



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

Διαχείριση Οικιακών Συσκευών με Χρήση Τεχνικών Βελτιστοποίησης και Θεωρίας Παιγνίων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δέσποινα Θ. Κοράκη

Επιβλέπων : Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Άρης Δημέας
Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Αθήνα, Ιούλιος 2012



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

Διαχείριση Οικιακών Συσκευών με Χρήση Τεχνικών Βελτιστοποίησης και Θεωρίας Παιγνίων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δέσποινα Θ. Κοράκη

Επιβλέπων : Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Άρης Δημέας
Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τη 16^η Ιουλίου 2012.

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Παπαθανασίου
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

.....
Δέσποινα Θ. Κοράκη

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

Copyright © Δέσποινα Θ. Κοράκη, 2012.

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.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2011-2012 στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Ν. Χατζηαργυρίου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το Δρ. Δημέα Άρη για τη συνεχή του καθοδήγηση και την εξαιρετική μας συνεργασία, που ήταν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την υποψήφια Διδάκτορα Τζωρτζίνα Ασημακοπούλου για την πολύτιμη βοήθειά της.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου που ήταν δίπλα μου και με στήριξε σε όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του ελέγχου του οικιακού φορτίου με την διαχείριση οικιακών συσκευών και ειδικότερα του ψυγείου. Πιο αναλυτικά, περιγράφεται αρχικά η έννοια του ευφυούς δικτύου (smart grid) και οι τεχνολογίες της Πληροφορικής και των Τηλεπικοινωνιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στη μορφή των σύγχρονων αγορών ενέργειας και στις πολιτικές που εφαρμόζονται για τον έλεγχο της ζήτησης και των οικιακών συσκευών σε οικιακό επίπεδο. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι τρόποι με τους οποίους οι έξυπνες συσκευές μπορούν να συμβάλλουν στη βελτίωση και λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με αναφορά σε υπάρχουσες έρευνες και τα αποτελέσματά τους αναφορικά με τον έλεγχο της κατανάλωσης οικιακών συσκευών, όπως είναι ο θερμοσίφωνας και το κλιματιστικό. Μετά την ανάλυση όλων των παραπάνω γίνεται εκτενής αναφορά στις αρχές λειτουργίας του ψυγείου και τους παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή του κατανάλωση. Μελετάται μέσω τριών περιπτώσεων η δυνατότητα ελέγχου του φορτίου του ψυγείου και το κέρδος που μπορεί να προκύψει από μια τέτοια διαδικασία. Στην πρώτη περίπτωση εξετάζεται από την πλευρά του καταναλωτή η δυνατότητα του ψυγείου να ανταποκρίνεται σε μεταβλητές τιμές ενέργειας, που αντανακλούν την οριακή τιμή του συστήματος, και να διαμορφώνει ανάλογα την ενεργειακή του κατανάλωση μεταβάλλοντας την εσωτερική του θερμοκρασία, εντός κάποιων συγκεκριμένων επιτρεπτών ορίων, ώστε να επιτευχθεί ελάχιστο κόστος για τον καταναλωτή. Υπολογίζεται, επίσης, το κόστος αυτής της καταναλισκόμενης ενέργειας για ένα έτος και συγκρίνεται με το κόστος που θα είχε η κατανάλωση της ενέργειας του ψυγείου αν αυτή δεν εξαρτώνταν από μεταβλητές τιμές, αλλά προέκυπτε από μια σταθερή μέση εσωτερική θερμοκρασία του ψυγείου. Στη δεύτερη περίπτωση εξετάζεται η δυνατότητα της μεταβολής της ενεργειακής κατανάλωσης του ψυγείου για την κάλυψη μεταβολών της αιολικής παραγωγής στο σύστημα της Κρήτης, με στόχο τη μεγιστοποίηση του κέρδους μιας ESCO που διαχειρίζεται ένα ή περισσότερα αιολικά πάρκα. Η κάλυψη αυτών των μεταβολών μελετάται μέσω της μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας του ψυγείου, εντός πάλι κάποιων συγκεκριμένων επιτρεπτών ορίων, και στη συνέχεια εξετάζεται και η παροχή εφεδρείας από το ψυγείο για την κάλυψη ενός συγκεκριμένου εύρους ισχύος. Στην τρίτη και τελευταία περίπτωση προσομοιώνεται ένα παιχνίδι της θεωρίας παιγνίων της κατηγορίας «ηγέτη-ακόλουθου». Ηγέτης είναι ο διαχειριστής του συστήματος DSO, ο οποίος έχει στόχο την ελαχιστοποίηση του μέσου μεταβλητού κόστους του συστήματος, και ακόλουθος μια ESCO, η οποία έχει στόχο τη μεγιστοποίηση του κέρδους της, το οποίο, όμως, εξαρτάται από το μέσο μεταβλητό κόστος. Το παιχνίδι αυτό προσομοιώθηκε για να εξεταστεί η δυνατότητα εφαρμογής του ελέγχου του φορτίου του ψυγείου και της παροχής εφεδρείας από αυτό στο πλαίσιο της αγοράς ενέργειας. Το μέσο μεταβλητό κόστος που υπολογίστηκε σε αυτό το μοντέλο συγκρίνεται, τέλος, με τη μέγιστη τιμή που μπορεί να προκύψει για αυτό, όπως και με την τιμή που θα προέκυπτε αν οι κινήσεις των δυο παικτών δε γίνονταν λαμβάνοντας υπόψιν ο ένας τις επιλογές του άλλου, αλλά στοχεύοντας μόνο στο δικό τους συμφέρον. Όλα τα μοντέλα υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab.

Λέξεις - κλειδιά: Έλεγχος ψυγείου, βελτιστοποίηση, θεωρία παιγνίων, ευφυές δίκτυο, εταιρείες ενεργειακών υπηρεσιών, διαχείριση οικιακών συσκευών, διαχείριση ζήτησης, αλγόριθμος minimax

Abstract

The purpose of this diploma thesis is to study the control of the household load by managing household appliances and especially the refrigerator. More specifically, the concept of the smart grid is initially described and then the Information Technology that can be used in modern power systems. In addition, reference is made in the form of the modern electricity markets and the policies that are applied in order to control demand and the household appliances in household level. The ways in which smart appliances can contribute to the improvement and operation of the power system are also described, with reference to existing researches and their results regarding the control of the consumption of household appliances, such as water-heaters and air condition systems. After analyzing all the above, a comprehensive reference is made to the principles of the refrigerator operation and the factors that affect its energy consumption. The ability to control the load of the refrigerator and the profit that may result from such a procedure is studied through three different cases. In the first case, the refrigerator's ability to respond to variable energy prices, that reflect the system's marginal price and to shape its energy consumption accordingly, are examined from the perspective of the consumer, in order to achieve a minimal cost for him. The energy consumption is determined by the refrigerator's internal temperature, being within certain limits. The cost of this energy is also calculated for one year and is compared to the cost of the energy consumption that would emerge in case the energy was not dependent on variable prices but it referred to a constant average internal temperature of the refrigerator. In the second case, the ability to change the energy consumption of a refrigerator in order to cover any changes in wind energy production of the system of Crete, is examined. The aim of this case is to maximize the profit of an ESCO that manages one or more wind farms. The coverage of these changes is studied once again by changing the internal temperature of the refrigerator and then another subcase is examined, where the refrigerator can provide energy backup in order to cover a specified range of power. In the third and last case a game of game theory is simulated of the category "leader-follower". The DSO is the leader that aims to minimize the mean variable cost of the system and the ESCO is the follower that aims to maximize its profit, which is dependent on the mean variable cost. This game is simulated to examine if the load control of the refrigerator and its ability to provide energy backup is applicable to the context of the energy market. The mean variable cost that is calculated is compared to the maximum value that it could have and to the value that it would have in case both players' moves were not made while taking into account each other's choices but only by aiming at their own interest. All models were implemented using the program Matlab.

Key – words: refrigerator control, optimization, game theory, smart grid, ESCO, control of household appliances, demand-response, minimax algorithm

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	5
Περίληψη.....	7
Abstract	9
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	15
Κεφάλαιο 2: Έξυπνα δίκτυα και διαχείριση ενέργειας	21
2.1. Το smart grid και το «Ίντερνετ της Ενέργειας»	21
2.2. Δομή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	23
Κεφάλαιο 3: Δεδομένα για οικιακούς καταναλωτές	29
Κεφάλαιο 4: Θεωρία Παιγνίων.....	37
4.1. Μορφές αναπαράστασης παιχνιδιών	37
4.2. Ισορροπία Nash	38
4.3. Κατηγορίες παιχνιδιών	39
4.4. Το μοντέλο του Stackelberg	40
Κεφάλαιο 5: Ψυγεία και μοντελοποίηση.....	43
Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων	49
6.1. Πρώτο πρόβλημα: Καταναλωτής	51
6.2. Δεύτερο πρόβλημα: ESCO	68
6.3. Τρίτο πρόβλημα: Παιχνίδι DSO-ESCO	74
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα	83
Βιβλιογραφία	85
Παράρτημα: Δεδομένα πρώτου και τρίτου προβλήματος.....	87

Εικόνες

Εικόνα 1: Ωριαίο διάγραμμα ροής συλλογής δεδομένων [3]	16
Εικόνα 2: Ετήσιο κέρδος ανά νοικοκυριό (€ '08) συγκριτικά με το Σενάριο 1 [3]	18
Εικόνα 3: Κόστος εφεδρείας σε εκατομμύρια € ανά σενάριο για δυο περιπτώσεις στρεφόμενης εφεδρείας: με και χωρίς τη συμμετοχή των ελεγχόμενων φορτίων [3]	19
Εικόνα 4: Μοντέλο συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο καταγράφονται τα δυο βασικά του υποσυστήματα [4]	23
Εικόνα 5: Οι συναλλαγές που πραγματοποιούνται στην αγορά ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της αγοράς εξισορρόπησης [4]	26
Εικόνα 6: Το προφίλ της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη λειτουργία ενός οικιακού πλυντηρίου πιάτων στις ΗΠΑ [13]	35
Εικόνα 7: Καμπύλη φορτίου με ποσοστό επί τοις εκατό ενός οικιακού πλυντηρίου πιάτων στις ΗΠΑ [13]	35
Εικόνα 8: Δίλημμα του Φυλακισμένου σε κανονική μορφή [16]	38
Εικόνα 9: Δίλημμα του Φυλακισμένου σε εκτεταμένη μορφή [16]	38
Εικόνα 10: Το προφίλ της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη λειτουργία ενός οικιακού ψυγείου στις ΗΠΑ [13]	43
Εικόνα 11: Καμπύλη φορτίου με ποσοστό επί τοις εκατό ενός οικιακού ψυγείου στις ΗΠΑ [13] ..	44
Εικόνα 12: Κύκλος ψύξης [18]	45
Εικόνα 13: Η καμπύλη φορτίου του ψυγείου και η μεταβολή της μέσω της μεταβολής του setpoint του	50
Εικόνα 14: Αποτελέσματα για το μήνα Ιανουάριο με E σε kWh και OTΣ σε €/MWh	55
Εικόνα 15: Αποτελέσματα για το μήνα Φεβρουάριο με E σε kWh και OTΣ σε €/MWh	56
Εικόνα 16: Αποτελέσματα για το μήνα Μάρτιο με E σε kWh και OTΣ σε €/MWh	57
Εικόνα 17: Αποτελέσματα για το μήνα Απρίλιο με E σε kWh και OTΣ σε €/MWh	58
Εικόνα 18: Αποτελέσματα για το μήνα Μάιο με E σε kWh και OTΣ σε €/MWh	59
Εικόνα 19: Αποτελέσματα για το μήνα Ιούνιο με E σε kWh και OTΣ σε €/MWh	60
Εικόνα 20: Αποτελέσματα για το μήνα Ιούλιο με E σε kWh και OTΣ σε €/MWh	61
Εικόνα 21: Αποτελέσματα για το μήνα Αύγουστο με E σε kWh και OTΣ σε €/MWh	62
Εικόνα 22: Αποτελέσματα για το μήνα Σεπτέμβριο με E σε kWh και OTΣ σε €/MWh	63
Εικόνα 23: Αποτελέσματα για το μήνα Οκτώβριο με E σε kWh και OTΣ σε €/MWh	64
Εικόνα 24: Αποτελέσματα για το μήνα Νοέμβριο με E σε kWh και OTΣ σε €/MWh	65
Εικόνα 25: Αποτελέσματα για το μήνα Δεκέμβριο με E σε kWh και OTΣ σε €/MWh	66
Εικόνα 26: Γράφος πιθανών κινήσεων δυο παικτών σε ένα παιχνίδι τρίλιζας [22]	75
Εικόνα 27: Αλγόριθμος minimax για παιχνίδι 2 παικτών [22]	76
Εικόνα 28: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την επίλυση του παιχνιδιού DSO-ESCO	78
Εικόνα 29: Κινήσεις DSO (κίτρινο) και ESCO (κόκκινο) που προέκυψαν από την προσομοίωση....	80
Εικόνα 30: Κινήσεις DSO (κίτρινο) και ESCO (κόκκινο) για μεγιστοποίηση MVC	80
Εικόνα 31: Κινήσεις DSO (κίτρινο) και ESCO (κόκκινο) αν ο DSO επέλεγε τις 3 ώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας	81

Πίνακες

Πίνακας 1: Το λειτουργικό κόστος του συστήματος σε € για κάθε σενάριο και οι επί τοις εκατό μεταβολές συγκριτικά με το Σενάριο 1 [3]	17
Πίνακας 2: Οι εκπομπές CO ₂ σε τόνους για κάθε σενάριο και οι επί τοις εκατό μεταβολές συγκριτικά με το Σενάριο 1 [3]	18
Πίνακας 3: Απώλειες γραμμών σε ποσοστό της παραγωγής για κάθε σενάριο και οι επί τοις εκατό μεταβολές συγκριτικά με το Σενάριο 1 [3]	19
Πίνακας 4: Εκτιμώμενη διείσδυση οικιακών συσκευών στα Ευρωπαϊκά νοικοκυριά [9]	31
Πίνακας 5: Επιλογές διαχείρισης της ζήτησης που μπορούν να προσφερθούν από έξυπνες συσκευές [10].....	32
Πίνακας 6: Ενδεικτικές τιμές των έξυπνων συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν για της εξισορρόπηση του συστήματος [12]	34
Πίνακας 7: Αποτελέσματα τρίτου σταδίου για τις δυο συσκευές και τις επιμέρους περιπτώσεις που μελετήθηκαν [19]	47
Πίνακας 8: Τιμές εσωτερικής θερμοκρασίας ψυγείου σε °C (setpoint) που προέκυψαν από την ελαχιστοποίηση	54
Πίνακας 9: Αποτελέσματα για το κόστος της ενέργειας σε € για τα setpoint που εξαρτώνται από την ΟΤΣ και για αυτά που είναι ανεξάρτητα από αυτή και ίσα με 4,7°C.....	67
Πίνακας 10: Αποτελέσματα για μεταβολές 0-3 MW	71
Πίνακας 11: Αποτελέσματα για μεταβολές 18-21 MW και κόστιμο φορτίου ψυγείων.....	72
Πίνακας 12: Αποτελέσματα για μεταβολές 0-21MW	73
Πίνακας 13: Τιμές MVC για τις 3 περιπτώσεις που συγκρίθηκαν	79
Πίνακας 14: Σταθμισμένος μέσος όρος της ΟΤΣ ανά μήνα και ανά ώρα για το 2011 [20]	88
Πίνακας 15: Σταθμισμένος μέσος όρος της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ανά μήνα και ανά ώρα για το 2011 [21].....	89
Πίνακας 16: Παραγωγή ενέργειας από μονάδα gas για μια ημέρα	89

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Σε παγκόσμιο επίπεδο υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την ενσωμάτωση «έξυπνων» και ενεργειακά αποδοτικών συσκευών που αποτελούν μέρος της ευρύτερης έννοιας του έξυπνου δικτύου, smart grid. Οι συσκευές παύουν να είναι «παθητικές», αλλά συμμετέχουν ενεργά στη λειτουργία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας είτε μειώνοντας την ενέργεια που καταναλώνουν, είτε μετατοπίζοντας την σε άλλες ώρες της ημέρας συμβάλλοντας, με αυτόν τον τρόπο, στη βελτιστοποίησή του. Προσφέροντας τη δυνατότητα μεταβλητού φορτίου οι «έξυπνες» συσκευές μπορούν να υποστηρίξουν την απορρόφηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, επειδή η παραγωγή τους είναι κυρίως μεταβλητή. Ακόμη, και οι καταναλωτές μπορούν να έχουν σημαντικό ρόλο στη διαχείριση της ζήτησης, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα οικονομικά οφέλη.

Το εργαστήριο ΣΗΕ έχει εμπλακεί σε διάφορα ερευνητικά προγράμματα που αφορούν την διαχείριση της ζήτησης. Κάποια από αυτά είναι τα έργα MICROGRIDS, MORE MICROGRIDS και Smart House/Smart Grid.

Το έργο MORE MICROGRIDS [1] αποτελεί συνέχεια του επιτυχημένου έργου MICROGRIDS [2]. Από το MICROGRIDS προέκυψαν θετικά αποτελέσματα για τη λειτουργία ενός μικροδικτύου και διερευνήθηκαν σε θεωρητικό και εργαστηριακό επίπεδο οι προοπτικές ελέγχου του, ενώ στη συνέχεια στο MORE MICROGRIDS διερευνήθηκε η δυνατότητα λειτουργίας πολλαπλών μικροδικτύων. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τα πιθανά οφέλη και τα τυχόν προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από τη λειτουργία υψηλής διείσδυσης μικροδικτύων στα δίκτυα της Ευρώπης. Επιπλέον, εξετάστηκαν οι διαδικασίες ελέγχου των πολλαπλών μικροδικτύων όταν λειτουργούν ως μία οντότητα και οι μοντελοποιήσεις οι οποίες απαιτούνται. Τα αποτελέσματα τόσο αυτού του προγράμματος όσο και του MICROGRIDS, εξετάστηκαν σε πραγματικά μικροδίκτυα.

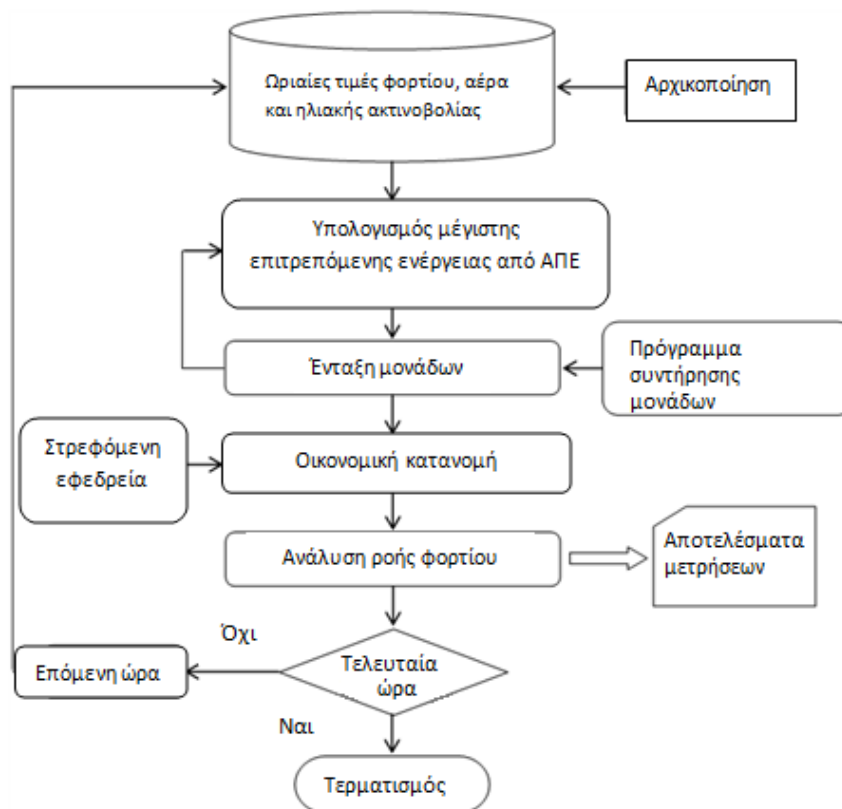
Το πρόγραμμα Smart House/Smart Grid στόχευσε μέσω της χρήσης σύγχρονων τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών (ICT) να βελτιστοποιήσει τη λειτουργία και την ενεργειακή απόδοση των καταναλωτών. Με βάση υπάρχοντα βιομηχανικά πρότυπα τόσο στον ενεργειακό τομέα, όσο και στο κομμάτι της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών, αναπτύχθηκε η βασική πλατφόρμα που απαιτείται για εγκατάσταση σε οικιακό επίπεδο και δοκιμάστηκε σε πραγματικές εγκαταστάσεις σε τρεις χώρες, στην Ελλάδα, στη Γερμανία και στην Ολλανδία. Επιπλέον, στο πρόγραμμα αυτό διερευνήθηκε η ικανότητα διαχείρισης μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεων, η ικανότητα έξυπνης διεπαφής με τους χρήστες και η ικανότητα της διαχείρισης συσκευών ώστε να μελετηθούν, τελικά, τα βήματα που θα οδηγήσουν σε μελλοντικές μαζικές εγκαταστάσεις της πλατφόρμας αυτής.

Ειδικότερα, στο Smart House/Smart Grid μελετήθηκε μέσω προσομοιώσεων αλλά και πραγματικών δοκιμών η επίδραση στην οικονομικότητα και την λειτουργία του ηλεκτρικού

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

συστήματος χρησιμοποιώντας σαν αναφορά το ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης. Με την προσομοίωση του δικτύου της Κρήτης προσδιορίστηκε το φορτίο που μπορεί να ελεγχθεί ανά πάσα στιγμή, κυρίως με μετατόπιση του από τις ώρες αιχμής σε άλλες ώρες, ώστε να υπάρχει αποδοτικότερη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου αλλά και σωστότερη και οικονομικότερη λειτουργία των μονάδων παραγωγής. Συγκεκριμένα, ο έλεγχος του φορτίου και η μετατόπισή του σε ώρες εκτός της αιχμής μπορεί να υποστηρίξει το ηλεκτρικό σύστημα σε περιπτώσεις υπερφόρτισης γραμμών, αλλά και να οδηγήσει σε οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος περιορίζοντας την λειτουργία των αιχμιακών μονάδων [3].

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούσαν ωριαίες τιμές της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην διάρκεια ενός έτους, την παραγωγή Α/Π και την ηλιακή ακτινοβολία λαμβάνοντας υπόψιν και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εγκατεστημένων μονάδων παραγωγής, ώστε να υπολογισθεί η μέγιστη επιτρεπτή ενέργεια που μπορεί να δοθεί από ΑΠΕ για να είναι ασφαλής η λειτουργία του αυτόνομου συστήματος. Το διάγραμμα ροής της συλλογής δεδομένων ανά ώρα είναι το παρακάτω.



Εικόνα 1: Ωριαίο διάγραμμα ροής συλλογής δεδομένων [3]

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η δυνατότητα των ελεγχόμενων φορτίων να συνεισφέρουν και στη σταθερότητα του συστήματος, όπως και η παροχή επικουρικών υπηρεσιών από αυτά. Ειδικότερα μελετήθηκαν σε δυο περιπτώσεις: σε μια περίοδο χαμηλού φορτίου και σε μια περίοδο υψηλού φορτίου. Σε κάθε μια από αυτές τις περιόδους διερευνήθηκαν δυο καταστάσεις: στη μια δεν ήταν δυνατή η απόρριψη φορτίου και στην άλλη το μέγιστο φορτίο που μπορούσε να

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

απορριφθεί ήταν το φορτίο των θερμοσιφώνων και των κλιματιστικών τη συγκεκριμένη ώρα της ημέρας. Ο θερμοσίφωνας και το κλιματιστικό επιλέχτηκαν ως συσκευές επειδή είναι πολύ εύκολο να ελεγχθούν και το φορτίο τους αποτελεί μεγάλο κομμάτι της ηλεκτρικής κατανάλωσης ενός σπιτιού. Επιπλέον, επειδή και οι δυο συσκευές μπορούν να αποθηκεύσουν την ενέργεια, είτε σε μορφή ζεστού νερού, είτε σε μορφή θέρμανσης ή ψύξης ενός χώρου, οποιαδήποτε παρέμβαση μέσω του ελέγχου του φορτίου τους δεν αλλάζει το επίπεδο άνεσης (comfort level) των κατοίκων ενός σπιτιού. Τα νοικοκυριά της περιοχής που μελετήθηκε ομαδοποιήθηκαν και κάθε ώρα ελέγχονταν, για διάρκεια 15 λεπτών, οι συσκευές μόνο της μιας ομάδας από τις τέσσερις που δημιουργήθηκαν. Το έτος χωρίστηκε, ακόμη, σε τέσσερις εποχές (φθινόπωρο, χειμώνα, άνοιξη, καλοκαίρι) λόγω της άμεσης σχέσης των φορτίων που μελετήθηκαν με τις καιρικές συνθήκες. Να σημειωθεί ότι στην συγκεκριμένη μελέτη ο έλεγχος των φορτίων των κλιματιστικών και των θερμοσιφώνων πραγματοποιούνταν μόνο σε ώρες αιχμής, σε ώρες δηλαδή που η ζήτηση του φορτίου ήταν μεγαλύτερη από το 90% του μέγιστου φορτίου [3].

Σε όλα τα παραπάνω εφαρμόστηκαν δυο σενάρια: στο πρώτο δεν γινόταν κανένας έλεγχος φορτίου και στο δεύτερο το φορτίο ελεγχόταν είτε ισάξια σε όλες τις περιοχές της Κρήτης, είτε κυρίως στα νοικοκυριά του Ηρακλείου και των Χανίων. Αναλυτικότερα, στο πρώτο σενάριο δεν εφαρμόστηκε κανένας έλεγχος φορτίου, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο σύγκρισης για την αξιολόγηση του αντίκτυπου που έχει ο έλεγχος των φορτίων στη λειτουργία του συστήματος. Στο δεύτερο σενάριο χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα και οι καμπύλες φορτίου των προς μελέτη οικιακών συσκευών για να προσομοιωθεί η συνεισφορά των ελεγχόμενων φορτίων στη λειτουργία του συστήματος. Επιλέχθηκαν δυο υποσενάρια: στο πρώτο (2A) εφαρμόστηκε έλεγχος φορτίων ομοιόμορφα σε όλες τις περιοχές της Κρήτης και στο δεύτερο (2B) ο έλεγχος φορτίων εφαρμόστηκε κυρίως στις δυο πιο κατοικημένες περιοχές της Κρήτης, τα Χανιά και το Ηράκλειο, οι οποίες είναι απομακρυσμένες από τον κύριο όγκο της παραγωγής. Να σημειωθεί ότι και στα δυο σενάρια μελετήθηκαν διάφορα ποσοστά ελεγχόμενων οικιακών συσκευών επί του συνόλου: 10%, 20% και 30%. Μεγαλύτερος αριθμός ελεγχόμενων συσκευών για τη διαδικασία του peak shaving δεν έφερνε τα επιθυμητά αποτελέσματα [3].

Το πλήθος των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα δυο παραπάνω σενάρια και την ανάλυση τους ήταν μεγάλο. Αρχικά, διαπιστώθηκε ότι ελέγχοντας κάποια φορτία μειώνεται το λειτουργικό κόστος του συστήματος. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι το λειτουργικό κόστος δεν αυξάνεται με τον αριθμό των συμμετεχόντων νοικοκυριών, αλλά υπάρχει ένα άνω όριο διείσδυσης πάνω από το οποίο δεν παρατηρείται καμία βελτίωση. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων και στα δυο σενάρια φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1).

	Σενάριο 1	Σενάριο 2A		Σενάριο 2B	
10%	215,957,553	215,204,940	-0.35%	214,455,919	-0.70%
20%		212,843,853	-1.44%	214,720,126	-0.57%
30%		213,694,172	-1.05%	-	

Πίνακας 1: Το λειτουργικό κόστος του συστήματος σε € για κάθε σενάριο και οι επί τοις εκατό μεταβολές συγκριτικά με το Σενάριο 1 [3]

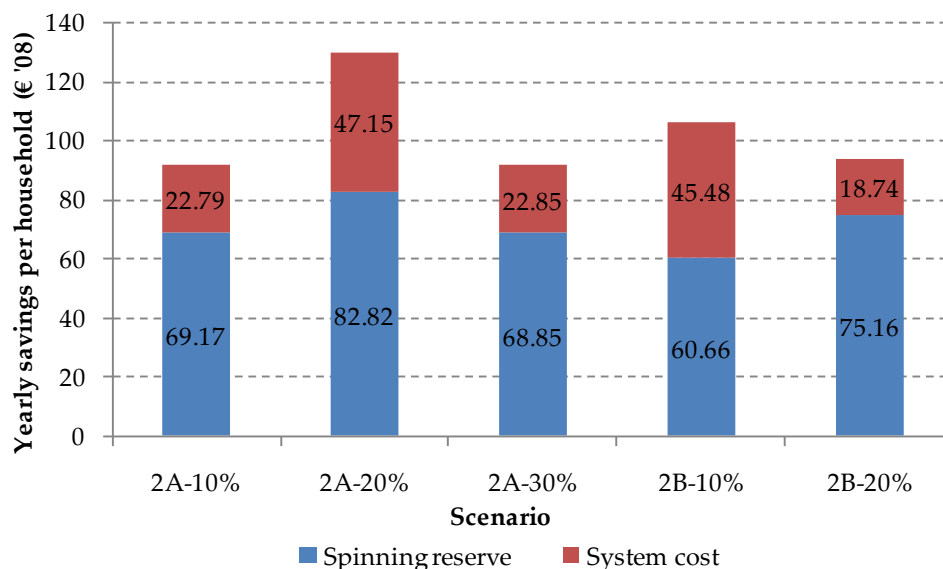
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι με τον έλεγχο των φορτίων βελτιώνονται ελαφρά και οι εκπομπές του CO₂ σε ποσοστά που κυμαίνονται από -0,04% έως -0,31% ανάλογα με το σενάριο και ειδικά στο σενάριο 2B παρουσιάστηκε βελτίωση για μικρότερα ποσοστά διείσδυσης. Τα αποτελέσματα αναγράφονται και στον Πίνακα 2.

	Σενάριο 1	Σενάριο 2A		Σενάριο 2B	
10%	1,468,351	1,467,728	-0.04%	1,465,906	-0.17%
20%		1,466,253	-0.14%	1,463,738	-0.31%
30%		1,464,271	-0.28%	-	

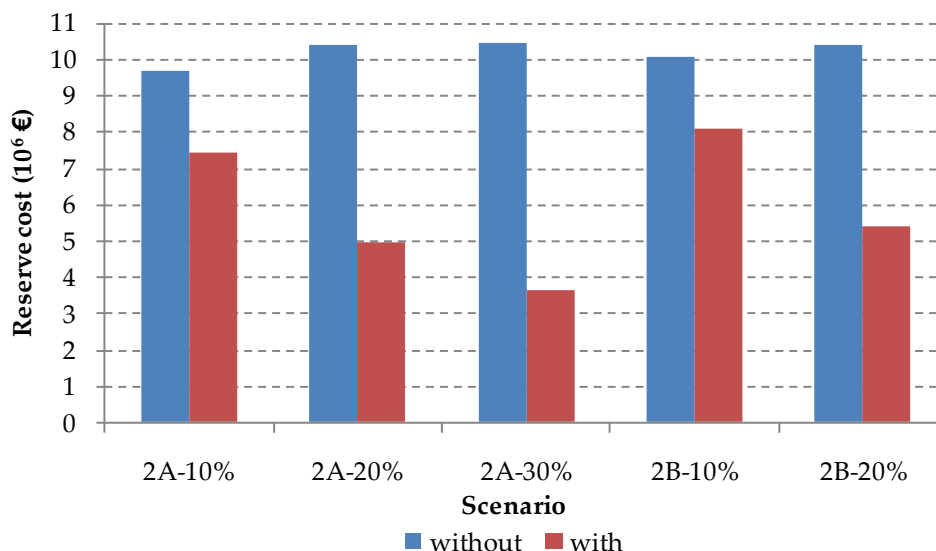
Πίνακας 2: Οι εκπομπές CO₂ σε τόνους για κάθε σενάριο και οι επί τοις εκατό μεταβολές συγκριτικά με το Σενάριο 1 [3]

Πολλή σημαντική ήταν η συνεισφορά των ελεγχόμενων φορτίων και στη στρεφόμενη εφεδρεία, αφού μειώθηκε σημαντικά το κόστος της εφεδρείας, ειδικά στις περιπτώσεις που θεωρήθηκε ότι τα ελεγχόμενα φορτία είναι μέρος της στρεφόμενης εφεδρείας, οπότε σε περίπτωση σφάλματος μπορούν εύκολα να αποκοπούν. Η μείωση του κόστους της εφεδρείας οδήγησε και σε μείωση στο κόστος του συστήματος, το οποίο μεταφράζεται ως κέρδος (σε €/έτος) για τα συμμετέχοντα νοικοκυριά. Τα ποσοτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω γραφήματα (Εικόνα 2, Εικόνα 3).



Εικόνα 2: Ετήσιο κέρδος ανά νοικοκυριό (€ '08) συγκριτικά με το Σενάριο 1 [3]

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή



Εικόνα 3: Κόστος εφεδρείας σε εκατομμύρια € ανά σενάριο για δυο περιπτώσεις στρεφόμενης εφεδρείας: με και χωρίς τη συμμετοχή των ελεγχόμενων φορτίων [3]

Όσον αφορά, τέλος, τις απώλειες στις γραμμές παρουσιάστηκε βελτίωση με την αύξηση του επιπέδου των ελεγχόμενων φορτίων στα σενάρια 2A και 2B, αλλά ειδικά στο σενάριο 2B παρουσιάστηκε και πάλι σημαντική βελτίωση σε χαμηλότερα ποσοστά διείσδυσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3). Ο λόγος για τον οποίο τα ποσοστά μείωσης των απωλειών στις γραμμές είναι μικρά είναι το γεγονός ότι ο έλεγχος φορτίων πραγματοποιήθηκε κυρίως μετατοπίζοντας φορτία από τις ώρες αιχμής σε διπλανές ώρες της ημέρας, όπου και εκεί το φορτίο ήταν αρκετά υψηλό.

	Σενάριο 1	Σενάριο 2A		Σενάριο 2B	
10%	6.871%	6.851%	-0.020%	6.839%	-0.032%
20%		6.845%	-0.026%	6.837%	-0.034%
30%		6.837%	-0.035%	-	

Πίνακας 3: Απώλειες γραμμών σε ποσοστό της παραγωγής για κάθε σενάριο και οι επί τοις εκατό μεταβολές συγκριτικά με το Σενάριο 1 [3]

Η διαχείριση των φορτίων του θερμοσίφωνα και του κλιματιστικού που δοκιμάστηκε στο αυτόνομο σύστημα της Κρήτης απέδειξε, συνεπώς, ότι μπορεί να έχει θετική επίδραση στη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου. Σε αυτή τη μελέτη έρχεται με την παρούσα διπλωματική να προστεθεί και η μελέτη του ψυγείου, ως συσκευή που ο έλεγχός της μπορεί να επηρεάσει την κατανάλωση ενέργειας ενός νοικοκυριού. Μια βασική διαφοροποίηση που υπάρχει στη μελέτη του ψυγείου είναι το γεγονός ότι το φορτίο του μπορεί να ελεγχθεί όλη τη διάρκεια της ημέρας, συνεπώς δεν υπάρχει περιορισμός μόνο στις ώρες αιχμής, όπως έγινε με το κλιματιστικό και το

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

θερμοσίφωνα. Στη συνέχεια θα μελετηθεί μέσα από τρία διαφορετικά μοντέλα ο έλεγχος της ενεργειακής κατανάλωσης του ψυγείου και η διαχείρισή του μέσω Ίντερνετ.

Κεφάλαιο 2

Έξυπνα δίκτυα και διαχείριση ενέργειας

2.1. Το smart grid και το «Ίντερνετ της Ενέργειας»

Κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας των βιομηχανοποιημένων οικονομιών έγιναν από τα πιο πολύπλοκα συστήματα που έχουν δημιουργηθεί από τον άνθρωπο. Παρόλα αυτά, οι τεχνολογίες της διανομής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας δεν αναπτύχθηκαν ιδιαίτερα από την εποχή που πρωτοδημιουργήθηκαν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό ήρθαν να δώσουν λύση τρεις μεγάλες τάσεις: η βιώσιμη ανάπτυξη, η αξιόπιστη ηλεκτροδότηση και η αποκέντρωση της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ανάπτυξη και στροφή στις ΑΠΕ προέκυψε για πολλούς λόγους. Αρχικά, η κλιματική αλλαγή αποτελεί μείζον πρόβλημα και οι περιβαλλοντικές ανησυχίες ολοένα και αυξάνονται. Αυτό, σε συνδυασμό με την πεπερασμένη ποσότητα καυσίμων που υπάρχουν στον κόσμο, αλλά και τα προβλήματα που αυτά και τα αέριά τους δημιουργούν στο περιβάλλον, έφερε στο επίκεντρο την ανάπτυξη νέων μορφών ενέργειας περισσότερο φιλικών προς το περιβάλλον. Αναπτύχθηκαν, λοιπόν, μορφές ενέργειας όπως η υδροηλεκτρική, η αιολική, η ηλιακή, η παραγωγή από βιομάζα και η γεωθερμική. Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι μέχρι στιγμής η πιο διαδεδομένη με ποσοστό περίπου 17%, με δεύτερη την αιολική η οποία παρουσιάζει ετήσια αύξηση 25% με 30%. Βασικό χαρακτηριστικό όλων αυτών των μορφών ενέργειας είναι η απόλυτη εξάρτηση τους από την πηγή ενέργειάς τους. Αυτό, όμως, σημαίνει μεταβαλλόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μπορεί να επηρεάσει τη σταθερότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, κάτι που είναι ανεπιθύμητο. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η εύρεση μιας ικανοποιητικής λύσης, ώστε οι μονάδες παραγωγής να μη διατηρούν περισσότερη εφεδρεία για την εξασφάλιση κάποιας σχετικής «ασφάλειας» απέναντι στις μεταβολές της παραγωγής των ΑΠΕ και ώστε τα έργα ΑΠΕ να γίνουν οικονομικά βιώσιμα.

Η συνεχής αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού, των ηλεκτρικών συσκευών και η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που απαιτούν χρήση ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησε στην ανάπτυξη και αναβάθμιση των συστημάτων διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Η χωρητικότητα των παλιών δικτύων δεν είναι πλέον ικανή να «στηρίξει» το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, άρα κρίθηκε απαραίτητη η εύρεση λύσεων στη συμφόρηση του δικτύου πέρα από τις επενδύσεις που στοχεύουν στην αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου.

Η τελευταία μεγάλη αλλαγή που έγινε είναι η αποκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αφού αναπτύχθηκε η έννοια της διεσπαρμένης παραγωγής. Αυτή, κυρίως με την μορφή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή και μονάδων συνδυασμένου κύκλου, συνδέεται στο δίκτυο διανομής ή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αλλάζοντας την παραγωγή ηλεκτρικής

Κεφάλαιο 2: Έξυπνα δίκτυα και διαχείριση ενέργειας

ενέργειας όσον αφορά τρεις τομείς: η παραγωγή ενέργειας παύει να είναι σταθερή, ο αριθμός των πηγών ενέργειας αυξάνεται, αλλά για την εξυπηρέτηση του φορτίου μειώνεται η ικανότητα παραγωγής όλων αυτών των μονάδων, και, τέλος, αλλάζει η θέση που βρίσκονται οι μονάδες παραγωγής και μειώνεται η απόσταση από το κέντρο κατανάλωσης. Το ολοένα αυξανόμενο μέγεθος της διεσπαρμένης παραγωγής οδηγεί, όμως, σε πολύ μεγάλη πολυπλοκότητα. Απαιτείται, λοιπόν, μια λύση και σε αυτό το πρόβλημα διαφορετική από την αύξηση της χωρητικότητας των γραμμών και τη μείωση του «μεριδίου» παραγωγής της κάθε μονάδας.

Σε όλα αυτά έρχεται να δώσει απάντηση η ανάπτυξη του smart grid, μέσα από πολιτικές διαχείρισης της ζήτησης (demand-response) και διαχείριση και συντονισμό της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το βασικό μέσο μεταφοράς πληροφορίας και δεδομένων που χρησιμοποιεί το smart grid είναι το Ίντερνετ. Αυτό συμβαίνει γιατί κάποιες ιδιότητες του διαδικτύου είναι πολύ χρήσιμες και επιθυμητές για τη λειτουργία του «έξυπνου δικτύου». Αρχικά, μέσω του διαδικτύου μπορεί να επιτευχθεί η αλληλεπίδραση και συνεργασία των καταναλωτών που είναι συνδεδεμένοι στο smart grid, ώστε να μπορούν να συμμετέχουν και στη διαχείρισή του. Η διεσπαρμένη παραγωγή, επίσης, δημιουργήσε μια τοπολογία παρόμοια με αυτή του Ίντερνετ, την ύπαρξη, δηλαδή, πολλών δικτύων που αποτελούνται και αυτά από επιμέρους δίκτυα. Συγκεκριμένα, τοπικά τμήματα του δικτύου παρέχουν τη δική τους παραγωγή, ανταλλάσσοντας λίγη ενέργεια με το υπόλοιπο δίκτυο, και όπως συμβαίνει και στο Ίντερνετ οι τελικές αποφάσεις λαμβάνονται σε αυτό το τοπικό επίπεδο. Τέλος, το Ίντερνετ, όντας ένα πολύπλοκο δίκτυο με πολλούς επιμέρους διασυνδεδεμένους κόμβους παρουσιάζει συμπεριφορές που δε μπορούν να ερμηνευθούν παρατηρώντας μεμονωμένους κόμβους ή συνδέσμους. Έχει, λοιπόν, αναπτύξει τρόπους να αυτο-οργανώνεται και να επιλύει μόνο του τα προβλήματά του, χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητα για τα σύγχρονα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρόλα τα κοινά χαρακτηριστικά που έχουν τα ηλεκτρικά δίκτυα με το Ίντερνετ ή τα χαρακτηριστικά του που θα έπρεπε να αναπτύξουν, είναι εντελώς διαφορετικά από τα δίκτυα υπολογιστών, αφού η ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι πληροφορία. Η ηλεκτρική ενέργεια έχει συνεχή μορφή και μεταδίδεται κυρίως μέσα από παθητικά δίκτυα. Σε αυτά, το μεγαλύτερο κομμάτι της ενέργειας επιλέγει να διαδοθεί μέσα από το μονοπάτι με τη μικρότερη αντίσταση. Στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας δεν υπάρχει, επίσης, αποθήκευση της ενέργειας στο δίκτυο, αφού πρέπει να διατηρείται συνεχώς η ισορροπία της προσφοράς/ζήτησης, για να αποφευχθούν οποιεσδήποτε αστάθειες που μπορεί να οδηγήσουν σε black-out. Αυτές οι τρεις βασικές διαφορές καθιστούν την υποδομή των ηλεκτρικών δικτύων πολύ διαφορετική από αυτών του διαδικτύου [4].

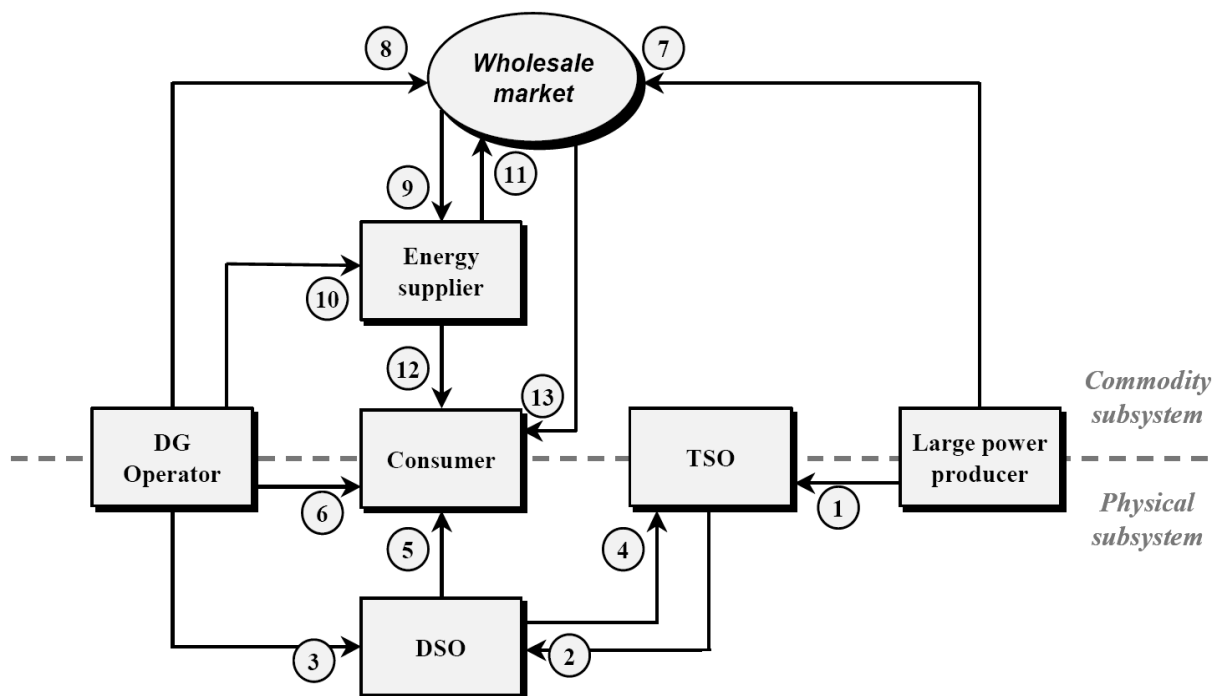
Ένας νέος όρος που έχει πρόσφατα δημιουργηθεί είναι το «Ίντερνετ της Ενέργειας». Ο όρος αυτός αναφέρεται στο συνδυασμό έξυπνων χρηστών, παρόχων και των υπόλοιπων μελών της αγοράς ενέργειας για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, μέσω του συντονισμού της παραγωγής και της κατανάλωσης. Συγκεκριμένα, απαιτείται μια ολοκληρωμένη υποδομή πληροφορίας και επικοινωνίας, η οποία θα βασίζεται στο Ίντερνετ και θα επιτρέπει την πρόσβαση σε πληροφορίες της ενέργειας απλά, τυποποιημένα, με ελάχιστο κόστος και σε πραγματικό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο οι προμηθευτές ενέργειας θα έχουν έγκαιρη και έγκυρη

Κεφάλαιο 2: Έξυπνα δίκτυα και διαχείριση ενέργειας

πληροφόρηση αναφορικά με τη ζήτηση της ενέργειας για να είναι σε θέση να εξασφαλίσουν τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος ενέργειας. Μια τέτοια υποδομή θα ωφελήσει και τους καταναλωτές, αφού μέσω των τεχνολογιών που θα αναπτυχθούν θα μπορούν να παρακολουθούν την ενεργειακή κατανάλωση των συσκευών τους, οπότε θα τις λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε να τη μειώσουν και άρα να μειώσουν και τα έξοδά τους. Βάση της ανάπτυξης του «Ίντερνετ της Ενέργειας» είναι οι τεχνολογίες της Πληροφορικής και των Τηλεπικοινωνιών, αφού χάρη σε αυτές θα αναπτυχθεί η επικοινωνία όλων των μελών της αγοράς ενέργειας και το δίκτυο της ενέργειας θα προσανατολισθεί προς την αγορά, παρέχοντας δυνατότητες για διαδραστική βελτιστοποίηση του δικτύου και δημιουργία νέων υπηρεσιών δικτύου [5].

2.2.Δομή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Το σύστημα της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από όλα τα συστήματα και τους παράγοντες που συμμετέχουν στην παραγωγή, στη μεταφορά, στη διανομή και στην διακίνηση της ενέργειας. Συγκεκριμένα, αποτελείται από δυο υποσυστήματα: το φυσικό υποσύστημα (physical subsystem), που περιλαμβάνει την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, και το εμπορικό υποσύστημα (commodity subsystem), που αφορά την αγοραπωλησία της ενέργειας. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4) παρουσιάζεται το μοντέλο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως φαίνεται τα δυο υποσυστήματα είναι διαχωρισμένα και παρόλο που σχετίζονται δε συνδέονται το ένα με το άλλο.



Εικόνα 4: Μοντέλο συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο καταγράφονται τα δυο βασικά του υποσυστήματα [4]

Κεφάλαιο 2: Έξυπνα δίκτυα και διαχείριση ενέργειας

Αναλυτικότερα, ο παραγωγός (producer) είναι υπεύθυνος για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό συμβάλλει και η διεσπαρμένη παραγωγή (DG), απλώς η παραγωγή της ενέργειας γίνεται σε μικρότερη κλίμακα. Ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς (transmission system operator- TSO) είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση του συστήματος μεταφοράς και των διασυνδέσεών του με άλλα συστήματα, όπου είναι δυνατό. Ακόμη, εξασφαλίζει τη μακροπρόθεσμη ικανότητα του συστήματος να ανταποκρίνεται στη ζήτηση για μεταφορά ενέργειας και για την εκτέλεση αυτών του των καθηκόντων διασφαλίζει τη συντήρηση και ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς. Μια άλλη αρμοδιότητα του διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς είναι η παροχή υπηρεσιών συστήματος στην περιοχή που ελέγχει. Αυτές οι υπηρεσίες περιλαμβάνουν υπηρεσίες εξισορρόπησης, για παράδειγμα εξάλειψη της διαφοράς ανάμεσα σε παραγωγή και ζήτηση, ικανότητα εφεδρείας, ποιότητα ισχύος, ελέγχοντας για παράδειγμα τη συχνότητα, παροχή αέργου ισχύος και ικανότητα εκκίνησης του συστήματος (black start capability). Ο διαχειριστής του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (distribution system operator- DSO) είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία του συστήματος διανομής σε μια συγκεκριμένη περιοχή και για τις συνδέσεις με το σύστημα μεταφοράς. Μέσω της συντήρησης και της ανάπτυξης του δικτύου διανομής εξασφαλίζει τη μακροπρόθεσμη ικανότητα του συστήματος να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις της ζήτησης της ενέργειας. Είναι, επίσης, υπεύθυνος για υπηρεσίες του συστήματος, όπως είναι η εξασφάλιση της ποιότητας του ρεύματος. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος «σύστημα μεταφοράς» αναφέρεται στο διασυνδεδεμένο δίκτυο υψηλής τάσης και ο όρος «σύστημα διανομής» αναφέρεται στη μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το δίκτυο διανομής υψηλής, μέσης και χαμηλής τάσης, χωρίς να συμπεριλαμβάνει την προμήθεια (supply) ηλεκτρικής ενέργειας. Ο προμηθευτής ηλεκτρικής ενέργειας (energy supplier) είναι υπεύθυνος για την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Ο παραγωγός και ο προμηθευτής μπορούν, μερικές φορές, να είναι το ίδιο άτομο, όπως και ένας προμηθευτής μπορεί να είναι ένας πελάτης χονδρικής ή ένας έμπορος, ο οποίος αγοράζει ενέργεια με σκοπό να την μεταπουλήσει εντός του συστήματος. Ο καταναλωτής (consumer), τέλος, αγοράζει την ενέργεια για προσωπική του χρήση και στις απελευθερωμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αγοράσει την ενέργεια από τον πάροχο της επιλογής του.

Το φυσικό υποσύστημα αποτελείται από όλο το hardware που παράγει και μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές, όπως και από όλον τον εξοπλισμό που χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια. Η δομή του καθορίζεται από τη φύση των επιμέρους στοιχείων που συνθέτουν το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή τις γεννήτριες (producer και DG), το δίκτυο μεταφοράς (TSO), το δίκτυο διανομής (DSO) και τα διάφορα φορτία (consumers) [6]. Το φυσικό υποσύστημα απεικονίζεται στο κάτω μέρος της Εικόνας 4. Οι μεγάλοι παραγωγοί ενέργειας διοχετεύουν την ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο μεταφοράς, συνεπώς η σχέση (1) της εικόνας αντιπροσωπεύει τη συμφωνία του παραγωγού με το διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς (TSO). Ο παραγωγός καταβάλλει τα τέλη σύνδεσης στο δίκτυο, και μερικές φορές και τέλη χρήσης του δικτύου, για τη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στους διαχειριστές του συστήματος διανομής (2), ο οποίος, με τη σειρά του, διανέμει την ενέργεια στον καταναλωτή. Η σχέση (5) αντιπροσωπεύει τα τέλη χρήσης του δικτύου και σύνδεσης σε αυτό που

Κεφάλαιο 2: Έξυπνα δίκτυα και διαχείριση ενέργειας

καταβάλλει ο καταναλωτής στο DSO για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και υπηρεσιών του συστήματος. Ακόμη, φαίνεται ότι η ενέργεια που παράγεται από τη διεσπαρμένη παραγωγή (DG) τροφοδοτείται κατευθείαν στο σύστημα διανομής με βάση κάποια συμφωνία ανάμεσα στους παραγωγούς και τον DSO (3). Οι παραγωγοί αυτοί καταβάλλουν και αυτοί τέλη σύνδεσης ή ακόμα και χρήσης του δικτύου στο διαχειριστή του συστήματος διανομής για τη μεταφορά της ενέργειας και τις υπηρεσίες του δικτύου. Το μεγαλύτερο κομμάτι της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από διεσπαρμένη παραγωγή διανέμεται στον καταναλωτή από τον DSO, αλλά σε περίπτωση που η παραγωγή αυτή ξεπεράσει τη ζήτηση το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτείται στο δίκτυο μεταφοράς (4) απ' όπου ο TSO το μεταφέρει σε άλλα συστήματα διανομής (2). Η μόνη σχέση που δεν αναλύθηκε είναι η σχέση (6). Αυτή αφορά στην άμεση κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται επί τόπου από τον καταναλωτή, για παράδειγμα από φωτοβολταϊκά στη στέγη του σπιτιού του, παραλείποντας τη διαδικασία πώλησης και αγοράς ενέργειας μέσω ενός προμηθευτή ενέργειας.

Σε αντίθεση με το φυσικό υποσύστημα, το εμπορικό υποσύστημα απεικονίζεται στο πάνω μέρος της Εικόνας 4 και αφορά τις οικονομικές συναλλαγές των εμπορευμάτων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Βασικός του στόχος είναι η αποτελεσματική κατανομή του κόστους και των οφελών, με βάση τους περιορισμούς που επιβάλλονται από το φυσικό υποσύστημα. Το εμπορικό υποσύστημα αποτελείται από όλους τους παράγοντες που συμμετέχουν στην παραγωγή, την πώληση και την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των αμοιβαίων σχέσεων τους και των δραστηριοτήτων υποστήριξης και ρύθμισής τους [6]. Οι μεγάλοι παραγωγοί ενέργειας (7) και μερικοί μεγάλοι παραγωγοί DG (8) προσφέρουν το εμπόρευμα, δηλαδή την ηλεκτρική ενέργεια, στη χονδρική αγορά (wholesale market) και από εκεί οι μεγάλοι καταναλωτές μπορούν να αγοράσουν απευθείας την ενέργεια, όπως φαίνεται και με τη σχέση (13), ενώ οι προμηθευτές ενέργειας (energy suppliers) αγοράζουν την ενέργεια με βάση συμβάσεις (9) για την εξυπηρέτηση μικρότερων καταναλωτών. Η συμμετοχή στη χονδρική αγορά καλύπτει τα έξοδα της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Εκτός της χονδρικής αγοράς ο προμηθευτής ενέργειας μπορεί να εξάγει το εμπόρευμα απευθείας από μικρούς παραγωγούς DG (10). Στη συνέχεια ο προμηθευτής παρέχει στους καταναλωτές την ηλεκτρική ενέργεια (12) με κάποιο κόστος για τους καταναλωτές. Οι προμηθευτές ενέργειας αγοράζουν, συνήθως, περισσότερη ενέργεια από όση χρειάζεται τελικά να πουλήσουν στους καταναλωτές, οπότε την επιπλέον ποσότητα την πουλούν πίσω στη χονδρική αγορά. Σε περίπτωση που ο προμηθευτής μπορεί να προβλέψει το ακριβές ποσό ηλεκτρικής ενέργειας αποζημιώνεται πλήρως, αφού δεν έχει να πληρώσει πρόστιμα για πιθανές αποκλίσεις. Παρόλα αυτά, οι αποκλίσεις από την προβλεπόμενη ή την εκτιμώμενη παραγωγή είναι σύνηθες φαινόμενο, λόγω της αποτυχίας να επιτευχθεί βραχυπρόθεσμα εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης. Είναι απαραίτητος, συνεπώς, ένας επιπλέον μηχανισμός, ο οποίος βραχυπρόθεσμα θα εξισορροπεί το σύστημα.

Με την απελευθέρωση των αγορών ενέργειας η ευθύνη της αντιστοίχισης της προσφοράς με τη ζήτηση μεσο- και μακροπρόθεσμα έγινε ευθύνη της ίδιας της αγοράς. Ο όρος μεσοπρόθεσμα αναφέρεται σε διάστημα ωρών, ενώ ο όρος μακροπρόθεσμα αναφέρεται σε διάστημα ημερών, μηνών ή και ετών. Η ισορροπία της προσφοράς και της ζήτησης, όμως, πρέπει να τηρείται ακόμα και σε επίπεδο δευτερολέπτων. Η διατήρηση της μεσοπρόθεσμης και βραχυπρόθεσμης

Κεφάλαιο 2: Έξυπνα δίκτυα και διαχείριση ενέργειας

της διεσπαρμένης παραγωγής και οι προμηθευτές ενέργειας έχουν επίσης πρόσβαση. Στην Εικόνα 5 φαίνεται η επίδραση της αγοράς εξισορρόπησης στο σύστημα ενέργειας και οι λιγότερο συνηθισμένες συναλλαγές για τις υπάρχουσες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας απεικονίζονται με διακεκομμένες γραμμές. Αναλυτικότερα, σε περίπτωση έλλειψης ο TSO προσπαθεί να τη διορθώσει αγοράζοντας την προσφορά του εμπορεύματος με τη χαμηλότερη τιμή από την αγορά εξισορρόπησης (16). Οι περισσότερες προσφορές είναι κυρίως από μεγάλους παραγωγούς ενέργειας (14), αλλά καμιά φορά και οι παραγωγοί διεσπαρμένης παραγωγής (κυρίως μεγάλες μονάδες συνδυασμένου κύκλου) (15) αλλά και οι προμηθευτές (18) προσφέρουν ηλεκτρική ενέργεια για εξισορρόπηση. Ο TSO χρεώνει τον προμηθευτή/ές που δημιούργησε/αν την ανισορροπία (17) με βάση την υψηλότερη τιμή που έχει καταβληθεί για την αγορά ενέργειας από την αγορά εξισορρόπησης. Σε περίπτωση που υπάρχει πλεόνασμα παραγόμενης ενέργειας ο TSO δέχεται και λαμβάνει την υψηλότερη προσφορά από την αγορά εξισορρόπησης για να προσαρμόσει προς τα κάτω τις μονάδες παραγωγής και οι προμηθευτές πληρώνουν στον TSO τα λεγόμενα «τέλη διαταραχής της ισορροπίας». Τα τέλη αυτά καθορίζονται από συμβόλαια ανάμεσα σε όλους τους παράγοντες της αγοράς ενέργειας, αλλά οι προμηθευτές ενέργειας είναι αυτοί που είναι κυρίως υπεύθυνοι για τη ζήτηση των καταναλωτών τους ή την παραγωγή από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, με τους οποίους έχουν υπογράψει συμβόλαια. Για αυτόν το λόγο οι προμηθευτές πληρώνουν τα τέλη εξισορρόπησης, σε περίπτωση που υπάρχει απόκλιση από την αναμενόμενη ζήτηση των καταναλωτών ή την αναμενόμενη παραγωγή των παραγωγών DG. Ακόμη, αν ένας μεγάλος παραγωγός ενέργειας δε συμμορφώνεται με τις συμβάσεις του, υποχρεώνεται ο ίδιος να πληρώσει τα τέλη εξισορρόπησης, αφού όλοι οι μεγάλοι παραγωγοί είναι υπεύθυνοι για το δικό τους πρόγραμμα για την παραγωγή ενέργειας. Βασικό κίνητρο που ωθεί τους παράγοντες της αγοράς ενέργειας να κάνουν ακριβείς προβλέψεις για την παραγωγή και την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η τιμή της ενέργειας που αγοράζεται για εξισορρόπηση, η οποία είναι μεγαλύτερη από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά. Συνήθως, η παραγωγή της ενέργειας εξισορρόπησης γίνεται από μονάδες με υψηλό οριακό κόστος, οπότε η τιμή της είναι σίγουρα ψηλότερη από αυτή της αγοράς [4].

Κεφάλαιο 3

Δεδομένα για οικιακούς καταναλωτές

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον έχει στραφεί στις price-responsive demand (PRD) αγορές. Αυτό συμβαίνει κυρίως στις Η.Π.Α., ενώ στην Ευρώπη τα περισσότερα προγράμματα που έχουν δοκιμαστεί είναι πιλοτικά. Σε αυτές τις αγορές υπάρχει άμεση σύνδεση της χονδρικής και λιανικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οι μεγάλοι καταναλωτές δεν είναι αντιμέτωποι με σταθερές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη χονδρική αγορά (όπως περιγράφηκε και στο προηγούμενο Κεφάλαιο με βάση την Εικόνα 4). Με αυτόν τον τρόπο σε περιπτώσεις, για παράδειγμα, πολύ υψηλών τιμών της χονδρικής αγοράς, όπως είναι στις μέρες που είναι πολύ ζεστές, οι καταναλωτές πρέπει να μειώσουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, διευκολύνοντας, ταυτόχρονα, το σύστημα για την εξυπηρέτηση όλων του των φορτίων. Η ανάπτυξη που έχουν σημειώσει οι προηγμένοι μετρητές (advanced metering infrastructure- AMI) που ενσωματώνονται στο smart grid, όπως και το ολοένα και αυξανόμενο ενδιαφέρον που υπάρχει για προγράμματα διαχείρισης ζήτησης (demand response-DR), τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω, υποδεικνύουν τη ραγδαία ανάπτυξη που θα έχουν οι παραπάνω αλλαγές στις αγορές ενέργειας.

Η επίτευξη PRD μπορεί να γίνει μέσω δυο μηχανισμών: στον πρώτο στέλνονται σήματα τιμών στους καταναλωτές, τα οποία βασίζονται στις τρέχουσες ή τις αναμενόμενες τιμές χονδρικής και στα οποία επιλέγουν να ανταποκριθούν σε όποιο βαθμό θέλουν και στον δεύτερο στέλνονται ποσοτικά σήματα (quantity signals) στους καταναλωτές. Στις Η.Π.Α., για παράδειγμα, οι καταναλωτές έχουν ευνοϊκότερα τιμολόγια, ωστόσο πρέπει οπωσδήποτε να τηρήσουν τα ποσοτικά σήματα, αφού υπάρχει κίνδυνος να τους επιβληθεί πρόστιμο.

Τα σήματα τιμών, τα οποία προσφέρουν τις περισσότερες επιλογές στους καταναλωτές, μπορούν να σταλούν μέσα από διάφορους μηχανισμούς, όπως είναι η δυναμική τιμολόγηση με βάση τις τιμές λιανικής και τα προγράμματα διαχείρισης ζήτησης. Μέσω των σημάτων τιμών οι καταναλωτές μπορούν να επιλέξουν είτε να εξοικονομήσουν χρήματα μειώνοντας από μόνοι τους την κατανάλωση τις ώρες αιχμής, είτε μελλοντικά, λόγω της ανάπτυξης της αυτόματης διαχείρισης των οικιακών συσκευών, να αγοράσουν ενέργεια σε μεταβλητές τιμές.

Αναλυτικότερα, στη δυναμική τιμολόγηση η διαφορά ανάμεσα στο μεταβλητό κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και της τιμής που πληρώνουν οι καταναλωτές είναι μειωμένη, αφού οι τιμές λιανικής που δίνονται στους καταναλωτές αντανακλούν τα μεταβλητά κόστη της χονδρικής αγοράς. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι δυναμικής τιμολόγησης, κάποιες από τις οποίες είναι η ωριαία τιμολόγηση (hourly pricing) και η ημερήσια τιμολόγηση (daily pricing). Η ωριαία τιμολόγηση είναι η πιο ευέλικτη και ακριβής μέθοδος τιμολόγησης, αφού οι τιμές λιανικής προς τους καταναλωτές ποικίλλουν κάθε ώρα. Οι τιμές αυτές ανακοινώνονται μια μέρα ή μια ώρα πριν και στις παραδοσιακές αγορές αντανακλούν το οριακό κόστος παραγωγής και

Κεφάλαιο 3: Δεδομένα για οικιακούς καταναλωτές

συμπεριλαμβάνουν χρεώσεις χρήσης συστήματος και δικτύου. Λόγω της αβεβαιότητας, που οφείλεται στη μεταβλητότητα του οριακού κόστους και των τιμών της χονδρικής αγοράς ενέργειας, οι καταναλωτές έχουν τη δυνατότητα να διαχειριστούν το ρίσκο που αναλαμβάνουν υπογράφοντας συμβόλαια με εγγυημένες σταθερές τιμές για κάποια συγκεκριμένη ποσότητα του φορτίου τους. Στην ημερήσια τιμολόγηση οι τιμές είναι καθορισμένες μέσα σε επιμέρους περιόδους χρόνου, αλλά η τιμή για τουλάχιστον μια περίοδο μεταβάλλεται καθημερινά. Αυτή η τιμή ανακοινώνεται συνήθως μια μέρα πριν [7].

Στα προγράμματα διαχείρισης ζήτησης (DR) προσφέρονται στους καταναλωτές εκπτώσεις με αντάλλαγμα τη δέσμευσή τους να περικόψουν τη χρήση κάποιων οικιακών συσκευών όταν τους ζητηθεί, κυρίως, όμως, σε περιπτώσεις ανάγκης. Το βασικό όφελος αυτών των DR προγραμμάτων είναι η δυνατότητα μείωσης της κορυφής της ζήτησης, το οποίο οδηγεί σε μεγάλη εξοικονόμηση, αφού σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να αποφευχθεί η χρήση των αιχμιακών μονάδων. Πολύ σημαντική είναι και η συνεισφορά αυτών των προγραμμάτων στην εφεδρεία. Συγκεκριμένα, για κάθε MW που μειώνεται η κατανάλωση μέσω πολιτικών διαχείρισης ζήτησης δεν προκύπτουν μόνο μειωμένα έξοδα των μονάδων, αλλά αυτή η ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για παροχή εφεδρείας, μειώνοντας και τα έξοδά της. Τέλος, με την αποστολή καλύτερων σημάτων τιμών στους καταναλωτές μπορεί να αυξηθεί και η ελαστικότητα της ζήτησης, πράγμα που αν γίνει σε μεγάλο βαθμό μπορεί να μειώσει τη δύναμη που ασκεί η αγορά στους καταναλωτές [8].

Πολιτικές της μορφής demand-response μπορούν να εφαρμοστούν με την έξυπνη χρήση οικιακών συσκευών. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4) είναι καταγεγραμμένη η διείσδυση κατά τη διάρκεια της ημέρας των εννέα βασικότερων οικιακών συσκευών που υπάρχουν στα σπίτια των καταναλωτών τεσσάρων περιοχών της Ευρώπης [9]. Οι πληροφορίες που προκύπτουν από αυτόν τον πίνακα είναι πολύ χρήσιμες, αφού εξάγονται συμπεράσματα για τον αριθμό των ωρών μιας ημέρας που είναι πιθανότερο να λειτουργεί κάποια συσκευή, οπότε προκύπτει και πόσο από το φορτίο της μπορεί να μετατοπισθεί μέσα από τον έλεγχό της.

Κεφάλαιο 3: Δεδομένα για οικιακούς καταναλωτές

	Περιοχή Α	Περιοχή Β	Περιοχή C	Περιοχή D	Περιοχή E
	Νότια Ευρώπη	Σκανδιναβία	Νέες χώρες μέλη	Γερμανία/Αυστρία	Ηνωμένο Βασίλειο
Συσκευή	διείσδυση σε %				
Πλυντήριο	95	85	75	95	95
Στεγνωτήριο	20	40	10	40	53
Πλυντήριο πιάτων	30	60	10	65	28
Κουζίνα και φούρνος	40 (10-60)	98	40	80	56
Ψυγείο	100	100	100	100	100
Καταψύκτης	60	90	30	55	40
Κλιματιστικό	30	0	5	5	0
Ηλεκτρικός θερμοσίφωνας	30	30	50	1	4
Κυκλοφορητής	70	70	70	80	60

Πίνακας 4: Εκτιμώμενη διείσδυση οικιακών συσκευών στα Ευρωπαϊκά νοικοκυριά [9]

Ο έλεγχος των οικιακών συσκευών μπορεί να γίνει με δυο τρόπους. Ο ένας τρόπος είναι καθορίζοντας έξυπνα τις χρονικές στιγμές του κύκλου λειτουργίας της κάθε συσκευής (smart timing of appliance cycles). Με λίγα λόγια, η εκκίνηση κάθε συσκευής καθυστερείται ώστε να γίνει με βάση τις απαιτήσεις του συστήματος για τη διαχείριση του φορτίου. Ένα ψυγείο, για παράδειγμα, μπορεί να αποθηκεύσει στο εσωτερικό του περισσότερο κρύο πριν από μια περίοδο υψηλών τιμών φορτίου, ώστε την ώρα αιχμής να μη λειτουργεί ενεργοβόρα. Γενικότερα, η λειτουργία του ψυγείου γίνεται σε κύκλους και αν δεν ανοιγοκλείνουν συχνά οι πόρτες του η περίοδος μετατόπισης του φορτίου του μπορεί να μεγιστοποιηθεί. Μια άλλη συσκευή στην οποία μπορεί να εφαρμοστεί η παραπάνω μέθοδος είναι το πλυντήριο πιάτων, αφού μετά τη λειτουργία του μπορεί να μείνει αδρανές για πολλές ώρες, σε περίπτωση που για παράδειγμα λειτουργήσει αργά το βράδυ. Ο δεύτερος τρόπος ελέγχου των οικιακών συσκευών είναι παρεμβαίνοντας στη λειτουργία τους, σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η μείωση του φορτίου του δικτύου (interruptions of appliance cycles). Αυτό συμβαίνει στέλνοντας ένα εξωτερικό σήμα με το οποίο ο εσωτερικός ελεγκτής της συσκευής διακόπτει τη λειτουργία της για κάποιο χρονικό διάστημα, το οποίο, όμως, είναι περιορισμένο για τεχνικούς λόγους. Ένα πλυντήριο, για παράδειγμα, δε μπορεί να διακοπεί για μεγάλο χρονικό διάστημα (το πολύ για 15 λεπτά) γιατί στη συνέχεια το ποσό θερμότητας που θα χρειαστεί για να ξαναθερμανθεί το νερό και να συνεχίσει τη λειτουργία του είναι μεγάλο. Τα πλυντήρια, βέβαια, δε διακόπτουν συνήθως τον κύκλο λειτουργίας τους, αλλά προγραμματίζονται για μία συγκεκριμένη ώρα έναρξης της πλύσης και την αλλάζουν αυτόματα σε περίπτωση που δεχτούν διαφορετικό σήμα. Τα κλιματιστικά, από την άλλη πλευρά, μπορούν να διακόψουν τη λειτουργία τους και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, ανάλογα όμως με τη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου και το επίπεδο άνεσης των

Κεφάλαιο 3: Δεδομένα για οικιακούς καταναλωτές

κατοίκων του. Να σημειωθεί ότι κατά την παρέμβαση στη λειτουργία οποιωνδήποτε οικιακών συσκευών είναι απαραίτητη η εξασφάλιση της ποιότητας των υπηρεσιών που παρέχουν. Στον Πίνακα 5 παρατίθεται η λειτουργία των έξυπνων συσκευών που ελέγχονται με τους δυο τρόπους διαχείρισης ζήτησης που αναλύθηκαν.

Smart Timing of Appliance Cycles		Interruptions of Appliance Cycles	
Αναμενόμενη χρονική μετατόπιση κύκλων λειτουργίας:		Αναμενόμενη διάρκεια διακοπής φορτίου:	
Πλυντήριο	3-6 ώρες	Πλυντήριο	~15 λεπτά
Στεγνωτήριο	3-6 ώρες	Στεγνωτήριο	~30 λεπτά
Πλυντήριο πιάτων	3-8 ώρες	Πλυντήριο πιάτων	~15 λεπτά
Ψυγείο	15-30 λεπτά	Ψυγείο	~15 λεπτά

Πίνακας 5: Επιλογές διαχείρισης της ζήτησης που μπορούν να προσφερθούν από έξυπνες συσκευές [10]

Με βάση τα παραπάνω, ο έλεγχος μιας συσκευής οδηγεί σε μια περίοδο μειωμένου φορτίου και σε μια περίοδο ανάκτησης του φορτίου. Η οποιαδήποτε παρέμβαση στον κύκλο λειτουργίας της συσκευής, είτε είναι παύση είτε είναι διακοπή, οδηγεί σε μια περίοδο μειωμένου φορτίου συγκριτικά με το φορτίο βάσης και στη συνέχεια, μετά το πέρας οποιασδήποτε παρέμβασης, το φορτίο αρχίζει να αυξάνεται και ξεπερνά το φορτίο βάσης. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν καθόλου απώλειες το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται κατά την περίοδο ανάκτησης φορτίου είναι ίδιο με το ποσό της ενέργειας που εξοικονομήθηκε κατά τη μείωσή του.

Βασικό ρόλο στη διαχείριση των φορτίων των οικιακών συσκευών παίζουν οι καταναλωτές και η διάθεση τους να συμμετάσχουν σε τέτοια προγράμματα. Υπάρχουν τρία επίπεδα αλληλεπίδρασης των καταναλωτών και των έξυπνων συσκευών. Αρχικά, υπάρχουν οι πλήρως αυτοματοποιημένες συσκευές, οι οποίες είναι σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε ο καταναλωτής να μη μπορεί να επηρεάσει την έξυπνη λειτουργία τους, όπως μπορεί για παράδειγμα να γίνει στα ψυγεία. Επιπλέον, υπάρχει και η λειτουργία “set and forget” στην οποία ο καταναλωτής ορίζει μια φορά τον τρόπο που θέλει να λειτουργεί η συσκευή του, αλλά έχει τη δυνατότητα να αναιρέσει την έξυπνη λειτουργία αν το επιθυμεί. Στο τρίτο επίπεδο, η λειτουργία της έξυπνης συσκευής καθορίζεται βήμα-βήμα. Ο καταναλωτής επιλέγει τον τρόπο που θέλει να λειτουργεί η συσκευή του κάθε φορά που τη θέτει σε λειτουργία και σε πιο περίπλοκες περιπτώσεις η συσκευή λαμβάνει σήματα που υποδεικνύουν την κατάσταση του συστήματος ενέργειας και μέσω της οθόνης της ενημερώνεται και ο καταναλωτής. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να αποφασίσει ο ίδιος πως μπορεί να βοηθήσει, είτε χρησιμοποιώντας τη συσκευή αργότερα μέσα στην ημέρα ή ορίζοντας την οικονομικότερη λειτουργία της.

Ένα παράδειγμα έξυπνων συσκευών είναι το νέο ψυγείο και πλυντήριο της Samsung με υποστήριξη Wi-Fi. Το ψυγείο έχει ενσωματωμένη LCD οθόνη 8” και με τη βοήθεια της λειτουργίας Grocery Manager ο καταναλωτής μπορεί να ελέγχει τις ημερομηνίες λήξης των τροφίμων και να ορίζει ειδοποιήσεις ώστε να τα καταναλώνει εντός αυτών. Το πλυντήριο έχει, επίσης, ενσωματωμένη LCD οθόνη 8” και είναι συνδεδεμένο με το smartphone του καταναλωτή,

Κεφάλαιο 3: Δεδομένα για οικιακούς καταναλωτές

ώστε να μπορεί να ορίζει εξ αποστάσεως τους κύκλους πλήσης, να αλλάζει τις ρυθμίσεις και να ανοίγει και να κλείνει το πλυντήριο όποτε εκείνος θελήσει [11].

Οι έξυπνες συσκευές μπορούν, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, να χρησιμοποιηθούν με πολλούς τρόπους για τη διαχείριση του φορτίου του συστήματος ενέργειας. Κατά το σχεδιασμό της ένταξης των μονάδων για την εξυπηρέτηση του φορτίου μπορούν και οι έξυπνες συσκευές να υπολογιστούν ως πόρος για τον προγραμματισμό του φορτίου. Ακόμη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και βραχυπρόθεσμα για την εξυπηρέτηση του συστήματος, σε περιπτώσεις που υπάρχουν αποκλίσεις ανάμεσα στην προγραμματισμένη παραγωγή ενέργειας και το αναμενόμενο φορτίο. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε σε αρνητικές αποκλίσεις, οπότε οι συσκευές καλούνται να καταναλώσουν λιγότερη ενέργεια, είτε σε θετικές αποκλίσεις, στις οποίες υπάρχει παραπάνω παραγωγή ενέργειας, για παράδειγμα από αιολικά πάρκα λόγω υψηλών ανέμων, οπότε μέσω της αύξησης της κατανάλωσης των έξυπνων συσκευών μπορεί να αποφευχθεί το κόστος της επιπλέον αυτής παραγωγής. Σε περιπτώσεις συμφόρησης του δικτύου ενέργειας η συμβολή των έξυπνων συσκευών είναι σημαντική. Αν, για παράδειγμα, η τροφοδότηση μιας περιοχής γίνεται μέσα από υπερφορτισμένες γραμμές, δηλαδή δε μπορεί να γίνει επιπλέον διανομή ενέργειας, οι συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση της κορυφής του φορτίου τις ώρες αιχμής. Τέλος, μπορούν να συμβάλλουν και στην παροχή επικουρικών υπηρεσιών, είτε με την παροχή εφεδρείας όπως αναλύθηκε παραπάνω, είτε μέσω της ρύθμισης της τάσης των γραμμών ή του συντελεστή ισχύος. Χρησιμοποιώντας, συνεπώς, τις έξυπνες συσκευές για τη ρύθμιση του συστήματος προκύπτουν τόσο οικονομικά, όσο και περιβαλλοντικά οφέλη, αφού μπορεί να αποφευχθεί η χρήση κάποιων μονάδων αιχμής αλλά και να γίνει καλύτερη εκμετάλλευση της αιολικής παραγωγής ενέργειας, σε περιπτώσεις χαμηλής ζήτησης και μεγάλων ανέμων, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο και τις εκπομπές CO₂.

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ευελιξία της λειτουργίας των συσκευών μπορεί να περιοριστεί από οποιεσδήποτε τεχνικές δυσκολίες ή από τις προτιμήσεις των καταναλωτών. Ακόμη, η σωστή λειτουργία μιας έξυπνης συσκευής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μέγιστη διάρκεια της μείωσης του φορτίου της και από το ποσό της ενέργειας που καταναλώνει σε έναν κύκλο λειτουργίας της και είναι διαθέσιμο προς μετατόπιση. Σε μια έρευνα της Silva και άλλων το 2009 [12] μελετήθηκαν στην Ολλανδία 8 εκατομμύρια νοικοκυριά, 70% των οποίων είχαν πλυντήρια ρούχων και ένα 20% παραπάνω από αυτούς χρησιμοποιούσαν πλυντήρια ρούχων σε συνδυασμό με στεγνωτήριο. Το 30% όλων των νοικοκυριών χρησιμοποιούσε πλυντήριο πιάτων.

Εφαρμόζοντας προγράμματα διαχείρισης ζήτησης στα παραπάνω νοικοκυριά παρατηρήθηκε ότι το ποσοστό αποκοπής της παραγωγής των αιολικών πάρκων σε περιόδους χαμηλού φορτίου μειώθηκε κατά 50% μειώνοντας το συνολικό κόστος καυσίμου του συστήματος κατά 4,5%. Στον Πίνακα 6 είναι καταγεγραμμένες μεμονωμένες τιμές για τις επιμέρους συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για τη σταθεροποίηση του συστήματος.

Κεφάλαιο 3: Δεδομένα για οικιακούς καταναλωτές

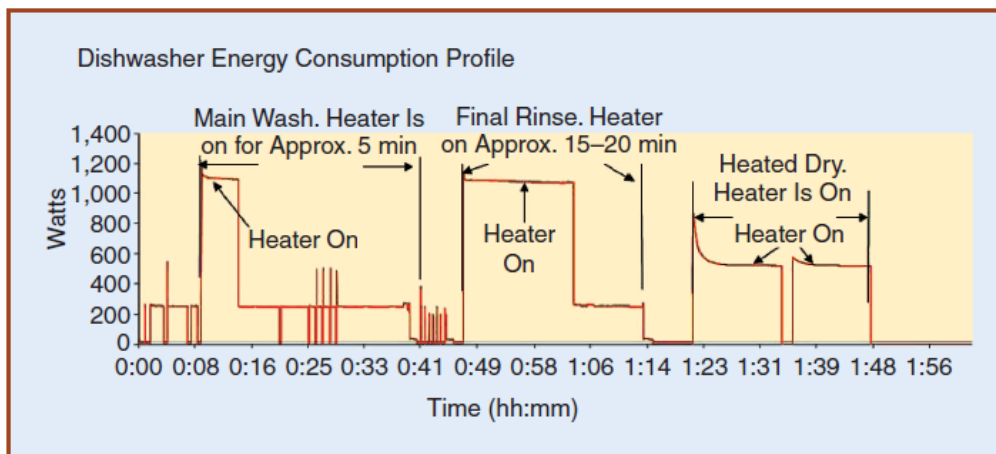
	Πλυντήριο	Πλυντήριο και Στεγνωτήριο	Πλυντήριο πιάτων
Ποσοστό διείσδυσης έξυπνων συσκευών	70%	20%	30%
Διάρκεια λειτουργίας	2 ώρες	4 ώρες	2 ώρες
Δυνατότητα μετατόπισης φορτίου	μέχρι 3 ώρες	μέχρι 3 ώρες	μέχρι 6 ώρες
Αποτελέσματα μελέτης:			
Κέρδος ανά συσκευή (α) και έτος	3,7 EUR/a	16,4 EUR/a	7,4 EUR/a
Αξία ανά συσκευή σε διάρκεια 12 ετών	44 EUR	200 EUR	89 EUR

Πίνακας 6: Ενδεικτικές τιμές των έξυπνων συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν για της εξισορρόπηση του συστήματος [12]

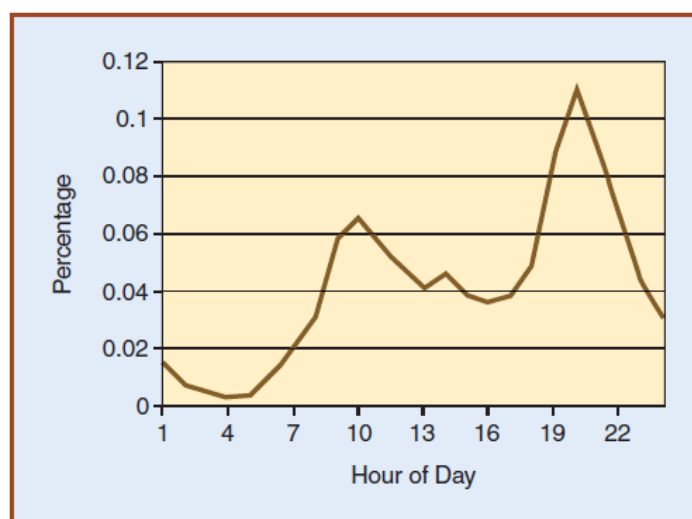
Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη αξία ανά συσκευή προκύπτει από τον συνδυασμό πλυντηρίου και στεγνωτηρίου. Το πλυντήριο πιάτων, επίσης, παρουσιάζει σημαντική αξία, το οποίο οφείλεται στη δυνατότητά του να μετατοπίζει το φορτίο του μέχρι και 6 ώρες. Προκύπτει, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι υπό ορισμένες συνθήκες η χρήση των έξυπνων συσκευών στη σταθεροποίηση του συστήματος μπορεί να οδηγήσει σε αξιόλογο κέρδος.

Αντίστοιχη έρευνα έγινε και για τη λειτουργία των ίδιων συσκευών όσον αφορά στη συμφόρηση του συστήματος και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπό ορισμένες συνθήκες η συνεισφορά των έξυπνων συσκευών σε συνθήκες επικίνδυνης συμφόρησης του δικτύου μπορεί να είναι σημαντικότερη και από τη συνεισφορά τους στη σταθεροποίηση του συστήματος.

Τρεις ακόμη που μελέτησαν τη χρήση των οικιακών συσκευών για demand response πολιτικές ήταν οι T. Joseph Lui, Warwick Stirling και Henry O. Marcy. Στο άρθρο τους «Get Smart» που δημοσιεύτηκε τον Ιούνιο του 2010 [13] περιέγραψαν την ανάπτυξη ενός συστήματος που μπορεί να συνδέσει το DR με το έξυπνο δίκτυο. Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε από τη Whirlpool Corporation και αποτελούνταν από τρεις τομείς: αυτόν του έξυπνου δικτύου, αυτόν του Ίντερνετ για επικοινωνία των ελεγκτών των συσκευών με το έξυπνο δίκτυο και αυτόν του οικιακού δικτύου, που αποτελούνταν από όλες τις επιμέρους οικιακές συσκευές, οι οποίες ήταν συνδεδεμένες μεταξύ τους και με τους άλλους δυο τομείς. Αναφέρθηκαν, ακόμη, οι οικιακές συσκευές στις οποίες θα μπορούσε να εφαρμοστεί αυτό το σύστημα ελέγχου, μια από τις οποίες ήταν πάλι το πλυντήριο πιάτων. Ο κύκλος λειτουργίας ενός πλυντηρίου πιάτων σε ένα νοικοκυριό των ΗΠΑ δίνεται στην Εικόνα 6 και στην Εικόνα 7 δίνεται η καμπύλη φορτίου του. Είναι φανερό πως το πλυντήριο πιάτων αποτελεί μια ιδανική συσκευή για εφαρμογή DR πολιτικών. Τέλος, πέρα από την ανάλυση των παραμέτρων του συστήματος που δημιουργήθηκε, κάτι που τονίστηκε πολύ ήταν η ανάγκη για ανάπτυξη DR αλγορίθμων γύρω από τους καταναλωτές για την κάθε οικιακή συσκευή, γιατί, όπως αναλύθηκε και παραπάνω, η αποδοχή τους επηρεάζει άμεσα το βαθμό στον οποίο μπορούν να ελεγχθούν οι συσκευές.



Εικόνα 6: Το προφίλ της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη λειτουργία ενός οικιακού πλυντηρίου πιάτων στις ΗΠΑ [13]



Εικόνα 7: Καμπύλη φορτίου με ποσοστό επί τοις εκατό ενός οικιακού πλυντηρίου πιάτων στις ΗΠΑ [13]

Μια άλλη συσκευή που έχει μοντελοποιηθεί και μελετηθεί αρκετά είναι ο θερμοσίφωνα. Αποτελεί το 15% με 20% του οικιακού φορτίου και επειδή η θέρμανση του νερού δεν είναι απαραίτητο να συμπίπτει με τη χρήση του, είναι μια συσκευή που μπορεί να ελεγχθεί αρκετά εύκολα. Οι IE Lane και N Beute βασιζόμενοι σε δεδομένα από πολλούς καταναλωτές μοντελοποίησαν το 1996 το φορτίο του οικιακού θερμοσίφωνα, για να μπορεί πάνω σε αυτό να σχεδιαστεί ο έλεγχός του [14]. Θεώρησαν ότι αν κάποιοι καταναλωτές χρησιμοποιούν τυχαία ζεστό νερό ο αριθμός των νοικοκυριών μπορεί να αναπαρασταθεί από μια καμπύλη Gauss. Όρισαν, επίσης, την κορυφή του φορτίου του κάθε θερμοσίφωνα ξεχωριστά και μοντελοποιώντας και τον αριθμό των θερμοσίφωνων που μπορεί να είναι σε λειτουργία κάθε φορά και την ενέργεια που καταναλώνει ο καθένας τους, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η καμπύλη φορτίου του θερμοσίφωνα εξαρτάται από την καμπύλη ζήτησης ζεστού νερού, τον αριθμό των θερμοσίφωνων που έχει το κάθε νοικοκυριό, την ποσότητα του ζεστού νερού που

Κεφάλαιο 3: Δεδομένα για οικιακούς καταναλωτές

καταναλώνεται σε κάθε χρήση και τη θερμοκρασία του ζεστού και του κρύου νερού. Οι M. Orphelin και J. Adnot, στη συνέχεια, ανακατασκεύασαν την καμπύλη φορτίου του θερμοσίφωνα, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε στρατηγικές διαχείρισης της ζήτησης (demand side management- DSM) [15].

Για να γίνουν, όμως, οι έξυπνες συσκευές λειτουργικές και να αποδώσουν τα οφέλη που αναλύθηκαν, πρέπει να ληφθούν υπόψιν κάποιοι οικονομικοί παράγοντες. Καταρχάς, κάθε οικιακή συσκευή θα πρέπει να έχει έναν εσωτερικό ηλεκτρονικό ελεγκτή, ο οποίος θα διαχειρίζεται την έξυπνη λειτουργία της. Είναι ακόμη βασικό να είναι εφοδιασμένη και με μια μονάδα επικοινωνίας, τόσο για τη λήψη των σημάτων τιμών, όσο και για την επικοινωνία με τις υπόλοιπες συσκευές και με το «κεντρικό σημείο» μέσα στο σπίτι, το οποίο με τη σειρά του θα επικοινωνεί με τους έξυπνους μετρητές. Κάθε συσκευή που περιμένει ένα σήμα τιμών, για να ρυθμίσει τη λειτουργία της, βρίσκεται σε standby mode και επειδή αυτή η λειτουργία καταναλώνει ενέργεια, υπάρχουν κάποια επιπλέον αλλά μικρά έξοδα. Όλα τα παραπάνω απαιτούν επενδύσεις και έξοδα, τα οποία πρέπει να είναι συγκρίσιμα με το κέρδος που θα αποφέρει η έξυπνη διαχείριση των συσκευών. Ακόμη, η κατασκευή και εγκατάσταση έξυπνων μετρητών και η διαχείριση και λειτουργία του smart grid δημιουργούν επιπλέον έξοδα. Αν τα κέρδη που προκύπτουν από τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, τη σταθεροποίηση του δικτύου, την καλύτερη εκμετάλλευση της αιολικής παραγωγής και τη μείωση των εκπομπών CO₂ είναι μεγαλύτερα από τα κόστη για την ανάπτυξη των απαιτούμενων τεχνολογιών, τότε είναι βέβαιο πως η ανάπτυξη της τεχνολογίας των έξυπνων συσκευών μπορεί να είναι πολύ συμφέρουσα.

Κεφάλαιο 4

Θεωρία Παιγνίων

Η θεωρία παιγνίων είναι μια μέθοδος των εφαρμοσμένων μαθηματικών που αφορά στη μελέτη προβλημάτων λήψης αποφάσεων από δυο ή περισσότερα άτομα και έχει μεγάλη εφαρμογή στα οικονομικά, στις πολιτικές επιστήμες, την ψυχολογία, την πληροφορική και τη βιολογία. Όλα τα παιχνίδια που μελετώνται στη θεωρία παιγνίων έχουν σαφή μαθηματική μορφή. Τα άτομα που καλούνται να λάβουν μέρος σε ένα παιχνίδι ονομάζονται «παίκτες» και έχουν ως επιδίωξη το μεγαλύτερο δυνατό «κέρδος». Για την επίτευξη του μέγιστου δυνατού «κέρδους» κάθε «παίκτης» ακολουθεί κάποια συγκεκριμένη στρατηγική, ώστε σε αλληλεπίδραση με τις στρατηγικές των άλλων «παικτών» να έχει το μεγαλύτερο δυνατό όφελος [16].

4.1.Μορφές αναπαράστασης παιχνιδιών

Υπάρχουν δυο βασικοί τρόποι παρουσίασης των ως προς επίλυση παιχνιδιών: η κανονική μορφή και η εκτεταμένη μορφή. Κάθε παιχνίδι μπορεί να αναπαρασταθεί είτε σε κανονική είτε σε εκτεταμένη μορφή, απλώς συνήθως για την παρουσίαση κάποιων παιχνιδιών μια από τις 2 μορφές είναι πιο βολική.

Η κανονική μορφή παιχνιδιού χαρακτηρίζεται από τους παίκτες, τη στρατηγική του κάθε παίκτη και το κέρδος που έχει κάθε παίκτης για κάθε συνδυασμό στρατηγικών που επιλέγεται από τους υπόλοιπους παίκτες. Ένα παιχνίδι κανονικής μορφής ορίζεται σαν:

$$G = \{S_1, \dots, S_n; u_1, \dots, u_n\}$$

όπου n είναι ο αριθμός των παικτών του παιχνιδιού, S_i η στρατηγική που έχει επιλέξει ο κάθε παίκτης i και u_i η συνάρτηση κέρδους του παίκτη i .

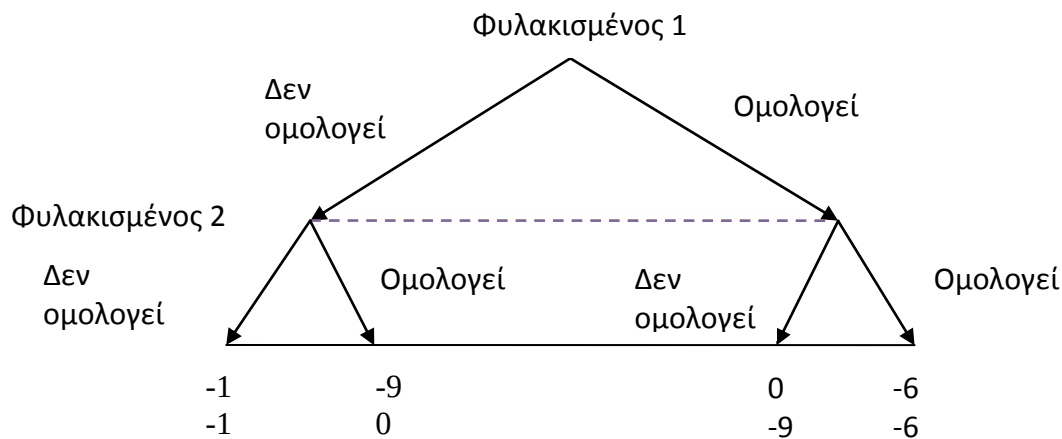
Στα παιχνίδια κανονικής μορφής οι παίκτες επιλέγουν ταυτόχρονα τη στρατηγική τους, συνεπώς ο καθένας επιλέγει τι θα κάνει χωρίς να γνωρίζει ποια θα είναι η κίνηση των υπόλοιπων παικτών. Ένα πολύ γνωστό παιχνίδι το οποίο αναπαρίσταται κυρίως σε κανονική μορφή είναι το «Δίλημμα του Φυλακισμένου». Υπάρχουν δυο ύποπτοι, οι οποίοι έχουν συλληφθεί και κατηγορούνται για ένα έγκλημα. Η αστυνομία έχει ελλιπή στοιχεία, ώστε να μπορέσει να τους καταδικάσει εκτός και αν κάποιος ομολογήσει. Αν κανένας δεν ομολογήσει θα καταδικαστούν και οι δυο για κάποιο μικρό αδίκημα και θα κάνουν ένα μήνα φυλακή, ενώ αν ομολογήσουν και οι δυο θα καταδικαστούν σε φυλακή για έξι μήνες. Αν, τέλος, ο ένας ομολογήσει και ο άλλος όχι, αυτός που ομολόγησε θα αφεθεί ελεύθερος, ενώ ο άλλος θα καταδικαστεί σε εννέα μήνες φυλακή. Το «Δίλημμα του Φυλακισμένου» αναπαρίσταται, συνεπώς, με κανονική μορφή όπως παρακάτω:

		Φυλακισμένος 2	
Φυλακισμένος 1		Δεν ομολογεί	Ομολογεί
	Δεν ομολογεί	-1 , -1	-9 , 0
	Ομολογεί	0 , -9	-6 , -6

Εικόνα 8: Δίλημμα του Φυλακισμένου σε κανονική μορφή [16]

Η εκτεταμένη μορφή καθορίζει τους παίκτες του παιχνιδιού, πότε είναι η σειρά του κάθε παίκτη να κάνει κίνηση και τι κινήσεις μπορεί να κάνει όταν έρθει η σειρά του, τι γνωρίζει κάθε παίκτης για τις κινήσεις των άλλων παικτών όταν έρθει η σειρά του και το κέρδος που μπορεί να έχει κάθε παίκτης για τον κάθε πιθανό συνδυασμό κινήσεων. Η εκτεταμένη μορφή χρησιμοποιεί γράφους, που αποτελούνται από τον αρχικό κόμβο, τους ενδιάμεσους κόμβους ή κόμβους αποφάσεων και τον τελικό κόμβο. Ο αρχικός κόμβος σηματοδοτεί την αρχή του παιχνιδιού, ενώ οι τελικοί κόμβοι το τέλος του. Κάθε κόμβος έχει δίπλα έναν αριθμό που δείχνει ποιος παίκτης έχει σειρά να παίξει και οι τελικοί κόμβοι έχουν τα κέρδη του κάθε παίκτη για τη στρατηγική που ακολουθήθηκε.

Το «Δίλημμα του Φυλακισμένου» μπορεί να αναπαρασταθεί και σε εκτεταμένη μορφή ως εξής:



Εικόνα 9: Δίλημμα του Φυλακισμένου σε εκτεταμένη μορφή [16]

4.2.Ισορροπία Nash

Σε ένα παιχνίδι κανονικής μορφής $G = \{S_1, \dots, S_n; u_1, \dots, u_n\}$ οι στρατηγικές $(s_1^*, \dots, s_n^*)$ αποτελούν ισορροπία Nash αν για κάθε παίκτη i η s_i^* είναι η καλύτερη αντίδραση του στις στρατηγικές των υπολοίπων παικτών. Με λίγα λόγια, αν κάθε παίκτης ακολουθήσει τη

Κεφάλαιο 4: Θεωρία Παιγνίων

στρατηγική του σημείου ισορροπίας κανένας δε θα παρεκκλίνει από αυτή, επειδή αποτελεί την καλύτερη κίνηση.

Στο «Δίλημμα του Φυλακισμένου» η ισορροπία Nash είναι η επιλογή Ομολογεί/Ομολογεί, αφού η στρατηγική του κάθε φυλακισμένου αποτελεί τη βέλτιστη αντίδραση στην επιλογή του άλλου.

4.3.Κατηγορίες παιχνιδιών

Τα παιχνίδια που μελετά η θεωρία παιγνίων μπορούν να χωριστούν σε πολλές επιμέρους κατηγορίες με βάση τα χαρακτηριστικά τους. Με βάση την κάθε κατηγορία επιλέγεται και άλλος τρόπος επίλυσης του προβλήματος.

1. **Στατικά παιχνίδια (static)** : Στην κατηγορία αυτή ανήκουν παιχνίδια στα οποία οι παίκτες επιλέγουν ταυτόχρονα στρατηγικές, συνεπώς όλοι οι παίκτες λαμβάνουν ταυτόχρονα το κέρδος τους με βάση το συνδυασμό των στρατηγικών που επιλέχτηκαν. Τέτοιου είδους παιχνίδια αναπαρίστανται σε κανονική μορφή και λύνονται με βάση την ισορροπία Nash.
2. **Δυναμικά παιχνίδια (dynamic)** : Στην κατηγορία αυτή ανήκουν παιχνίδια που περιλαμβάνουν διαδοχικές αποφάσεις των παικτών και κάθε παίκτης επιλέγει μια στρατηγική γνωρίζοντας τις αποφάσεις όλων των παικτών που προηγήθηκαν. Τέτοιου είδους παιχνίδια ονομάζονται και ακολουθιακά και αναπαρίστανται σε εκτεταμένη μορφή. Τα δυναμικά παιχνίδια μπορούν να διεξαχθούν με δυο τρόπους:
 - i. Σε γύρους: Το παιχνίδι προχωράει σε γύρους και οι κινήσεις που έκανε ο κάθε παίκτης στον προηγούμενο γύρο μελετώνται κατά το ξεκίνημα ενός νέου γύρου. Αν για παράδειγμα στον πρώτο γύρο οι παίκτες 1 και 2 επιλέξουν αντίστοιχα τις κινήσεις a_1 , a_2 στον δεύτερο γύρο οι παίκτες 3 και 4 βλέπουν το ζεύγος κινήσεων (a_1, a_2) που επέλεξαν οι 1,2 και επιλέγουν αντίστοιχα τα a_3 , a_4 . Το κέρδος του κάθε παίκτη προκύπτει στο τέλος του παιχνιδιού συναρτήσει όλων των κινήσεων όλων των επιμέρους γύρων.
 - ii. Επαναλαμβανόμενα παιχνίδια: Είναι παιχνίδια τα οποία επαναλαμβάνονται συνεχώς, είτε για πεπερασμένο αριθμό φορών είτε επ' άπειρον.

Στα δυναμικά παιχνίδια πλήρους και τέλειας πληροφορίας ανήκει και η μέθοδος της προς τα πίσω επαγωγής (backwards induction). Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια επαναληπτική μέθοδο που λύνει παιχνίδια πεπερασμένης εκτεταμένης μορφής ή επαναλαμβανόμενα παιχνίδια. Συγκεκριμένα, έστω ότι έχουμε ένα υποπαίγνιο ενός επαναλαμβανόμενου παιχνιδιού. Καθορίζεται, αρχικά, η βέλτιστη στρατηγική του παίκτη που έκανε την τελευταία κίνηση και στη συνέχεια πηγαίνοντας προς τα πίσω καθορίζεται η βέλτιστη κίνηση του κάθε προηγούμενου παίκτη. Αυτό συνεχίζεται μέχρι να καθοριστούν οι βέλτιστες κινήσεις όλων των παικτών, οπότε και έχει βρεθεί η τέλεια ισορροπία Nash για το υποπαίγνιο που μελετήθηκε.

Κεφάλαιο 4: Θεωρία Παιγνίων

3. **Με ελλιπή πληροφορία (incomplete information)** : Στην κατηγορία αυτή ανήκουν παιχνίδια στα οποία δεν είναι γνωστές σε όλους του παίκτες οι παράμετροι του παιχνιδιού, για παράδειγμα ποιοι και πόσοι είναι οι υπόλοιποι παίκτες, ποιες είναι οι διαθέσιμες στρατηγικές τους και τι κέρδος μπορεί να τους αποφέρουν αυτές οι στρατηγικές. Τέτοιου είδους παιχνίδια λύνονται με βάση την ισορροπία Bayesian Nash.
4. **Με πλήρη πληροφορία (complete information)** : Στην κατηγορία αυτή ανήκουν παιχνίδια στα οποία σε κάθε παίκτη είναι γνωστοί οι αντίπαλοι, η συνάρτηση κέρδους του κάθε παίκτη και η εξέλιξη του παιχνιδιού μέχρι το σημείο στο οποίο βρίσκονται.
5. **Τέλειας πληροφορίας (perfect information)** : Στην κατηγορία αυτή ανήκουν παιχνίδια στα οποία παίζει ένας παίκτης κάθε φορά και αυτός έχει πλήρη γνώση όλων των κινήσεων που έχουν γίνει μέχρι εκείνη τη στιγμή.
6. **Ατελούς πληροφορίας (imperfect information)** : Στην κατηγορία αυτή ανήκουν παιχνίδια στα οποία σε κάποιο σημείο ο παίκτης που παίζει δεν ξέρει την ιστορία και τη μέχρι εκείνη τη στιγμή εξέλιξη του παιχνιδιού.
7. **Ανταγωνιστικά παιχνίδια (non-cooperative)** : Στην κατηγορία αυτή ανήκουν παιχνίδια στα οποία ο κάθε παίκτης προσπαθεί να βελτιστοποιήσει τη συνάρτηση κέρδους του, ακόμα και εις βάρος άλλων παικτών.
8. **Παιχνίδια συνεργασίας (cooperative)** : Στην κατηγορία αυτή ανήκουν παιχνίδια στα οποία οι παίκτες συνήθως συνεργάζονται για να επιτύχουν την αύξηση του κέρδους τους συγκριτικά με το αν έπαιζαν ανταγωνιστικά. Οι συνεργασίες μπορούν να επιβληθούν από κάποιον εξωτερικό παράγοντα και επιβάλλεται συνήθως «τιμωρία» άμα υπάρξει εκτροπή από τη στρατηγική που έχει συμφωνηθεί, ώστε να μη συμφέρει κανένα παίκτη να βγει από τη συνεργασία.

4.4. Το μοντέλο του Stackelberg

Το 1934 ο Stackelberg πρότεινε ένα δυναμικό μοντέλο διπωλίου στο οποίο μια «ηγέτιδα» (leader) εταιρεία κάνει πρώτη κίνηση και μια «ακόλουθος» (follower) εταιρεία κινείται δεύτερη. Το μοντέλο του Stackelberg είναι παρόμοιο με το μοντέλο του Cournot, στο οποίο κάποιες εταιρείες ανταγωνίζονται για την ποσότητα αγαθών που θα παράγουν με στόχο τη μεγιστοποίηση του κέρδους τους και λαμβάνουν όλες τις αποφάσεις τους ανεξάρτητα και ταυτόχρονα. Στο μοντέλο του Stackelberg, από την άλλη πλευρά, οι κινήσεις των δυο εταιρειών γίνονται διαδοχικά. Αρχικά, επιλέγει η «ηγέτιδα» εταιρεία μια στρατηγική, η οποία είναι αμετάκλητη και δε μπορεί να αλλάξει την επόμενη χρονική περίοδο. Στη συνέχεια, η «ακόλουθος» εταιρεία επιλέγει την κίνησή της ανάλογα με την επιλογή της «ηγέτιδας» την

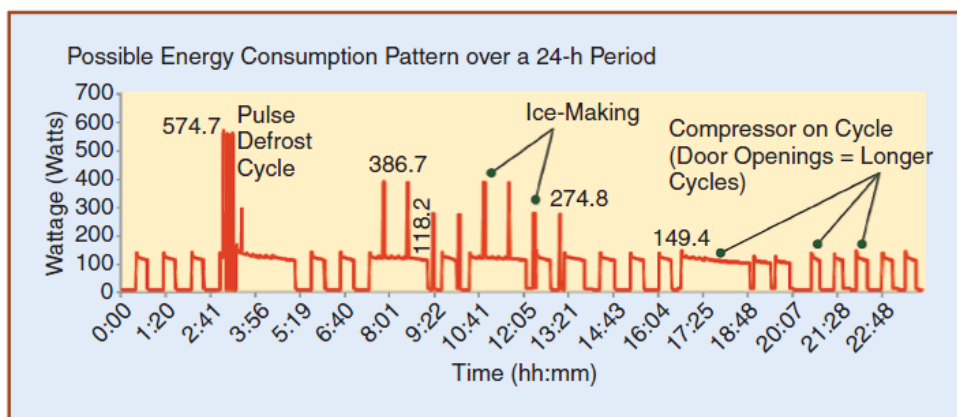
Κεφάλαιο 4: Θεωρία Παιγνίων

πρώτη χρονική περίοδο, ώστε να μπορέσει να μεγιστοποιήσει το κέρδος της. Το αποτέλεσμα που προκύπτει για την «ακόλουθο» εταιρεία από το μοντέλο του Stackelberg είναι χειρότερο συγκριτικά με αυτό που προκύπτει από το μοντέλο του Cournot, ενώ ισχύει το αντίθετο για την «ηγέτιδα» εταιρεία, η οποία σε αυτού του είδους το παιχνίδι έχει το πλεονέκτημα. Ένας συνήθης τρόπος επίλυσης του μοντέλου του Stackelberg είναι με τη χρήση της μεθόδου της προς τα πίσω επαγωγής, όπως αναλύθηκε και στην παραπάνω παράγραφο.

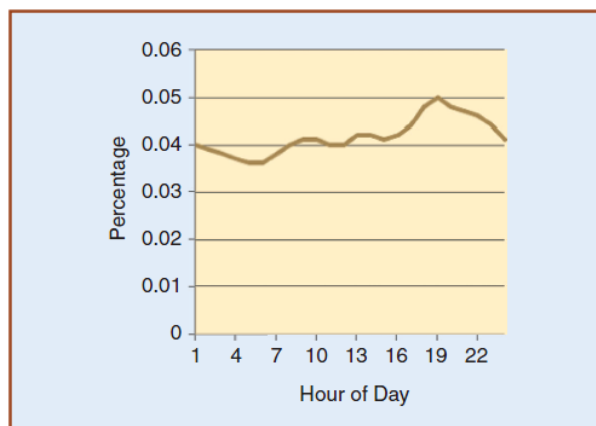
Κεφάλαιο 5

Ψυγεία και μοντελοποίηση

Στην παρούσα διπλωματική μελετάται ο έλεγχος του ψυγείου για την εξυπηρέτηση πολιτικών διαχείρισης ζήτησης. Το ψυγείο, όπως και ο θερμοσίφωνας, είναι συσκευές που πρέπει να διατηρούν την εσωτερική τους θερμοκρασία εντός καθορισμένων ορίων. Η δυνατότητα ελέγχου του φορτίου τέτοιων συσκευών ενεργοποιείται από ένα σύστημα θερμικής αποθήκευσης και αν οι συσκευές είναι εφοδιασμένες με κατάλληλους ελεγκτές και συστήματα επικοινωνίας δε χρειάζεται καθόλου η ανθρώπινη παρεμβολή. Στις Εικόνες 10 και 11 δίνονται ο κύκλος λειτουργίας και η ημερήσια καμπύλη φορτίου ενός οικιακού ψυγείου στις ΗΠΑ. Παρατηρείται ότι η καμπύλη του φορτίου είναι σχετικά σταθερή, το οποίο είναι λογικό καθώς το ψυγείο είναι μια συσκευή που λειτουργεί καθόλη τη διάρκεια της ημέρας. Το συμπέρασμα που μπορεί, λοιπόν, να προκύψει είναι πως ο έλεγχος του φορτίου του μπορεί να γίνει οποιαδήποτε ώρα της ημέρας και όχι μόνο τις ώρες αιχμής, όπως συμβαίνει για παράδειγμα με τα κλιματιστικά ή τον θερμοσίφωνα [17].

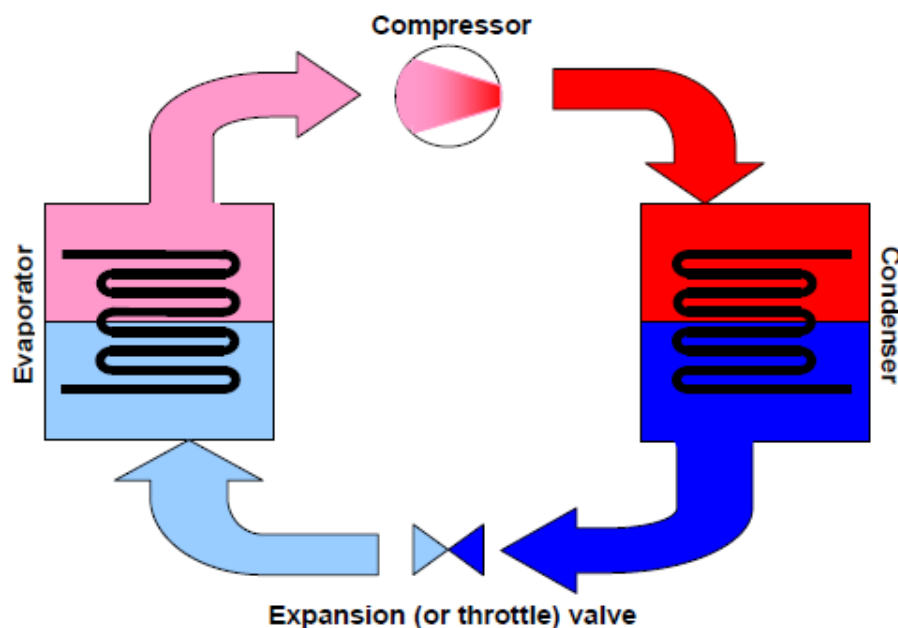


Εικόνα 10: Το προφίλ της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη λειτουργία ενός οικιακού ψυγείου στις ΗΠΑ [13]



Εικόνα 11: Καμπύλη φορτίου με ποσοστό επί τοις εκατό ενός οικιακού ψυγείου στις ΗΠΑ [13]

Ο πιο συνηθισμένος κύκλος ψύξης που εφαρμόζεται στα περισσότερα οικιακά ψυγεία είναι αυτός που χρησιμοποιεί τη συμπίεση υδρατμών. Στόχος του είναι η μεταφορά θερμότητας από μια περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας, δηλαδή μέσα από το ψυγείο, σε μια περιοχή υψηλής θερμοκρασίας, δηλαδή το περιβάλλον. Αποτελείται από έναν εξατμιστή (evaporator), ένα συμπιεστή (compressor), ένα συμπυκνωτή (condenser) μια βαλβίδα εκτόνωσης (expansion valve), τα οποία απεικονίζονται και στην Εικόνα 12. Ο κύκλος ψύξης είναι ο εξής: Αρχικά, το ψυκτικό υγρό εξατμίζεται σε κορεσμένο ατμό με τη βοήθεια της θερμότητας που βρίσκεται γύρω από τον εξατμιστή. Στη συνέχεια, ο κορεσμένος ατμός συμπιέζεται αδιαβατικά, δηλαδή χωρίς ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον, σε υπέρθερμο ατμό και μετά στο συμπυκνωτή «απορρίπτει» το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς του οπότε μετατρέπεται πάλι σε κορεσμένο υγρό. Τέλος, η θερμοκρασία και η πίεση του ψυκτικού υγρού μειώνονται μέσω της βαλβίδας εκτόνωσης και ο κύκλος ψύξης ολοκληρώνεται με την είσοδο του υγρού πάλι στον εξατμιστή [18].



Εικόνα 12: Κύκλος ψύξης [18]

Βασικό ρόλο στην ενεργειακή κατανάλωση των ψυγείων παίζουν οι καταναλωτές. Η συμπεριφορά των καταναλωτών και το αντίκτυπό της στην κατανάλωση των ψυγείων έχει μελετηθεί σε πολλές έρευνες. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση αυτή ποικίλλουν. Αρχικά, η θερμοκρασία του δωματίου ή του περιβάλλοντος είναι καθοριστικής σημασίας. Σύμφωνα με τον Αμερικανικό Σύλλογο Μηχανικών Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers- ASHRAE) το 60-70% του θερμού φορτίου ενός ψυγείου προκαλείται από την αγωγιμότητα μέσα από τα τοιχώματα της συσκευής, η οποία καθορίζεται από τη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο ψυγείο και το δωμάτιο που βρίσκεται. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μπορεί να επηρεάσει και αυτή την απόδοση του συμπιεστή του ψυγείου, η οποία μειώνεται όταν η θερμοκρασία είναι αυξημένη. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την κατανάλωση των ψυγείων είναι η εσωτερική τους θερμοκρασία. Αν ο θερμοστάτης έχει οριστεί σε μια χαμηλή θερμοκρασία η ενεργειακή κατανάλωση είναι μεγαλύτερη από το αν ρυθμιστεί σε μια υψηλότερη θερμοκρασία. Βασική προϋπόθεση σε αυτό αποτελεί αυτές οι θερμοκρασίες να είναι εντός ενός επιτρεπτού εύρους για την ασφάλεια της ποιότητας των τροφίμων που αποθηκεύονται στο ψυγείο. Έρευνες έχουν δείξει ότι η μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας του ψυγείου μπορεί να αυξήσει τη «διάρκεια ζωής» των τροφίμων, ενώ κάτω από τους 10°C αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2-3 °C μπορεί να τη μειώσει στο μισό.

Βασικός παράγοντας για την ενεργειακή κατανάλωση ενός ψυγείου είναι και ο αριθμός των ανοιγοκλεισιμάτων των πορτών. Όταν ανοίγει η πόρτα του ψυγείου ο ψυχρός αέρας που υπάρχει στο εσωτερικό του ανταλλάσσεται με ζεστό και με υγρασία αέρα από το περιβάλλον. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση, αφού μετά το κλείσιμο των πορτών το ψυγείο προσπαθεί να επαναφέρει την εσωτερική του θερμοκρασία στα φυσιολογικά επίπεδα. Κάποιες έρευνες αναφέρουν ότι και η ποσότητα των τροφίμων εντός ενός ψυγείου μπορεί να

Κεφάλαιο 5: Ψυγεία και μοντελοποίηση

επηρεάσει την κατανάλωση του όπως επίσης και ότι η αποθήκευση, για παράδειγμα, μπουκαλιών με νερό μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης [18].

Οι James Y.Kao και George E.Kelly μελέτησαν το 1996 την ευαισθησία της ενεργειακής κατανάλωσης δυο ψυγείο-καταψυκτών όσον αφορά στους παραπάνω παράγοντες [19]. Αναλυτικότερα, έγιναν δυο τεστ, στο πρώτο ο θερμοστάτης και στο ψυγείο και στον καταψύκτη ήταν ορισμένος στο μέσο της θερμότερης και ψυχρότερης θερμοκρασίας και στο δεύτερο και οι δυο θερμοστάτες ήταν ορισμένοι είτε στην ψυχρότερη είτε στη θερμότερη θερμοκρασία του κάθε τμήματος. Οι δυο μονάδες που μελετήθηκαν ήταν από τον ίδιο κατασκευαστή και είχαν τους αισθητήρες θερμοκρασίας για τον έλεγχο του συμπιεστή στο χώρο αποθήκευσης τροφίμων. Τα τεστ έγιναν σε ένα δωμάτιο στο οποίο η θερμοκρασία και η υγρασία ήταν πλήρως ελεγχόμενη και τα δεδομένα της θερμοκρασίας, της ώρας, της κατάστασης των συμπιεστών και της απόψυξης αποθηκεύονταν σε υπολογιστή. Ο υπολογιστής χρησιμοποιήθηκε και για τον έλεγχο των ψυγείοκαταψυκτών και τα ανοιγοκλεισίματα των πορτών. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε τρία στάδια. Στο πρώτο αναγνωρίστηκαν οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρέαζαν την ενεργειακή κατανάλωση των ψυγείοκαταψυκτών, στο δεύτερο έγιναν κάποια επιπλέον τεστ για να ελεγχθεί η επιρροή των προηγούμενων παραγόντων και στο τρίτο μελετήθηκε η ενέργεια που καταναλώνει ο ψυγείοκαταψύκτης για διάφορες εσωτερικές και εξωτερικές θερμοκρασίες.

Τα αποτελέσματα του πρώτου σταδίου έδειξαν ότι βασικοί παράγοντες επιρροής της ενεργειακής κατανάλωσης των ψυγείοκαταψυκτών ήταν η θερμοκρασία του δωματίου, η υγρασία του και ο αριθμός των ανοιγοκλεισιμάτων των πορτών. Από αυτούς οι δυο σημαντικότεροι ήταν η θερμοκρασία δωματίου και ο αριθμός ανοιγοκλεισιμάτων των πορτών, τα οποία και μελετήθηκαν στο δεύτερο στάδιο. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η ενεργειακή κατανάλωση χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς των παραγόντων αυτών: η θερμοκρασία του δωματίου είχε τιμές από 21,1°C έως 32,2°C με βήμα 2,8°C και οι πόρτες μπορούσαν να ανοιγοκλείσουν από 0 έως 3 φορές την ώρα. Η υγρασία του δωματίου, ακόμη, είχε τιμές από 30% έως 40% και για κάθε ψυγείοκαταψύκτη έγιναν 20 δοκιμές (4·5) διατηρώντας την εσωτερική τους θερμοκρασία σταθερή στο μέσο της θερμότερης και ψυχρότερης θερμοκρασίας. Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο έγιναν διάφορες δοκιμές μεταβάλλοντας την εσωτερική θερμοκρασία του ψυγείου και την εξωτερική θερμοκρασία του δωματίου κρατώντας τις πόρτες των ψυγείοκαταψυκτών κλειστές. Η θερμοκρασία του ψυγείου και του καταψύκτη είχαν τις εξής ρυθμίσεις: ψυχρότερη/ψυχρότερη (coldest/coldest- C/C), ψυχρότερη/θερμότερη (coldest/warmest- C/W), θερμότερη/θερμότερη (warmest/warmest- W/W) και θερμότερη/ψυχρότερη (warmest/coldest- W/C). Η θερμοκρασία του δωματίου μεταβαλλόταν με τον ίδιο τρόπο όπως και στο δεύτερο στάδιο.

Τα αποτελέσματα του τρίτου σταδίου και για τις δυο συσκευές καταγράφονται στον Πίνακα 7. Για την κάθε συσκευή και ανάλογα με την θερμοκρασία του χώρου του ψυγείου και του χώρου της κατάψυξης καταγράφηκαν οι εσωτερικές θερμοκρασίες και η θερμοκρασία του δωματίου και με βάση αυτά υπολογίστηκε για κάθε μέρα η καταναλισκόμενη ενέργεια.

Κεφάλαιο 5: Ψυγεία και μοντελοποίηση

	Comp. Temp. Setting	Room Temp.		Food Comp.Temp.		Freezer Temp.		Energy Use kWh/day
		°C	°F	°C	°F	°C	°F	
Top-Mounted-Freezer Unit	C/W	21.3	70.3	-1.1	30.1	-15.7	3.7	1.695
		24.4	76.0	-1.2	29.8	-16.3	2.7	1.934
		27.1	80.7	-1.4	29.5	-16.7	1.9	2.309
		29.3	84.8	-1.4	29.5	-17.1	1.2	2.419
		31.8	89.2	-1.1	30.1	-16.8	1.8	3.147
	C/C	21.4	70.5	-0.1	31.9	-21.2	-6.2	1.488
		24.3	75.7	-0.2	31.7	-22.4	-8.4	1.744
		27.9	82.3	0.0	32.0	-23.0	-9.4	1.821
		29.7	85.4	0.1	32.1	-23.1	-9.5	2.065
	M/M	31.9	89.5	0.0	32.0	-23.3	-9.9	2.398
		21.6	70.9	3.6	38.4	-13.9	7.0	1.267
		23.8	74.8	3.8	38.8	-14.6	5.8	1.481
		26.8	80.2	4.1	39.3	-14.9	5.1	1.605
	W/W	29.7	85.5	4.9	40.8	-14.8	5.3	1.770
		31.9	89.4	5.2	41.3	-14.6	5.7	1.892
		21.2	70.1	5.0	41.0	-8.8	16.2	1.353
		23.8	74.9	5.3	41.6	-9.3	15.3	1.460
	W/C	27.9	82.2	5.6	42.1	-9.7	14.5	1.746
		29.3	84.7	5.8	42.5	-10.1	13.9	1.773
		31.9	89.4	5.9	42.7	-10.4	13.3	1.856
		21.4	70.5	5.7	42.3	-14.2	6.4	1.292
		23.9	75.0	6.3	43.4	-14.7	5.5	1.360
		26.7	80.0	6.5	43.7	-15.6	3.9	1.492
		29.4	85.0	7.1	44.8	-15.8	3.5	1.585
		31.9	89.4	7.6	45.7	-16.2	2.9	1.725
Side-by-Side Door Unit	C/W	23.4	74.2	-3.9	24.9	-21.1	-5.9	2.131
		26.4	79.6	-3.9	24.9	-21.6	-6.8	2.750
		29.2	84.5	-3.8	25.2	-22.1	-7.8	2.699
		32.0	89.6	-3.8	25.2	-22.4	-8.3	3.009
	C/C	24.0	75.2	-5.1	22.8	-27.0	-16.6	2.782
		25.9	78.7	-5.7	21.8	-27.7	-17.9	2.981
		29.5	85.1	-3.8	25.1	-26.3	-15.3	3.550 *
		31.9	89.5	-1.4	29.4	-24.9	-12.8	3.607 *
	M/M	21.6	70.9	3.9	39.1	-13.3	8.0	1.389
		23.8	74.8	4.2	39.5	-14.2	6.5	1.596
		26.8	80.2	4.4	40.0	-14.9	5.1	1.819
		29.7	85.5	5.2	41.3	-15.3	4.4	2.086
	W/W	31.9	89.4	5.7	42.3	-15.5	4.1	2.299
		24.2	75.6	5.4	41.7	-10.9	12.4	1.405
		27.2	81.0	5.8	42.4	-11.7	10.9	1.617
		29.4	85.0	6.0	42.8	-12.3	9.8	1.832
	W/C	32.9	91.2	6.5	43.7	-12.7	9.2	2.023
		23.7	74.6	5.2	41.4	-16.6	2.2	1.627
		26.4	79.6	5.5	41.9	-17.6	0.4	1.800
		29.2	84.5	5.6	42.1	-18.2	-0.8	2.055
		32.1	89.8	6.2	43.1	-18.7	-1.7	2.740

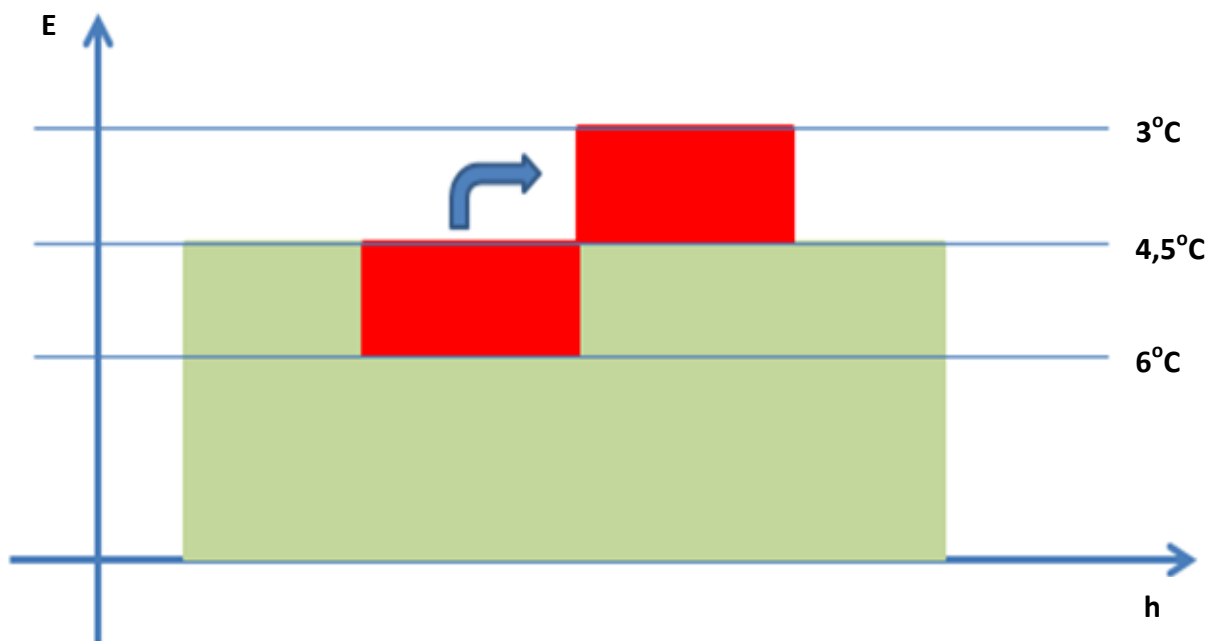
Πίνακας 7: Αποτελέσματα τρίτου σταδίου για τις δυο συσκευές και τις επιμέρους περιπτώσεις που μελετήθηκαν [19]

Κεφάλαιο 6

Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων

Η ενεργειακή κατανάλωση των ψυγείων μελετήθηκε μέσα από τρία μοντέλα. Στο πρώτο μελετάται η ρύθμιση της κατανάλωσης του ψυγείου με γνώμονα τον καταναλωτή και στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους του. Στο δεύτερο η ενεργειακή κατανάλωση των ψυγείων συσχετίζεται με την παροχή εφεδρείας και την καλύτερη διαχείριση της αιολικής παραγωγής, ώστε μια ESCO που διαχειρίζεται ένα ή περισσότερα αιολικά πάρκα να μεγιστοποιεί το κέρδος της. Στο τρίτο μοντέλο παρουσιάζεται ένα παιχνίδι leader-follower όπου ηγέτης είναι ο διαχειριστής του συστήματος (DSO) και ακόλουθος είναι μια ESCO. Σε αυτό το παιχνίδι στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του μέσου μεταβλητού κόστους και μέσα από τις κινήσεις των δυο παικτών παρουσιάζεται η διαφορά που μπορούν να έχουν τα αποτελέσματα ανάλογα με τις επιλογές του καθενός.

Σε όλα αυτά τα προβλήματα αντικείμενο μελέτης ήταν το επίπεδο της εσωτερικής θερμοκρασίας του ψυγείου, δηλαδή το setpoint του. Η καμπύλη φορτίου του ψυγείου είναι σχετικά σταθερή, αφού λειτουργεί καθόλη τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό φαίνεται και στην Εικόνα 13, αφού η ενεργειακή κατανάλωση του ψυγείου απεικονίζεται σταθερή κατά τη διάρκεια μιας ημέρας και η μέση θερμοκρασία του εσωτερικού του ψυγείου για αυτή τη σταθερή ενέργεια είναι ίση με $4,5^{\circ}\text{C}$. Να σημειωθεί πως όλα αυτά αναφέρονται σε σταθερή εξωτερική θερμοκρασία, αλλιώς η καμπύλη φορτίου δε θα ήταν ευθεία, αλλά θα είχε διακυμάνσεις. Στα τρία προβλήματα που μελετήθηκαν θεωρήθηκε, με βάση και τα αποτελέσματα της μελέτης των James Y.Kao και George E.Kelly [19], ότι η εσωτερική θερμοκρασία του ψυγείου μεταβάλλεται από τους 3°C έως τους 6°C , με τους 3°C να αντιστοιχούν στη μέγιστη κατανάλωση ενέργειας από τη συσκευή και τους 6°C να αντιστοιχούν στην ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Οι $4,5^{\circ}\text{C}$, λοιπόν, είναι μια μέση θερμοκρασία στην οποία το ψυγείο καταναλώνει τη σταθερή ενέργεια που χρειάζεται μέσα στη μέρα. Με τη μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του ψυγείου μπορεί, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 13, να αυξηθεί ή να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας της συσκευής και να μετατοπισθεί και το φορτίο του ψυγείου σε κάποιες άλλες ώρες της ημέρας. Συγκεκριμένα, αν το ψυγείο λειτουργήσει για ένα χρονικό διάστημα στους 6°C η ενέργεια που καταναλώνει μειώνεται, κάτι που συμφέρει πολύ αν η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας εκείνη τη στιγμή είναι αυξημένη. Αυτό μπορεί να συμβεί και τις ώρες αιχμής, για τη διευκόλυνση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενέργεια που εξοικονομείται μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη ώρα της ημέρας, την οποία το ψυγείο θα λειτουργεί στους 3°C , άρα, όπως αναφέρθηκε, θα καταναλώνει περισσότερη ενέργεια. Να σημειωθεί ότι τέτοιου είδους μεταβολές μπορούν να γίνουν για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα, αλλιώς το ψυγείο μπορεί να βγει εκτός των επιθυμητών θερμοκρασιών λειτουργίας. Μέσω της μεταβολής του setpoint του ψυγείου μπορεί, λοιπόν, να μετατοπισθεί το φορτίο του από μια ώρα της ημέρας σε μια άλλη.



Εικόνα 13: Η καμπύλη φορτίου του ψυγείου και η μεταβολή της μέσω της μεταβολής του setpoint του

6.1.Πρώτο πρόβλημα: Καταναλωτής

Στο συγκεκριμένο μοντέλο μελετήθηκε η ενεργειακή κατανάλωση των ψυγείων στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση του κόστους των καταναλωτών. Συγκεκριμένα, η οριακή τιμή του συστήματος (ΟΤΣ) μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ανάλογα με τις μονάδες που είναι ενταγμένες για την εξυπηρέτηση του φορτίου. Τις ώρες αιχμής η οριακή τιμή του συστήματος έχει συνήθως μεγαλύτερη τιμή απ' ότι τις υπόλοιπες ώρες τις ημέρας γιατί τίθενται σε λειτουργία οι αιχμιακές μονάδες, οι οποίες ανεβάζουν σημαντικά το κόστος. Σε μια οικονομία στην οποία οι καταναλωτές θα ήταν άμεσα συνδεδεμένοι με τη χονδρική αγορά ενέργειας η τιμολόγηση θα μπορούσε να είναι κάθε ώρα ανάλογη της παραγωγής της ενέργειας και όχι σταθερή. Συνεπώς, τις ώρες αιχμής η ενέργεια θα ήταν ακριβότερη για τον καταναλωτή απ' ότι κάποια άλλη ώρα της ημέρας. Κάτι τέτοιο θα αποτελούσε κίνητρο για λιγότερη κατανάλωση τις ώρες υψηλών τιμών και μετατόπιση κάποιων φορτίων, για παράδειγμα του σπιτιού, σε ώρες χαμηλού κόστους.

Τα παραπάνω εφαρμόστηκαν κατά την προσομοίωση του πρώτου μοντέλου. Δεδομένα ήταν ο σταθμισμένος μέσος όρος ανά μήνα και ώρα της ΟΤΣ σε €/MWh και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος σε °C. Οι τιμές αυτές είναι πραγματικές, προέρχονται από τον ΑΔΜΗΕ [20] και το Openmeteo [21] και παρατίθενται στο Παράρτημα. Για τον υπολογισμό της ενέργειας δημιουργήθηκε μια εξίσωση με δυο συντελεστές και άλλες δυο μεταβλητές, την οριακή τιμή του συστήματος, η οποία θεωρήθηκε πως είναι ίση με την τιμή της παραγόμενης ενέργειας, και το setpoint της θερμοκρασίας του ψυγείου. Στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση της ενέργειας, για την επίτευξη και του ελάχιστου κόστους για τον καταναλωτή. Η εξίσωση που ελαχιστοποιήθηκε είναι η παρακάτω:

$$\sum_{i=1}^{24} [a_i(T) \cdot s_i + b_i(T)] \cdot p_i \quad (1)$$

Η εξίσωση (1) αποτελεί άθροισμα για τη διάρκεια μιας ημέρας του γινομένου της ΟΤΣ για κάθε ώρα p_i και της ευθείας $a_i(T) \cdot s_i + b_i(T)$, η οποία αντιπροσωπεύει την ενέργεια που καταναλώνει ένα οικιακό ψυγείο. Οι συντελεστές a_i και b_i προέκυψαν σε ζεύγη μέσα από γραμμική παρεμβολή κάποιων από τις τιμές της θερμοκρασίας του ψυγείου και της ενέργειας του Πίνακα 7 για το ψυγείο με τον καταψύκτη στην κορυφή (top mounted freezer unit). Οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται άμεσα από τη θερμοκρασία, αφού αναφέρονται σε θερμοκρασίες δωματίου 21°C, 24°C, 27°C ή 32°C. Το setpoint s_i , ακόμη, έχει εύρος τιμών από 3°C έως 6°C, για να μην αλλοιωθεί η ποιότητα των τροφίμων εντός του ψυγείου από τις μεταβολές της θερμοκρασίας μέσα στη μέρα. Στη μέγιστη τιμή (6°C) το ψυγείο καταναλώνει την ελάχιστη δυνατή ενέργεια, ενώ στην ελάχιστη τιμή (3°C) τη μέγιστη δυνατή ενέργεια. Οποιαδήποτε τιμή, τέλος, των δεδομένων της θερμοκρασίας που ήταν εκτός των ορίων των 21°C και 32°C προσαρμόστηκε στις ήδη υπάρχουσες.

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων

Η ελαχιστοποίηση για τον προσδιορισμό του setpoint στο οποίο θα λειτουργεί το ψυγείο, με βάση τα υπάρχοντα δεδομένα, έγινε υπό κάποιους περιορισμούς. Αυτοί ήταν οι παρακάτω:

$$3 \leq s_i \leq 6 \quad (2)$$

$$|s_i - s_{i-1}| \leq 0,9 \quad (3)$$

$$\left| \frac{\sum_{i=1}^{24} s_i}{24} - 4,5 \right| \leq \varepsilon \quad (4)$$

Ο περιορισμός (2) είναι αυτός που αναφέρθηκε και παραπάνω για την εξασφάλιση της ποιότητας των τροφίμων εντός του ψυγείου. Ο περιορισμός (3) ορίζει ότι η μεταβολή θερμοκρασίας που θα κάνει το ψυγείο μια συγκεκριμένη ώρα δε θα είναι μεγαλύτερη του ενός βαθμού. Ο περιορισμός (4), τέλος, εξασφαλίζει ότι οι τιμές της θερμοκρασίας του ψυγείου κυμαίνονται κατά τη διάρκεια μιας ημέρας γύρω από μια συγκεκριμένη τιμή, την $4,5+\varepsilon$. Η μεταβλητή ε μπορεί να πάρει οποιαδήποτε μικρή τιμή και στο συγκεκριμένο πρόβλημα ορίστηκε ίση με 0,2, συνεπώς η μέση τιμή της θερμοκρασίας του ψυγείου κάθε μέρα ήταν ίση με $4,7^\circ\text{C}$. Με τους περιορισμούς (3) και (4) εξασφαλίζεται ότι το setpoint του ψυγείου δε θα γίνει για όλες τις ώρες ίσο με την ανώτερη τιμή, δηλαδή 6°C , ώστε να υπάρχει ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, με βάση όλα τα παραπάνω, ήταν η εξής:

Με βάση τα δεδομένα της θερμοκρασίας, της ΟΤΣ και των τιμών των α και b για τις θερμοκρασίες 21°C , 24°C , 27°C και 32°C υπολογίστηκαν με γραμμική παρεμβολή τα αντίστοιχα ζεύγη των συντελεστών α και b για την κάθε ώρα του εκάστοτε μήνα. Στη συνέχεια, με βάση αυτές τις τιμές και τους περιορισμούς που αναλύθηκαν παραπάνω, ελαχιστοποιήθηκε η συνάρτηση (1) και προέκυψαν τιμές για το setpoint του ψυγείου για όλες τις ώρες κάθε μήνα. Οι τιμές αυτές επαληθεύτηκε πως είχαν μέση τιμή τους $4,7^\circ\text{C}$, όπως ορίστηκε και από τον περιορισμό (4) και είναι καταγεγραμμένες στον Πίνακα 8. Για αυτές τις τιμές των setpoint υπολογίστηκε η καταναλισκόμενη ενέργεια E του ψυγείου και συγκρίθηκε με την ενέργεια που θα κατανάλωνε το ψυγείο αν η εσωτερική του θερμοκρασία παρέμενε σταθερή και ίση με την τιμή $4,7^\circ\text{C}$, δηλαδή αν η λειτουργία του ψυγείου δε μεταβαλλόταν ανάλογα με την οριακή τιμή του συστήματος. Επιπλέον, υπολογίστηκε το κόστος της ενέργειας και για τις 2 περιπτώσεις και οι τιμές αυτές συγκρίθηκαν, ώστε να προκύψει κάποιο συμπέρασμα ως προς την εξοικονόμηση ή μη που μπορεί να υπάρξει εφαρμόζοντας τον παραπάνω έλεγχο στα οικιακά ψυγεία. Όλα αυτά έγιναν με τη βοήθεια του Matlab και τη χρήση της εντολής linprog, η οποία είναι μια εντολή που επιλύει με γραμμικό προγραμματισμό και ελαχιστοποίησε τη γραμμική συνάρτηση (1) υπολογίζοντας το ελάχιστο s_i για κάθε ώρα. Η μορφή που έπρεπε να έχει η συνάρτηση (1) για να ελαχιστοποιηθεί από την εντολή linprog είναι η εξής:

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων

$f^T x$, όπου $x = s_i = \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{24} \end{bmatrix}$ και $f_i = a_i \cdot p_i$, συνεπώς οι τιμές των συντελεστών b δε χρειάστηκαν στην ελαχιστοποίηση.

Αντιστοίχως, η μορφή των περιορισμών πρέπει να είναι η εξής:

$$\begin{bmatrix} 3 \\ \vdots \\ 3 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{24} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 6 \\ \vdots \\ 6 \end{bmatrix},$$

$$|s_i - s_{i-1}| \leq 0,9 \rightarrow -0,9 \leq s_i - s_{i-1} \leq 0,9 \rightarrow s_i - s_{i-1} \leq 0,9 \quad (5)$$

$$\rightarrow s_{i-1} - s_i \leq 0,9 \quad (6)$$

$$(5) \rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & \cdots & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{24} \end{bmatrix} \leq 0,9 \cdot \text{ones}(23,1)$$

$$(6) \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{24} \end{bmatrix} \leq 0,9 \cdot \text{ones}(23,1)$$

και

$$\begin{cases} \text{ones}(1,24) \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{24} \end{bmatrix} \leq (\varepsilon + 4,5) \cdot 24 \\ -\text{ones}(1,24) \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{24} \end{bmatrix} \leq (\varepsilon - 4,5) \cdot 24 \end{cases}$$

όπου η συνάρτηση $\text{ones}(m,n)$ είναι μια συνάρτηση του Matlab που δημιουργεί έναν πίνακα διαστάσεων $m \times n$ γεμάτο άσσους.

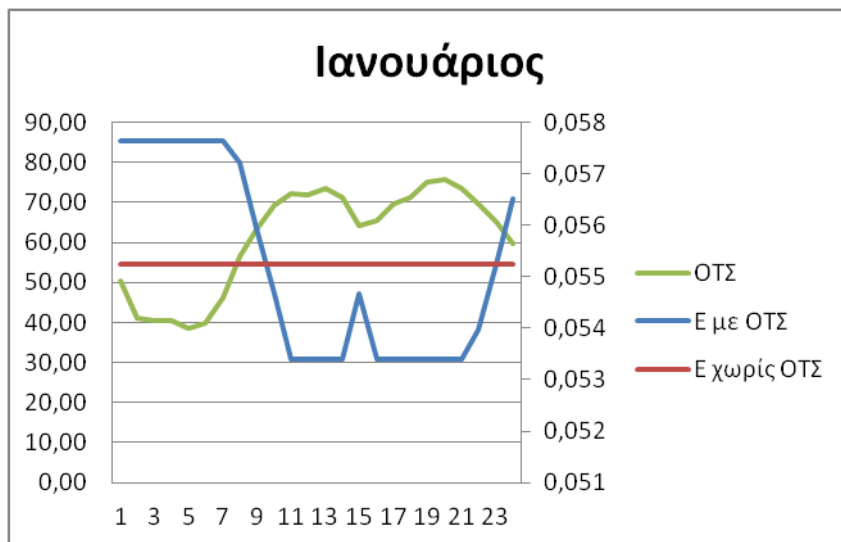
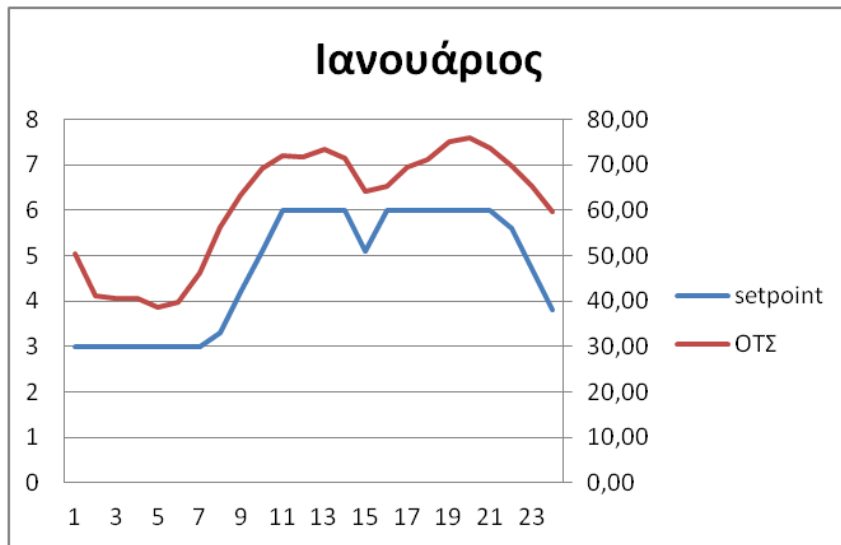
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για όλους τους μήνες και οι επιμέρους συγκρίσεις παρατίθενται στις Εικόνες 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 και στον Πίνακα 9. Να σημειωθεί ότι η ενέργεια E είναι σε kWh και η ΟΤΣ σε €/MWh.

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων

	Ιαν	Φεβ	Μαρτ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
1	3	3	3	3,9	3,9	3	3,9	3	3	3	3	3
2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
8	3,3	3,8	3,3	3,3	3	3,9	3	3	3	3,9	3	3,8
9	4,2	4,7	4,2	4,2	3,9	4,8	3,9	3,6	3,9	4,8	3,9	4,7
10	5,1	5,6	5,1	5,1	4,8	5,7	4,8	4,5	4,8	5,7	4,8	5,6
11	6	6	6	6	5,7	6	5,7	5,4	5,7	6	5,7	6
12	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
13	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
14	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5,1
15	5,1	6	5,1	6	6	6	6	6	6	5,58	5,1	4,2
16	6	5,1	4,95	5,1	5,82	6	6	6	6	4,68	6	5,1
17	6	6	5,85	4,2	4,92	6	6	6	6	3,78	6	6
18	6	6	6	4,2	4,02	6	6	6	6	4,68	6	6
19	6	6	6	5,1	4,92	6	6	6	6	5,58	6	6
20	6	6	6	6	5,82	6	6	6	6	6	6	6
21	6	6	6	6	6	5,7	6	6	6	6	6	6
22	5,6	5,1	6	6	6	4,8	5,4	6	5,7	6	6	6
23	4,7	4,2	5,1	6	6	3,9	4,5	5,1	4,8	6	5,1	5,1
24	3,8	3,3	4,2	5,7	6	3	3,6	4,2	3,9	5,1	4,2	4,2

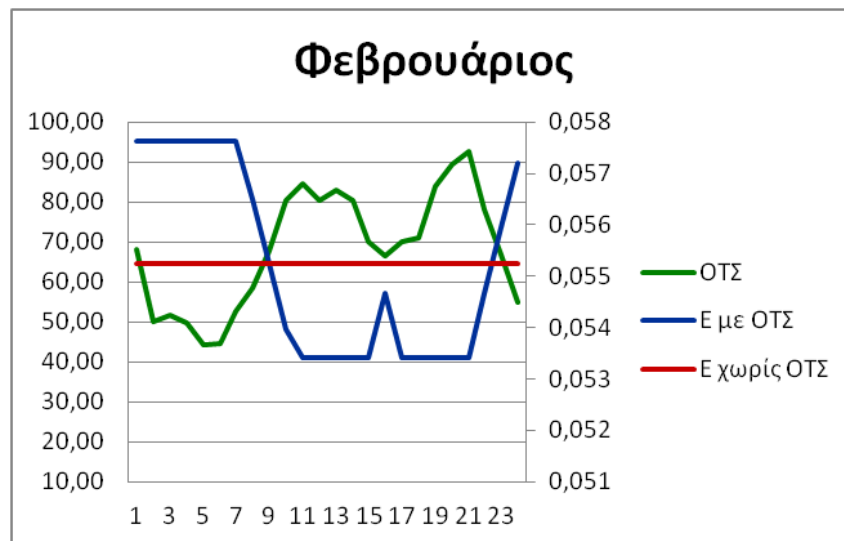
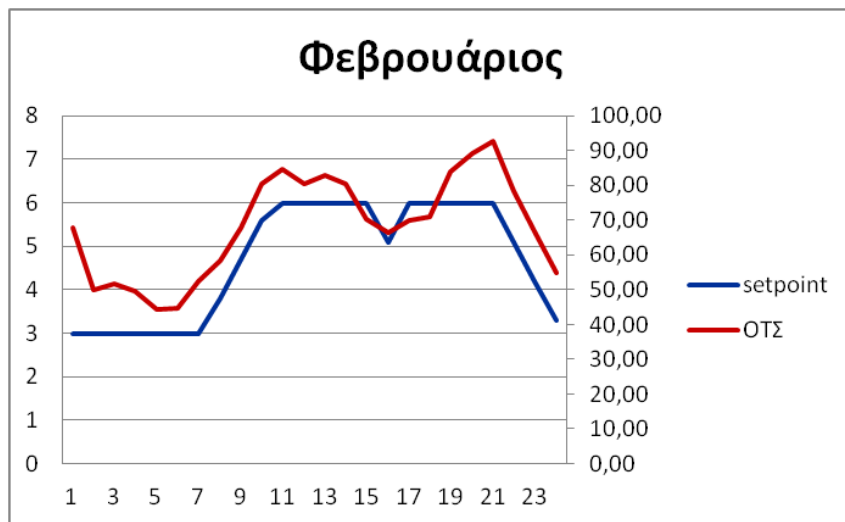
Πίνακας 8: Τιμές εσωτερικής θερμοκρασίας ψυγείου σε °C (setpoint) που προέκυψαν από την ελαχιστοποίηση

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων



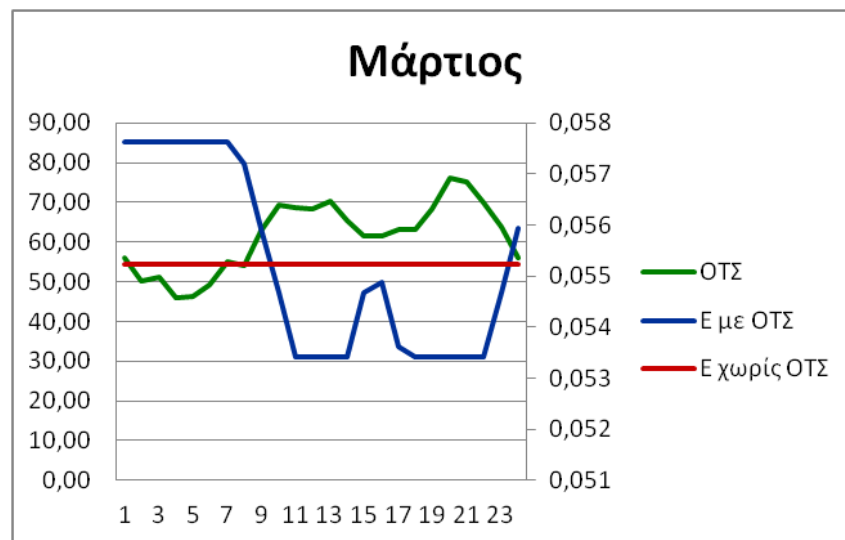
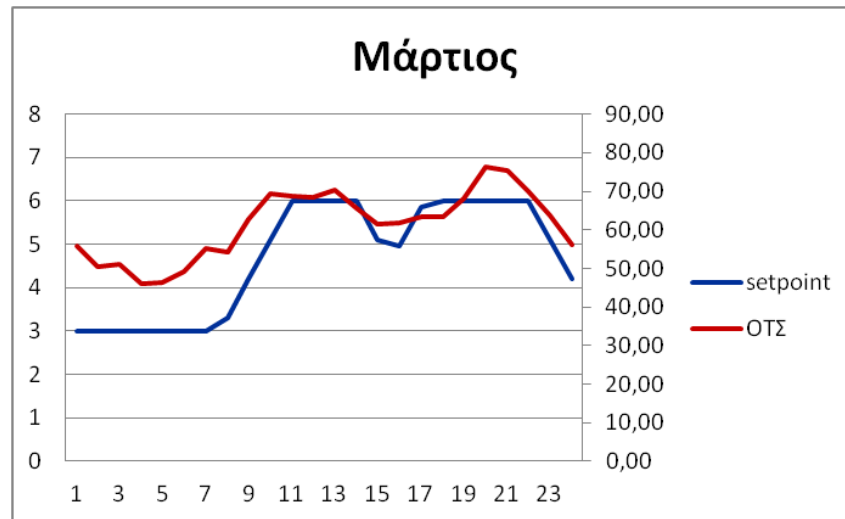
Εικόνα 14: Αποτελέσματα για το μήνα Ιανουάριο με E σε kWh και OTS σε €/MWh

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων



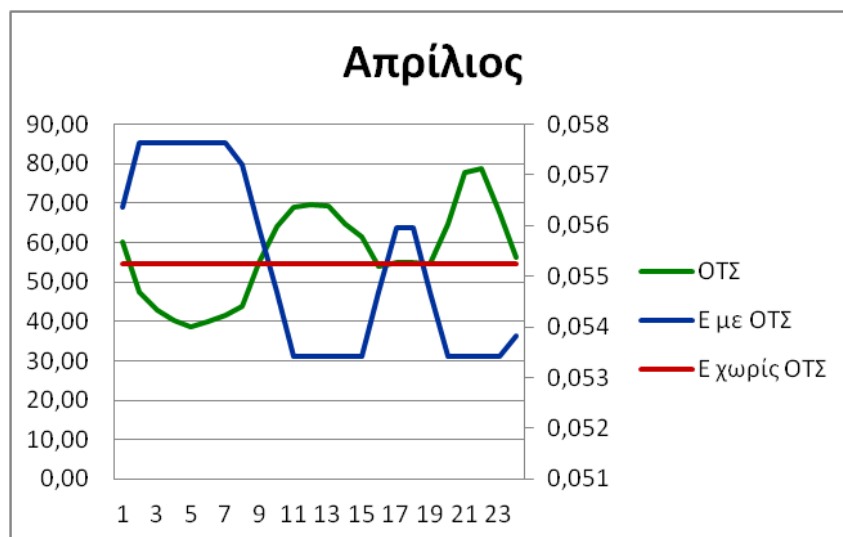
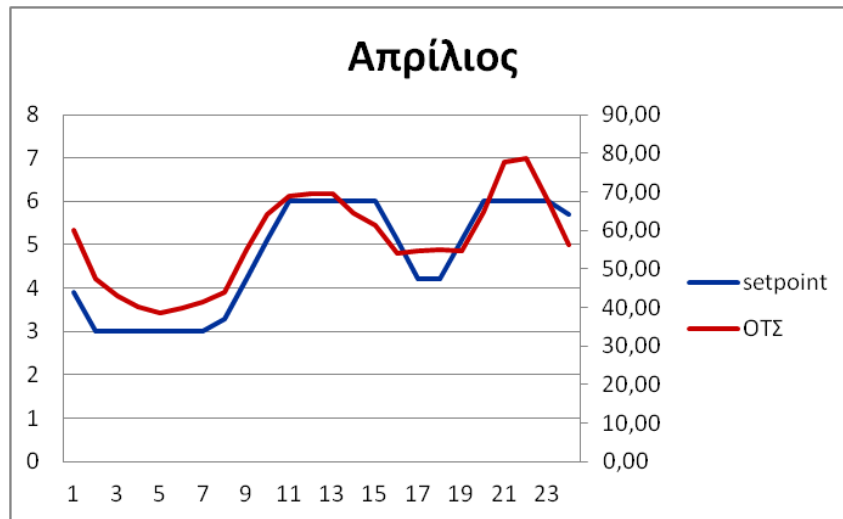
Εικόνα 15: Αποτελέσματα για το μήνα Φεβρουάριο με E σε kWh και OTS σε €/MWh

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων



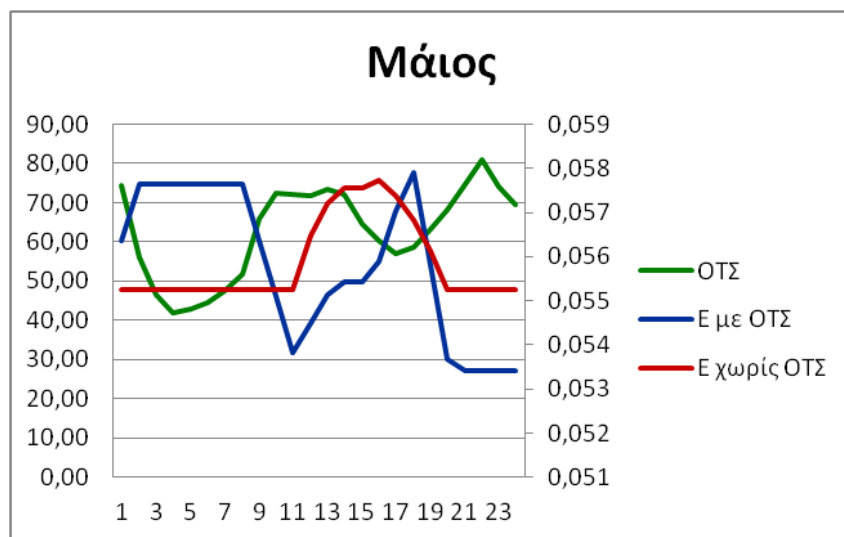
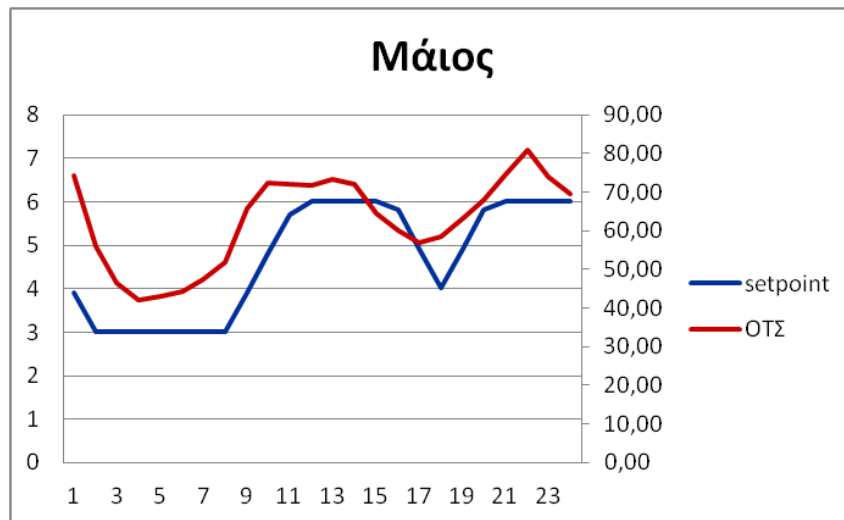
Εικόνα 16: Αποτελέσματα για το μήνα Μάρτιο με E σε kWh και OTS σε €/MWh

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων



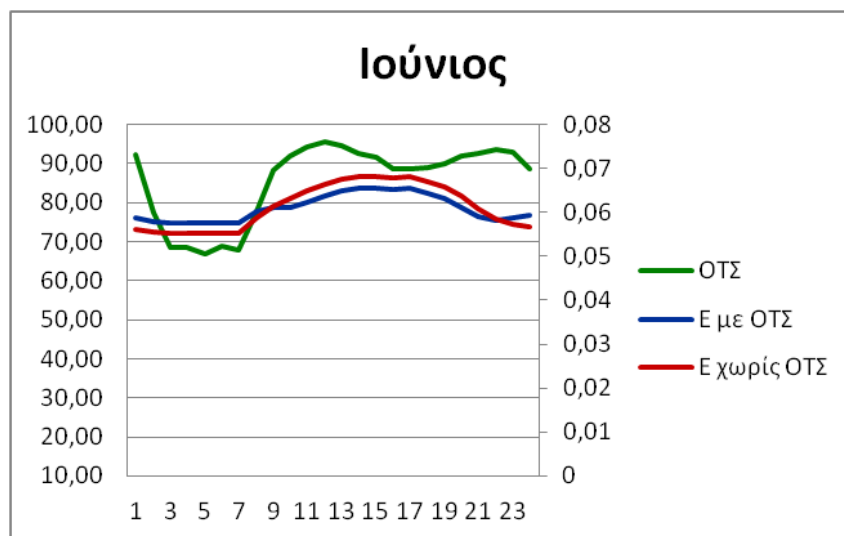
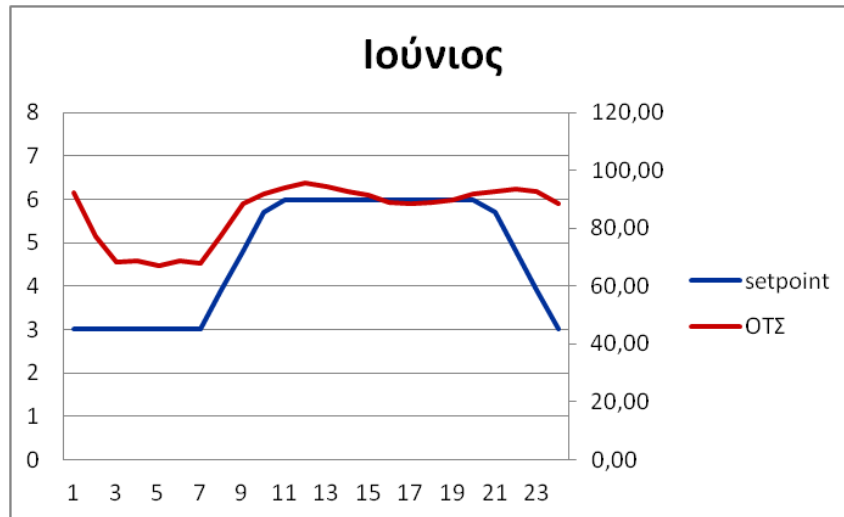
Εικόνα 17: Αποτελέσματα για το μήνα Απρίλιο με E σε kWh και OTS σε €/MWh

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων



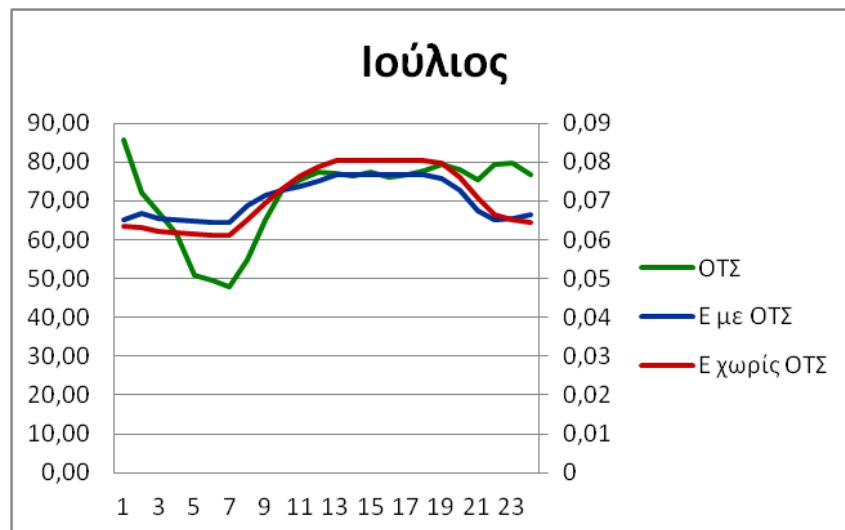
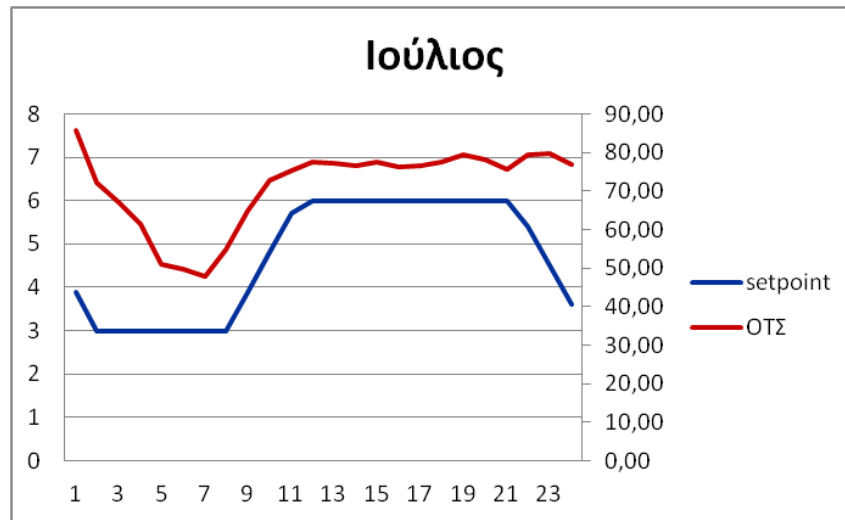
Εικόνα 18: Αποτελέσματα για το μήνα Μάιο με E σε kWh και OTS σε €/MWh

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων



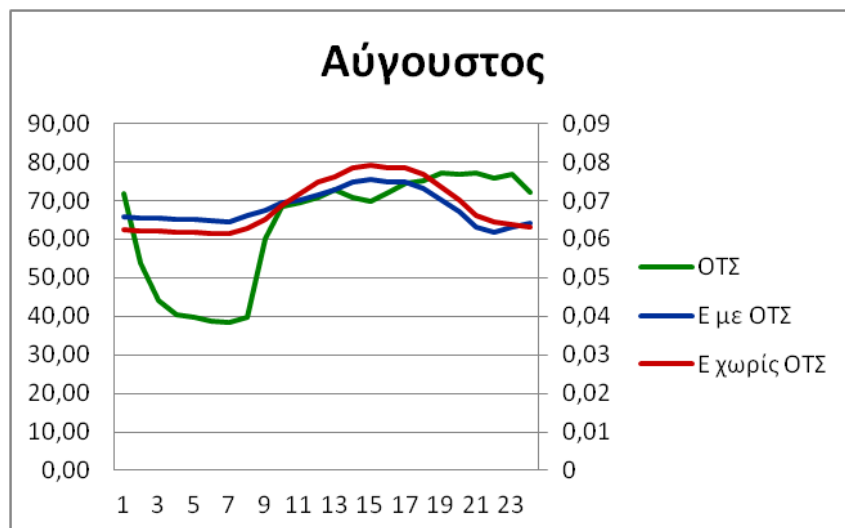
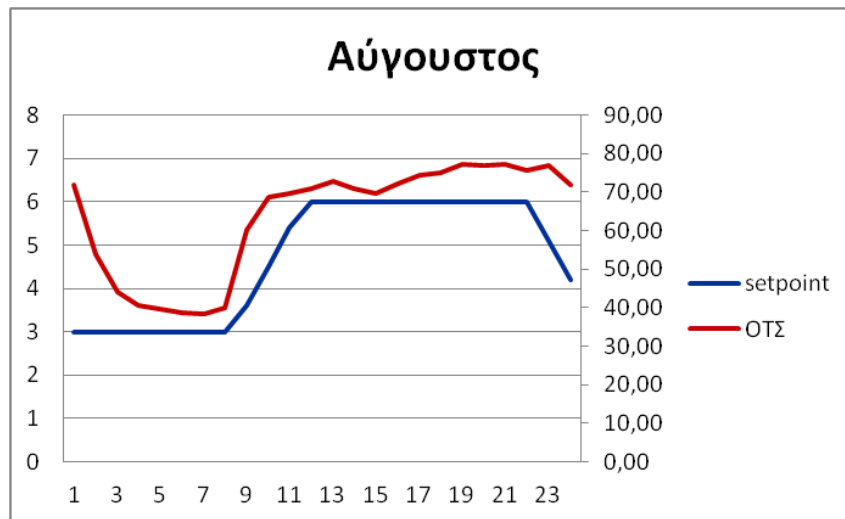
Εικόνα 19: Αποτελέσματα για το μήνα Ιούνιο με E σε kWh και OTS σε €/MWh

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων



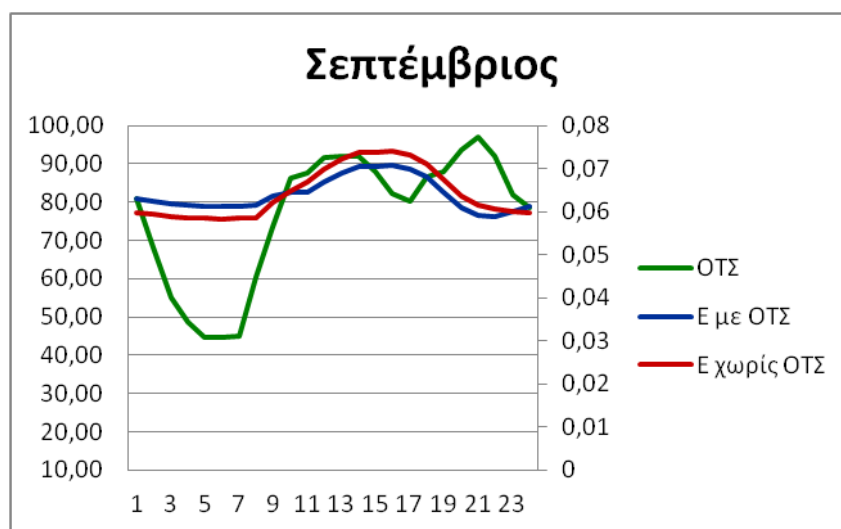
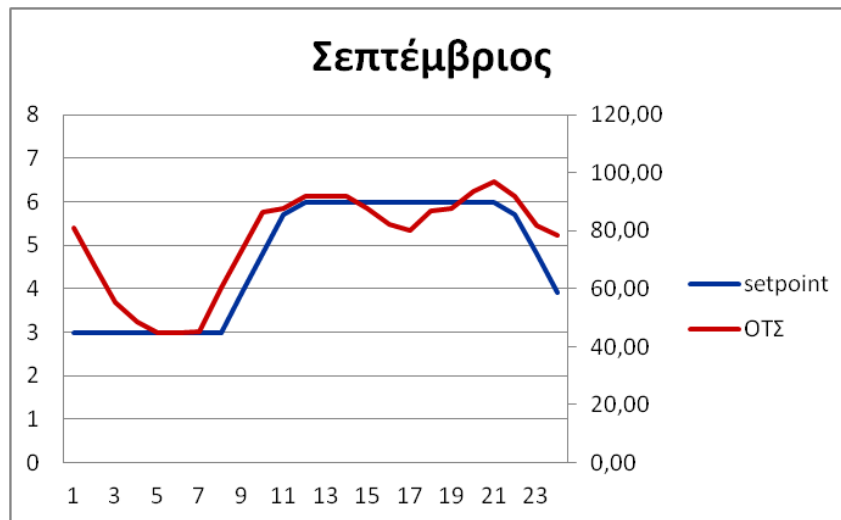
Εικόνα 20: Αποτελέσματα για το μήνα Ιούλιο με Ε σε kWh και OTS σε €/MWh

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων



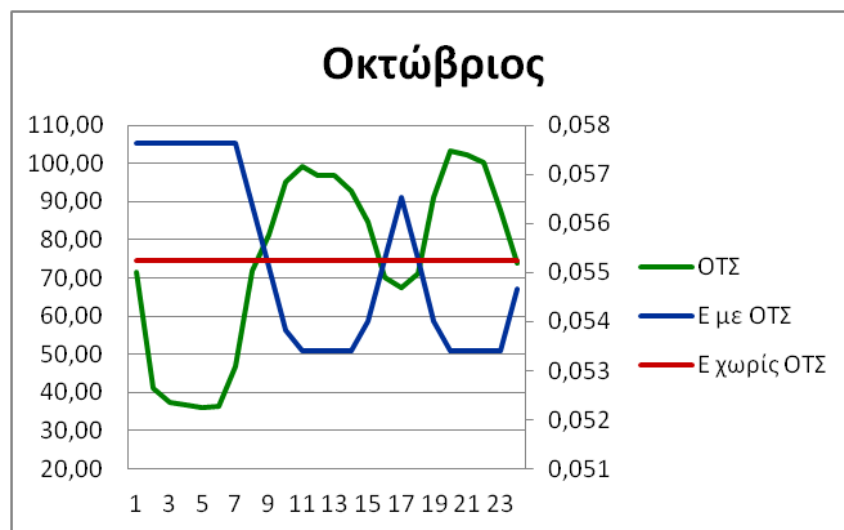
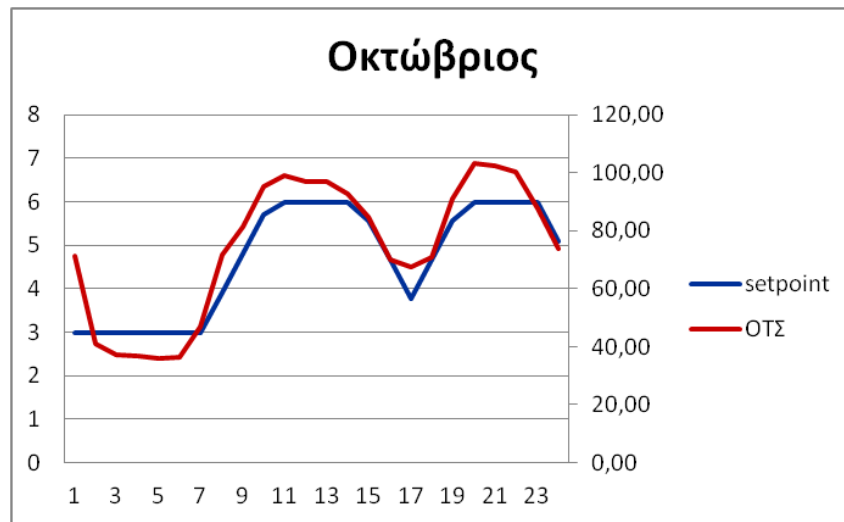
Εικόνα 21: Αποτελέσματα για το μήνα Αύγουστο με E σε kWh και OTS σε €/MWh

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων



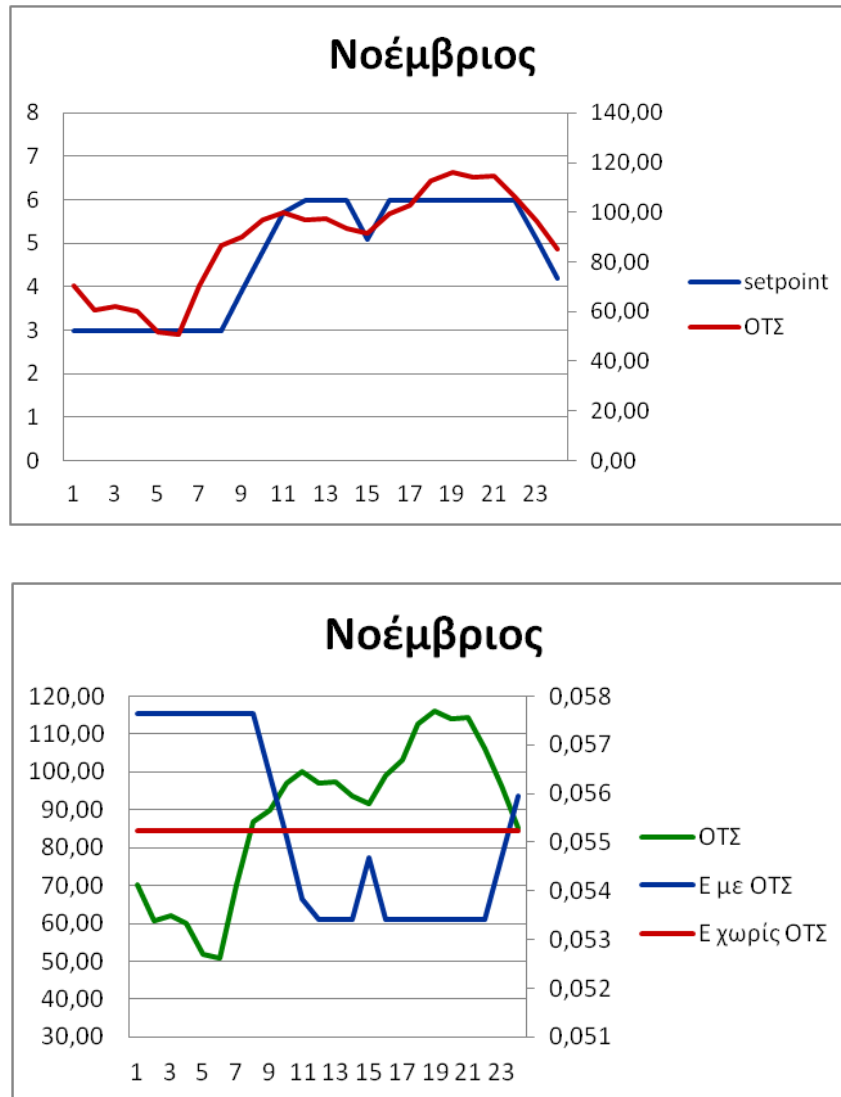
Εικόνα 22: Αποτελέσματα για το μήνα Σεπτέμβριο με E σε kWh και OTS σε €/MWh

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων



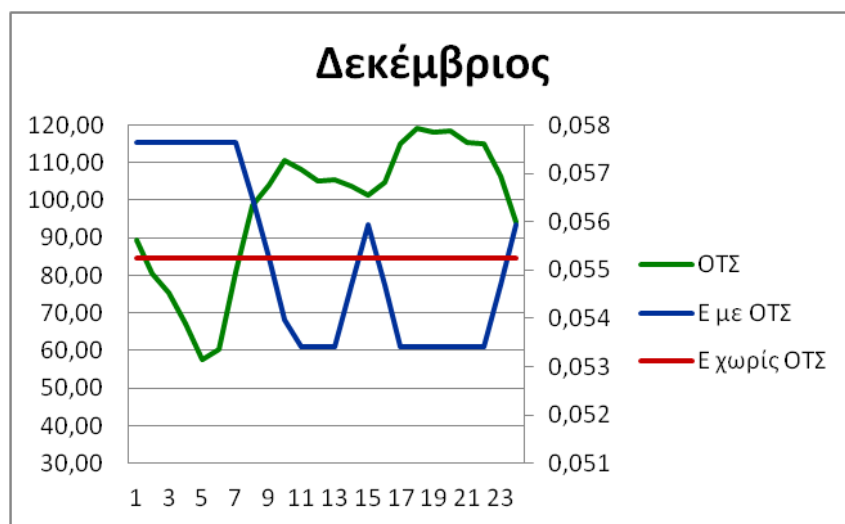
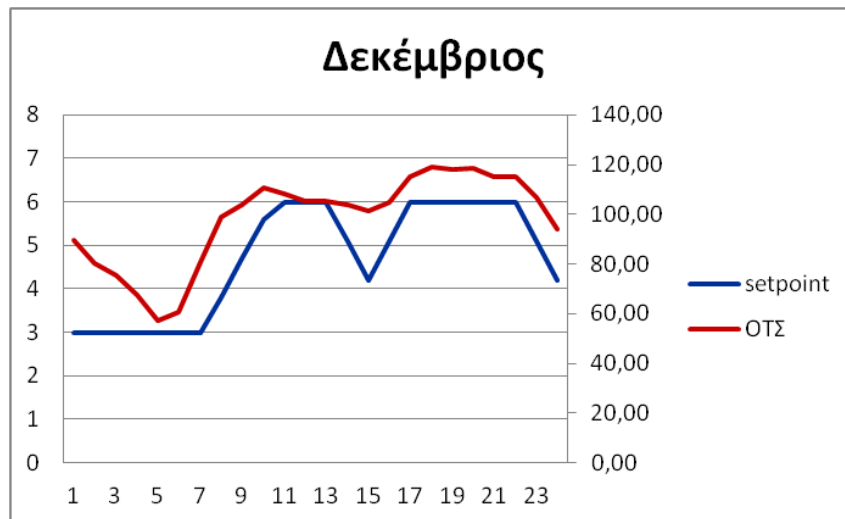
Εικόνα 23: Αποτελέσματα για το μήνα Οκτώβριο με E σε kWh και OTS σε €/MWh

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων



Εικόνα 24: Αποτελέσματα για το μήνα Νοέμβριο με Ε σε kWh και OTS σε €/MWh

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων



Εικόνα 25: Αποτελέσματα για το μήνα Δεκέμβριο με E σε kWh και OTS σε €/MWh

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων

	κόστος E (€)	κόστος E για $s=4,7^{\circ}\text{C}$ (€)
Ιαν	2,492	2,509
Φεβ	2,520	2,536
Μαρ	2,512	2,522
Απρ	2,258	2,272
Μαι	2,589	2,604
Ιουν	3,767	3,806
Ιουλ	3,756	3,799
Αυγ	3,243	3,288
Σεπ	3,553	3,600
Οκτ	3,040	3,068
Νοε	3,501	3,525
Δεκ	4,010	4,032

Πίνακας 9: Αποτελέσματα για το κόστος της ενέργειας σε € για τα setpoint που εξαρτώνται από την ΟΤΣ και για αυτά που είναι ανεξάρτητα από αυτή και ίσα με $4,7^{\circ}\text{C}$

Από τις παραπάνω εικόνες και τον Πίνακα 9 προκύπτουν πολλά συμπεράσματα. Αρχικά πρέπει να σημειωθεί ότι τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Απρίλιο, Οκτώβριο, Νοέμβριο, Δεκέμβριο η καμπύλη της ενέργειας που δεν εξαρτάται από την ΟΤΣ είναι σταθερή επειδή η θερμοκρασία του περιβάλλοντος για αυτούς τους μήνες ήταν κάτω από τους 21°C , συνεπώς όλες αυτές οι τιμές «προσαρμόστηκαν» στους 21°C με άνω όριο τους 24°C . Αυτό είχε ως αποτέλεσμα οι συντελεστές α και b να είναι σταθεροί, άρα και η καταναλισκόμενη ενέργεια να παραμένει σταθερή. Οι τιμές του setpoint που υπολογίστηκαν «ακολουθούν», όπως είναι επιθυμητό, την καμπύλη της ΟΤΣ, αφού σε υψηλές τιμές της ΟΤΣ το setpoint λαμβάνει υψηλές τιμές για μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, ενώ σε χαμηλές τιμές της ΟΤΣ το setpoint πέφτει, ώστε το ψυγείο να μπορεί να καταναλώσει περισσότερη ενέργεια. Αυτό συμβαίνει κυρίως ώστε αν κάποια από τις επόμενες ώρες το ψυγείο χρειαστεί να αυξήσει τη θερμοκρασία του για να μειώσει την κατανάλωσή του να έχει το περιθώριο να το κάνει. Επιπλέον, η κατανάλωση της ενέργειας που εξαρτάται από τις τιμές της ΟΤΣ είναι χαμηλή στις κορυφές της ΟΤΣ και υψηλή στις βυθίσεις της. Το ίδιο ισχύει και για την κατανάλωση της ενέργειας που δεν εξαρτάται από την ΟΤΣ αλλά έχει σταθερό setpoint στους $4,7^{\circ}\text{C}$, απλά για αυξημένη ΟΤΣ έχει μεγαλύτερες τιμές από την ελεγχόμενη κατανάλωση ενέργειας και για μειωμένη ΟΤΣ μικρότερες τιμές. Παρατηρώντας και τον Πίνακα 9 με τα επιμέρους κόστη που προκύπτουν και για τους 2 τρόπους προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο έλεγχος της κατανάλωσης των ψυγείων μεταβάλλοντας την εσωτερική τους θερμοκρασία ανάλογα με την οριακή τιμή του συστήματος μπορεί να αποφέρει κέρδος, συνεπώς η περαιτέρω μελέτη του έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Να σημειωθεί ότι οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν αντανakλούν το οριακό κόστος και το ετήσιο κέρδος υπολογίσθηκε περίπου ίσο με 0,5 €. Η πραγματική χρέωση στην Ελλάδα ανά kWh είναι περίπου 10-15 cent του ευρώ, οπότε η εκτίμηση για το ετήσιο κέρδος από την παραπάνω διαδικασία θα έπρεπε να είναι κάπου στο 1 €.

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων

Η προσομοίωση, λοιπόν, του παραπάνω μοντέλου απέδειξε πως ο έλεγχος της κατανάλωσης οικιακών ψυγείων μπορεί όντως να έχει αποτέλεσμα αν οι καταναλωτές χρησιμοποιούν μεταβλητές τιμές ενέργειας. Το ψυγείο μπορεί να μεταβάλει την εσωτερική του θερμοκρασία, εντός ενός επιτρεπτού ορίου, ανάλογα με την τιμή της ενέργειας την εκάστοτε ώρα και με σωστή ρύθμιση μπορεί να αποφέρει σημαντική μείωση του κόστους του καταναλωτή, αλλά και διευκόλυνση της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

6.2.Δεύτερο πρόβλημα: ESCO

Το δεύτερο μοντέλο που προσομοιώθηκε αφορούσε πάλι στη μελέτη της διαχείρισης της ενεργειακής κατανάλωσης των ψυγείων με στόχο τη μεγιστοποίηση του κέρδους μιας ESCO που διαχειρίζεται ένα ή περισσότερα αιολικά πάρκα. Μια ESCO είναι μια εταιρεία παροχής ενέργειας (Energy Service Company) που μπορεί να παρέχει στους καταναλωτές ολοκληρωμένες λύσεις για θέματα ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των σχεδίων και την υλοποίηση των έργων ενεργειακής εξοικονόμησης, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη διαχείριση του κινδύνου από τέτοιες επενδύσεις. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί μια τέτοια εταιρεία είναι συνήθως ο εξής: Μελετάται πρώτα σε βάθος η ιδιοκτησία στην οποία θα εφαρμόσει την πολιτική της, σχεδιάζεται μια ενεργειακά αποδοτική λύση, εγκαθίστανται τα απαραίτητα στοιχεία και το σύστημα συντηρείται για να εξασφαλιστεί η εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη διάρκεια της περιόδου αποπληρωμής. Η περίοδος αποπληρωμής και η συμμετοχή του καταναλωτή και της ESCO στα επιμέρους έξοδα ορίζεται από συμβόλαια που υπογράφονται και από τις δυο πλευρές, τα οποία μπορεί να έχουν διαφορετική μορφή ανάλογα με την περίπτωση. Για μια ESCO που διαχειρίζεται έναν αριθμό αιολικών πάρκων ισχύουν τα εξής: η αιολική παραγωγή εξαρτάται άμεσα από τον άνεμο και την ταχύτητά του. Για το σύστημα της Κρήτης, το οποίο μελετήθηκε, υπάρχει καθημερινή πρόβλεψη ανέμου με $\pm$ 0,1 απόκλισης. Με βάση αυτή την πρόβλεψη μπορεί να εκτιμηθεί η καθημερινή αιολική παραγωγή με ένα επίπεδο αβεβαιότητας. Σε περιπτώσεις μεγάλης βύθισης στην πρόβλεψη ανέμου, η αιολική παραγωγή δε μπορεί να καλύψει κάποια φορτία, οπότε κρίνεται απαραίτητη είτε η λειτουργία μιας επιπλέον μονάδας παραγωγής είτε η κάλυψη της χαμένης ισχύος από τις μονάδες που ήδη λειτουργούν. Αν κανένα από τα δυο δεν είναι εφικτό ο διαχειριστής υποχρεώνεται να διακόψει κάποια φορτία για ένα χρονικό διάστημα, ώστε η παραγωγή να μπορεί να καλύψει τη ζήτηση. Η αβεβαιότητα που υπάρχει στην παραγωγή των ΑΠΕ είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά που καθιστούν δύσκολη τη μεγάλη διείσδυσή τους για την εξυπηρέτηση των φορτίων.

Το φορτίο των ψυγείων θα μπορούσε να βοηθήσει στην αποφυγή μιας τέτοιας απώλειας της παραγωγής. Συγκεκριμένα, ελέγχοντας την ενεργειακή κατανάλωση των ψυγείων μέσω του setpoint της εσωτερικής του θερμοκρασίας, το οποίο ρυθμίζεται από 3 °C έως 6 °C, μπορεί να μειωθεί η κατανάλωσή τους σε τέτοιο σημείο ώστε να καλύπτεται μια βύθιση που μπορεί να οφείλεται στη μεταβλητότητα του ανέμου. Συνεπώς, δε χρειάζεται να γίνει αποκοπή φορτίων ούτε λειτουργία επιπλέον μονάδων, κάτι που ωφελεί όχι μόνο την ESCO αλλά και το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Το συμφέρον της ESCO μέσω της εκμετάλλευσης και διαχείρισης του

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων

φορτίου των ψυγείων μπορεί να προκύψει με τον εξής τρόπο: από τη στιγμή που η εταιρεία μπορεί να διαχειριστεί τα φορτία των ψυγείων και έχει στη διάθεσή της και την πρόβλεψη του ανέμου για κάθε μέρα, γνωρίζει ποιες ώρες υπάρχει πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να είναι χαμηλή και άρα και η αιολική παραγωγή μειωμένη. Αυτές τις ώρες μπορεί να ρυθμίσει τα ψυγεία με τέτοιο τρόπο ώστε να καταναλώνουν τόση ενέργεια όση μπορεί να τους καλύψει το σύστημα μαζί με τα Α/Π, συνεισφέροντας στην αποφυγή αποκοπής φορτίων. Ακόμη, τα ψυγεία εκτός από μεταβολή της ενεργειακής τους κατανάλωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών και συγκεκριμένα εφεδρείας. Ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να γίνει αυτό και η μοντελοποίησή του αναλύεται παρακάτω.

Η ημερήσια κατανάλωση ενέργειας του ψυγείου ενός νοικοκυριού είναι περίπου 1,5kWh, δηλαδή 0,0625kW την ώρα. Το σύστημα της Κρήτης αποτελείται από 330.000 νοικοκυριά άρα η μέση ωριαία κατανάλωση των ψυγείων είναι περίπου ίση με 21MW. Η πρώτη περίπτωση που μελετήθηκε ήταν η διαχείριση της κατανάλωσης των ψυγείων για μεταβολές της ενέργειας από 0MW μέχρι 3MW. Για τη μελέτη αυτών των μεταβολών έγινε προσομοίωση με βάση τις προβλέψεις ενός αιολικού πάρκου της Κρήτης και θεωρήθηκε ότι η λειτουργία των ψυγείων στους 3°C σημαίνει κατανάλωση 3MW και στους 6°C σημαίνει κατανάλωση 0MW. Συνεπώς, άμα χρειάζεται να καταναλωθούν 3MW, αν υπάρχει για παράδειγμα επιπλέον αιολική παραγωγή, αυτό μπορεί να γίνει από τα ψυγεία για setpoint ίσο με 3°C, οπότε δεν υπάρχει απόρριψη ενέργειας, ενώ αν υπάρχει κάποια βύθιση στην πρόβλεψη ανέμου μέχρι και 3MW μπορούν να την καλύψουν τα ψυγεία αυξάνοντάς το setpoint τους μέχρι και τους 6°C. Δεδομένο σε αυτό το πρόβλημα ήταν η πρόβλεψη του ανέμου του αιολικού πάρκου που μελετήθηκε με τα ±όριά της για μια συγκεκριμένη μέρα και η αντιστοίχιση των μεταβολών που αναφέρθηκε. Η μοντελοποίηση βασίστηκε μόνο στη μικρότερη ±απόκλιση από την πρόβλεψη ανέμου. Η συνάρτηση που ελαχιστοποιήθηκε είναι η:

$$\sum_{i=1}^{24} e(t) = \sum_{i=1}^{24} |\sigma_L(t) - s_i(t)|^2 + |\sigma_u(t) - s_i(t)|^2 \quad (7)$$

όπου σ_L η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στη μικρότερη απόκλιση από την πρόβλεψη και σ_u η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη απόκλιση από την πρόβλεψη. Το s_i είναι το setpoint του ψυγείου το οποίο πάλι μεταβάλλεται από 3°C έως 6°C για τη διασφάλιση της ποιότητας των τροφίμων. Τα σ_L και σ_u προέκυψαν με γραμμική παρεμβολή από τις αποκλίσεις της πρόβλεψης και τις αντιστοιχίσεις των θερμοκρασιών με τις μεταβολές της ενέργειας που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $e(t)$ δίνει την τιμή του setpoint του ψυγείου, η οποία κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές σ_L και σ_u , για την οποία το ψυγείο καταναλώνει την ελάχιστη ενέργεια υπό τις εκάστοτε συνθήκες. Με αυτό τον τρόπο η λειτουργία του ψυγείου συσχετίζεται άμεσα με την πρόβλεψη του ανέμου και τις πιθανές της αποκλίσεις, οπότε διακυμάνσεις της παραγωγής μέχρι και 3MW μπορούν να «απορροφηθούν» από τα ψυγεία. Ο λόγος που υπάρχουν τετράγωνα είναι για διευκόλυνση της βελτιστοποίησης, η οποία παρατίθεται αναλυτικά παρακάτω.

Η ελαχιστοποίηση της σχέσης (7) έγινε υπό κάποιους περιορισμούς. Αυτοί ήταν οι εξής:

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων

$$\sigma_L(t) \leq s_i \leq \sigma_u(t) \text{ για } i = 1, \dots, 24 \quad (8)$$

$$|s_i - s_{i-1}| \leq 0,9 \text{ για } i=2, \dots, 24 \quad (9)$$

Ο περιορισμός (8) υποδηλώνει ότι οι τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας του ψυγείου θα βρίσκονται εντός των ορίων των τιμών που αντιστοιχίστηκαν στη μικρότερη και τη μεγαλύτερη απόκλιση από την πρόβλεψη ανέμου. Ο περιορισμός (9) ορίζει πάλι ότι η μεταβολή θερμοκρασίας που θα κάνει το ψυγείο μια συγκεκριμένη ώρα δε θα είναι μεγαλύτερη του ενός βαθμού.

Η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης (7) έγινε με τη βοήθεια της εντολής του Matlab quadprog. Η συγκεκριμένη εντολή είναι εντολή τετραγωνικού προγραμματισμού και επιστρέφει την ελάχιστη τιμή s_i για την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης (7). Για να πάρει η συνάρτηση (7) την επιθυμητή μορφή ώστε να μπορεί να γίνει η χρήση της εντολής quadprog έγιναν τα εξής:

$$e(t) = |\sigma_L(t) - s_i(t)|^2 + |\sigma_u(t) - s_i(t)|^2 = (\sigma_L^2 + \sigma_u^2) + 2s_i^2 - 2s_i \cdot (\sigma_L + \sigma_u)$$

Η μορφή που πρέπει να έχει η συνάρτηση είναι $\frac{1}{2} x^T H x + f^T x$, όπου $x = s_i = \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{24} \end{bmatrix}$,

$$f^T = -2s_i \cdot (\sigma_L + \sigma_u)^T = -2 \cdot [\sigma_{L1} + \sigma_{u1} \quad \dots \quad \sigma_{L24} + \sigma_{u24}] \text{ και } H = 4 \cdot [s_1 \quad \dots \quad s_{24}] \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{24} \end{bmatrix}.$$

Αντιστοίχως, η μορφή των περιορισμών πρέπει να είναι η εξής:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{L1} \\ \vdots \\ \sigma_{L24} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{24} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \sigma_{u1} \\ \vdots \\ \sigma_{u24} \end{bmatrix} \text{ και}$$

$$|s_i - s_{i-1}| \leq 0,9 \rightarrow -0,9 \leq s_i - s_{i-1} \leq 0,9 \rightarrow s_i - s_{i-1} \leq 0,9 \quad (10)$$

$$\rightarrow s_{i-1} - s_i \leq 0,9 \quad (11)$$

$$(10) \rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{24} \end{bmatrix} \leq 0,9 \cdot \text{ones}(23,1)$$

$$(11) \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{24} \end{bmatrix} \leq 0,9 \cdot \text{ones}(23,1)$$

όπου η συνάρτηση ones(m,n) είναι μια συνάρτηση του Matlab που δημιουργεί έναν πίνακα διαστάσεων m×n γεμάτο άσσους.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρώτο πρόβλημα είναι αυτά του Πίνακα 10.

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων

	πρόβλεψη (MW)	όριο - (MW)	όριο + (MW)	s _i (°C)
1	0,47863	0,16131	1,43157	5,36
2	0,46671	0,21862	1,03197	5,59
3	0,55387	0,29794	1,09006	5,60
4	1,06241	0,73764	1,81158	5,46
5	1,85091	1,29202	3,00118	5,15
6	2,88533	1,89649	3,78622	5,06
7	3,30554	2,2621	4,10594	5,08
8	3,42879	2,60231	4,31811	5,14
9	3,55865	2,47624	4,5789	4,95
10	3,66849	2,55404	4,6441	4,95
11	3,42839	2,45016	4,43256	5,01
12	3,62743	2,62936	4,42522	5,10
13	3,72418	2,70953	4,50391	5,10
14	3,51879	2,64786	4,34696	5,15
15	3,59945	2,60148	4,5732	5,01
16	3,39637	2,29087	4,307	4,99
17	2,65588	1,74676	3,67063	5,04
18	1,9938	1,38313	3,05434	5,16
19	1,96489	1,33947	3,04382	5,15
20	1,71731	1,24514	2,7656	5,24
21	1,52883	1,03643	2,65844	5,19
22	1,01502	0,72371	1,68622	5,52
23	0,70761	0,41413	1,36162	5,53
24	0,61064	0,28611	1,518	5,38

Πίνακας 10: Αποτελέσματα για μεταβολές 0-3 MW

Με βάση τη λογική των μεταβολών των 3MW αναπτύχθηκε η επόμενη περίπτωση, η οποία αφορούσε στην παροχή εφεδρείας από τα ψυγεία. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η δυνατότητα αποκοπής του φορτίου των ψυγείων σε περιπτώσεις βυθίσεων στην πρόβλεψη του ανέμου, ώστε να μη χρειαστεί να αποκοπεί άλλο φορτίο. Η προσέγγιση της περίπτωσης αυτής έγινε με τον ίδιο τρόπο με προηγουμένως, απλά αυτή τη φορά αντικείμενο μελέτης δεν ήταν η ενέργεια αλλά η ισχύς των ψυγείων. Ουσιαστικά, η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης (7) έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε οποιαδήποτε βύθιση να καλύπτεται από το φορτίο των ψυγείων οπότε η πρόβλεψη της παραγωγής των αιολικών πάρκων να είναι ίση με τη διαθέσιμη ισχύ. Οι μεταβολές που μελετήθηκαν αφορούσαν «κόψιμο» ισχύος από 18MW έως 21MW, οπότε λειτουργία στους 3°C σημαίνει αποκοπή ισχύος 21MW και λειτουργία στους 6°C σημαίνει αποκοπή ισχύος 18MW. Η αντιστοίχιση των ακραίων θερμοκρασιών του setpoint του ψυγείου είναι ουσιαστικά ίδια με της πρώτης περίπτωσης, αφού οι μεταβολές είναι πάλι της τάξης των 3MW. Το συγκεκριμένο

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων

πρόβλημα μελετήθηκε για τη συνολική παραγωγή των αιολικών πάρκων της Κρήτης Iweco Χώνος, Αχλάδια, Κρυά και Ρόκας. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν και πάλι ίδια με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω και τα αποτελέσματα είναι αυτά που καταγράφονται στον Πίνακα 11.

	πρόβλεψη (MW)	όριο - (MW)	όριο + (MW)	s_i (°C)
1	29,61301	27,52779	31,51134	4,01
2	27,15136	25,20842	28,91834	4,15
3	26,35418	24,24093	28,49602	3,87
4	24,81443	22,22213	27,47817	3,37
5	24,39506	21,89668	26,8523	3,52
6	25,30163	22,806	27,90057	3,45
7	25,11098	22,73788	27,56133	3,59
8	25,76792	23,40629	27,85697	3,77
9	29,22638	27,7347	30,69977	4,51
10	23,89316	20,91702	26,20361	3,61
11	28,46569	25,74437	30,0584	3,84
12	28,9956	25,99517	30,52905	3,73
13	28,85748	25,73899	30,71257	3,51
14	28,12308	25,32834	29,70403	3,81
15	27,07318	24,71582	28,74512	3,99
16	25,07599	22,40296	27,25756	3,57
17	23,3493	20,77205	25,78714	3,49
18	22,39791	19,78373	24,88084	3,45
19	20,80838	18,42466	23,06917	3,68
20	20,53037	18,17725	22,77083	3,70
21	20,27296	17,52289	22,23117	3,65
22	18,87023	15,88659	21,51632	3,19
23	15,35246	12,69319	18,13628	3,28
24	10,82683	7,97858	13,4844	3,25

Πίνακας 11: Αποτελέσματα για μεταβολές 18-21 MW και κόστιμο φορτίου ψυγείων

Σε αντίστοιχο σκεπτικό με την πρώτη περίπτωση μελετήθηκαν μεταβολές της πρόβλεψης από 0 MW έως 21 MW, οι οποίες αφορούσαν όλα τα αιολικά πάρκα της Κρήτης. Η λειτουργία των ψυγείων στους 3°C σημαίνει κατανάλωση 21MW και στους 6°C σημαίνει κατανάλωση 0MW, με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε και στο πρώτο πρόβλημα που μελετήθηκε ένα αιολικό πάρκο. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ακριβώς η ίδια και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται στον Πίνακα 12. Πρέπει να τονισθεί ότι η συγκεκριμένη περίπτωση προκύπτει από ασάφειες στη βιβλιογραφία και τα αποτελέσματα της μελέτης των James Y. Kao και George E. Kelly [19], οπότε η ορθότητα των αποτελεσμάτων της τίθεται υπό αμφισβήτηση.

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων

	πρόβλεψη (MW)	όριο - (MW)	όριο + (MW)	s _i (°C)
1	72,3673	61,6682	82,6037	4,50
2	76,1604	67,2487	84,6491	4,76
3	61,5491	52,2308	72,7001	4,54
4	58,9568	48,4945	70,3119	4,44
5	53,4684	44,1316	64,6038	4,54
6	47,7401	39,8988	59,0941	4,63
7	52,6672	43,8583	63,3998	4,60
8	63,9982	55,1897	72,4535	4,77
9	70,1169	59,7633	79,8909	4,56
10	69,207	58,2152	79,9146	4,45
11	68,5482	58,1658	79,0056	4,51
12	66,4013	54,2576	76,7261	4,40
13	55,2044	47,1559	66,369	4,63
14	53,6065	44,016	62,0812	4,71
15	45,0032	37,2345	53,5011	4,84
16	38,555	33,5378	46,1041	5,10
17	34,249	29,6113	39,4861	5,29
18	31,3929	27,2811	37,431	5,28
19	30,8363	24,1305	37,4962	5,05
20	26,9266	20,8862	34,7358	5,01
21	24,4786	18,3495	30,4285	5,14
22	27,8259	22,9803	33,8499	5,22
23	31,2622	27,1194	36,3266	5,34
24	35,4549	31,1291	40,9146	5,30

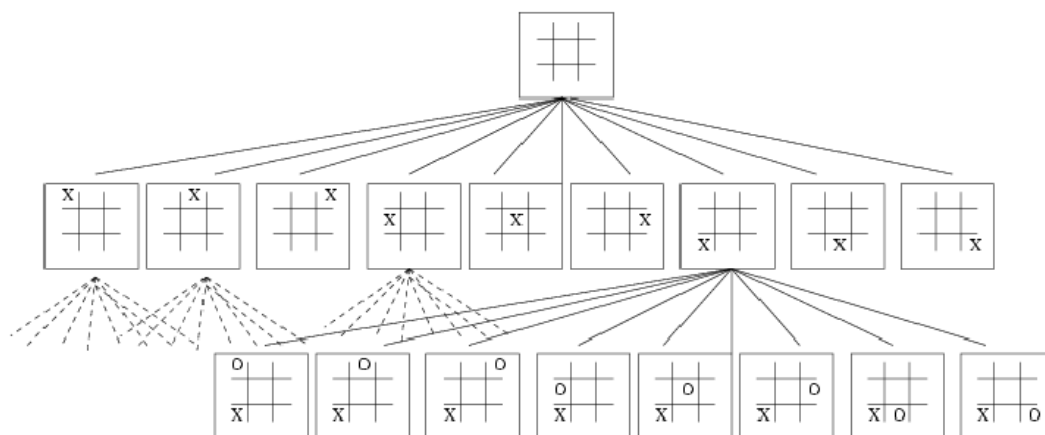
Πίνακας 12: Αποτελέσματα για μεταβολές 0-21MW

Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη μελέτη των παραπάνω τριων περιπτώσεων είναι πως η διαχείριση του φορτίου των ψυγείων μπορεί όντως να ωφελήσει μια ESCO που διαχειρίζεται ένα ή περισσότερα αιολικά πάρκα. Με μικρές μεταβολές της εσωτερικής θερμοκρασίας του ψυγείου μπορούν να καλυφθούν μικρές αποκλίσεις της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής. Με αυτό τον τρόπο, η αιολική παραγωγή μπορεί να θεωρηθεί πολύ πιο αξιόπιστη και άρα μπορεί να υπάρξει και μεγαλύτερη διείσδυση των αιολικών πάρκων, το οποίο συμφέρει την ESCO.

6.3.Τρίτο πρόβλημα: Παιχνίδι DSO-ESCO

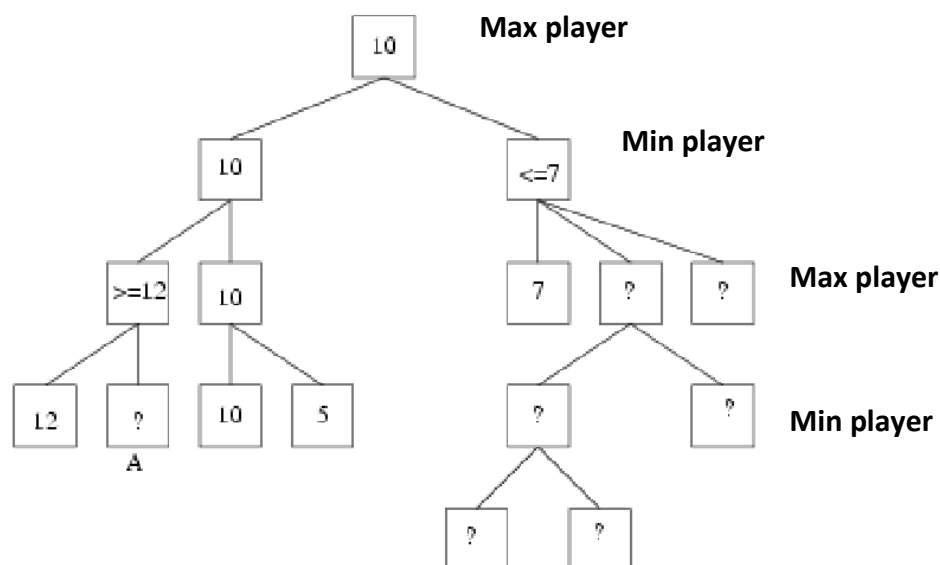
Το τρίτο μοντέλο που προσομοιώθηκε μελέτησε ένα παιχνίδι leader-follower, με βάση το μοντέλο του Stackelberg. Ο ηγέτης του παιχνιδιού ήταν ο διαχειριστής του συστήματος DSO και ο ακόλουθος η εταιρεία παροχής ενέργειας ESCO. Σε αυτό το παιχνίδι μελετήθηκε η επίδραση της λειτουργίας των ψυγείων στο μέσο μεταβλητό κόστος, αν το φορτίο τους χρησιμοποιείται για κάποιες ώρες της ημέρας ως εφεδρεία, ανάλογα και με το ποιες και πόσες ώρες της ημέρας είναι αυτές και ποια είναι η ημερήσια παραγωγή ενέργειας από τις ήδη υπάρχουσες μονάδες.

Το παιχνίδι αποτελείται από δυο γύρους, στον πρώτο κινείται ο DSO και στο δεύτερο η ESCO. Σκοπός του παιχνιδιού ήταν η ελαχιστοποίηση του μέσου μεταβλητού κόστους MVC του συστήματος λειτουργώντας, όπως προαναφέρθηκε, για κάποιες ώρες της ημέρας τα ψυγεία για παροχή εφεδρείας. Συγκεκριμένα, με βάση και το μοντέλο που μελετήθηκε στο δεύτερο πρόβλημα, για κάποιες μεταβολές της παραγωγής ενέργειας τα ψυγεία μπορούν να παρέχουν εφεδρεία κόβοντας το φορτίο τους για κάποιο χρονικό διάστημα. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αποφευχθεί το κόστος άλλων φορτίων και να λειτουργήσει καλύτερα το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένη στο παιχνίδι ήταν η ημερήσια παραγωγή ενέργειας από μια μονάδα gas, δηλαδή μια μονάδα που καίει diesel. Ο DSO, αρχικά, έπρεπε να επιλέξει 3 ώρες της ημέρας τις οποίες τα ψυγεία θα μπορούν να παρέχουν εφεδρεία, στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση του μέσου μεταβλητού κόστους. Θεωρήθηκε ότι όποιες ώρες λειτουργούν τα ψυγεία για την παροχή εφεδρείας ο διαχειριστής μπορεί να υποκαταστήσει τους ακριβούς A/Σ με φτηνές diesel. Το μέσο μεταβλητό κόστος μιας μονάδας gas είναι ίσο με 200 €/MWh και μιας μονάδας diesel ίσο με 71 €/MWh. Η λογική επιλογή, λοιπόν, θα ήταν ο DSO να τοποθετήσει τη λειτουργία των ψυγείων τις ώρες που η παραγωγή των μονάδων gas είναι μέγιστη, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το μέσο μεταβλητό κόστος του συστήματος. Παρόλα αυτά, λόγω της μορφής του παιχνιδιού καθοριστικό ρόλο στη βέλτιστη λύση παίζει και η επιλογή του ακόλουθου, της ESCO, το οποίο θα αποδειχθεί και παρακάτω. Στη συνέχεια, λοιπόν, η ESCO επιλέγει σε ποιες από τις υπόλοιπες ώρες θέλει να εντάξει τη λειτουργία των ψυγείων, ώστε να έχει μέγιστο κέρδος, το οποίο εξαρτάται άμεσα από την τιμή του μέσου μεταβλητού κόστους. Βασικός όρος του παιχνιδιού είναι ότι οι ώρες που εντάσσονται τα ψυγεία δε μπορούν να είναι συνεχόμενες. Διακοπή του φορτίου τους μπορεί να γίνει το πολύ για ένα τέταρτο της ώρας και θεωρήθηκε πως αν αυτό γίνει για μια ώρα δε μπορεί να γίνει για την αμέσως επόμενη, ώστε να μην υπάρξει κίνδυνος για την ποιότητα των τροφίμων. Ο αλγόριθμος με βάση τον οποίο υπολογίστηκε η βέλτιστη λύση του παραπάνω προβλήματος είναι ο minimax. Αυτός υπολογίζει την κίνηση που μεγιστοποιεί το κέρδος του πρώτου παίκτη και ελαχιστοποιεί το κέρδος του δεύτερου, το οποίο είναι και το ζητούμενο στο παιχνίδι leader-follower. Επειδή όλες οι πιθανές κινήσεις των δυο παικτών σχηματίζουν ένα γράφο είναι απαραίτητο να μην είναι πολύ μεγάλος, ώστε να μπορεί να γίνει γρήγορα η διάσχισή του για την εύρεση του βέλτιστου αποτελέσματος. Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου γράφου είναι αυτό της Εικόνας 26. Σε αυτόν απεικονίζονται οι επιμέρους κινήσεις που μπορούν να κάνουν οι δυο παίκτες σε ένα παιχνίδι τρίλιζας και είναι φανερό πως η καταγραφή όλων των δυνατών συνδυασμών κινήσεων μπορεί να δημιουργήσει ένα πολύ μεγάλο γράφο, που απαιτεί μεγάλο χρόνο για τη διάσχισή του και τον εντοπισμό ενός επιθυμητού συνδυασμού κινήσεων.



Εικόνα 26: Γράφος πιθανών κινήσεων δυο παικτών σε ένα παιχνίδι τρίλιζας [22]

Με τον αλγόριθμο minimax μειώνεται σημαντικά ο αριθμός των υπόδεντρων που σχηματίζονται και οι κινήσεις που αποθηκεύονται είναι κυρίως αυτές που μπορούν να δώσουν το τελικό επιθυμητό αποτέλεσμα. Η αναζήτηση που κάνει αυτός ο αλγόριθμος δεν είναι επίπεδο- επίπεδο αλλά σε βάθος, δηλαδή δεν εντοπίζει πρώτα την 1^η κίνηση με το μεγαλύτερο κέρδος, μετά τη 2^η κίνηση με το μεγαλύτερο κέρδος κ.ο.κ. γιατί κάτι τέτοιο μπορεί να μην οδηγήσει στο βέλτιστο τελικό αποτέλεσμα. Για να γίνει η αναζήτηση του δέντρου σε βάθος πρέπει να γίνουν υποθέσεις για τις μετέπειτα κινήσεις κάθε παίκτη. Ακόμη, ο αριθμός των υπόδεντρων στα οποία γίνεται αναζήτηση μπορεί να μειωθεί σημαντικά αν αμεληθούν εντελώς αυτά που προκύπτουν αν ο παίκτης επιλέξει μια κίνηση που του αποφέρει το ελάχιστο κέρδος. Αυτό επιτεύχθηκε με τον έξυπνο αλγόριθμο minimax (smarter minimax) και απεικονίζεται και στην Εικόνα 27. Όπως φαίνεται οι περιοχές που δεν έχουν τιμές και είναι σημειωμένες με ερωτηματικά «?» δεν επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, το ερωτηματικό που βρίσκεται κάτω αριστερά στο δέντρο δεν έχει σημασία σε τι τιμή αντιστοιχεί γιατί ο min player θα επέλεγε να παίξει προς τον κόμβο 10, ώστε ο max player να έχει ελάχιστο κέρδος. Αυτό ονομάζεται beta-cutoff. Τα ερωτηματικά, επίσης, στο δεξί μέρος του δέντρου δεν έχει σημασία σε τι τιμή αντιστοιχούν γιατί ο max player θα επιλέξει την τιμή 10, ώστε να μην έχει δυνατότητα ο min player να επιλέξει την τιμή 7. Αυτό ονομάζεται alpha cutoff. Με αυτόν τον τρόπο, λοιπόν, η διάσχιση του γράφου γίνεται σε πολύ μικρότερο υπολογιστικό χρόνο και οι επιμέρους κινήσεις που μελετώνται είναι μόνο αυτές που μπορεί να οδηγήσουν σε κάποιο επιθυμητό αποτέλεσμα [22].



Εικόνα 27: Αλγόριθμος minimax για παιχνίδι 2 παικτών [22]

Στο παιχνίδι που μελετήθηκε ο DSO στοχεύει, όπως προαναφέρθηκε, στην ελαχιστοποίηση του MVC και η ESCO στη μεγιστοποίηση του κέρδους της, το οποίο εξαρτάται από την τιμή του μέσου μεταβλητού κόστους. Πρέπει, λοιπόν, ο διαχειριστής να κάνει σωστή επιλογή των ωρών που θα λειτουργούν τα ψυγεία, ώστε όποια και να είναι η επιλογή της ESCO να της αποφέρει το μικρότερο κέρδος. Το κέρδος της ESCO δίνεται από τη σχέση

$$c = a \cdot MVC \cdot x \quad (12)$$

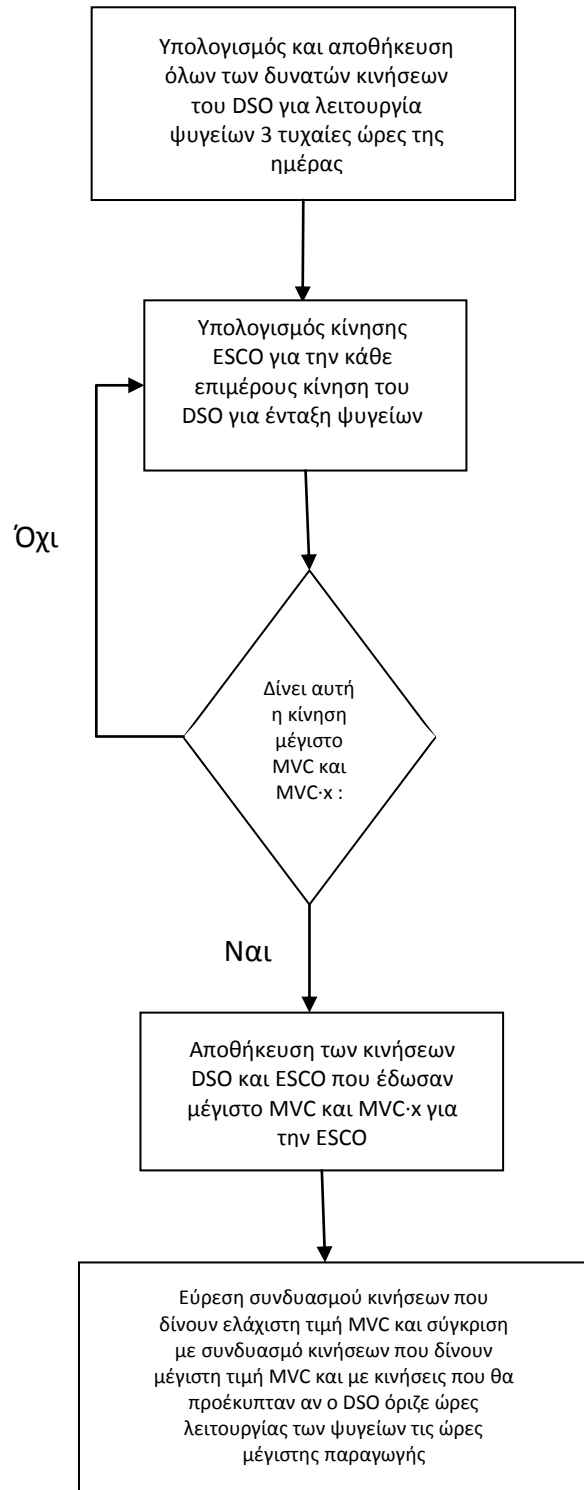
όπου το a είναι μια σταθερή ποσότητα που εκφράζει τη συνολική ισχύ που δίνει η μονάδα παραγωγής την εκάστοτε ώρα της ημέρας, MVC είναι το μέσο μεταβλητό κόστος ανάλογα με τη μονάδα που είναι σε λειτουργία και το x υποδηλώνει πόσες φορές συνολικά χρησιμοποιούνται τα ψυγεία για παροχή εφεδρείας μέσα σε μια μέρα. Ο λόγος για τον οποίο το κέρδος εξαρτάται άμεσα από τον παράγοντα x είναι επειδή η ESCO διαχειρίζεται τα ψυγεία, οπότε μεγαλύτερη χρήση των ψυγείων για παροχή εφεδρείας μπορεί να αυξήσει το κέρδος της, πάντα σε συνδυασμό και με το μέσο μεταβλητό κόστος. Ο μέγιστος αριθμός ωρών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ψυγεία σε μια μέρα είναι 12, επειδή όπως προαναφέρθηκε δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν δυο συνεχόμενες ώρες. Θεωρήθηκε ότι ο διαχειριστής στην κίνησή του επιλέγει 3 ώρες της ημέρας τις οποίες η ESCO υποχρεωτικά θα λειτουργεί τα ψυγεία και στη συνέχεια η εταιρεία επιλέγει από 5 έως 9 άλλες ώρες τις ημέρας, τις οποίες θα λειτουργήσει τα ψυγεία για να μεγιστοποιήσει τη σχέση (12).

Όλα τα παραπάνω υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab. Αρχικά, αποθηκεύτηκαν σε έναν πίνακα όλες οι δυνατές κινήσεις που μπορεί να κάνει ο διαχειριστής, «μοιράζοντας» τα ψυγεία σε τρεις τυχαίες ώρες της ημέρας, οι οποίες, όμως, δεν ήταν συνεχόμενες. Στη συνέχεια, για κάθε μια από αυτές τις κινήσεις βρέθηκε η κίνηση της ESCO που δίνει τη μεγαλύτερη τιμή μέσου μεταβλητού κόστους. Αυτό πραγματοποιήθηκε για τις

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων

περιπτώσεις που η ESCO εντάσσει τα ψυγεία 5 επιπλέον φορές τη μέρα, 6, 7, 8 και 9 αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, αφού υπολογίστηκαν όλες οι δυνατές κινήσεις που μπορεί να κάνει η ESCO, υπολογιζόταν μέσω ενός επαναληπτικού βρόχου η κίνηση της για την οποία προκύπτει μέγιστη τιμή της σχέσης (12) για την κάθε επιμέρους επιλογή του DSO. Ο συνδυασμός των δυο κινήσεων που προέκυπτε αποθηκευόταν σε έναν πίνακα μαζί με τη μέγιστη τιμή του MVC και το $MVC \cdot x$. Ο γράφος, λοιπόν, περιορίστηκε μόνο στα σημαντικά υπόδεντρα, το οποίο ήταν και το επιθυμητό με βάση όσα περιγράφηκαν και παραπάνω. Με βάση όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν μελετώντας τις διάφορες κινήσεις της ESCO βρέθηκε, τέλος, η κίνηση του DSO που έδινε την ελάχιστη τιμή για το μέσο μεταβλητό κόστος. Παρατηρήθηκε ότι σε κάποιες περιπτώσεις για περισσότερες διαφορετικές κινήσεις του DSO προέκυπτε η ίδια ελάχιστη τιμή του μέσου μεταβλητού κόστους. Βρέθηκε, επίσης, και ο συνδυασμός κινήσεων που οδηγεί στη μέγιστη τιμή του μέσου μεταβλητού κόστους για να χρησιμοποιηθεί στις συγκρίσεις των αποτελεσμάτων. Το διάγραμμα ροής των κινήσεων που ακολουθήθηκαν είναι αυτό της Εικόνας 28.

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων



Εικόνα 28: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την επίλυση του παιχνιδιού DSO-ESCO

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων

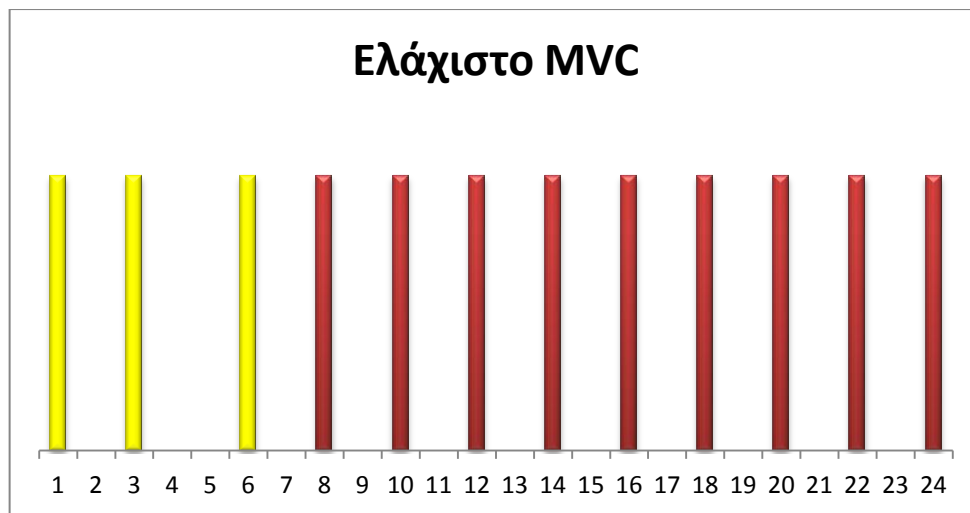
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις επιμέρους προσομοιώσεις συγκρίθηκαν με άλλες δυο τιμές. Αρχικά, συγκρίθηκαν με τις κινήσεις των δυο παικτών που θα οδηγούσαν στο μέγιστο μέσο μεταβλητό κόστος, ώστε να φανεί η διαφορά της τιμής που υπολογίστηκε από το αν τυχαίες κινήσεις οδηγούσαν στη μέγιστη τιμή. Ακόμη, σύγκριση έγινε και με την τιμή του μέσου μεταβλητού κόστους που θα προέκυπτε αν ο DSO επέλεγε τις ώρες λειτουργίας των ψυγείων με βάση το εξής σκεπτικό: από τη στιγμή που στόχος του διαχειριστή είναι η ελαχιστοποίηση του MVC είναι λογικό να επιλέξει να λειτουργήσουν τα ψυγεία τις ώρες που υπάρχει μεγάλη παραγωγή ενέργειας από τις μονάδες gas. Με αυτόν τον τρόπο εκείνες τις ώρες η ενέργεια θα παραχθεί από μονάδες diesel, που έχουν χαμηλότερη τιμή μέσου μεταβλητού κόστους. Μια τέτοια κίνηση θα ήταν απολύτως λογική για το διαχειριστή όμως πρέπει, όπως προαναφέρθηκε, να λάβει υπόψιν και τις πιθανές κινήσεις της ESCO πριν επιλέξει αυτές τις 3 ώρες, γιατί μπορεί μια τέτοια επιλογή να μην είναι η βέλτιστη. Αυτό αποδείχθηκε και από τις συγκρίσεις που έγιναν, αφού φάνηκε πως ο συνδυασμός κινήσεων που βρέθηκε μέσω της διαδικασίας που περιγράφηκε παραπάνω αποφέρει καλύτερα αποτελέσματα από αυτή τη λογική λύση.

Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από μια από τις προσομοιώσεις. Η παραγωγή της ενέργειας από τη μονάδα gas δίνεται στο Παράρτημα.

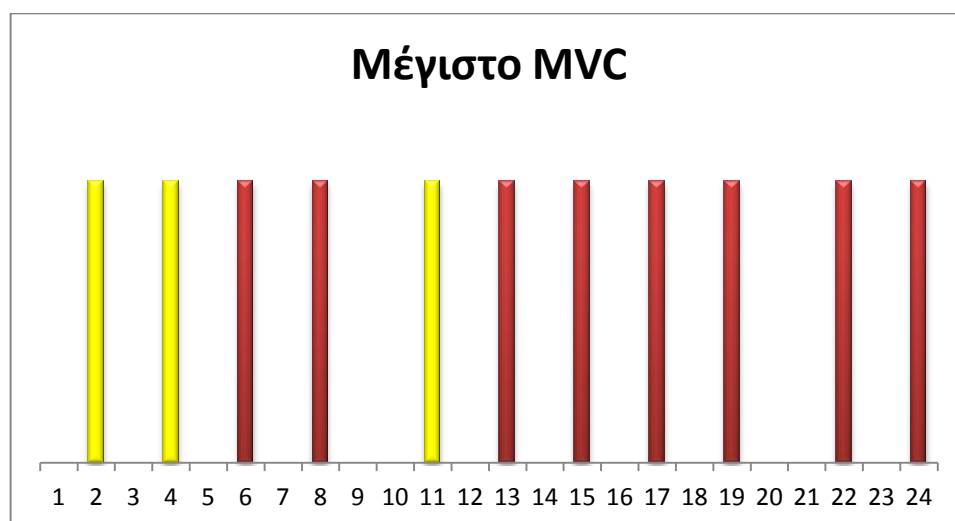
Αν ο DSO επέλεγε μόνος του να εντάξει τα ψυγεία τις ώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή και άρα το μεγαλύτερο μέσο μεταβλητό κόστος, θα τα έβαζε τις ώρες 10, 21 και 23. Οι τιμές του MVC και οι αντίστοιχες κινήσεις των δυο παικτών για τις 3 περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 13 και στις Εικόνες 29, 30 και 31. Οι κινήσεις των δυο παικτών που απεικονίζονται για το ελάχιστο MVC είναι μια επιλογή από τις 29 διαφορετικές που προέκυψαν για αυτή την τιμή. Να σημειωθεί ότι με κίτρινο αποτυπώνονται οι επιλογές του DSO και με κόκκινο της ESCO.

Ελάχιστο MVC (€/MWh)	Μέγιστο MVC (€/MWh)	MVC από λογική κίνηση DSO (€/MWh)
132,615	146,069	141,859

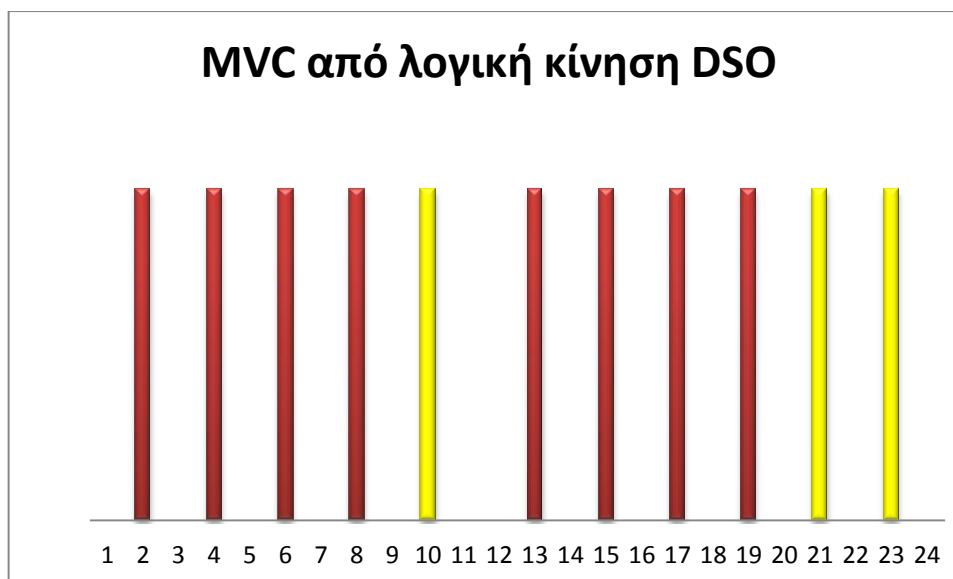
Πίνακας 13: Τιμές MVC για τις 3 περιπτώσεις που συγκρίθηκαν



Εικόνα 29: Κινήσεις DSO (κίτρινο) και ESCO (κόκκινο) που προέκυψαν από την προσομοίωση



Εικόνα 30: Κινήσεις DSO (κίτρινο) και ESCO (κόκκινο) για μεγιστοποίηση MVC



Εικόνα 31: Κινήσεις DSO (κίτρινο) και ESCO (κόκκινο) αν ο DSO επέλεγε τις 3 ώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας

Από τα παραπάνω γραφήματα προκύπτουν αρκετά συμπεράσματα. Καταρχάς, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 13 η τιμή του μέσου μεταβλητού κόστους που υπολογίστηκε από τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω είναι όντως η ελάχιστη και είναι σημαντικά μικρότερη τόσο από τη μέγιστη τιμή του μέσου μεταβλητού κόστους όσο και από την τιμή που θα προέκυπτε αν ο DSO επέλεγε να λειτουργήσει τα ψυγεία τις ώρες μέγιστης παραγωγής. Συγκριτικά με το μέγιστο MVC η διαφορά είναι στα 13,45 €/MWh, τιμή που είναι αρκετά σημαντική αφού για μια μέση τιμή ημερήσιας παραγωγής των 15MW το κέρδος είναι 201,8 €/h άρα σε ένα έτος το κέρδος για το σύνολο των καταναλωτών ανέρχεται στα 1.767.330 €. Ακόμα και συγκριτικά με την κίνηση που θα έκανε ο DSO με βάση τη λογική η διαφορά είναι στα 9,24 €, το οποίο δείχνει και τη σημασία που έχει η μελέτη όλων των παραγόντων για την εύρεση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος. Οι κινήσεις και των δυο παικτών είναι εξίσου σημαντικές στο παιχνίδι και αποδείχθηκε ότι η εφαρμογή της μεθόδου της προς τα πίσω επαγωγής (backwards induction), που περιγράφηκε και στο Κεφάλαιο 4, είναι πολύ σημαντική σε τέτοιου είδους παιχνίδια, αφού μπορεί να οδηγήσει με ακρίβεια στη βέλτιστη δυνατή λύση, η οποία μπορεί να είναι διαφορετική από την προφανή. Αξιοπρόσεκτο είναι το γεγονός ότι οι κινήσεις του DSO είναι εντελώς διαφορετικές και στις 3 περιπτώσεις που συγκρίθηκαν. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η λύση που προέκυψε από την προσομοίωση αφορούσε ένταξη των ψυγείων 12 φορές τη μέρα, ενώ οι άλλες δυο λύσεις αφορούσαν ένταξη των ψυγείων 11 φορές την ημέρα. Αυτό δε σημαίνει υποχρεωτικά ότι όσο περισσότερες ώρες εντάσσονται τα ψυγεία τόσο χαμηλότερο είναι το μέσο μεταβλητό κόστος, αφού, όπως αποδείχθηκε, η τιμή του εξαρτάται κατά πολύ από τις επιλογές και των δυο παικτών. Είναι, όμως, λογικό να προκύπτει σε κάποιες περιπτώσεις χαμηλότερο μέσο μεταβλητό κόστος αν εντάσσονται για περισσότερες ώρες τα ψυγεία, αφού η παραγωγή από τις μονάδες gas μειώνεται.

Κεφάλαιο 6: Προβλήματα μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης ψυγείων

Αποδείχθηκε, λοιπόν, ότι αν η χρήση των ψυγείων για την παροχή εφεδρείας γίνει πραγματικότητα μπορεί να εφαρμοστεί στις σύγχρονες αγορές ενέργειας και να συμβάλει, μάλιστα, στη μείωση του μέσου μεταβλητού κόστους του συστήματος.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Μετά την ανάλυση της μορφής του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και των πολιτικών με τις οποίες μπορεί να ελεγχθεί το φορτίο διαφόρων οικιακών συσκευών μοντελοποιήθηκε το ψυγείο και μελετήθηκε η ενεργειακή του κατανάλωση. Από την ανάλυση προέκυψε πως η μεταβολή του setpoint του ψυγείου μπορεί να μετατοπίσει το φορτίο του ή και να μειώσει την ενεργειακή του κατανάλωση σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, αποφέροντας κέρδος για τους διαχειριστές του. Ακολουθούν αναλυτικότερα τα συμπεράσματα που προέκυψαν για την κάθε επιμέρους περίπτωση που μελετήθηκε.

Στην πρώτη περίπτωση αναλύθηκε η μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του ψυγείου και η εξαρτησή της από την οριακή τιμή του συστήματος, για να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας και άρα και το κόστος του καταναλωτή. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για όλους τους μήνες ενός έτους απέδειξαν ότι το setpoint ακολουθεί τις μεταβλητές τιμές. Βρέθηκε, επίσης, ότι και η κατανάλωση της ενέργειας εξαρτάται από τις μεταβλητές τιμές, συνεπώς τις ώρες που η ΟΤΣ είναι υψηλή, η κατανάλωση του ψυγείου είναι χαμηλή και αντίστοιχα τις ώρες που η ΟΤΣ είναι χαμηλή, η ενεργειακή κατανάλωσή του είναι υψηλότερη. Η ενεργειακή κατανάλωση του ψυγείου, λοιπόν, μπορεί να διαμορφωθεί ανάλογα με τις τιμές της οριακής τιμής του συστήματος και, μετατοπίζοντας κυρίως το φορτίο του ψυγείου, μπορεί να μειωθεί το συνολικό κόστος για την ενέργεια που πληρώνει ο καταναλωτής. Συγκριτικά, αν το ψυγείο δε μετέβαλε το setpoint του ανάλογα με την ΟΤΣ, αλλά το διατηρούσε σταθερό και ίσο με 4,7 °C, βρέθηκε ότι η κατανάλωση της ενέργειας με setpoint εξαρτώμενο από την ΟΤΣ είναι χαμηλότερη και το κέρδος που προκύπτει για ένα νοικοκυριό είναι περίπου ίσο με 0,5€/έτος. Αυτή η τιμή μπορεί να φαίνεται μικρή, αλλά για νοικοκυριά με πολλά ακόμα φορτία, όπως είναι τα κλιματιστικά, θα αυξηθεί σημαντικά.

Στη δεύτερη περίπτωση μελετήθηκε η δυνατότητα των ψυγείων να καλύπτουν μικρές αποκλίσεις που μπορεί να προκύψουν στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής, ώστε να μεγιστοποιείται το κέρδος μιας ESCO που διαχειρίζεται αιολικά πάρκα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με μεταβολή του setpoint από 3°C έως 6°C τα ψυγεία μπορούν να μεταβάλλουν αντίστοιχα την κατανάλωση τους. Μελετήθηκε, ακόμα, η δυνατότητα των ψυγείων να παρέχουν εφεδρεία ισχύος 18-21MW, μεταβάλλοντας ξανά το setpoint τους με βάση την πρόβλεψη ανέμου. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν και πάλι ότι κάτι τέτοιο είναι δυνατό, συνεπώς οποιαδήποτε βύθιση, της τάξης των MW που μελετήθηκαν, μπορεί να «καλυφθεί» κόβοντας το φορτίο των ψυγείων για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το δεύτερο πρόβλημα είναι πολύ σημαντικά, αφού αποδείχθηκε ότι μέσω της εφαρμογής τέτοιου είδους ελέγχου στις οικιακές συσκευές μπορεί να αυξηθεί η αξιοπιστία των ΑΠΕ και να μειωθεί η αβεβαιότητα της παραγωγής τους, που οφείλεται στον παράγοντα της πηγής ενέργειάς τους.

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

Στο τρίτο και τελευταίο πρόβλημα μελετήθηκε ένα παιχνίδι ηγέτη-ακόλουθου ανάμεσα σε ένα DSO και μια ESCO. Αντικείμενο μελέτης ήταν η επίδραση της λειτουργίας των ψυγείων στο μέσο μεταβλητό κόστος, αν το φορτίο τους χρησιμοποιείται για κάποιες ώρες της ημέρας ως εφεδρεία. Ο τρόπος με τον οποίο οι δυο παίκτες επέλεγαν τις κινήσεις τους αποδείχθηκε πως είναι καθοριστικός για την εύρεση της βέλτιστης λύσης, δηλαδή για την επίτευξη του σκοπού του ισχυρότερου (DSO), ο οποίος ήταν η ελαχιστοποίηση του μέσου μεταβλητού κόστους, αν η ESCO από την άλλη πλευρά επιθυμεί να μεγιστοποιήσει το κέρδος της. Αποδείχθηκε, λοιπόν, ότι η χρήση των ψυγείων για παροχή εφεδρείας μπορεί να γίνει πραγματικότητα στις σύγχρονες αγορές ενέργειας προσφέροντας, πέρα από όλα τα υπόλοιπα οφέλη, και μείωση του μέσου μεταβλητού κόστους του συστήματος.

Με βάση όλα τα παραπάνω είναι φανερό πως η διαχείριση οικιακών συσκευών μπορεί να έχει θετικά αποτελέσματα στη βελτίωση της λειτουργίας του δικτύου και την παροχή επικουρικών υπηρεσιών. Οι καταστάσεις ανισορροπίας ζήτησης-παραγωγής μπορούν να εξαλειφθούν και μέσω πολιτικών διαχείρισης της ζήτησης μπορεί να επιτευχθεί πολύ σωστότερη λειτουργία του δικτύου και εξυπηρέτηση των φορτίων. Ακόμη, με τη διαχείριση του φορτίου των οικιακών συσκευών μπορεί να περιοριστεί η χρήση των αιχμιακών μονάδων, άρα να γίνει ακόμα πιο οικονομική η λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος. Η διείσδυση των ΑΠΕ, επίσης, θα αυξηθεί, αφού οι μεταβολές της παραγωγής τους θα μπορούν να απορροφηθούν από τη λειτουργία των συσκευών, οπότε η αξιοπιστία τους θα είναι υψηλή. Πολύ βασικό είναι και το γεγονός ότι το φορτίο κάποιων οικιακών συσκευών θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εφεδρεία. Με αυτόν τον τρόπο θα μειωθούν οι περιπτώσεις στις οποίες είναι απαραίτητη η αποκοπή κάποιων φορτίων, αλλά θα μειωθεί και το κόστος του συστήματος, αφού δε θα χρειάζεται οι μονάδες παραγωγής να τηρούν μεγάλη εφεδρεία.

Οι τεχνολογίες του smart grid έχουν αρχίσει να παρουσιάζουν μεγάλη ανάπτυξη και πολλές εταιρείες έχουν ήδη αρχίσει να προωθούν οικιακές συσκευές με ενσωματωμένους ελεγκτές, για τη διαχείριση της κατανάλωσης και της λειτουργίας τους από το χρήστη, όπου και αν αυτός βρίσκεται. Είναι προφανές ότι χρειάζεται να γίνουν αρκετά βήματα μέχρι αυτές οι τεχνολογίες να ενταχθούν πλήρως στην καθημερινότητα, αλλά και να υπάρξει η αντίστοιχη ανταπόκριση και συμμετοχή των καταναλωτών, ώστε όλα αυτά τα οφέλη να γίνουν πραγματικότητα.

Βιβλιογραφία

- [1] «More Microgrids,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.microgrids.eu/index.php>.
- [2] «Microgrids,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.microgrids.eu/micro2000/index.php>.
- [3] Georgia E. Asimakopoulou, Emmanouil M. Voumvoulakis, Aris L. Dimeas, Nikos D. Hatziaargyriou, «Impact of Large-Scale Integration of Intelligent Meters to the Operation of the Power System of Crete,» Χερσόνησος, Κρήτη, 2011.
- [4] «Deliverable D2.5 Final Architecture for SmartHouse/SmartGrid,» 2011.
- [5] «Internet of Energy- ICT for Energy Markets of the Future,» Federation of German Industries, BDI initiative Internet of Energy, E-Energy: E-Energy Begleitforschung, Βερολίνο, 2010.
- [6] L. de Vries, «Securing the public interest in electricity generation markets, The myths of the invisible hand and the copper plate,» 2004.
- [7] S. Braithwait, «Behavior Modification,» *IEEE power & energy magazine*, pp. 37-45, Μάιος/ Ιούνιος 2010.
- [8] Ahmad Faruqui, Robert Earle, «Demand Response and Advanced Metering,» *Regulation*, 2006.
- [9] Prof. Dr. Rainer Stamminger, Dr. Gereon Broil, Christiane Pakula, Heiko Jungbecker, Maria Braun, Ina Rüdenauer, Christoph Wendker, «D2.3 Synergy Potential of Smart Appliances,» 2008.
- [10] C. Timpe, «Smart Domestic Appliances Supporting the System Integration of Renewable Energy,» Freiburg, 2009.
- [11] «Samsung: Υπερσύγχρονο ψυγείο και πλυντήριο με υποστήριξη Wi-Fi [CES 2012],» 15 Ιανουαρίου 2012. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.techgear.gr/samsung-wifi-enabled-refridgator-and-washing-machine-37345/>.
- [12] V. Silva, V. Stanojevic, A. Shafiu, M. Watts, with contributions from D. Pudjianto, G. Strbac, J. Kondo, J. Zhong, «Smart Domestic Appliances in Stressed Electricity Networks; a report from the Smart-A project,» 2009.
- [13] T. Joseph Lui, Warwick Stirling, Henry O. Marcy, «Get Smart,» *IEEE power & energy magazine*, pp. 66-78, Μάιος/ Ιούνιος 2010.
- [14] Prof. Nico Beute, Dr Ian E Lane, «A model of the domestic hot water load,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 1850-1855, Νοέμβριος 1996.
- [15] M. Orphelin, J. Adnot, «Improvement of Methods for Reconstructing Water Heating Aggregated Load Curves and Evaluating Demand-Side Control Benefits».
- [16] R. Gibbons, *Game theory for applied economists*, 1992.
- [17] Michael Stadler, Wolfram Krause, Michael Sonnenschein, Ute Vogel, «The Adaptive Fridge – Comparing different control schemes for enhancing load shifting of electricity demand,» 2007.
- [18] J. Geppert, «Modelling of domestic refrigerators' energy consumption under real life conditions in Europe,» 2011.

- [19] James Y.Kao, George E.Kelly, «Factors Affecting the Energy Consumption of Two Refrigerator-Freezers,» 1996.
- [20] «ΑΔΜΗΕ- Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.admie.gr/leitoyrgia-dedomena/leitoyrgia-agoras-ilektrikis-energeias/anafores-dimosieyseis-agoras/>.
- [21] «Openmeteo,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://openmeteo.org/db/timeseries/d/232/>.
- [22] G. Strong, «The Minimax Algorithm,» 2011.

Παράρτημα

Δεδομένα πρώτου και τρίτου προβλήματος

Στους παρακάτω πίνακες ακολουθούν τα δεδομένα του πρώτου και του τρίτου προβλήματος που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 14 δίνεται ο σταθμισμένος μέσος όρος της οριακής τιμής του συστήματος ανά μήνα και ανά ώρα για το 2011 και στον Πίνακα 15 δίνεται ο σταθμισμένος μέσος όρος της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος ανά μήνα και ανά ώρα για το 2011. Οι δυο αυτοί Πίνακες χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα στο πρώτο πρόβλημα με τον καταναλωτή. Στον Πίνακα 16 δίνεται η παραγωγή της μονάδας gas για μια μέρα, που χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο στο παιχνίδι του τρίτου προβλήματος.

Οριακή τιμή συστήματος (ΟΤΣ) (€/MWh)																								
Σταθμισμένος μέσος όρος ανά μήνα και ανά ώρα (€/MWh)																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Ιαν	50,36	41,25	40,62	40,49	38,71	39,91	46,23	56,37	63,39	69,37	72,17	71,87	73,38	71,41	64,30	65,35	69,54	71,14	75,07	75,88	73,65	69,70	65,23	59,83
Φεβ	68,01	49,94	51,82	49,61	44,27	44,75	52,56	58,40	67,71	80,51	84,66	80,42	83,03	80,31	70,15	66,60	69,97	70,92	84,11	89,37	92,61	78,19	66,96	54,78
Μαρ	55,88	50,28	51,19	45,98	46,46	49,29	55,21	54,18	62,72	69,30	68,71	68,32	70,37	65,56	61,42	61,65	63,26	63,25	68,26	76,32	75,32	70,03	63,76	56,08
Απρ	60,09	47,47	42,99	40,20	38,59	39,83	41,46	43,78	54,86	64,17	68,84	69,60	69,36	64,59	61,44	54,09	54,79	55,07	54,64	64,62	77,63	78,77	67,56	56,24
Μαι	74,37	55,96	46,41	41,95	42,97	44,39	47,59	51,83	65,80	72,37	72,00	71,71	73,39	72,21	64,41	60,15	57,02	58,49	63,13	68,05	74,70	80,89	73,96	69,52
Ιουν	92,19	77,37	68,52	68,59	66,98	68,79	67,80	77,78	88,41	92,06	94,16	95,76	94,56	92,60	91,49	88,81	88,69	88,87	89,86	92,02	92,58	93,64	92,88	88,68
Ιουλ	85,61	72,01	67,02	61,56	50,99	49,59	47,73	54,84	65,03	72,67	75,36	77,47	77,23	76,42	77,53	76,13	76,68	77,59	79,41	78,08	75,54	79,27	79,84	76,87
Αυγ	71,95	53,74	44,21	40,50	39,65	38,62	38,48	39,85	60,19	68,55	69,55	70,82	72,81	70,88	69,73	72,13	74,40	75,09	77,28	76,84	77,10	75,74	76,88	71,96
Σεπτ	81,07	68,03	55,23	48,72	44,77	44,75	45,12	60,41	73,38	86,42	87,80	91,72	91,94	91,94	87,91	82,21	80,25	86,74	87,87	93,62	96,89	91,96	81,88	78,63
Οκτ	71,42	41,01	37,38	36,65	36,11	36,51	46,92	71,82	81,47	95,12	99,28	96,96	96,97	92,85	84,57	70,11	67,33	71,02	90,95	103,21	102,36	100,24	87,59	73,86
Νοε	70,27	60,61	61,93	60,04	51,73	50,80	70,37	86,85	90,07	97,13	100,02	96,97	97,33	93,74	91,53	99,25	103,01	112,59	116,04	114,17	114,37	106,37	96,50	85,19
Δεκ	89,48	80,45	75,21	67,33	57,44	60,50	80,91	98,70	103,94	110,63	108,22	105,20	105,30	103,75	101,20	104,71	114,96	118,99	118,16	118,36	115,23	115,09	106,60	94,06

Πίνακας 14: Σταθμισμένος μέσος όρος της ΟΤΣ ανά μήνα και ανά ώρα για το 2011 [20]

Θερμοκρασία (°C)																								
Σταθμισμένος μέσος όρος ανά μήνα και ανά ώρα																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Ιαν	9,0	8,9	8,6	8,7	8,6	8,4	8,3	8,2	8,2	8,5	10,7	11,5	12,0	12,2	12,4	12,2	11,8	11,2	9,8	9,3	9,1	9,1	9,2	9,0
Φεβ	8,8	8,6	8,5	8,4	8,2	8,2	8,2	8,3	8,5	9,3	10,7	11,4	11,9	12,3	12,5	12,6	12,3	11,7	10,6	9,9	9,7	9,3	9,2	9,1
Μαρ	9,0	8,8	8,7	9,1	8,8	8,6	8,4	8,8	9,4	10,8	11,6	12,2	12,7	13,1	13,3	13,2	13,0	12,7	11,9	10,6	10,0	9,7	9,6	9,2
Απρ	12,1	12,0	11,8	11,6	11,5	11,4	11,3	11,9	13,2	14,0	14,8	15,6	16,0	16,4	16,7	16,9	16,6	16,2	15,4	14,2	13,3	13,0	12,7	12,5
Μαι	16,2	16,2	16,2	16,0	16,1	15,9	16,1	17,6	18,9	19,9	21,0	21,7	22,1	22,3	22,3	22,4	22,2	21,9	21,5	20,2	18,5	17,5	17,1	16,7
Ιουν	21,5	21,1	20,8	20,5	20,3	20,3	20,9	23,0	24,4	25,4	26,5	27,2	27,6	27,8	27,8	27,7	27,8	27,4	26,9	25,8	24,2	22,8	22,2	21,8
Ιουλ	25,7	25,5	24,9	24,7	24,6	24,3	24,4	26,6	28,2	29,4	30,6	31,4	32,1	32,6	33,0	33,2	32,9	32,4	31,7	30,5	28,6	27,2	26,5	26,1
Αυγ	25,1	24,9	24,8	24,7	24,6	24,5	24,4	25,2	26,6	28,0	29,0	30,0	30,5	31,3	31,5	31,3	31,3	30,7	29,6	28,4	27,0	26,1	25,8	25,4
Σεπτ	23,6	23,3	23,1	22,9	22,8	22,7	22,8	22,9	24,9	26,3	27,3	28,4	29,2	29,7	29,7	29,8	29,5	28,8	27,5	25,7	24,6	24,1	23,8	23,6
Οκτ	14,9	14,7	14,7	14,7	14,5	14,3	14,3	14,2	15,2	16,9	17,7	18,6	19,1	19,5	19,7	19,6	18,9	18,3	16,8	15,8	15,4	15,1	14,9	14,7
Νοε	9,7	9,7	9,6	9,4	9,4	9,4	9,3	9,3	9,8	11,0	12,2	12,9	13,6	14,0	14,2	14,2	13,6	12,5	11,4	10,9	10,5	10,2	10,0	9,9
Δεκ	10,1	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,8	9,6	9,6	10,3	12,5	13,2	13,8	14,1	14,3	14,3	13,7	12,7	11,3	10,7	10,7	10,6	10,5	10,4

Πίνακας 15: Σταθμισμένος μέσος όρος της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ανά μήνα και ανά ώρα για το 2011 [21]

ώρα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ενέργεια (MW)	23,8	18,3	13,2	0	0	0	0	11,1	23,2	24,8	24,5	24,2	24	23,8	20,4	23	23,3	23,3	23,2	23,3	27,6	25,8	24,8	12,6

Πίνακας 16: Παραγωγή ενέργειας από μονάδα gas για μια ημέρα

