος  $c_t$ . Οι μεταβλητές εκφράζουν την εισαγόμενη και την εξαγόμενη ενέργεια αντίστοιχα ενώ η παράμετρος εκφράζει τις χρεώσεις που όταν εισάγεται ενέργεια (και μόνο τότε) για την χρήση του δικτύου. Τέλος, στο στοχαστικό πρόβλημα που καταστρώσαμε το φορτίο και η παραγωγή των φωτοβολταϊκών δεν θεωρούνται δύο ξεχωριστές μεταβλητές, τις συνδυάζουμε σε μια μεταβλητή την  $p^l$ , η οποία αποτελεί ουσιαστικά την διαφορά του φορτίου και της παραγωγής. Με την προϋπόθεση ότι η παραγωγή των φωτοβολταϊκών δεν είναι πολύ μεγάλη, η παραδοχή αυτή δεν αλλοιώνει το αποτέλεσμα και μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα του προβλήματος.

Η αντικειμενική συνάρτηση καθώς και οι περιορισμοί του προβλήματος παρατίθενται στις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\min \left( \lambda_n * p_n^{p2p} + E_W \left[ \sum_{t \in T} (p_{t,w}^b * \lambda_t^b - p_{t,w}^s * \lambda_t^s + c_t * x_{t,w}^+) \right] \right. \\ \left. + E_W \left[ \sum_{t \in T \setminus t_0} p_{t,w}^{p2p} * \lambda_{t,w} \right] \right) \quad (5.8)$$

Και οι περιορισμοί θα είναι:

$$C_{t,w} = C_{t-1,w} + p_{t-1,w}^c * E - p_{t-1,w}^d, \forall t \geq t_0, \forall w \in W \quad (5.9)$$

$$C_{min} \leq C_{t,w} \leq C_{max}, \forall t \geq t_0, \forall w \in W \quad (5.10)$$

$$C_{t_0,w} = C_{n_T,w} = C_{initial}, \forall w \in W \quad (5.11)$$

$$0 \leq p_{t,w}^c * E \leq u_{t,w} * P_N, \forall t \geq t_0, \forall w \in W \quad (5.12)$$

$$0 \leq p_{t,w}^d \leq (1 - u_{t,w}) * P_N, \forall t \geq t_0, \forall w \in W \quad (5.13)$$

$$p_n^{p2p} + p_{t_0,w}^b - p_{t_0,w}^s = p_{t_0,w}^l + E * p_{t_0,w}^c - p_{t_0,w}^d, \forall w \in W \quad (5.14)$$

$$p_{t,w}^{p2p} + p_{t,w}^b - p_{t,w}^s = p_{t,w}^l + E * p_{t,w}^c - p_{t,w}^d, \forall t \geq t_0, \forall w \in W \quad (5.15)$$

$$p_{t,w}^l + E * p_{t,w}^c - p_{t,w}^d = x_{t,w}^+ - x_{t,w}^-, \forall t \in T, \forall w \in W \quad (5.16)$$

$$0 \leq x_{t,w}^+ \leq g_{t,w} * M, \forall t \geq t_0, \forall w \in W \quad (5.17)$$

$$0 \leq x_{t,w}^- \leq (1 - g_{t,w}) * M, \forall t \geq t_0, \forall w \in W \quad (5.18)$$

$$0 \leq p_{t,w}^b \leq x_{t,w}^+, \forall t \geq t_0, \forall w \in W \quad (5.19)$$

$$0 \leq p_{t,w}^s \leq x_{t,w}^-, \forall t \geq t_0, \forall w \in W \quad (5.20)$$

Οι περιορισμοί (5.9) – (5.11) είναι απαραίτητοι για να επιβληθεί στην μπαταρία η επιθυμητή συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, ο (5.9) προσδιορίζει την συνολική

αποθηκευμένη ενέργεια στην αρχή του βήματος  $t$  (opening capacity) για κάθε σενάριο  $w$  ανάλογα με την ενέργεια που υπήρχε στην μπαταρία στο χρονικό βήμα και τις επιλογές φόρτισης και εκφόρτισης που συνέβησαν. Ταυτόχρονα, ο (5.10) διασφαλίζει πως η αποθηκευμένη ενέργεια θα βρίσκεται πάντα εντός των επιθυμητών ορίων και τέλος ο (5.11) επιβάλλει την διατήρηση της αρχικής αποθηκευμένης ενέργειας στην μπαταρία μετά το πέρας της περιόδου μελέτης.

Οι περιορισμοί (5.12) και (5.13) περιορίζουν την ισχύ φόρτισης και εκφόρτισης στις μέγιστες τιμές που επιτρέπει ο κατασκευαστής της μπαταρίας.

Οι περιορισμοί (5.14) και (5.15) χρησιμοποιούνται για να διασφαλιστεί το ισοζύγιο ενέργειας μεταξύ τη φυσικής ροής ενέργειας και της ενέργειας που ανταλλάσσεται/εμπορεύεται, τόσο στο πρώτο στάδιο (περιορισμός (5.14)) όσο και στο δεύτερο (περιορισμός(5.15)). Αξίζει να σημειωθεί πως στον περιορισμό (5.17) ο όρος  $p_n^{p2p}$ , που εμφανίζεται αποτελεί την μεταβλητή απόφασης πρώτου σταδίου και συνεπώς δεν εξαρτάται ούτε από το σενάριο ούτε από το χρονικό βήμα.

Οι περιορισμοί (5.16)-(5.18) εισάγονται για να διαχωριστεί η ενέργεια που εισάγεται από αυτήν που εξάγεται καθώς φορολόγηση και χρεώσεις δικτύου επιβάλλονται μόνο στην πρώτη. Το  $M$  που εμφανίζεται είναι ένας πολύ μεγάλος αριθμός που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με μια binary μεταβλητή για να καταστήσει αμοιβαίως αποκλειόμενες τις δύο μεταβλητές.

Τέλος, οι περιορισμοί (5.19) και (5.20) χρειάζονται για να επιβάλλουν την χρήση του δικτύου μόνο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών που δεν εξυπηρετούνται από τις ανταλλαγές στην P2P αγορά. Το σετ αυτών των περιορισμών, σε συνδυασμό με τον περιορισμό (5.16) απαγορεύει την δημιουργία arbitrage μεταξύ των δυο αγορών από τον καταναλωτή, καθώς του επιτρέπει να αγοράσει (αντίστοιχα να πουλήσει) το πολύ όση ενέργεια χρειάζεται να εισάγει (ή να εξάγει αντίστοιχα) για να ικανοποιήσει τις ενεργειακές ανάγκες του φυσικού συστήματος όπως προκύπτουν από τον περιορισμό (5.16)

## 5.4 Σενάρια

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 3 η επιτυχία ενός στοχαστικού μοντέλου βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην κατασκευή ενός επαρκούς και αντιπροσωπευτικού δείγματος σεναρίων. Το σύνολο  $W$  των σεναρίων που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος θα πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλο για να προσομοιώσει μεγάλο μέρος της αβεβαιότητας αλλά ταυτόχρονα δεν θα πρέπει να είναι τόσο μεγάλο που θα καθιστά τους υπολογισμούς πολύ πιο σύνθετους με αποτέλεσμα να αυξάνει σημαντικά τον χρόνο των προσομοιώσεων. Στη παρούσα διπλωματική εργασία, επιθυμούμε να φτιάξουμε ένα σύνολο σεναρίων  $W$  για το φορτίο του καταναλωτή μας που εμφανίζει αβεβαιότητα. Εντούτοις, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την παραγωγή των σεναρίων δεν μπορεί να είναι ανεξάρτητη των δεδομένων που μελετάμε καθώς σημαντικό κριτήριο για την επιλογή της αποτελούν τα χαρακτηριστικά των δεδομένων αυτών. Για αυτόν τον λόγο μέθοδος κατασκευής των σεναρίων παρουσιάζεται εκτενέστερα στο ακόλουθο κεφάλαιο όπου και δίνονται τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήσαμε.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Μελέτη Περίπτωσης και Αποτελέσματα

### 6.1 Περιβάλλον Προσομοιώσεων

Η υλοποίηση των παραπάνω μοντέλων καθώς και η επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης έγιναν με χρήση της γλώσσας υψηλού επιπέδου Python[35]. Η βιβλιοθήκη Pyomo[36] χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του προβλήματος βελτιστοποίησης, ενώ ο επίλυτής προβλημάτων βελτιστοποίησης Gurobi[37] χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του. Για την δημιουργία του μοντέλου *SARIMA* που χρησιμοποιήθηκε για το forecast των τιμών του φορτίου, έγινε χρήση της βιβλιοθήκης statsmodels[38]. Τέλος, απαραίτητες για την δημιουργία του κώδικα ήταν και οι βιβλιοθήκες pandas[39] και NumPy[40], ενώ για την οπτικοποίηση χρησιμοποιήθηκαν οι Matplotlib[41] και η Seaborn[42].

### 6.2 Δεδομένα Εισόδου

Το μοντέλο που περιεγράφηκε και κατασκευάστηκε στην κεφάλαιο 4 είναι γενικό, μπορεί δηλαδή να χρησιμοποιηθεί ανεξαρτήτως χρονικών βημάτων, παραμέτρων μπαταρίας ή δεδομένων φορτίου. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα.

Για τις τιμές του Ηλεκτρικού Ρεύματος, χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα για την τιμή της Αγοράς Επόμενης Ημέρας που είναι διαθέσιμα από το Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας [43]. Καθώς για τις ανάγκες του προβλήματος χρειαζόμαστε τρεις διαφορετικές τιμές σε κάθε χρονικό βήμα, τις  $\lambda_t^b$ ,  $\lambda_t^s$  και  $\lambda_{t,w}$  θεωρήσαμε πως για κάθε  $t \in T$  η  $\lambda_t^b$  είναι μεγαλύτερη από την spot price και η  $\lambda_t^s$  είναι μικρότερη. Όσον αφορά την  $\lambda_{t,w}$ , δηλαδή την τιμή στην p2p αγορά, εφόσον δεν υπάρχουν ιστορικά δεδομένα για τις τιμές ενέργειας σε p2p αγορές την θεωρήσαμε ίση με την spot price για κάθε  $t \in T/t_0$ .

Για τις καταναλώσεις, στο ντετερμινιστικό μοντέλο χρησιμοποιήσαμε ένα προφίλ φορτίου εικοσιτεσσάρων ωρών και στο στοχαστικό χρησιμοποιήσαμε δεδομένα 12 εβδομάδων για να εκπαιδεύσουμε το μοντέλο *SARIMA* και να κατασκευάσουμε τα σενάρια που απαιτούνται.

Για την μπαταρία επιλέχτηκαν οι εξής παράμετροι:

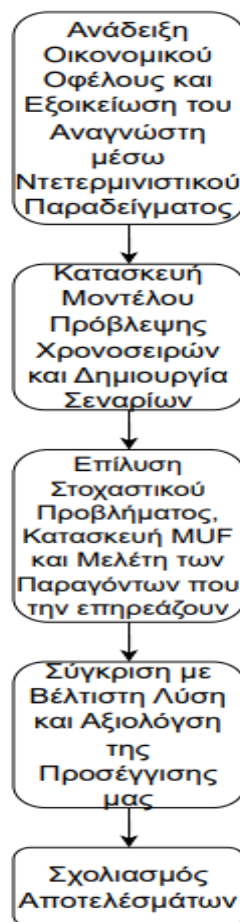
Παράμετρος	Τιμή
$C_{max}$	13 kWh
$C_{min}$	1,3kWh
$E$	0.9
$P_N$	7kW

Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε τιμές που συχνά εμφανίζονται σε μπαταρίες οικιακής χρήσης και για αυτό θεωρήθηκαν κατάλληλες για την παρούσα εργασία. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι το  $C_{min}$  εκφράζει την ελάχιστη χωρητικότητα που επιθυμούμε να έχουμε στην μπαταρία και με την οποία κάνουμε τους υπολογισμούς, στη πράξη το  $C_{min}$  μπορεί να είναι μηδέν αλλά επιλέγουμε πάντα να κρατάμε κάποια ενέργεια στη μπαταρία για λόγους εφεδρείας σε περίπτωση κάποιας διακοπής της παροχής.

### 6.3 Παρουσίαση των Βημάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται αναφορικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την υλοποίηση των προσομοιώσεων και την εξαγωγή αποτελεσμάτων στην παρούσα διπλωματική. Επιπλέον, δίνεται ένα διάγραμμα ροής που βοηθάει τον αναγνώστη να κατανοήσει την λογική ακολουθία και τον σκοπό των βημάτων αυτών.

1. Στην ενότητα 6.4, παρουσιάζεται και επιλύεται ένα απλό ντετερμινιστικό πρόβλημα για να αναδειχθούν τα οικονομικά οφέλη της χρήσης της μπαταρίας και να εξοικειωθεί ο αναγνώστης με τα προβλήματα βελτιστοποίησης πριν παρουσιαστεί το πολυπλοκότερο στοχαστικό
2. Στην ενότητα 6.5, παρουσιάζεται το μοντέλο *SARIMA* που απαιτείται για την κατασκευή των σεναρίων.
3. Στην ενότητα 6.6, το στοχαστικό πρόβλημα επιλύεται και κατασκευάζονται οι MUF, επίσης μελετώνται οι παράγοντες που επηρεάζουν το σχήμα τους
4. Στην ενότητα 6.7, μετά την αποκάλυψη των τιμών του φορτίου προσδιορίζεται η πραγματικά βέλτιστη συμπεριφορά της μπαταρίας και χρησιμοποιείται για αξιολόγηση της προσέγγισής μας.
5. Στην ενότητα 6.8, γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

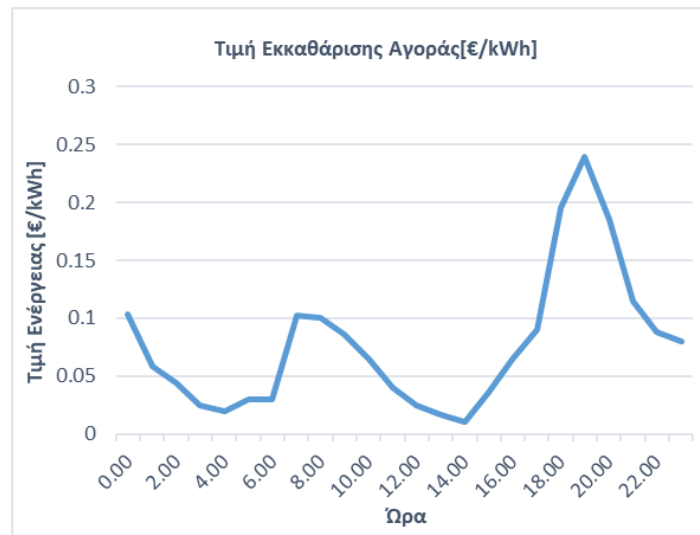


Εικόνα 11-Διάγραμμα Ροής Κεφαλαίου 6

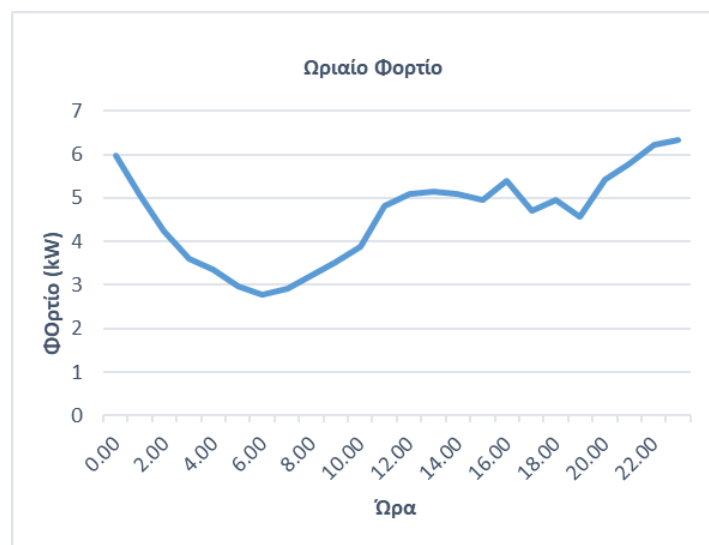
## 6.4 Ντετερμινιστικό Μοντέλο και Οικονομικά Οφέλη Βέλτιστης Χρήσης της Μπαταρίας

Πριν επιλυθεί το πρόβλημα της συμμετοχής του prosumer στην P2P αγορά κρίθηκε σκόπιμο να αναδειχθούν τόσο τα οικονομικά οφέλη που δύναται να προκύψουν από ορθή χρήση μιας μπαταρίας όσο και η σημασία της καλής επίγνωσης των παραμέτρων του προβλήματος. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, σε πρώτο χρόνο το φορτίο θεωρείται δεδομένο και κατασκευάζεται ένα ντετερμινιστικό μοντέλο το οποίο λαμβάνει τις βέλτιστες αποφάσεις για την φόρτιση και την εκφόρτιση της μπαταρίας στη διάρκεια του υπό εξέταση εικοσιτετράωρου.

Στα ακόλουθα σχήματα, δίνεται η τιμή εκκαθάρισης της αγοράς επόμενης ημέρας στην διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου που θα χρησιμοποιήσουμε ως τιμή αναφοράς καθώς και η το ωριαίο προφίλ φορτίου του prosumer που μελετάμε.



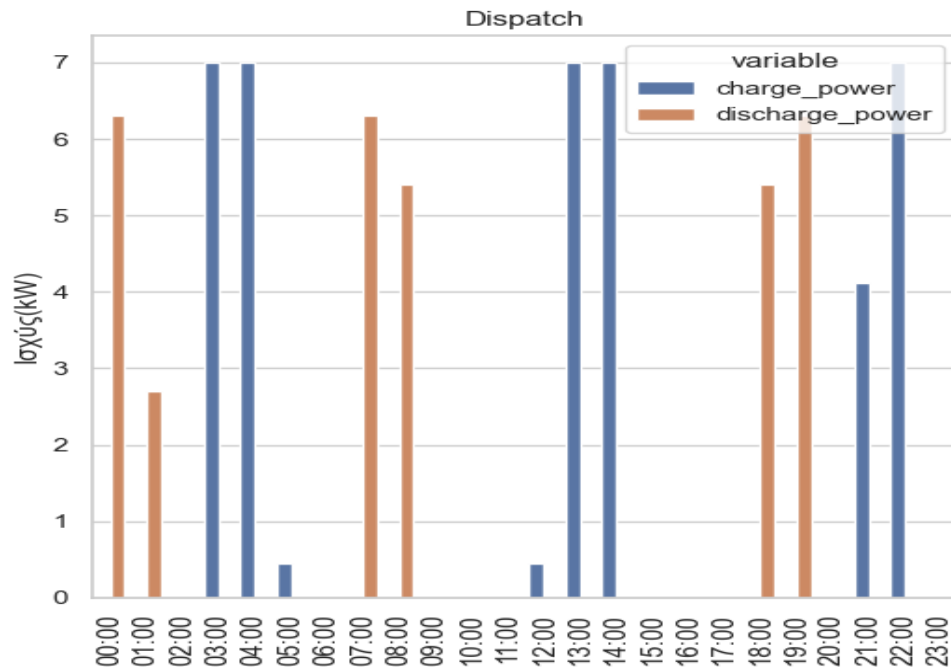
*Εικόνα 12-Τιμή Εκκαθάρισης Αγοράς*



*Εικόνα 13-Προφίλ φορτίου*

Τα παραπάνω δεδομένα τροφοδοτούνται στο ντετερμινιστικό γραμμικό μοντέλο και το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται με σκοπό να αποφασιστεί η συμπεριφορά φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας στα επιμέρους χρονικά βήματα και να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος.

Όπως περιμέναμε και απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα, η μπαταρία θα φορτίζει όταν η τιμή της ενέργειας θα είναι χαμηλή και θα εκφορτίζει όταν η τιμή της ενέργειας θα είναι υψηλή, πάντα σεβόμενοι τους περιορισμούς του φυσικού συστήματος.



**Εικόνα 14-Φόρτιση και Εκφόρτιση μπαταρίας ανά ώρα**

Εν και η εγκατάσταση τέτοιων μπαταριών συνήθως προτείνεται σε συνδυασμό με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστημάτων, πολλά οικονομικά οφέλη δύναται να προκύψουν για τον prosumer και από την αυτόνομη χρήση της. Στην ακόλουθη εικόνα δίνεται μια σύγκριση του συνολικού ημερήσιου κόστους που θα κληθεί να πληρώσει ο prosumer με και χωρίς την χρήση της μπαταρίας.

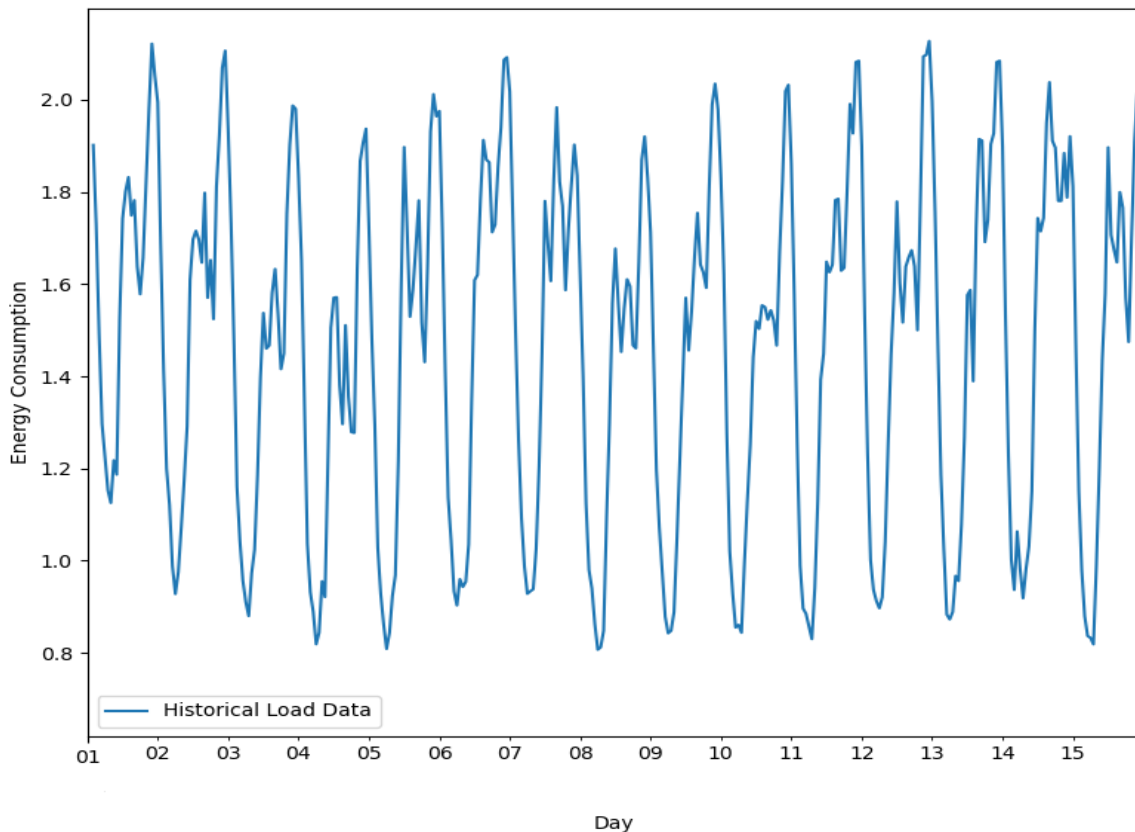


**Εικόνα 15-Ημερήσιο Κόστος με και χωρίς Μπαταρία**

Στην επόμενη ενότητα εξετάζεται το πως το φορτίο που στην πραγματικότητα εμφανίζει αβεβαιότητα, και δεν είναι γνωστό όπως θεωρήσαμε, μπορεί να εκτιμηθεί προκειμένου να μπορέσουμε να προσεγγίσουμε την βέλτιστη λύση.

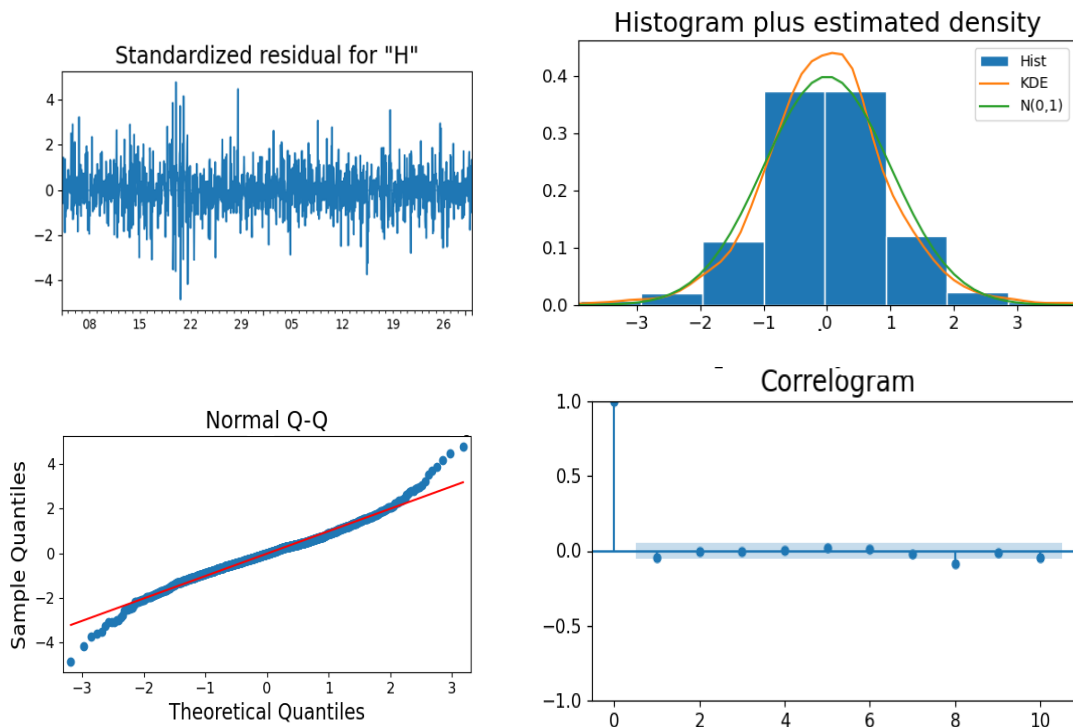
## 6.5 Μοντέλο Πρόβλεψης και Κατασκευή Σεναρίων

Σε πρώτο χρόνο κατασκευάζουμε ένα μοντέλο πρόβλεψης χρονοσειρών  $SARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q, S)$  που αφού εκπαιδευτεί σε προηγούμενά δεδομένα προβλέπει το συνολικό φορτίο της επόμενης ημέρας. Αξίζει να σημειώσουμε πως στη μεθοδολογία μας έχουμε θεωρήσει άγνωστη μεταβλητή το άθροισμα των καταναλώσεων και της παραγωγής του φ/β συστήματος του Prosumer και με αυτόν τον τρόπο έχουμε μοναδική άγνωστη μεταβλητή την  $p^l$ . Ο λόγος που επιλέξαμε αυτό το μοντέλο έναντι άλλων όπως τα απλά  $ARMA(p, q)$  και  $ARIMA(p, d, q)$  είναι πως, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα, τα δεδομένα μας εμφανίζουν εποχικότητα με περίοδο 24 ωρών την οποία επιθυμούμε να λάβουμε υπόψιν.



*Εικόνα 16-Καμπύλη Φορτίου Οικιακών Καταναλώσεων για τις πρώτες 15 μέρες του Ιανουαρίου*

Η επιλογή του καταλληλότερου συνόλου για τις παραμέτρους του μοντέλου έγινε με βάση το Akaike Information Criterion [44]. Για τις παραμέτρους  $q, d, Q$  και  $D$  εξετάστηκαν οι τιμές 0 και 1, ενώ για τις παραμέτρους  $p$  και  $P$  οι τιμές 0, 1, 2, 3 και 4. Το μοντέλο που τελικά εμφάνιση την μικρότερη AIC τιμή και επιλέχθηκε ήταν το  $SARIMA(3, 0, 1) \times (2, 1, 1, 24)$ .



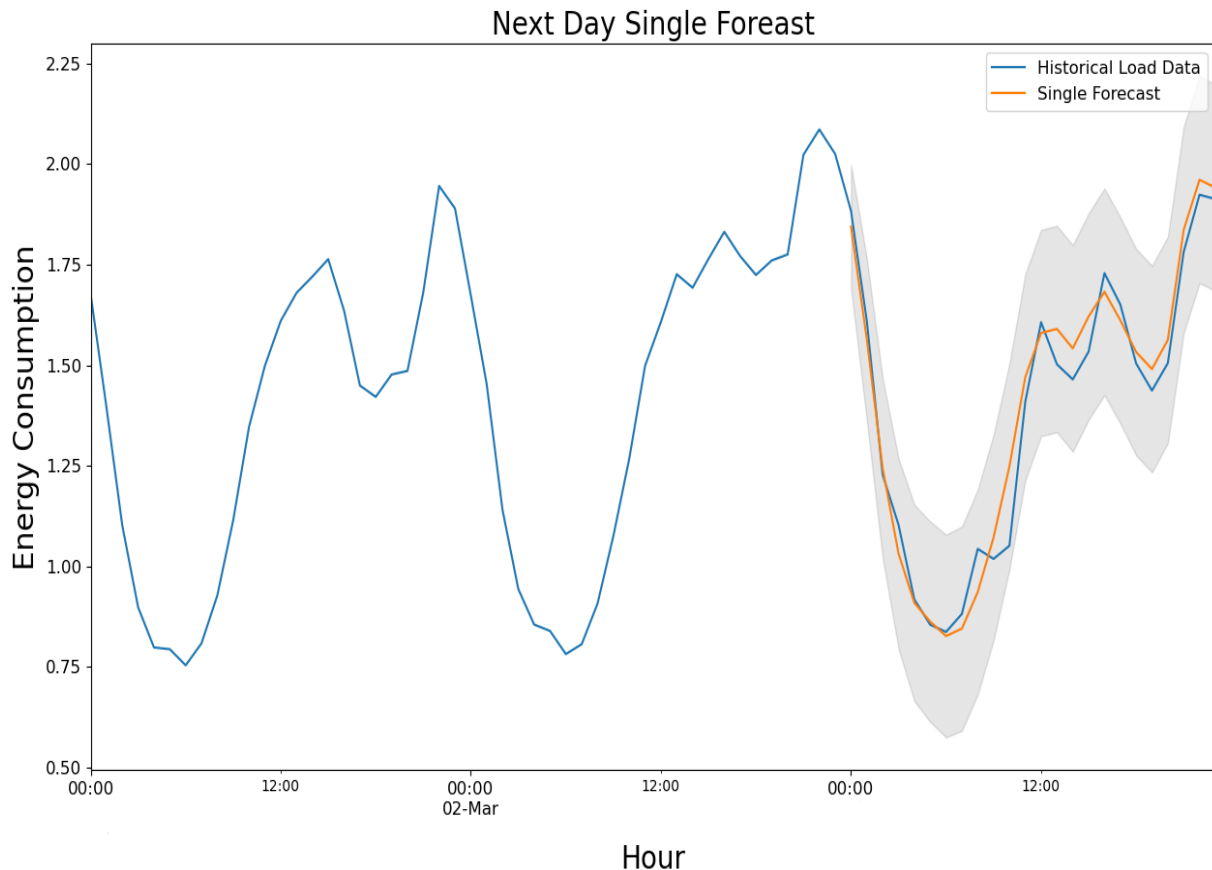
**Εικόνα 17-**Διαγράμματα Αξιολόγησης Μοντέλου

Τα τέσσερα διαγράμματα όπως αναφέραμε και στα Κεφάλαια της θεωρίας χρησιμοποιούνται συχνά για την αξιολόγηση των μοντέλων πρόβλεψης χρονοσειρών. Τα διαγράμματα αυτά σχεδιάστηκαν και στην περίπτωση που εξετάζουμε και παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα:

1. Στο διάγραμμα των standardized residuals δεν βλέπουμε εμφανή μοτίβα, η μέση τιμή των υπολοίπων είναι κοντά στο 0 και η διακύμανση ως επί το πλείστον ενιαία.
2. Από το Ιστόγραμμα και την σύγκριση της καμπύλης Εκτίμηση της Κατανομής (KDE) σε σχέση με την κανονική κατανομή ( $N(0,1)$ ) βλέπουμε πως τα υπόλοιπα (residuals) ακολουθούν κανονική κατανομή.
3. Από το Q-Q plot επιβεβαιώνουμε και πάλι πως τα υπόλοιπα ακολουθούν κανονική κατανομή. Παρατηρούμε πως στις άκρες φαίνεται να υπάρχει μία απόκλιση, αυτό είναι απολύτως αναμενόμενο ακόμα και όταν η εφαρμογή των μοντέλων είναι πάρα πολύ καλή. Για να είναι καλή η εφαρμογή μας, το σημαντικό είναι, η πλειοψηφία των σημείων του Q-Q plot να βρίσκεται πάνω στην ευθεία γραμμή, όπως και συμβαίνει στην περίπτωση μας.
4. Τέλος, από το διάγραμμα Αυτοσυσχέτισης, βλέπουμε ότι η συσχέτιση των υπολοίπων για όλες τις υστερήσεις μεγαλύτερες του 0 είναι ασήμαντη, όπως και θα θέλαμε να είναι.

Με βάση τα παραπάνω, μπορούμε να πούμε ότι τα μοντέλο πρόβλεψης *SARIMA* έχει εφαρμοστεί πολύ καλά πάνω στα δεδομένα και μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για προβλέψεις και κατασκευή σεναρίων.

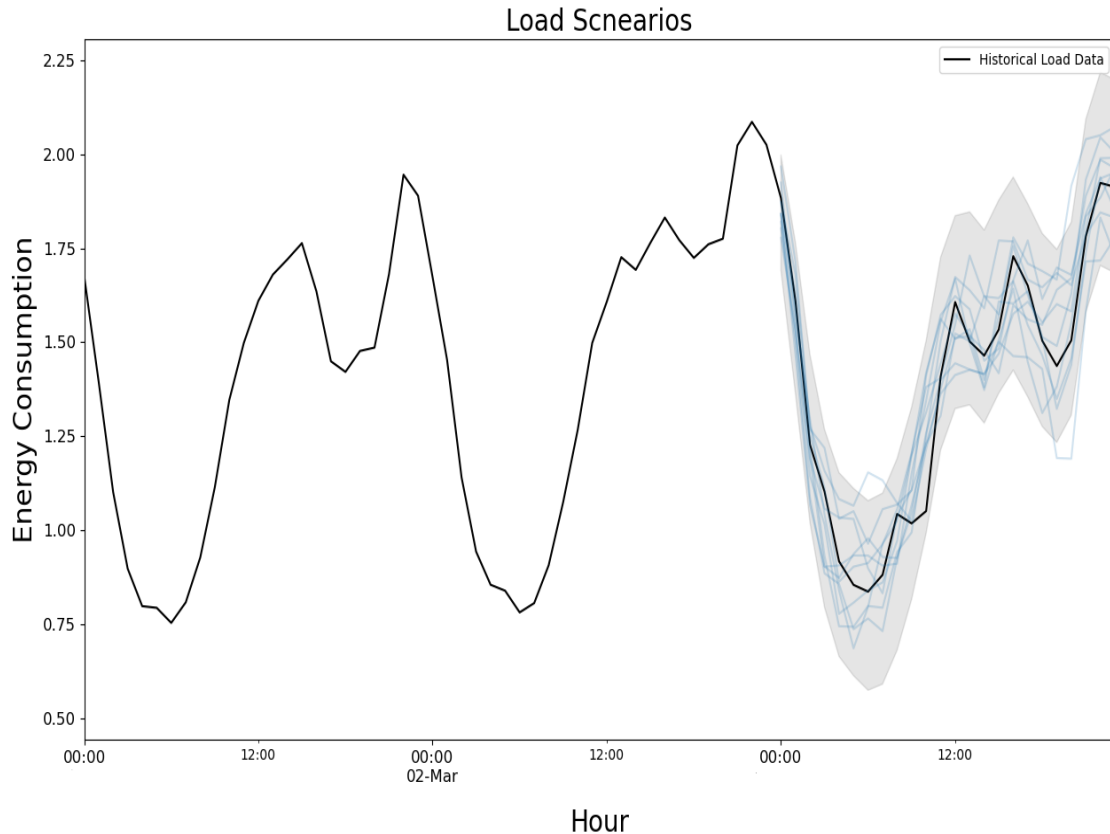
Στην παρακάτω εικόνα παρατίθεται η πρόβλεψη που έκανε το μοντέλο για την τελευταία ημέρα του συνόλου δεδομένων μας, μαζί με τις πραγματικές τιμές τις μέρες αυτής. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή γύρω από την πρόβλεψη αντιστοιχεί σε διάστημα εμπιστοσύνης 95%, εν ολίγοις αυτό σημαίνει πως η πιθανότητα η τιμή του φορτίου της επόμενης ημέρας να είναι εντός της γκρι περιοχής είναι 95%.



**Εικόνα 18-Πρόβλεψη Φορτίου Επόμενης Ημέρα**

Σε δεύτερο χρόνο, αντί να χρησιμοποιήσουμε απευθείας την πρόβλεψη του *SARIMA*, όπως θα κάναμε εάν χρησιμοποιήσουμε κάποιο ντετερμινιστικό μοντέλο, επιθυμούμε να κατασκευάσουμε ένα σύνολο προβλέψεων των πιθανών προφίλ φορτίου της επομένης μέρας, για τον σκοπό αυτό με την βοήθεια του μοντέλου που έχουμε κατασκευάσει παράγουμε 10 πιθανά σενάρια για το φορτίο. Η λογική κατασκευής των σεναρίων είναι αυτή που εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 2, όπου και μιλήσαμε για την προσομοίωση Monte Carlo. Το *SARIMA* μοντέλο εκπαιδεύεται σε παρελθοντικά δεδομένα και ανιχνεύει τα trend που εμφανίζονται σε αυτά καθώς και την κατανομή που φαίνεται να εμφανίζεται στα σφάλματα. Σε επόμενο χρόνο, προκειμένου να κατασκευάσει σενάρια χρησιμοποιεί την κατανομή αυτή που ακολουθούν τα σφάλματα για να παράξει ένα τυχαίο πλήθος σεναρίων. Το γεγονός ότι η κατανομή των σφαλμάτων είναι γνωστή καθιστά την εφαρμογή της προσομοίωσης Monte Carlo πολύ ευκολότερη καθώς δεν χρειάζεται πλέον να υποθέσουμε πράγματα για αυτήν, το ίδιο το μοντέλο την έχει ανιχνεύσει.

Στην ακόλουθη εικόνα δίνονται τα 10 σενάρια που κατασκευάσαμε. Επιλέξαμε έναν περιορισμένο αριθμό σεναρίων καθώς στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν μας ενδιαφέρει να δείξουμε ποιο είναι το ιδανικό πλήθος σεναρίων που απαιτείται για βέλτιστη πρόβλεψη αλλά να δείξουμε πως τέτοιες μέθοδοι μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμα εργαλεία για την επίλυση του προβλήματος που μελετάμε, δηλαδή για τον υπολογισμό της οικονομικότερης διαχείρισης της μπαταρίας, μέσω της επίλυσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, και την μετέπειτα κατάστρωση ενός εργαλείου (της *MUF*) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκκαθάριση μίας P2P αγοράς.



**Εικόνα 19-Forecast Επόμενης Ημέρας και Κατασκευή Σεναρίων**

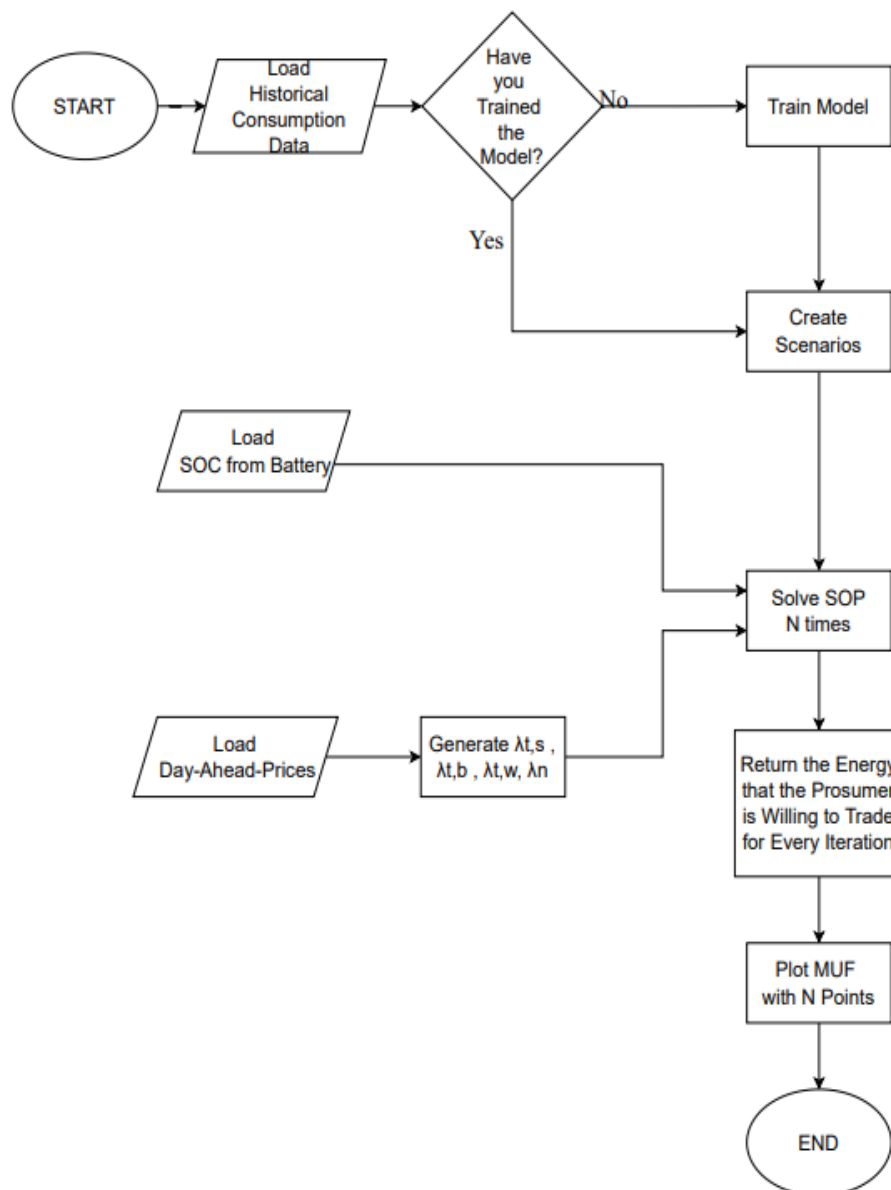
Έχοντας πλέον χτίσει και αξιολογήσει το μοντέλο που απαιτείται για την κατασκευή των σεναρίων και την μετέπειτα επίλυση του στοχαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης μπορούμε να προχωρήσουμε στην επίλυση του πλήρους προβλήματος που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο.



## 6.6 Επίλυση Πλήρους Προβλήματος με Χρήση του Στοχαστικού Μοντέλου και Κατάστρωση Συναρτήσεων Οριακής Χρησιμότητας

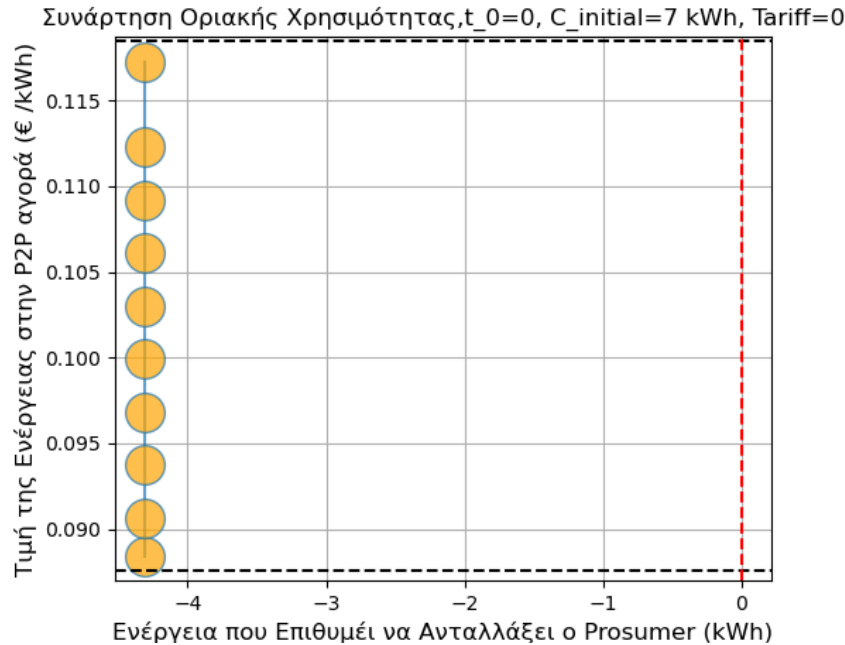
### 6.6.1 Κατασκευή και Επεξήγηση της Συνάρτησης Οριακής Χρησιμότητας

Για κάποια χρονική στιγμή  $t_0$  που μας ενδιαφέρει, αποφασίζεται ένα πλήθος σεναρίων που θα κατασκευαστούν μέσω του μοντέλου SARIMA και το στοχαστικό πρόβλημα δύο σταδίων που περιεγράφηκε στην ενότητα 5.2 επιλύεται για διαφορετικές τιμές τις παραμέτρου  $\lambda_n$ . Εν συνεχεία, η μεταβλητή απόφασης πρώτου σταδίου,  $p_n^{p2p}$ , καταγράφεται σε κάθε επίλυση και τα ζεύγη τιμών  $(p_n^{p2p}, \lambda_n)$  συνδυάζονται και έτσι δημιουργείται η συνάρτηση οριακής χρησιμότητας. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται το διάγραμμα ροής που ακολουθείτε για την κατασκευή της Συνάρτησης Οριακής Χρησιμότητας.



Εικόνα 20-Διάγραμμα Ροής για την Κατασκευή της MUF

Για την κατασκευή της κάθε MUF έχουμε επιλέξει την χρήση 10 ζευγών  $(p_n^{p2p}, \lambda_n)$ , δηλαδή για την κατασκευή της κάθε MUF έχουμε λύσει το στοχαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης 10 φορές μεταβάλλοντας την  $\lambda_n$  από  $\lambda_t^b$  μέχρι  $\lambda_t^s$  με σκοπό να δούμε και να καταγράψουμε ποια είναι η ενέργεια που συμφέρει τον Prosumer να εμπορευτεί προκειμένου να ελαχιστοποιήσει το κόστος του και πως αυτή επηρεάζεται από τις μεταβολές στην αγορά ενέργειας P2P. Στην ακόλουθη εικόνα βλέπουμε την MUF του Prosumer για το χρονικό βήμα  $t_0 = 0$ , αρχική φόρτιση της μπαταρίας  $C = 7$  kWh, απουσία tariff στην εισαγόμενη ενέργεια



**Εικόνα 21-Συνάρτηση Οριακής Χρησιμότητας για  $t_0 = 0$  και  $C_{initial} = 7$  kWh χωρίς tariff**

Στον κατακόρυφο άξονα δίνεται η τιμή της ενέργειας στην P2P αγορά και στον οριζόντιο άξονα δίνεται η ενέργεια που επιθυμεί ο Prosumer να εμπορευτεί σε αυτήν όπως προέκυψε από την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα βλέπουμε πως η προθυμία του Prosumer να εμπορευτεί ενέργεια δεν μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται η τιμή της ενέργειας, πιο συγκεκριμένα ο ίδιος επιθυμεί σε όλες τις περιπτώσεις να πουλήσει περίπου 4,5 kWh ενέργειας.

Υπενθυμίζεται ότι κατά σύμβαση θεωρούμε αρνητική την ενέργεια που εμπορεύεται ο prosumer στην P2P αγορά θετική όταν αγοράζει και αρνητική όταν πουλάει.

### 6.6.2 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Μορφή της Συνάρτησης Οριακής Χρησιμότητας

Αξίζει να σημειώσουμε πως το σχήμα της συνάρτησης οριακής χρησιμότητας επηρεάζεται σημαντικά όταν μεταβάλλεται:

1. Η αρχική φόρτιση της μπαταρίας
2. Το χρονικό βήμα που εξετάζουμε
3. Η παρουσία ή απουσία tariff

Ακολούθως, εξετάζουμε πως επηρεάζεται η προθυμία του Prosumer να εμπορευτεί ενέργεια

και συνεπώς πως μεταβάλλεται και το σχήμα των συναρτήσεων οριακής χρησιμότητας όταν μεταβάλλονται η παραπάνω δυο παράμετροι, για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούμε τρία χρονικά βήματα τα:

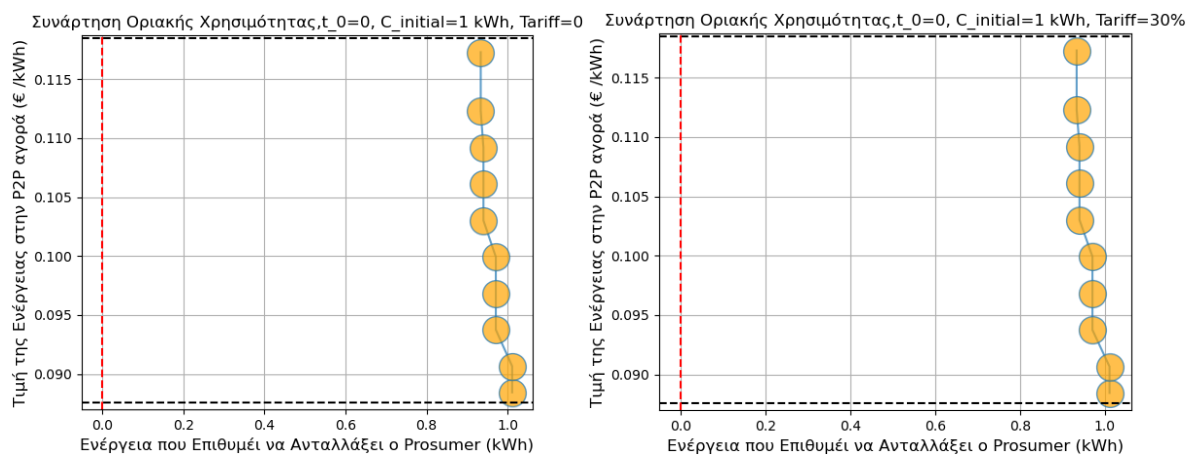
1.  $t_0 = 0$ , στο οποίο η τιμή της ενέργειας έχει μια ενδιάμεση τιμή
2.  $t_0 = 4$ , στο οποίο η τιμή της ενέργειας έχει πολύ χαμηλή τιμή
3.  $t_0 = 19$ , στο οποίο η τιμή της ενέργειας έχει πολύ υψηλή τιμή

Και σε κάθε χρονικό βήμα εξετάζουμε πέντε περιπτώσεις διαφορετικές αρχικής φόρτισης, οι αρχικές φορτίσεις που επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε αντιστοιχούν στην ελάχιστη, την μέγιστη και την μέση τιμή της συνολικής χωρητικότητας της μπαταρίας καθώς και σε δύο ενδιάμεσες τιμές.

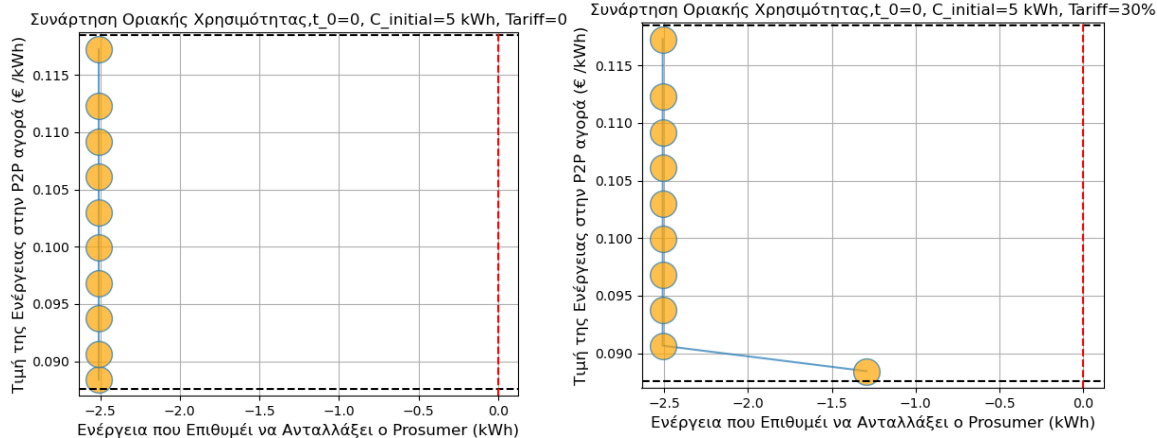
1.  $C_{min}=1$  kWh
2.  $C_1=5$  kWh
3.  $C_{aveg} = 7$  kWh
4.  $C_2 = 9$  kWh
5.  $C_{max} = 13$  kWh

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας, στα γραφήματα που βρίσκονται στη δεξιά πλευρά έχει θεωρηθεί πως δεν υπάρχει καμία χρέωση για την εισαγόμενη από το δίκτυο ενέργεια ενώ σε αυτά στα αριστερά έχει θεωρηθεί χρέωση 30 τοις εκατό επί της τιμής εκκαθάρισης αγοράς σε εκείνο το χρονικό βήμα.

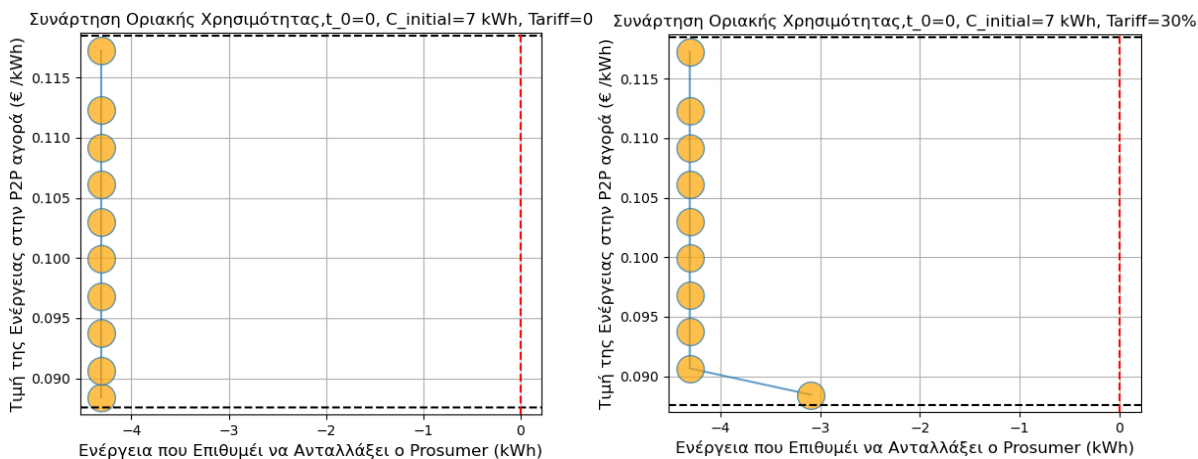
Για  $t_0 = 0$ , λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα:



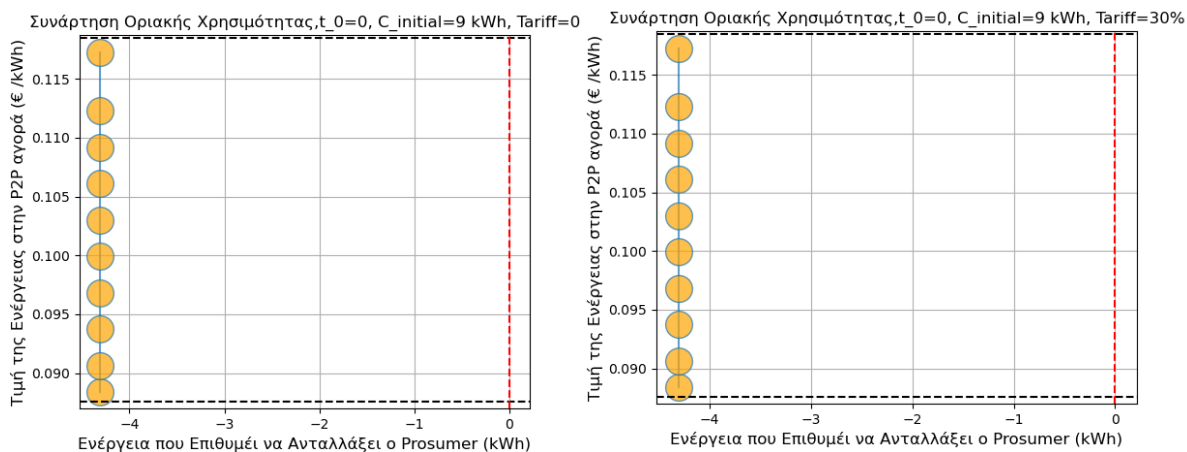
**Εικόνα 22-Αποτελέσματα για  $t_0 = 0$  και  $C_{initial} = 1$  kWh με και χωρίς tariff**



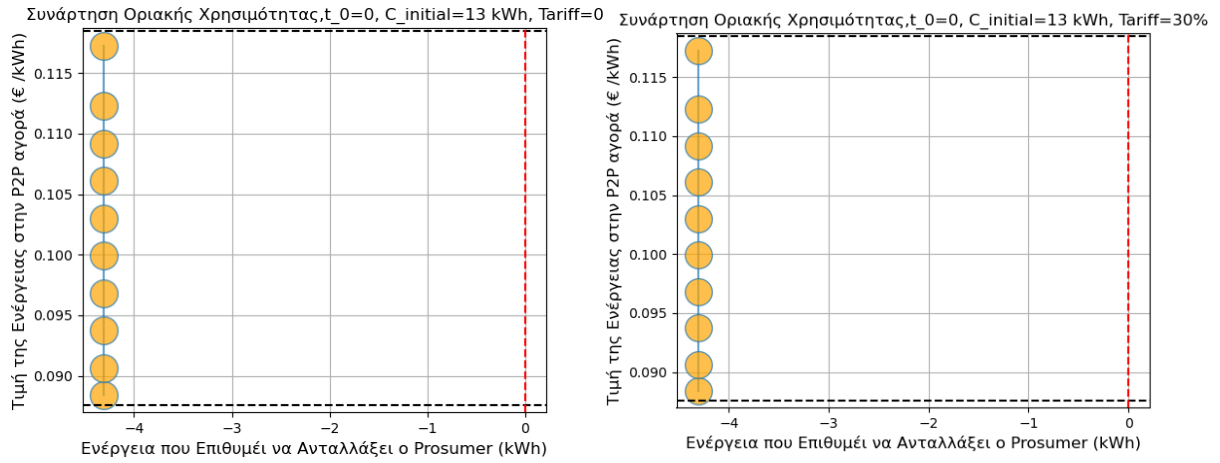
**Εικόνα 23-Αποτελέσματα για  $t_0 = 0$  και  $C_{initial} = 5$  kWh με και χωρίς tariff**



**Εικόνα 24-Αποτελέσματα για  $t_0 = 0$  και  $C_{initial} = 7$  kWh με και χωρίς tariff**

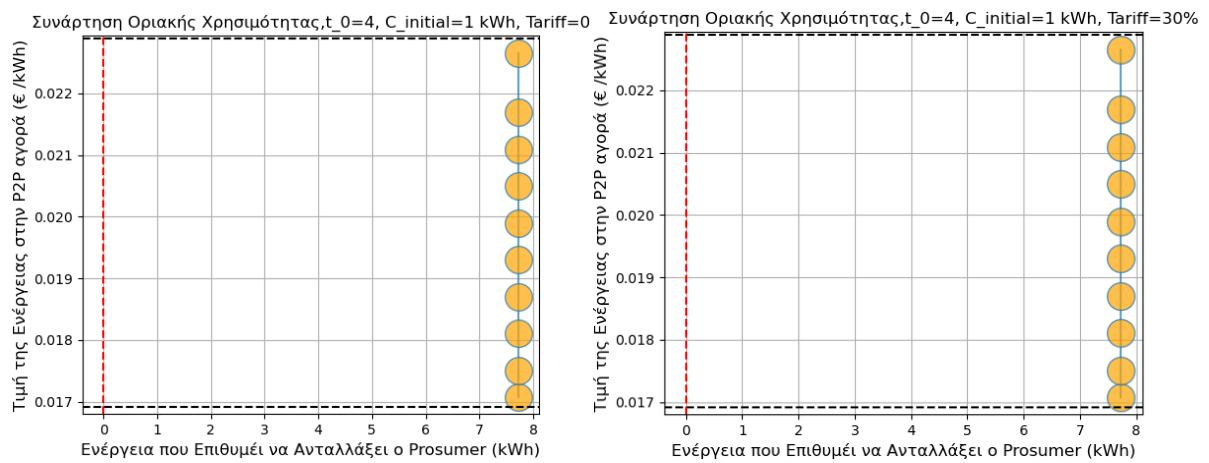


**Εικόνα 25-Αποτελέσματα για  $t_0 = 0$  και  $C_{initial} = 9$  kWh με και χωρίς tariff**

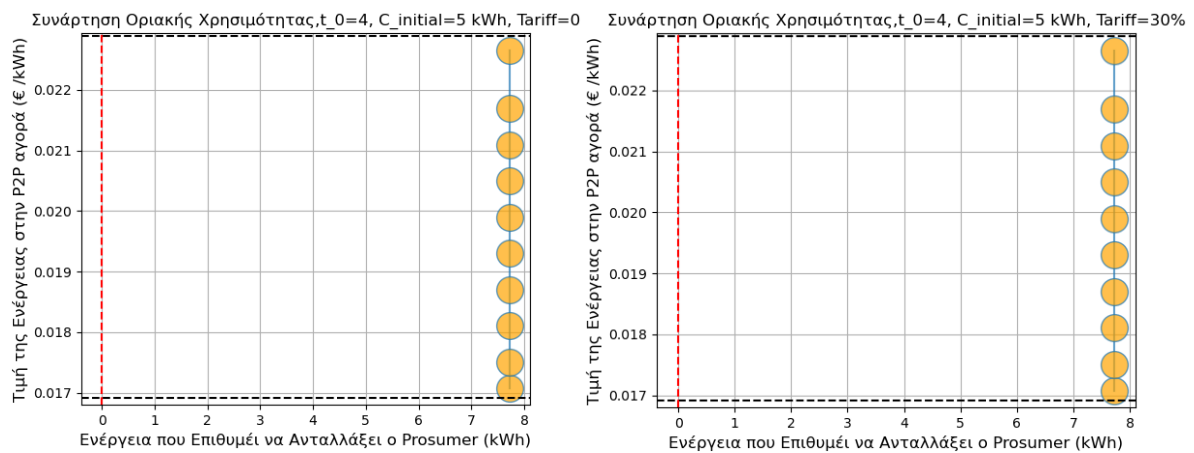


**Εικόνα 26-Αποτελέσματα για  $t_0 = 0$  και  $C_{initial} = 13$  kWh με και χωρίς tariff**

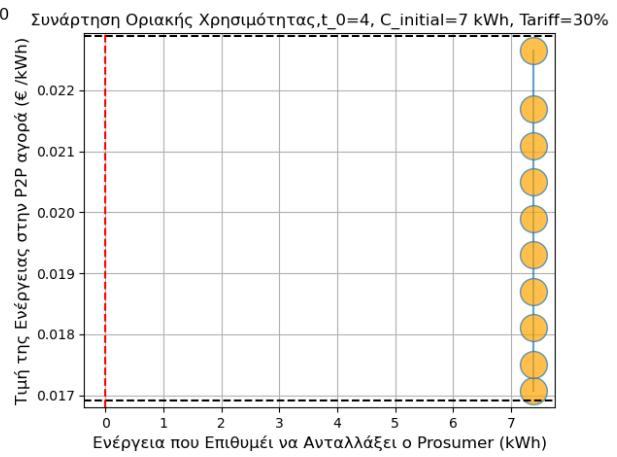
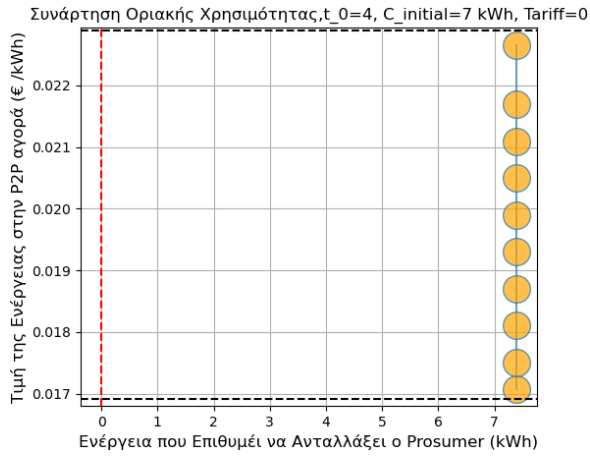
Έπειτα, για  $t_0 = 4$ , λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα:



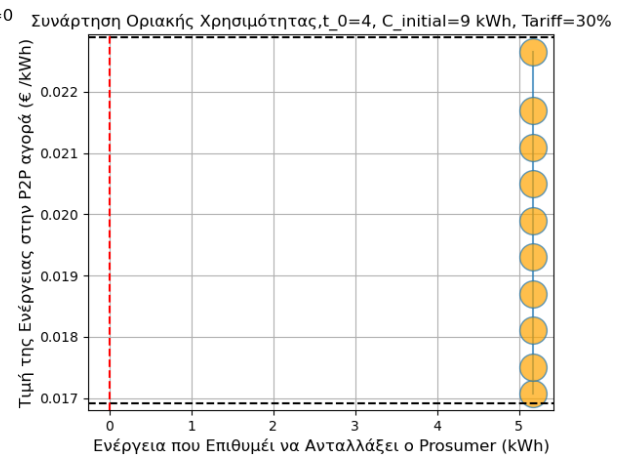
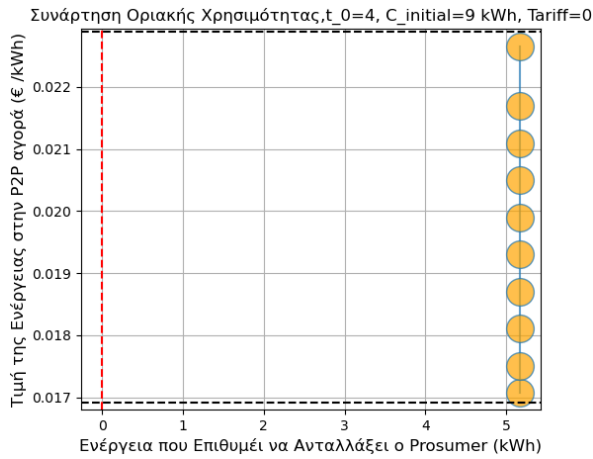
**Εικόνα 27-Αποτελέσματα για  $t_0 = 4$  και  $C_{initial} = 1$  kWh με και χωρίς tariff**



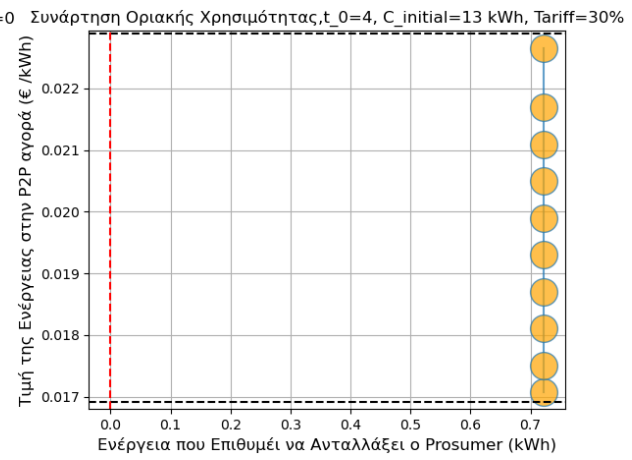
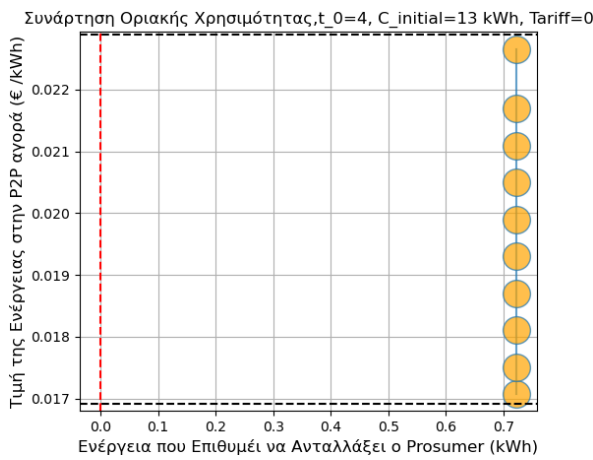
**Εικόνα 28-Αποτελέσματα για  $t_0 = 4$  και  $C_{initial} = 5$  kWh με και χωρίς tariff**



**Εικόνα 29-Αποτελέσματα για  $t_0 = 4$  και  $C_{initial} = 7$  kWh με και χωρίς tariff**

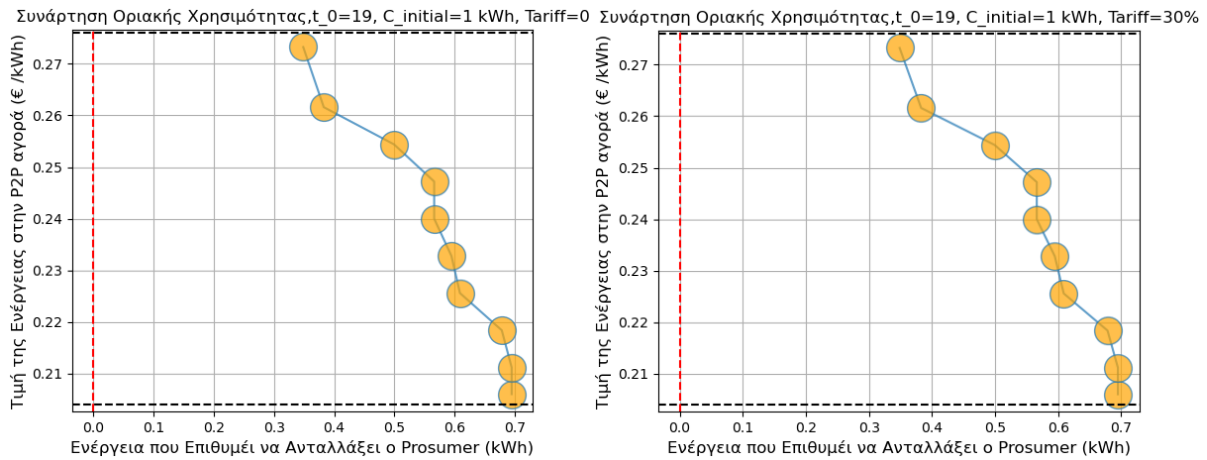


**Εικόνα 30-Αποτελέσματα για  $t_0 = 4$  και  $C_{initial} = 9$  kWh με και χωρίς tariff**

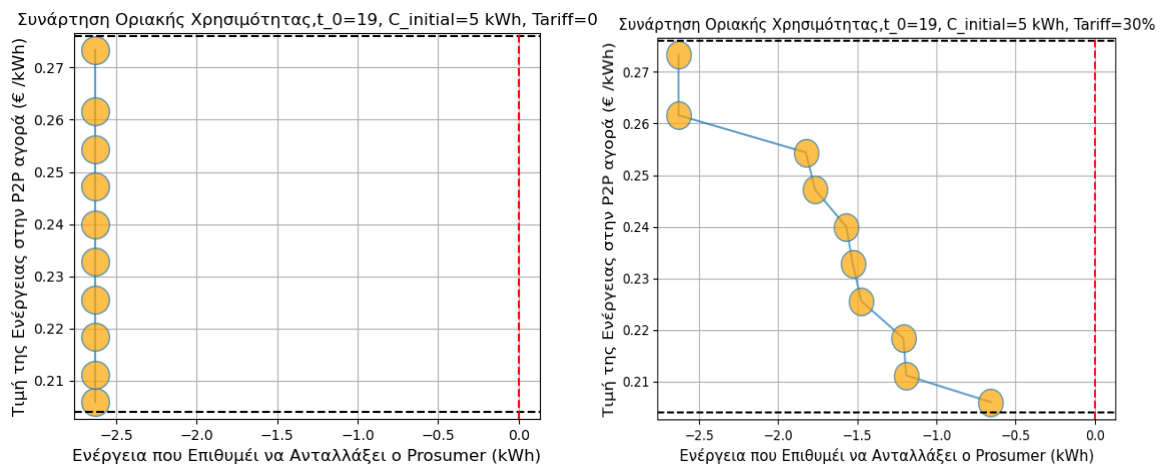


**Εικόνα 31-Αποτελέσματα για  $t_0 = 4$  και  $C_{initial} = 13$  kWh με και χωρίς tariff**

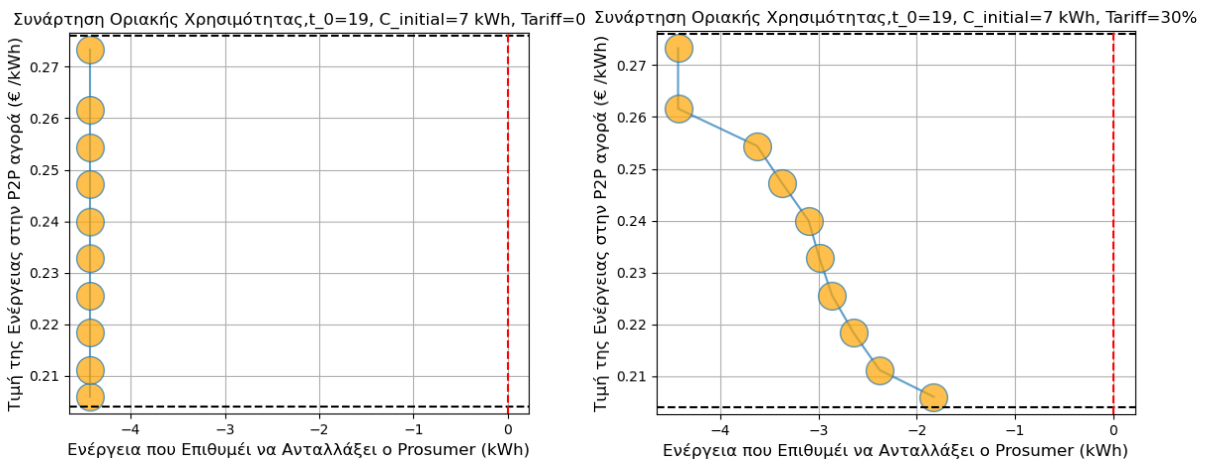
Τέλος για  $t_0 = 19$ , λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα:



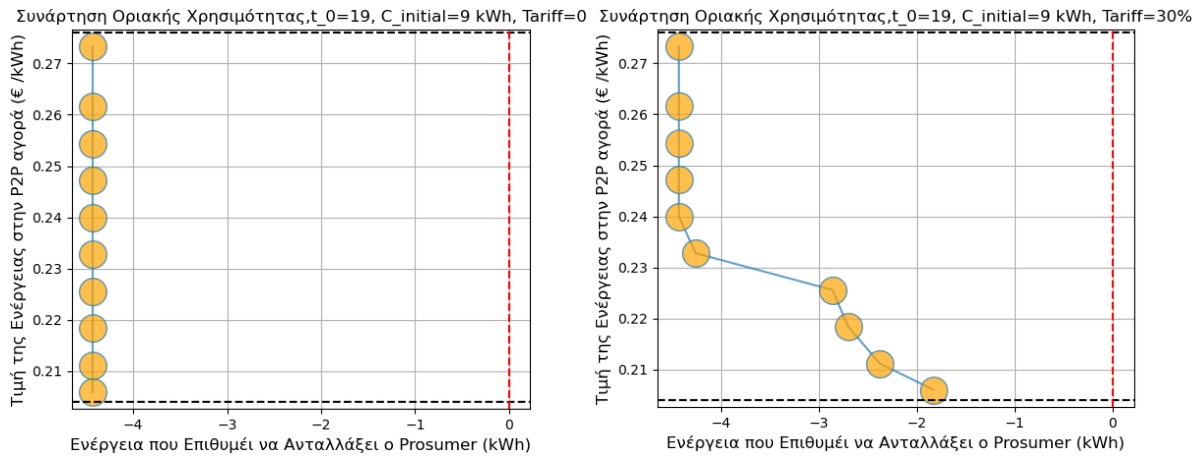
**Εικόνα 32-Αποτελέσματα για  $t_0 = 19$  και  $C_{initial} = 1$  kWh με και χωρίς tariff**



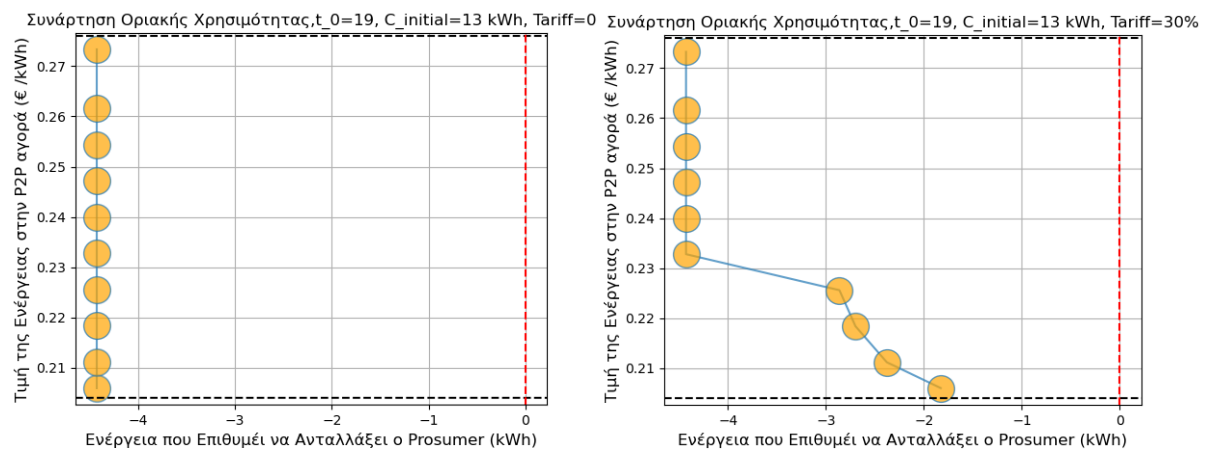
**Εικόνα 33-Αποτελέσματα για  $t_0 = 19$  και  $C_{initial} 5$  kWh με και χωρίς tariff**



**Εικόνα 34-Αποτελέσματα για  $t_0 = 19$  και  $C_{initial} = 7$  kWh με και χωρίς tariff**



**Εικόνα 35-Αποτελέσματα για  $t_0 = 19$  και  $C_{initial} = 9$  kWh με και χωρίς tariff**



**Εικόνα 36-Αποτελέσματα για  $t_0 = 19$  και  $C_{initial} = 13$  kWh με και χωρίς tariff**

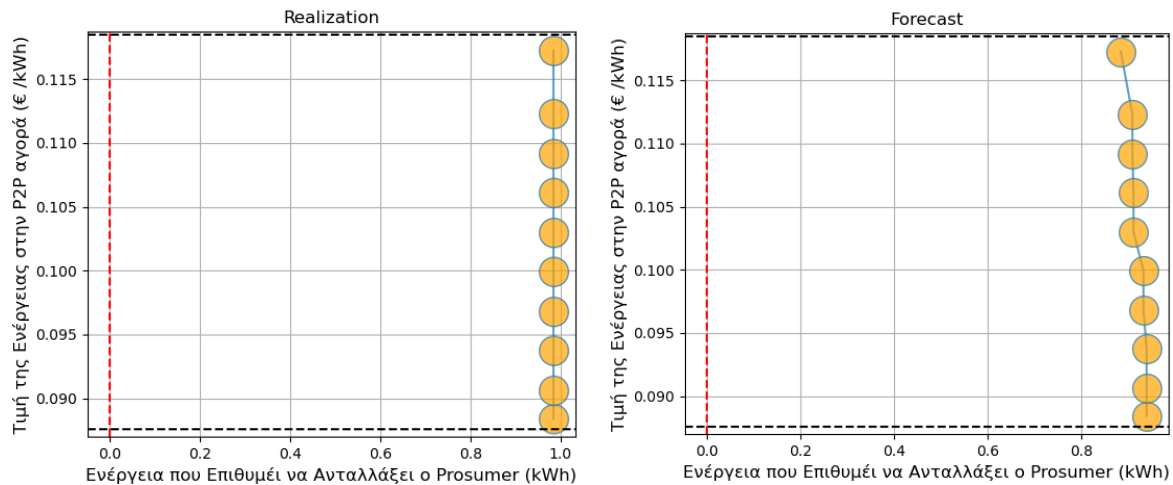
## 6.7 Realization και Απόδοση Μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η κατασκευή της βέλτιστης Marginal Utility Function καθώς και η επίτευξη του πραγματικού ελάχιστου δυνατού κόστους θα απαιτούσε να γνωρίζουμε επακριβώς το φορτίο της επόμενης ημέρας. Επειδή στη πράξη αυτό δεν θα είναι ποτέ εφικτό για την κατασκευή των συναρτήσεων στη διπλωματική αυτή προτείναμε την χρήση ενός μοντέλου SARIMA που εκπαιδευόμενο σε προηγούμενες καταναλώσεις θα κατασκευάζει κάποια σενάρια για το φορτίο της επόμενης ημέρας. Εάν το πλήθος των σεναρίων είναι αντιπροσωπευτικό, η ποιότητα τους καλή και πραγματικά απρόβλεπτα γεγονότα δεν λάβουν χώρα, η λύση του στοχαστικού προβλήματος θα πρέπει να πλησιάζει αυτήν που θα συνέβαινε άμα γνωρίζαμε επακριβώς το φορτίο και λύνουμε ένα ντετερμινιστικό πρόβλημα.

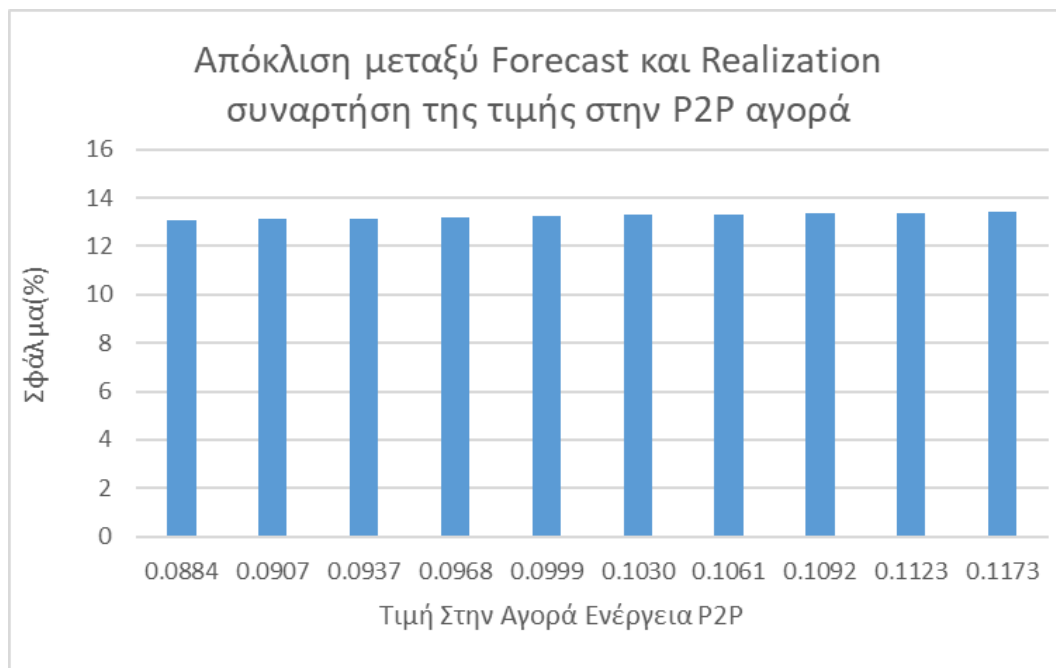
Καθώς τα δεδομένα που χρησιμοποιούμε ανήκουν στο παρελθόν, στο παράδειγμα που εξετάζουμε έχουμε το πλεονέκτημα να γνωρίζουμε και την πραγματική εξέλιξη του φορτίου της επόμενης ημέρας, συνεπώς χρησιμοποιώντας το realization και επιλύοντας το ντετερμινιστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης θα κατασκευάσουμε την βέλτιστη Συνάρτηση Οριακής Χρησιμότητας και θα συγκρίνουμε το αναμενόμενο κόστος που προκύπτει από την επίλυση του στοχαστικού προβλήματος σε σχέση με αυτό που προκύπτει από την επίλυση του ντετερμινιστικού όταν έχουμε πλήρη επίγνωση όλων των παραμέτρων.



Για να κάνουμε την σύγκριση της εκτίμησης και του realization χρησιμοποιούμε την πρώτη και την πιο απλή περίπτωση, δηλαδή την  $t_0 = 0$  και  $C_{initial} = 1 kWh$  χωρίς tariff. Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθεται η MUF όπως προέκυψε από την επίλυση του Ντετερμινιστικού προβλήματος μετά την αποκάλυψη του realization και η MUF όπως προέκυψε από το στοχαστικό μοντέλο πρόβλεψης.



**Εικόνα 37-Σύγκριση Realization (αριστερά) και Εκτίμησης (δεξιά)**



**Εικόνα 38-Ποσοστιαίο Σφάλμα Μεταξύ Μοντέλου και Realization**

Στην παραπάνω εικόνα δίνεται η σε ποσοστό επί της εκατό η διαφορά μεταξύ του αναμενόμενου κόστους προ πρόβλεψε το στοχαστικό μοντέλο και του βέλτιστου κόστους που μπορεί να επιτευχθεί όπως υπολογίστηκε από το ντετερμινιστικό μοντέλο.

## 6.8 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Από τις παραπάνω συναρτήσεις γίνεται ξεκάθαρο πως οι τρεις παράγοντες που εξετάσαμε επηρεάζουν δραστικά την προθυμία του Prosumer να εμπορευθεί ενέργεια στην Peer-to-Peer αγορά. Πιο συγκεκριμένα, προκύπτουν τα παρακάτω βασικά σημεία:

1. Όταν η τιμή της ενέργειας είναι χαμηλή ο Prosumer επιθυμεί να αγοράσει ενέργεια, μάλιστα στο παράδειγμα που εξετάζουμε για  $t_0 = 4$  ο Prosumer αγοράζει όση παραπάνω ενέργεια του επιτρέπεται είτε από την μέγιστη ισχύς φόρτισης της μπαταρίας είτε από την διαθέσιμη χωρητικότητα
2. Όταν η τιμή της ενέργειας είναι υψηλή ο Prosumer επιθυμεί να πουλήσει ενέργεια, παρατηρούμε ότι όταν η τιμή της ενέργειας.
3. Η παρουσία των φόρων στην εισαγόμενη ενέργεια δύναται να επηρεάσει τις επιθυμίες του Prosumer να αγοράσει η να πουλήσει ενέργεια. Αυτό συμβαίνει καθώς αρκετές φορές ακόμα και εάν η ενέργεια αυτή καθαυτή είναι πιο φτηνή η εφαρμογή των φόρων καθιστά την αγορά της ασύμφορη και συνεπώς ο Prosumer προτιμάει ακόμα και στις περιπτώσεις που η τιμή είναι μέγιστη αντί να την πουλήσει να την κρατήσει για ιδιοκατανάλωση σε επόμενα χρονικά βήματα αντί να χρειαστεί να εισάγει ενέργεια. Το αποτέλεσμα αυτό είναι πολύ έκδηλο στις συναρτήσεις του χρονικού βήματος  $t_0 = 19$ .
4. Η τιμή της ενέργειας στην P2P αγορά επηρεάζει πολύ τις αποφάσεις του Prosumer, χαρακτηριστικά στην εικόνα 32 και στα δύο σχήματα βλέπουμε πως ενώ ο Prosumer αγοράζει όλο και περισσότερη ενέργεια όσο η τιμή της στην P2P αγορά μικραίνει.
5. Σημαντικό ρόλο στις αποφάσεις του Prosumer διαδραματίζει και η αρχική φόρτιση της μπαταρίας, παρατηρώντας τις εικόνες 22 και 23 που αντιστοιχούν στην  $t_0 = 4$  για  $C_{initial} = 1 kWh$  και  $C_{initial} = 5 kWh$  αντίστοιχα, βλέπουμε πως ενώ στην πρώτη περίπτωση ο Prosumer αποφασίζει ότι τον συμφέρει να αγοράσει ενέργεια στην δεύτερη περίπτωση αποφασίζει ότι τον συμφέρει να πουλήσει ενέργεια. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα είναι πολύ έκδηλο και στις υπόλοιπες γραφικές
6. Τέλος, όσον αφορά την σύγκριση του μοντέλου μας και της βέλτιστης λύσης που προκύπτει από την επίλυση του ντετερμινιστικού προβλήματος μετά την αποκάλυψη της αβεβαιότητας. Παρατηρούμε ότι το σφάλμα παρουσιάζει μισ αρκετά σταθερή τιμή έχοντας λιγότερο από 0.5% απόκλιση μεταξύ των δύο ακραίων τιμών στην αγορά ενέργειας P2P. Η απόλυτη τιμή του σφάλματος είναι περίπου 13%, το οποίο μας λέει ότι το στοχαστικό πρόβλημα που επιλύουμε με την βοήθεια των σεναρίων που κατασκευάστηκαν από το SARIMA δουλεύει καλά καθώς η στρατηγική ανταλλαγής ενέργειας που μας προτείνει οδηγεί σε κόστος που διαφέρει περίπου 13% από το βέλτιστο που μπορούμε να επιτύχουμε. Όσον αφορά την συνάρτηση Οριακής Χρησιμότητας αυτήν καθαυτή βλέπουμε ότι τόσο το σχήμα όσο και οι τιμές των δύο περιπτώσεων είναι πολύ παρόμοιες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 Συμπεράσματα

### 7.1 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα διπλωματική αρχικά αναφερθήκαμε στις έντονες αλλαγές που εμφανίζονται στον χώρο τις ενέργειας, αναφερθήκαμε τόσο στα παραδοσιακά μοντέλα Ηλεκτρικών Συστημάτων όσο και στα χαρακτηριστικά των Νέων Ηλεκτρικών Συστημάτων και τις τεχνολογίες που καθιστούν την μετάβαση από τα πρώτα στα δεύτερα εφικτή.

Εν συνεχεία, αναλύσαμε περιληπτικά αλλά επεξηγηματικά την θεωρία που απαιτείται για να κατανοήσει κανείς την μεθοδολογία της εργασίας αυτής. Πιο συγκεκριμένα, αναφορά έγινε στα προβλήματα βελτιστοποίησης και δη τα στοχαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης καθώς και στα μοντέλα προβλέψεις χρονοσειρών. Η ανάγνωση των πρώτων θεωρητικών κεφαλαίων παρέχει στον αναγνώστη την ελάχιστη εξοικείωση που απαιτείται για την κατανόηση της παρούσας εργασίας.

Σκοπός μας ήταν πέραν του να προσδιορίσουμε πως ο Prosumer μπορεί να χρησιμοποιήσει την μπαταρία του με βέλτιστο τρόπο για να μειώσει το κόστος του, να φτιάξουμε και ένα εργαλείο, την MUF, που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κάποιον ρυθμιστή ή κάποια πλατφόρμα Blockchain σε μια P2P αγορά ηλεκτρικής ενέργειας για να γίνει η εκκαθάριση της. Έτσι, στην εργασία συμπεριλήφθηκε και ένα κεφάλαιο το οποίο παρέχει στον αναγνώστη πληροφορίες σχετικά με τις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο τις P2P αγορές που εξετάζουμε εμείς όσο και τις παραδοσιακές αγορές που σήμερα λειτουργούν σε Ελλάδα και Ευρώπη.

Αφού διατυπώσαμε και επεξηγήσαμε πιο συγκεκριμένα το πρόβλημα που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική, για να γίνει πιο εύκολη η κατανόηση των εννοιών που παρουσιάστηκαν πριν την επίλυση του στοχαστικού μοντέλου, επιστρατεύσαμε ένα ντετερμινιστικό μοντέλο μέσω του οποίου παρουσιάστηκε η αξία της οικιακής μπαταρίας ως μέσο εξοικονόμησης χρημάτων.

Στο τελευταίο σκέλος της εργασίας, κατασκευάστηκαν μέσω ενός μοντέλου *SARIMA* σενάρια και το στοχαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύθηκε πολλαπλές φορές για διαφορετικές τιμές της ενέργειας στην P2P αγορά. Η συνάρτηση που προέκυψε από τα ζεύγη ενέργειας που διατίθεται να ανταλλάξει ο Prosumer σε κάθε χρονικό βήμα ανάλογα με την τιμή της ενέργειας στην P2P αγορά, όπως αναφέραμε, αποτελεί την Συνάρτηση Οριακής Χρησιμότητας του Prosumer και εκφράζει την επιθυμία του να εμπορευτεί ενέργεια ανάλογα με την τιμή της. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής είδαμε πως να επιλύσουμε το πρόβλημα βέλτιστης διαχείρισης της μπαταρίας, πως να κατασκευάσουμε την Συνάρτηση Οριακής Χρησιμότητας και πως η συνάρτηση αυτή επηρεάζεται από το χρονικό βήμα που εξετάζουμε, την αρχική κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας και την παρουσία ή απουσία φόρων. Τέλος, συγκρίναμε τα αποτελέσματα που έλαβε το μοντέλο μας υπό συνθήκες αβεβαιότητας με την βέλτιστη λύση που προκύπτει από την επίλυση ενός ντετερμινιστικού προβλήματος βελτιστοποίησης όταν έχουμε πλήρη επίγνωση όλων των παραμέτρων του προβλήματος.

## 7.2 Συμπεράσματα

Δύο σημαντικοί ιδέες αναπτύσσονται στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής. Η μία είναι η επίλυση των στοχαστικών προβλημάτων για τον προσδιορισμό της βέλτιστης στρατηγικής εμπορίας ενέργειας και την ελαχιστοποίηση του κόστους που θα κληθεί να πληρώσει ο Prosumer και η άλλη είναι η κατάστρωση των Συναρτήσεων Οριακής Χρησιμότητας.

Στη παρούσα διπλωματική είδαμε ότι η επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο που μπορεί να οδηγήσει σε βέλτιστη χρήση της μπαταρίας και εξοικονόμηση χρημάτων για τους Prosumers. Καθώς επιθυμούμε να εστιάσουμε στις Peer-to-Peer αγορές και στις Συναρτήσεις Οριακής Χρησιμότητας το στοχαστικό πρόβλημα που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4 προτείνει την βέλτιστη στρατηγική εμπορίας ενέργειας στο πλαίσιο μιας τέτοιας αγοράς, εντούτοις, η προσέγγιση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις περιπτώσεις που οι Prosumers συνδέονται απευθείας στο δίκτυο.

Με τις Συναρτήσεις Οριακής Χρησιμότητας, η επιθυμία των Prosumers να αγοράσουν ή να πουλήσουν ενέργεια στο πλαίσιο μιας Peer-to-Peer αγοράς εκφράζεται σύντομα και πλήρως αριθμητικά και για αυτό δύναται να αποτελέσουν ένα σημαντικό και αποτελεσματικό εργαλείο για την λειτουργία των αγορών αυτών. Με τις συναρτήσεις αυτές, μια πλατφόρμα Blockchain, μπορεί να υλοποιεί εύκολα και γρήγορα την αντιστοίχιση των αγοραστών και πωλητών. Όπως είναι αναμενόμενο, κάποιες φορές η ενέργεια στην Peer-to-Peer αγορά θα είναι σε περίσσεια ή σε έλλειψη και σε αυτές τις περιπτώσεις οι Prosumer θα πρέπει να καλύπτουν τις ανάγκες τους χρησιμοποιώντας το δίκτυο, όπως δηλαδή θα κάνουν άμα δεν συμμετείχαν στην αγορά.

Σημαντικό κομμάτι της διπλωματικής πέραν της επίλυσης του προβλήματος και της κατάστρωσης των Συναρτήσεων Οριακής Χρησιμότητας ήταν και ο προσδιορισμός των παραγόντων που επηρεάζουν τη μορφή των Συναρτήσεων αυτών αλλά και η αξιολόγηση της μεθοδολογίας μας. Για τον λόγο αυτό, στο Κεφάλαιο 6 σχεδιάστηκαν διαφορετικές Συναρτήσεις Οριακής Χρησιμότητας και επιπλέον έγινε σύγκριση του μοντέλου μας και της πραγματικά βέλτιστης λύσης που όμως σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου δεν είναι γνωστή αφού δεν γνωρίζουμε τις τιμές των παραμέτρων που εμφανίζουν αβεβαιότητα. Καταλήξαμε στο ότι οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την μορφή των Συναρτήσεων Οριακής Χρησιμότητας είναι η αρχική φόρτιση της μπαταρίας ή παρουσία/απουσία φόρων και η τιμή της ενέργειας. Τέλος, είδαμε ότι η λύση που προτάθηκε από το μοντέλο μας δεν απέχει σημαντικά από αυτήν που θα ακολουθούσαμε άμα γνωρίζαμε πλήρως όλες τις παραμέτρους.

## 7.3 Μελλοντικές επεκτάσεις

Στην παρούσα διπλωματική έχουμε εξετάσει την περίπτωση στην οποία ο προγραμματισμός γίνεται μέχρι το τέλος της ημέρας, δηλαδή κάθε μέρα ξεκινάει στις 12 το βράδυ και ολοκληρώνεται μετά από 24 ώρες όπου και ξεκινάει ο καινούριος προγραμματισμός με τις τιμές εκκαθάρισης αγοράς της επόμενης ημέρας, θα είχε ενδιαφέρον να κατασκευαστεί ένα μοντέλο πρόβλεψης και για τις τιμές ενέργειας και ο προγραμματισμός να γίνεται πάντα κοιτώντας μπροστά είκοσι τέσσερα βήματα. Ένας τέτοιος προγραμματισμός θα οδηγούσε σε καλύτερη διαχείριση εάν το μοντέλο πρόβλεψης της τιμής ήταν καλό καθώς για την λήψη των αποφάσεων θα υπήρχε μεγαλύτερος ορίζοντας εξέτασης και, εάν και θα αστοχούσε μερικές φορές, ως επί το πλείστον θα ήταν εύστοχο καθώς η τιμή της ενέργειας εμφανίζει ένα αρκετά προβλέψιμο μοτίβο στη διάρκεια κάθε ημέρας.

Θα είχε ενδιαφέρον να επιλυθεί το ίδιο πρόβλημα αρκετές φορές χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετικό πλήθος σεναρίων και να καταγραφούν οι υπολογιστικοί χρόνοι που απαιτούνται κάθε φορά για την κατάστρωση της Συνάρτησης Οριακής Χρησιμότητας καθώς και η βελτίωση που εμφανίζεται στην πρόβλεψη. Εκτελώντας ένα μεγάλο πλήθος δοκιμών και περιπτώσεων δύναται να προκύψει ένα πλήθος σεναρίων που αφενός οδηγεί σε πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα στις περισσότερες περιπτώσεις και αφετέρου δεν απαιτεί πάρα πολύ υπολογιστικό χρόνο.

Θα μπορούσε επιπλέον να υλοποιηθεί μια σύγκριση μεταξύ ενός ντετερμινιστικού και ενός στοχαστικού μοντέλου, να εξεταστεί δηλαδή μεγάλο πλήθος περιπτώσεων και να δούμε ποιο μοντέλο οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα στις περισσότερες περιπτώσεις. Κάτι τέτοιο απαιτεί την προσομοίωση πολλών διαφορετικών ημερών καθώς λόγω της τυχαιότητας που εμφανίζει το πρόβλημα είναι δεδομένα ότι κάποιες φορές το ένα μοντέλο θα βγει καλύτερο και κάποιες το άλλο.

Καθώς το ηλεκτρικό φορτίο εμφανίζει έντονη εποχικότητα και με βάση την περίοδο του χρόνου θα έχει ενδιαφέρον να κατασκευαστεί μοντέλο πρόβλεψης χρονοσειρών που εκπαιδεύεται σε ετήσια δεδομένα και λαμβάνει και υπόψη τις αργίες και τις γιορτές που εμφανίζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ζήτησης.

Η διαδικασία υλοποίησης την αντιστοίχισης αγοραστών και πωλητών δεν συμπεριλαμβάνετε στους στόχους της εργασίας αυτής, παρόλα αυτά πολλές φορές για τέτοιες διαδικασίες χρησιμοποιούνται γραμμικές συναρτήσεις, συνεπώς η γραμμικοποίηση των Συναρτήσεων Οριακής Χρησιμότητας μπορεί να βοηθήσει στη γρηγορότερη και ευκολότερη εκκαθάριση της αγοράς. Μια σύγκριση της ποιότητας της αρχικής Συνάρτησης Οριακής Χρησιμότητας και μιας γραμμικοποιημένης θα μπορούσε να μας πει πόσο η γραμμικοποίηση των συναρτήσεων αυτών είναι εφικτή χωρίς να αλλοιώνεται πολύ η πληροφορία τους.

Εάν εξετάζεται κάποια περίπτωση στην οποία η παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά είναι πολύ μεγάλη, αντί να χρησιμοποιηθεί μια μόνο μεταβλητή (το άθροισμα) για τα δεδομένα που παρουσιάζουν αβεβαιότητα, δηλαδή το φορτίο και την παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος του Prosumer, θα είχε ενδιαφέρον να θεωρηθούν δύο ξεχωριστές μεταβλητές και να δημιουργηθούν χωριστά μοντέλα πρόβλεψης. Μια τέτοια προσέγγιση θα είχε αξία καθώς το προφίλ του φορτίου και της παραγωγής του φωτοβολταϊκού συστήματος δεν εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες και συνεπώς δυο ξεχωριστά μοντέλα μπορούν να προσομοιώσουν καλύτερα την συνολική συμπεριφορά του συστήματος.

Τέλος, θα είχε ενδιαφέρον να συμπεριλάβουμε στο σύστημα ευέλικτα φορτία όπως Ηλεκτρικά Οχήματα και να επιλύσουμε και πάλι το στοχαστικό πρόβλημα για να δούμε πως μεταβάλλονται οι προτιμήσεις του Prosumer αλλά και τα περιθώρια κέρδους του όταν αυξάνεται η πολυπλοκότητα του συστήματος αλλά και οι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] P. Padiaditis, K. Sirviö, C. Ziras, K. Kauhaniemi, H. Laaksonen, and N. Hatziargyriou, “Compliance of Distribution System Reactive Flows with Transmission System Requirements,” *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 7719, vol. 11, no. 16, p. 7719, Aug. 2021, doi: 10.3390/APP11167719.
- [2] P. Padiaditis, C. Ziras, J. Hu, S. You, and N. Hatziargyriou, “Decentralized DLMPs with synergetic resource optimization and convergence acceleration,” *Electric Power Systems Research*, vol. 187, p. 106467, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.EPSR.2020.106467.
- [3] M. Shafiullah, S. D. Ahmed, and F. A. Al-Sulaiman, “Grid Integration Challenges and Solution Strategies for Solar PV Systems: A Review,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 52233–52257, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3174555.
- [4] P. Padiaditis, D. Papadaskalopoulos, N. Hatziargyriou, and D. Presic, “Cross-border shared sizing of frequency restoration reserves: Insights from the H2020 CROSSBOW project,” *SEST 2021 - 4th International Conference on Smart Energy Systems and Technologies*, Sep. 2021, doi: 10.1109/SEST50973.2021.9543208.
- [5] P. Padiaditis, D. Papamatthaiou, D. Papadaskalopoulos, D. Presic, and N. D. Hatziargyriou, “Multi-Area Frequency Restoration Reserve Sizing,” *IEEE Trans Ind Appl*, 2023, doi: 10.1109/TIA.2023.3242638.
- [6] P. Padiaditis, D. Papadaskalopoulos, A. Papavasiliou, and N. Hatziargyriou, “Bilevel Optimization Model for the Design of Distribution Use-of-System Tariffs,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 132928–132939, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3114768.
- [7] P. Padiaditis, C. Ziras, D. Papadaskalopoulos, and N. Hatziargyriou, “Synergies between Distribution Use-of-System Tariffs and Local Flexibility Markets,” *SEST 2022 - 5th International Conference on Smart Energy Systems and Technologies*, 2022, doi: 10.1109/SEST53650.2022.9898437.
- [8] C. Zhang, J. Wu, Y. Zhou, M. Cheng, and C. Long, “Peer-to-Peer energy trading in a Microgrid,” *Appl Energy*, vol. 220, pp. 1–12, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.03.010.
- [9] Stein W. Wallace and William T. Ziemba, “Applications of Stochastic Programming,” *Applications of Stochastic Programming*, Jan. 2005, doi: 10.1137/1.9780898718799.
- [10] A. J. Kleywegt, A. Shapiro, and T. Homem-De-Mello, “The Sample Average Approximation Method for Stochastic Discrete Optimization,” <https://doi.org/10.1137/S1052623499363220>, vol. 12, no. 2, pp. 479–502, Jul. 2006, doi: 10.1137/S1052623499363220.

- [11] J. K. Afriyie, S. Twumasi-Ankrah, K. B. Gyamfi, D. Arthur, and W. A. Pels, “Evaluating the Performance of Unit Root Tests in Single,” *Time Series Processes. Mathematics and Statistics*, vol. 8, no. 6, pp. 656–664, 2020, doi: 10.13189/ms.2020.080605.
- [12] Roger D. Peng, “A Very Short Course on Time Series Analysis.” <https://bookdown.org/rdpeng/timeseriesbook/> (accessed Feb. 07, 2023).
- [13] Rob J Hyndman and George Athanasopoulos, “Forecasting: Principles and Practice (2nd ed).” <https://otexts.com/fpp2/> (accessed Feb. 11, 2023).
- [14] “statsmodels.tsa.arima.model.ARIMAResults.plot\_diagnostics — statsmodels.” [https://www.statsmodels.org/dev/generated/statsmodels.tsa.arima.model.ARIMAResults.plot\\_diagnostics.html](https://www.statsmodels.org/dev/generated/statsmodels.tsa.arima.model.ARIMAResults.plot_diagnostics.html) (accessed Feb. 21, 2023).
- [15] ΑΔΜΗΕ, “ΙΟΥΛΙΟΣ 2018”.
- [16] F. Ioannidis, K. Kosmidou, K. Andriosopoulos, and A. Everkiadi, “Assessment of the Target Model Implementation in the Wholesale Electricity Market of Greece,” *Energies 2021, Vol. 14, Page 6397*, vol. 14, no. 19, p. 6397, Oct. 2021, doi: 10.3390/EN14196397.
- [17] Malcolm Keay, “Oxford Energy Comment The EU ‘Target Model’ for electricity markets: fit for purpose?,” 2013, Accessed: Jan. 18, 2023. [Online]. Available: [http://europa.eu/rapid/press-release\\_MEMO-13-416\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-13-416_en.htm)
- [18] ΑΔΜΗΕ, ““Περιγραφή.”” <https://www.admie.gr/agora/genika/perigrifi> (accessed Jan. 16, 2023).
- [19] Όμιλος - EnExGroup, ““Όμιλος Χρηματιστηρίου Ενέργειας.”” <https://www.enexgroup.gr/el/web/guest/enexgroup> (accessed Jan. 18, 2023).
- [20] ΡΑΕ, <https://www.rae.gr/sxetika-me-ti-rae/> (accessed Jan. 19, 2023).
- [21] ΥΠΕΝ, “Θεσμικό πλαίσιο -.” <https://ypen.gov.gr/energeia/ilektriki-energeia/chondriki-agora/thesmiko-plaisio/> (accessed Jan. 17, 2023).
- [22] ΡΑΕ, “Μη Διασυνδ. Νησιά.” <https://www.rae.gr/mi-diasynd-nisia/> (accessed Jan. 19, 2023).
- [23] ΔΕΔΔΗΕ, “Ρυθμιστικό Πλαίσιο.” <https://deddie.gr/el/deddie/i-etairaia/ruthmistiko-plaisio/> (accessed Jan. 19, 2023).
- [24] ΔΑΠΕΕΠ Α.Ε., “Ρυθμιστικό Πλαίσιο.” <https://www.dapeep.gr/dimosieuseis/rithmistiko-plaisio/> (accessed Jan. 19, 2023).
- [25] ΡΑΕ, ““Αγορά.”” <https://www.rae.gr/xondremporiki-agora-diasynd-systima/> (accessed Jan. 16, 2023).

- [26] Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας Α.Ε., ““Απόφαση 5 - Συμβόλαια Μελλοντικής Εκπλήρωσης Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ενεργειακή Χρηματοπιστωτική Αγορά (Αγορά Παραγώγων) του ΕΧΕ (Έκδοση 1.4).”,” Sep. 2021.
- [27] T. International Renewable Energy Agency, *Peer-to-peer electricity trading - Innovation Landscape Brief*. 2020. [Online]. Available: [www.irena.org](http://www.irena.org)
- [28] T. Chen, H. Pourbabak, and W. Su, “Electricity market reform,” in *The Energy Internet: An Open Energy Platform to Transform Legacy Power Systems into Open Innovation and Global Economic Engines*, Elsevier, 2018, pp. 97–121. doi: 10.1016/B978-0-08-102207-8.00005-9.
- [29] P. Samadi, A.-H. Mohsenian-Rad, R. Schober, V. W. S. Wong, and J. Jatskevich, “Optimal Real-time Pricing Algorithm Based on Utility Maximization for Smart Grid.”
- [30] Y. Liu, L. Wu, and J. Li, “Peer-to-peer (P2P) electricity trading in distribution systems of the future,” *The Electricity Journal*, vol. 32, no. 4, pp. 2–6, May 2019, doi: 10.1016/J.TEJ.2019.03.002.
- [31] H. Javed *et al.*, “Recent Trends, Challenges, and Future Aspects of P2P Energy Trading Platforms in Electrical-Based Networks Considering Blockchain Technology: A Roadmap Toward Environmental Sustainability,” *Front Energy Res*, vol. 10, p. 134, Mar. 2022, doi: 10.3389/FENRG.2022.810395/BIBTEX.
- [32] C. Ziras, T. Sousa, and P. Pinson, “What Do Prosumer Marginal Utility Functions Look Like? Derivation and Analysis,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 5, pp. 4322–4330, Sep. 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3068620.
- [33] M. Fahriog̃lu and F. L. Alvarado, “Using Utility Information to Calibrate Customer Demand Management Behavior Models,” 2001.
- [34] S. Saxena, A. Brookson, H. K. Turesson, H. Farag, H. Turesson, and H. Kim, “Design and Field Implementation of Blockchain Based Renewable Energy Trading in Residential Communities Create new project ‘uGrid control’ View project Zero Electric Vehicle Awareness Initiative-Natural Resource Canada (NRCan) View project Design and Field Implementation of Blockchain Based Renewable Energy Trading in Residential Communities,” 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/334760133>
- [35] “Our Documentation | Python.org.” <https://www.python.org/doc/> (accessed Mar. 01, 2023).
- [36] “Pyomo Documentation 6.5.0 — Pyomo 6.5.0 documentation.” <https://pyomo.readthedocs.io/en/stable/> (accessed Feb. 28, 2023).
- [37] “Documentation - Gurobi Optimization.”



<https://www.gurobi.com/documentation/> (accessed Feb. 28, 2023).

- [38] “Introduction — statsmodels.” <https://www.statsmodels.org/stable/index.html> (accessed Mar. 01, 2023).
- [39] “pandas documentation — pandas 1.5.3 documentation.” <https://pandas.pydata.org/docs/> (accessed Mar. 01, 2023).
- [40] “NumPy Documentation.” <https://numpy.org/doc/> (accessed Mar. 01, 2023).
- [41] “Matplotlib — Visualization with Python.” <https://matplotlib.org/> (accessed Mar. 01, 2023).
- [42] “seaborn: statistical data visualization — seaborn 0.12.2 documentation.” <https://seaborn.pydata.org/> (accessed Mar. 01, 2023).
- [43] EnExGroup, “Day-Ahead Market .” <https://www.enexgroup.gr/el/markets-publications-el-day-ahead-market> (accessed Jan. 25, 2023).
- [44] J. E. Cavanaugh and A. A. Neath, “The Akaike information criterion: Background, derivation, properties, application, interpretation, and refinements,” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, vol. 11, no. 3. Wiley-Blackwell, May 01, 2019. doi: 10.1002/wics.1460.