



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

## Προγραμματισμός και προσομοίωση ενεργειακού ελεγκτή για την ένταξη καταναλωτών σε προγράμματα διαχείρισης ζήτησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΑΡΡΗΣ Μ. ΘΕΟΔΩΡΟΣ

Επιβλέπων : ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2015





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

## Προγραμματισμός και προσομοίωση ενεργειακού ελεγκτή για την ένταξη καταναλωτών σε προγράμματα διαχείρισης ζήτησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΑΡΡΗΣ Μ. ΘΕΟΔΩΡΟΣ

Επιβλέπων : ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2006.

.....

Ν.Χατζηαργυρίου

.....

Σ.Παπαθανασίου

.....

Π.Γεωργιάκης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2015

.....

**ΣΑΡΡΗΣ Μ. ΘΕΟΔΩΡΟΣ**

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

Copyright © ΣΑΡΡΗΣ Μ. ΘΕΟΔΩΡΟΣ 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η σχεδίαση ενός έξυπνου ενεργειακού ελεγκτή ο οποίος θα ελέγχει και θα συντονίζει την ενεργειακή κατανάλωση ενός κτιρίου. Αναβαθμίζοντας την ευελιξία των φορτίων και του προφίλ ζήτησης του καταναλωτή, ο ελεγκτής αυτός θα επιτρέψει την εφαρμογή προγραμμάτων «διαχείρισης ζήτησης» σε ένα «έξυπνο δίκτυο».

Στο πρώτο μέρος αυτής της διπλωματικής παρουσιάζεται μία εισαγωγή στο «έξυπνο δίκτυο» και στη διαχείριση ζήτησης. Ακολούθως, γίνεται μία μελέτη της οικιακής εγκατάστασης υπό το πρίσμα της διαχείρισης ζήτησης, εξετάζοντας τα φορτία και γενικά το προφίλ κατανάλωσης. Ακόμη, εισάγεται η έννοια του γραμμικού προγραμματισμού και προτείνεται η βελτιστοποίηση σαν εργαλείο για την επίλυση των προβλημάτων της διαχείρισης ζήτησης. Επιπροσθέτως, γίνεται μία πρωτόλεια προσπάθεια να περιγραφεί το μοντέλο ενός «έξυπνου δικτύου» και οι απαραίτητες προϋποθέσεις για την υλοποίηση προγραμμάτων διαχείρισης ζήτησης. Στο τρίτο κεφάλαιο ο ελεγκτής συνδέεται με τον προσομοιωτή RTDS, προκειμένου να γίνουν κάποιες προσομοιώσεις και να δοκιμαστούν οι δυνατότητες ενός ελεγκτή ως «ενορχηστρωτή» της ενεργειακής κατανάλωσης του «έξυπνου σπιτιού». Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μία εφαρμογή, στην οποία ο ελεγκτής ελέγχει τις περιβαλλοντικές συνθήκες ώστε να χειριστεί ένα φορτίο, για να καταδειχτεί και αυτή η δυνατότητα ενός ελεγκτή.

## **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

Ελεγκτής Έξυπνου Σπιτιού, διαχείρισης ζήτησης, απόκριση ζήτησης, έξυπνο δίκτυο, μικροδίκτυο, βέλτιστος προγραμματισμός φορτίων, οικιακά φορτία, γραμμικός προγραμματισμός, βελτιστοποίηση, προσομοιωτής πραγματικού χρόνου

## **ABSTRACT**

The objective of this thesis is the design of a smart energy controller who will control and coordinate the energy consumption of a building. By upgrading the flexibility and the load profile of the consumer, the controller will enable the implementation of “demand response” programs in a “smart grid” or in an energy grid.

In the first part of this thesis an introduction to smart grids and demand response is presented. Afterwards, we study the residential electrical installation with respect to the demand response needs, by examining the domestic loads and the residential consuming profile. In addition, linear programming is introduced and optimization is suggested as a tool for solving demand response problems. Furthermore, an early attempt is made to describe the architecture of the smart grid and the requirements for implementing demand response programs. In the third chapter, the controller is connected to the RTS simulator, in order to simulate and test the capabilities of the controller in scheduling the energy consumption of a smart home. In the fourth chapter an application is presented, in which the controller monitors the environmental parameters to control a load, in order to additionally examine this capability of a controller.

## **KEYWORDS**

Smart home controller, demand response, demand side management, smart grid, microgrid, linear programming, optimal load scheduling, domestic loads, RTDS simulator, load controlling using relay

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Η διαχείριση ενεργειακής ζήτησης στα πλαίσια του «smart grid» .....	12
1.1. Εισαγωγή.....	12
1.2. Η διαχείριση ζήτησης.....	12
1.3. Η απόκριση ζήτησης .....	14
1.4. Απαιτήσεις ενός σύγχρονου Σ.Η.Ε.-Μοντέλο ενός «έξυπνου δικτύου»(smart grid) .....	16
1.5. Προγράμματα διαχείρισης ζήτησης στην Ευρώπη.....	22
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : Η αρχιτεκτονική ενός «έξυπνου δικτύου» .....	24
2.1. Εισαγωγή.....	24
2.2. Το προφίλ της ζήτησης ενός «έξυπνου σπιτιού» .....	26
2.3. Βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενός «έξυπνου σπιτιού».....	35
2.3.1. Το μαθηματικό πρόβλημα της βελτιστοποίησης .....	35
2.3.2. Βελτιστοποίηση της οικιακής κατανάλωσης-εφαρμογές.....	39
2.4. Ο κεντρικός ελεγκτής του «έξυπνου σπιτιού» .....	48
2.5. Ο ρόλος του aggregator στο «έξυπνο δίκτυο» .....	51
2.5.1. Εισαγωγή.....	51
2.5.2. Demand bidding-Εφαρμογή βελτιστοποίησης για τον aggregator .....	53
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : Προσομοίωση λειτουργίας κεντρικού ενεργειακού ελεγκτή.....	57
3.1. Εισαγωγή.....	57
3.2. Κεντρικός ενεργειακός ελεγκτής .....	57
3.3. Ψηφιακός εξομοιωτής πραγματικού χρόνου .....	58
3.4. Επικοινωνία μεταξύ RTDS και μικροεπεξεργαστή.....	59
3.5. Οι προσομοιώσεις ανοικτού βρόγχου (open loop) .....	61
3.5.1. Εισαγωγή.....	61
3.5.2. Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση.....	66
3.5.3. Σενάριο βελτιστοποίησης 1: Ελαχιστοποίηση του κόστους.....	71
3.5.3. Σενάριο βελτιστοποίησης 2: Μεγιστοποίηση της αυτοκατανάλωσης .....	74
3.6. Οι προσομοιώσεις κλειστού βρόγχου (closed loop) .....	78
3.6.1. Εισαγωγή.....	78
3.6.2. Το σενάριο βάσης .....	79
3.6.3. Σενάριο επαναπρογραμματισμού 1: Αλλαγή της ώρας φόρτισης του αυτοκινήτου .....	81
3.6.4. Σενάριο επαναπρογραμματισμού 2: Έκτακτα όρια ισχύος .....	82

Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> : Κύκλωμα ελέγχου ρελέ με αισθητήρες με τη χρήση του ελεγκτή .....	83
4.1. Εισαγωγή.....	83
4.2. Κύκλωμα αισθητήρων .....	84
4.3. Κύκλωμα ελέγχου ρελέ.....	86
4.4. Μικροελεγκτής Arduino XinoRF.....	88
4.5. Ελεγκτής Raspberry Pi 2.....	92
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προοπτικές συνέχισης.....	93
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	96
Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ .....	96
Βιβλιογραφία .....	103



Εικόνα 1:Εξομάλυνση της ζήτησης [1].....	13
Εικόνα 2:Προγράμματα απόκρισης ζήτησης.....	14
Εικόνα 3:Παραδοσιακό και «έξυπνο» ΣΗΕ [2].....	16
Εικόνα 4: Η απεικόνιση ενός «έξυπνου δικτύου» [11].....	24
Εικόνα 5:Ο ενεργειακός ελεγκτής ως διαχειριστής του «έξυπνου σπιτιού» [12].....	25
Εικόνα 6: Ο ρόλος του aggregator [13].....	25
Εικόνα 7: Ένα τυπικό προφίλ της ενεργειακής ζήτησης ενός σπιτιού [14].....	26
Εικόνα 8:Ο ρόλος του κεντρικού ελεγκτή μέσα στο <<έξυπνο δίκτυο>>.....	48
Εικόνα 9: Σύνδεση arduino και Raspberry Pi.....	59
Εικόνα 10: Φωτογραφία του RTDS.....	60
Εικόνα 11: Η διάταξη στις προσομοιώσεις ανοικτού βρόγχου.....	61
Εικόνα 12: Κύκλωμα της οικιακής εγκατάστασης.....	61
Εικόνα 13: Κύκλωμα οικιακής εγκατάστασης.....	65
Εικόνα 14: Η διάταξη στις προσομοιώσεις κλειστού βρόγχου.....	79
Εικόνα 15:Σύνδεση DHT11 και Arduino.....	85
Εικόνα 16:Σύνδεση LDR και Arduino.....	86
Γράφημα 1: Ημερήσια καμπύλη κατανάλωσης της ηλεκτρικής κουζίνας.....	28
Γράφημα 2:Ημερήσια καμπύλη κατανάλωσης του φούρνου μικροκυμάτων.....	29
Γράφημα 3:Ημερήσια καμπύλη ζήτησης οπτικοακουστικών συσκευών.....	29
Γράφημα 4:Ημερήσια καμπύλη ζήτησης ηλεκτρονικού υπολογιστή.....	30
Γράφημα 5:Ημερήσια καμπύλη ζήτησης φωτισμού.....	30
Γράφημα 6:Ημερήσια καμπύλη ζήτησης μικρών ηλεκτρονικών συσκευών.....	31
Γράφημα 7:Ημερήσια καμπύλη ζήτησης air condition.....	31
Γράφημα 8:Ημερήσια καμπύλη ζήτησης ψυγείου.....	32
Γράφημα 9:Προφίλ λειτουργίας πλυντηρίου ρούχων.....	32
Γράφημα 10:Προφίλ λειτουργίας στεγνωτήριου ρούχων.....	33
Γράφημα 11:Προφίλ λειτουργίας πλυντηρίου πιάτων.....	33
Γράφημα 12:Προφίλ λειτουργίας θερμοσίφωνου.....	34
Γράφημα 13:Προφίλ φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου.....	34
Γράφημα 14:Ημερήσια καμπύλη ζήτησης σταθερών φορτίων.....	39
Γράφημα 15:Ημερήσια καμπύλης χρέωσης-TOU.....	40
Γράφημα 16:Τελική καμπύλη ημερήσιας ζήτησης χωρίς βελτιστοποίηση.....	41
Γράφημα 17:Καμπύλη ημερήσιου κόστους κατανάλωσης χωρίς βελτιστοποίηση(TOU).....	41
Γράφημα 18:Τελική καμπύλη ημερήσιας ζήτησης με βελτιστοποίηση(TOU).....	42
Γράφημα 19:Καμπύλη ημερήσιου κόστους με βελτιστοποίηση(TOU).....	42
Γράφημα 20:Ημερήσια καμπύλη χρέωσης(RTP).....	43
Γράφημα 21:Τελική καμπύλη ημερήσιας ζήτησης χωρίς βελτιστοποίηση.....	44
Γράφημα 22:Καμπύλη ημερήσιου κόστους κατανάλωσης χωρίς βελτιστοποίηση(RTP).....	44

Γράφημα 23:Τελική καμπύλη ημερήσιας ζήτησης με βελτιστοποίηση(RTP) .....	45
Γράφημα 24:Καμπύλη ημερήσιου κόστους κατανάλωσης με βελτιστοποίηση(RTP).....	45
Γράφημα 25:Η ημερήσια φωτοβολταϊκή παραγωγή .....	46
Γράφημα 26:Αξιοποίηση της τοπικής παραγωγής χωρίς βελτιστοποίηση .....	46
Γράφημα 27: Αξιοποίηση της τοπικής παραγωγής μετά τη βελτιστοποίηση .....	47
Γράφημα 28:Τελική καμπύλη ημερήσιας ζήτησης με βελτιστοποίηση(RTP) .....	53
Γράφημα 29: Η ισχύς των φορτίων προς περικοπή .....	54
Γράφημα 30: Το κόστος των φορτίων προς περικοπή .....	55
Γράφημα 31: Η ισχύς των φορτίων προς περικοπή .....	55
Γράφημα 32: Το κόστος των φορτίων προς περικοπή .....	56
Γράφημα 33:Καμπύλη ημερήσιας ζήτησης (RTP) μετά από βελτιστοποίηση για συμμετοχή σε πρόγραμμα demand bidding .....	56
Γράφημα 34: Τα σταθερά φορτία των προσομοιώσεων .....	62
Γράφημα 35: Καμπύλη πλυντηρίου ρούχων .....	63
Γράφημα 36: Καμπύλη πλυντηρίου πιάτων .....	63
Γράφημα 37: Καμπύλη θερμοσίφωνα.....	64
Γράφημα 38: Καμπύλη ηλεκτρικού αυτοκινήτου.....	64
Γράφημα 39: Η φωτοβολταϊκή παραγωγή των προσομοιώσεων .....	65
Γράφημα 40: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Σταθερά φορτία .....	66
Γράφημα 41: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Πλυντήριο πιάτων.....	67
Γράφημα 42: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Ηλεκτρικό αυτοκίνητο .....	67
Γράφημα 43: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Θερμοσίφωνα .....	68
Γράφημα 44: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Πλυντήριο ρούχων.....	68
Γράφημα 45: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Προφίλ κατανάλωσης.....	69
Γράφημα 46: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Φωτοβολταϊκή παραγωγή.....	69
Γράφημα 47: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Ισοζύγιο ισχύος.....	70
Γράφημα 48: Σενάριο 1 - RTP τιμολόγηση .....	71
Γράφημα 49: Σενάριο 1 - Πλυντήριο ρούχων .....	72
Γράφημα 50: Σενάριο 1 - Πλυντήριο πιάτων.....	72
Γράφημα 51: Σενάριο 1 – Θερμοσίφωνα.....	73
Γράφημα 52: Σενάριο 1 - Ηλεκτρικό αυτοκίνητο.....	73
Γράφημα 53: Σενάριο 1 - Προφίλ ζήτησης .....	74
Γράφημα 54: Σενάριο 2 - Πλυντήριο ρούχων.....	75
Γράφημα 55: Σενάριο 2 - Πλυντήριο πιάτων.....	75
Γράφημα 56: Σενάριο 2 - Θερμοσίφωνα .....	76
Γράφημα 57: Σενάριο 2 - Ηλεκτρικό αυτοκίνητο.....	76
Γράφημα 58: Σενάριο 2 - Προφίλ ζήτησης .....	77
Γράφημα 59: Σενάριο 2 - Αντιπαραβολή παραγωγής και κατανάλωσης πριν και μετά τη βελτιστοποίηση .....	77
Γράφημα 60: Η μέθοδος τιμολόγησης στις προσομοιώσεις κλειστού βρόγχου.....	79
Γράφημα 61: Τα σταθερά φορτία στις προσομοιώσεις κλειστού βρόγχου .....	80
Γράφημα 62: Το προφίλ ζήτησης στο σενάριο βάσης - Προσομοίωση κλειστού βρόγχου .....	80

Γράφημα 63: Το προφίλ της ζήτησης στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης κλειστού βρόγχου .....	81
Γράφημα 64: Το προφίλ ζήτησης στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης κλειστού βρόγχου.....	82
Γράφημα 65: Υγρασία περιβάλλοντος.....	90
Γράφημα 66: Θερμοκρασία περιβάλλοντος.....	90
Γράφημα 67: Επίπεδο φωτισμού περιβάλλοντος .....	91
Γράφημα 68: Κατάσταση ρελέ.....	91
Πίνακας 1:Ορισμοί των συμβόλων του μαθηματικού προβλήματος .....	37
Πίνακας 2:Ημερήσιος σχεδιασμός μεταβλητών φορτίων χωρίς/με βελτιστοποίηση .....	39
Πίνακας 3: Προτιμήσεις καταναλωτή.....	66
Πίνακας 4: Το χρονικό παράθυρο των ελεγχόμενων φορτίων - Σενάριο βελτιστοποίησης 1 .....	71
Πίνακας 5: Το χρονικό παράθυρο των ελεγχόμενων φορτίων - Σενάριο βάσης προσομοιώσεων κλειστού βρόγχου .....	80

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> :Η διαχείριση ενεργειακής ζήτησης στα πλαίσια του «smart grid»

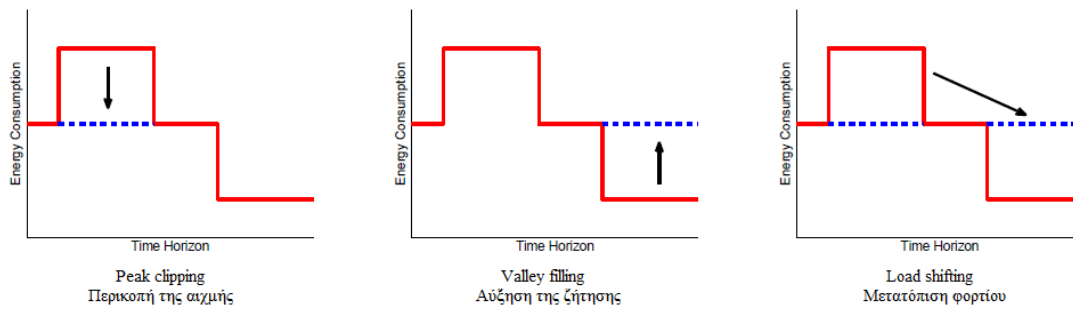
### 1.1. Εισαγωγή

Το ελληνικό ΣΗΕ, όπως και τα ΣΗΕ των περισσότερων ανεπτυγμένων κρατών, σχεδιάστηκε και αξιοποιήθηκε σε μία εποχή όπου κυριαρχούσε η εξής προσέγγιση: Πρέπει να υπάρχει η υποδομή για την πλήρη κάλυψη της ζήτησης όπως και αν πρόεκυπτε αυτή. Η ζητούμενη εξισορρόπηση μεταξύ παραγωγής και ζήτησης οδήγησε λοιπόν σε επενδύσεις για εγκαταστάσεις παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι επενδύσεις αυτές φυσικά είναι δαπανηρές και χρειάζονται χρόνια για να γίνει η απόσβεση.

Δεδομένου ότι η ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται διαχρονικά,(εξαίρεση αυτού του κανόνα αποτελεί η οικονομική ύφεση που βιώνει η Ελλάδα τον καιρό που γράφεται αυτή η διπλωματική) ο σχεδιασμός του ηλεκτρικού δικτύου οδηγεί στην ανάγκη να αυξάνεται η διαθέσιμη παραγωγή για να καλύπτει αυτήν την ζήτηση. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δίνουν τη δυνατότητα να επεκταθεί η διαθέσιμη παραγωγή, και μάλιστα σε οικολογική κατεύθυνση, αλλά όπως γνωρίζουμε δεν είναι πλήρως ελεγχόμενες καθώς εξαρτώνται από τους νόμους της φύσης. Για παράδειγμα μπορούμε να εκμεταλλευόμαστε την ηλιακή ενέργεια μόνο τις ώρες της ημέρας που είναι διαθέσιμη, και με ακόμα πιο απρόβλεπτο τρόπο κινείται η αιολική ενέργεια. Δεδομένης και της αδυναμίας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με οικονομικό τρόπο, προκρίνεται η ανάγκη να γίνουν βήματα στη πλευρά της κατανάλωσης προκειμένου να συνεχίσει να εξισορροπείται η παραγωγή με τη ζήτηση με χαμηλότερο κόστος και με πιο ευέλικτο τρόπο.

### 1.2. Η διαχείριση ζήτησης

Την διαχείριση ζήτησης (**Demand Side Management**) συνιστούν όλες εκείνες οι ενέργειες που επιφέρουν αλλαγές στο μοτίβο της κατανάλωσης με απώτερο στόχο το όφελος των καταναλωτών και γενικά του κοινωνικού συνόλου. Για παράδειγμα, ένα πρόγραμμα διαχείρισης ζήτησης θα μπορούσε να ενθαρρύνει τους καταναλωτές να εξομαλύνουν την καμπύλη ζήτησης τους. Με αυτό τον τρόπο θα αποφεύγονται οι υψηλές αιχμές φορτίου, που οδηγούν σε υψηλό κόστος παραγωγής για μία-δύο ώρες την ημέρα, αλλά και η εμφάνιση «κοιλιάδων» στην καμπύλη, που δημιουργούν προβλήματα στην αξιοπιστία του συστήματος. Συνοπτικά η εξομάλυνση της καμπύλης ζήτησης παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 1:Εξομάλυνση της ζήτησης [1]

Τα οφέλη από την εφαρμογή προγραμμάτων διαχείρισης ζήτησης, δηλαδή από την αλλαγή στο μοτίβο της κατανάλωσης είναι τα εξής:

- Χαμηλότερο κόστος για την ικανοποίηση της ζήτησης. Τα προγράμματα διαχείρισης ζήτησης μπορούν να δράσουν επικουρικά στις αιχμές του ηλεκτρικού δικτύου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όχι μόνο να μην εντάσσονται στην παραγωγή ακριβότερες μονάδες για να καλυφτεί η αυξημένη ζήτηση, αλλά και να αποφεύγονται υπερφορτίσεις του εξοπλισμού του ηλεκτρικού δικτύου (π.χ. μετασχηματιστές, γραμμές κτλ). Με αυτό τον τρόπο μπορεί ακόμα και να αποφευχθεί μεσοπρόθεσμα μία κοστοβόρα επένδυση που μπορεί να χρειαστεί για την κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών των καταναλωτών.
- Τα οφέλη για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να μεταφραστούν σε οικονομικά κίνητρα για τη συμμετοχή των καταναλωτών στα προγράμματα διαχείρισης ζήτησης.
- Αυτή η επικουρική λειτουργία της διαχείρισης ζήτησης, της «παραγωγής» μέσω της περικοπής φορτίου, μπορεί επίσης να έχει οφέλη για την αξιοπιστία του δικτύου η οποία δοκιμάζεται σε περιπτώσεις αυξημένης (έως και οριακής) φόρτισης.
- Συνολικά η λελογισμένη και οργανωμένη χρήση των ενεργειακών πόρων φροντίζει για την ρύπανση του περιβάλλοντος και την καλύτερη αξιοποίηση των συμβατικών μορφών ενέργειας. Ακόμη, η αλλαγή του μοτίβου της ηλεκτρικής κατανάλωσης μπορεί να ωφελήσει την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Όπως γνωρίζουμε η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας αυτή τη στιγμή δεν αποτελεί λύση στο πρόβλημα της μη ελεγχόμενης παραγωγής από τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (ηλιακή, αιολική κτλ) λόγω της παρούσας τεχνολογίας, και άρα η αλλαγή στο μοτίβο της κατανάλωσης μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο μοιάζει να αποτελεί την καλύτερη λύση ώστε να συγχρονιστούμε χρονικά με την παραγωγή.

### 1.3. Η απόκριση ζήτησης

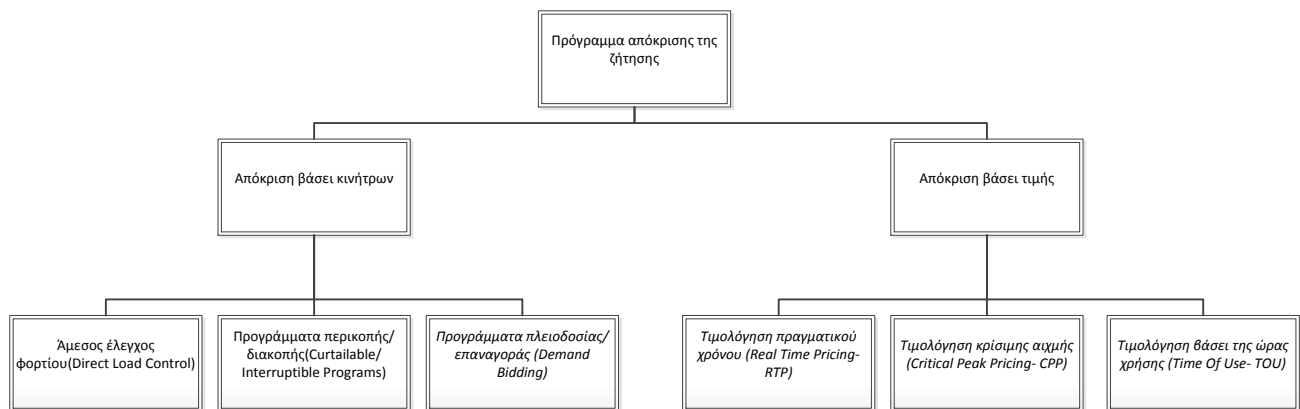
Μία βασική έννοια της διαχείρισης ζήτησης είναι η απόκριση ζήτησης (**Demand Response**). Ως απόκριση ζήτησης ορίζεται η αλλαγή στο μοτίβο κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας από πλευράς καταναλωτών. Η αλλαγή αυτή αποσκοπεί στο να αποφευχθούν οριακές καταστάσεις για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και να γίνεται συνολικά πιο οικονομική και αποδοτική αξιοποίηση των υποδομών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα κλασικό κίνητρο προκειμένου να αλλάξουν οι καταναλωτές τις συνήθειες του είναι να παρέχονται τα αντίστοιχα οικονομικά οφέλη.

Υπάρχουν διαφορετικά προγράμματα που μπορούν να εφαρμοστούν για την επιθυμητή απόκριση ζήτησης. Γενικά θα μπορούσαμε να τα χωρίσουμε σε δύο κατηγορίες:

*Απόκριση βάσει κινήτρων:* Τα προγράμματα αυτά δίνουν κίνητρα στους καταναλωτές με τη μορφή πίστωσης στο λογαριασμό τους ή με άμεση πληρωμή έτσι ώστε να περικόψουν φορτίο κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος.

*Απόκριση βάσει τιμής:* Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας μέσα σε ένα 24ωρο μεταβάλλεται σύμφωνα με το κόστος παραγωγής. Με τις διαφορετικές χρεώσεις οι καταναλωτές μπορούν να εξοικονομήσουν χρήματα μεταβάλλοντας την καμπύλη κατανάλωσης τους ώστε να καταναλώνουν λιγότερο όταν η τιμή είναι υψηλή και περισσότερο όταν η τιμή είναι χαμηλή.

Ακολουθεί ένα διάγραμμα με τις δύο βασικές κατηγορίες προγραμμάτων καθώς και με τα πιο βασικά προγράμματα σε κάθε κατηγορία και η συνοπτική περιγραφή τους:



Εικόνα 2: Προγράμματα απόκρισης ζήτησης

#### Απόκριση βάσει κινήτρων:

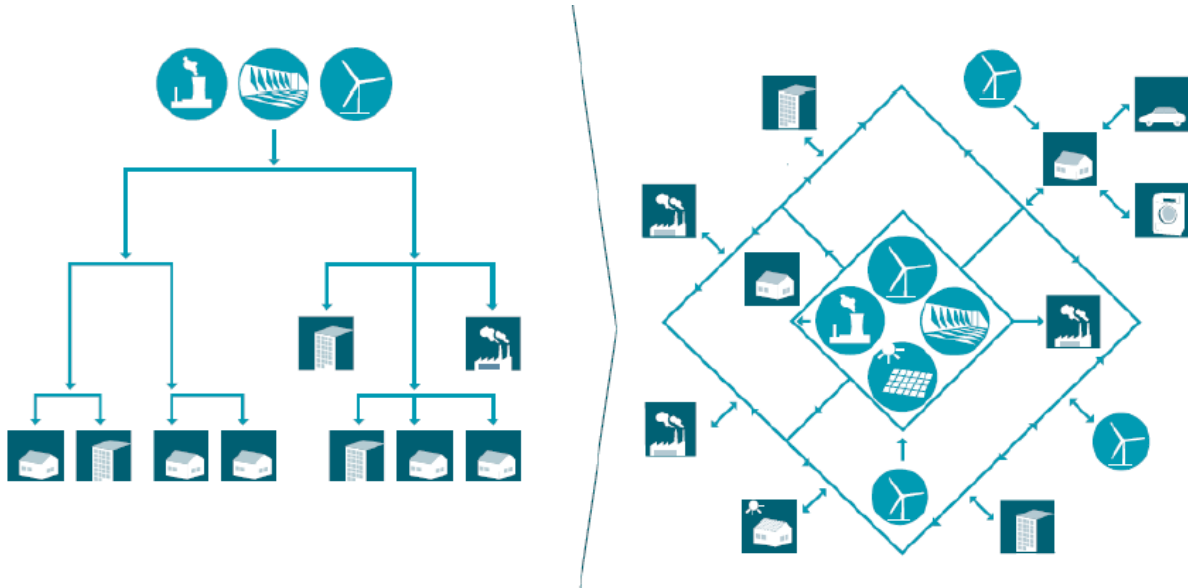
- *Άμεσος έλεγχος στο φορτίο (Direct Control):* Ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να επέμβει απευθείας σε φορτία των καταναλωτών προκειμένου να εξασφαλίσει την αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου. Οι συμβεβλημένοι καταναλωτές θα έχουν θέσει στη διάθεση του διαχειριστή την δυνατότητα περικοπής φορτίου με την αντίστοιχη αποζημίωση σε περίπτωση συμμετοχής.
- *Προγράμματα περικοπής/διακοπής (Curtailable/Interruptible Programs):* Οι συμβεβλημένοι χρήστες έχουν οικονομικά οφέλη εφόσον συμφωνήσουν στη μείωση της κατανάλωσής τους σε κάποιο συμφωνηθέν όριο.
- *Προγράμματα πλειοδοσίας/επαναγοράς (Demand Bidding):* Οι χρήστες ορίζουν, μετά από διαδικασία πλειοδοσίας στο πλαίσιο της αγοράς, σε ποια τιμή διατίθενται να περικόψουν το φορτίο τους. Ο διαχειριστής, με κριτήριο την οικονομικότερη και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος, δίνει τα τελικά σήματα για περικοπή φορτίου.

#### Απόκριση βάσει τιμής:

- *Τιμολόγηση βάσει της ώρας χρήσης (Time Of Use - TOU):* Στο πρόγραμμα αυτό η ημέρα χωρίζεται σε τμήματα στα οποία η ενέργεια τιμολογείται διαφορετικά. Η τιμολόγηση αντικατοπτρίζει το μέσο κόστος της παραγωγής και μεταφοράς της ενέργειας. Θα μπορούσε να πει κανείς ότι σε αυτή την κατηγορία ανήκει το νυχτερινό τιμολόγιο που χρησιμοποιείται εδώ και χρόνια στην Ελλάδα.
- *Τιμολόγηση κρίσιμης αιχμής (Critical Peak Pricing - CPP):* Ο πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζει μια περίοδο ως κρίσιμη. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στην εμφάνιση κινδύνων για την ευστάθεια του συστήματος είτε στο αυξημένο κόστος για την απόκτηση των απαραίτητων πόρων (π.χ. καυσίμων) για την παραγωγή. Κατά αυτήν την περίοδο (που μπορεί να διαρκεί κάποιες ώρες) ισχύει υψηλή τιμολόγηση της κατανάλωσης.
- *Τιμολόγηση πραγματικού χρόνου (Real Time Pricing - RTP):* Η τιμή του ηλεκτρισμού αλλάζει σε διαστήματα μίας ώρας, αντικατοπτρίζοντας την αλλαγή της τιμής του ηλεκτρισμού στο πλαίσιο της χονδρεμπορικής αγοράς. Οι καταναλωτές προειδοποιούνται για τις αλλαγές στην τιμολόγηση την προηγούμενη ημέρα ή την προηγούμενη ώρα.

#### 1.4. Απαιτήσεις ενός σύγχρονου Σ.Η.Ε.-Μοντέλο ενός «έξυπνου δικτύου»(smart grid)

Το «έξυπνο δίκτυο» θα μπορούσε να οριστεί ως ένα ηλεκτρικό δίκτυο που εμπλέκει όλους τους καταναλωτές και τους παραγωγούς έτσι ώστε να επιτύχει την οικονομικότερη και αξιόπιστη παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Στον όρο «εμπλέκει» ο ορισμός αυτός εμπεριέχει τη βασική διαφορά μεταξύ ενός κλασσικού Σ.Η.Ε. και ενός «έξυπνου δικτύου»: Η μεταφορά πληροφορίας αλλά και ενέργειας σε ένα «έξυπνο δίκτυο» είναι αμφίδρομη και όχι μόνο από τα πάνω προς τα κάτω:



Εικόνα 3: Παραδοσιακό και «έξυπνο» ΣΗΕ [2]

Μάλιστα η διπλωματική αυτή σκοπεύει να εστιάσει στη συμμετοχή των οικιακών καταναλωτών στο έξυπνο δίκτυο. Σε αυτό το πεδίο χρειάζεται να γίνει αρκετή έρευνα, καθώς οι κατοικίες αποτελούν σημαντικό κομμάτι της ζήτησης και διαθέτουν μεγαλύτερη ευελιξία από μεγαλύτερους καταναλωτές π.χ. βιομηχανικές μονάδες.

Προκειμένου να μπορεί να λειτουργήσει ένα τέτοιο δίκτυο, είναι φανερό ότι πρέπει να γίνει έρευνα σε διάφορους τομείς. Συνοπτικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι πρέπει να υπάρξουν οι αναγκαίες υποδομές στους παρακάτω τομείς:

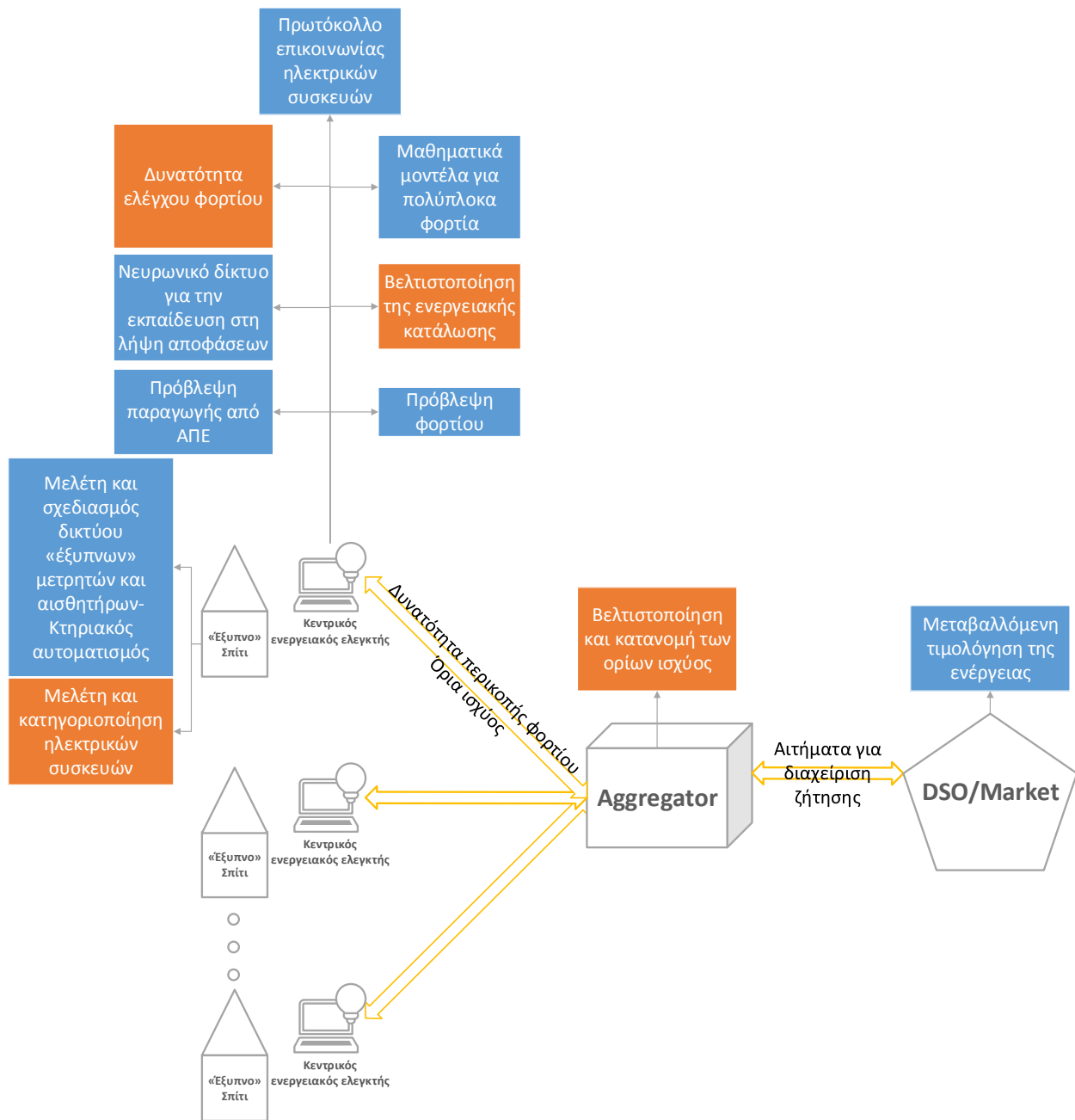
- Νομικό πλαίσιο: Θέσπιση του νομικού πλαισίου κάθε οντότητας στο δίκτυο (π.χ. για την προστασία προσωπικών πληροφοριών των καταναλωτών).
- Ανθρωπιστικές επιστήμες: Μελέτη της συμπεριφοράς και των αναγκών των διάφορων χρηστών έτσι ώστε να καταρτιστούν τα σωστά προγράμματα που θα υπολογίζουν τον ανθρώπινο παράγοντα.
- Τηλεπικοινωνίες: Δημιουργία των προϋποθέσεων για την επικοινωνία των οντοτήτων.
- Οικονομικά: Δημιουργία μοντέλων που θα χρειαστούν προκειμένου οι διάφορες οντότητες να μπορούν να συμμετέχουν στις συναλλαγές.



- Υπολογιστικά συστήματα: Σχεδιασμός των διαφόρων συστημάτων που θα συλλέγουν ,θα ανταλλάσσουν δεδομένα και θα παίρνουν τις διάφορες αποφάσεις.
- Ενέργεια: Εμπλουτισμός των εργαλείων που χρησιμοποιεί ο πάροχος, ο διαχειριστής και οι όποιες νέες οντότητες σχηματίζουν σε ένα τέτοιο δίκτυο, προκειμένου να μπορεί να εκμεταλλευτεί στο έπακρο όλες τις νέες δυνατότητες του δικτύου.

Για τους τέσσερις πρώτους τομείς θα χρειαστεί να γίνουν οι απαραίτητες υποθέσεις, καθώς η διπλωματική αυτή έχει στόχο να εστιάσει περισσότερο στους δύο τελευταίους τομείς. Εστιάζοντας λοιπόν στους δύο τελευταίους τομείς, του ενεργειακού σχεδιασμού και του σχεδιασμού υπολογιστικών συστημάτων, η διπλωματική αυτή φιλοδοξεί να περιγράψει τις υποδομές που θα χρειαστούν προκειμένου να μπορεί ένα έξυπνο σπίτι να ενταχθεί σε προγράμματα διαχείρισης ζήτησης. Αυτό προϋποθέτει μελέτη στο εσωτερικό του έξυπνου σπιτιού, αλλά και στο επίπεδο της αγοράς και του διαχειριστή του ηλεκτρικού συστήματος, όπου θα χρειαστεί να προστεθούν δυνατότητες και εργαλεία. Άξονας αυτού του μοντέλου αλλά και της παρούσας εργασίας αποτελεί η σχεδίαση ενός ενεργειακού ελεγκτή ο οποίος θα μπορεί να οργανώνει την οικιακή κατανάλωση αλλά και να αλληλεπιδρά με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργία του ελεγκτή θα εξασφαλίσει από τεχνικής απόψεως την ανταλλαγή των σημάτων και την εκτέλεση των εντολών. Ακόμη με τον ενεργειακό ελεγκτή θα εξασφαλιστεί ότι ο καταναλωτής θα μπορεί να θέσει τις προτιμήσεις του αλλά από εκεί και πέρα η εκτέλεση του προγράμματος θα βασίζεται όσο το δυνατόν λιγότερο στον ανθρώπινο παράγοντα ο οποίος είναι για διάφορους λόγους αστάθμητος.

Από το εσωτερικό του έξυπνου σπιτιού ως την αγορά, ένα μοντέλο για την διαχείριση ζήτησης φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Σε αυτό το σχήμα αναφέρονται επίσης τα εργαλεία τα οποία είναι απαραίτητα προκειμένου να γίνει εφικτή η λειτουργία προγραμμάτων διαχείρισης ζήτησης σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο:



Εικόνα 4: Εργαλεία και οντότητες στο «έξυπνο» δίκτυο

Με πορτοκαλί χρώμα απεικονίζουμε τα εργαλεία και τους τομείς που θα εστιάσει η παρούσα διπλωματική. Από την άλλη, οι ενότητες με μπλε χρώμα δεν εξετάζονται σε αυτήν την εργασία, αλλά αποτελούν ένα σημαντικό μέρος της έρευνας που πρέπει να γίνει για να δημιουργηθούν οι υποδομές πάνω στις οποίες θα βασιστεί ένα σύγχρονο «έξυπνο» ΣΗΕ. Ας προχωρήσουμε στη συνοπτική περιγραφή των εργαλείων του δικτύου, προκειμένου να αποσαφηνιστεί σιγά-σιγά το μοντέλο λειτουργίας που προτείνουμε:

- Μελέτη και σχεδιασμός δικτύου «έξυπνων» μετρητών και αισθητήρων-Κτηριακός αυτοματισμός:  
Θεωρητικά κάθε κτήριο θα πρέπει να γίνει ένα μικρό δίκτυο στο οποίο θα συλλέγονται πληροφορίες από τις διάφορες συσκευές όπως κατανάλωση, συντελεστής ισχύος κτλ ,οι συνθήκες που επικρατούν στο χώρο (θερμοκρασία, υγρασία, φωτισμός κτλ όπου αυτές είναι απαραίτητες) και η τοπική παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε αυτό το δίκτυο θα πρέπει να υπάρχει η απαραίτητη υποδομή έτσι ώστε ο κεντρικός ενεργειακός ελεγκτής να ελέγχει με αυτόματο τρόπο τα διάφορα μεγέθη και τα ηλεκτρικά φορτία. Έτσι θα μπορεί να εξασφαλίσει τις ζητούμενες συνθήκες περιβάλλοντος, την ικανοποίηση των αναγκών των ενοίκων και φυσικά την εξοικονόμηση ενέργειας.
- Μελέτη και κατηγοριοποίηση ηλεκτρικών συσκευών:  
Όπως καταλαβαίνουμε για μία αποτελεσματική διαχείριση ζήτησης θα πρέπει να κατηγοριοποιήσουμε τα φορτία. Μία πρώτη κατηγοριοποίηση για τις οικιακές συσκευές έχει ως εξής:
  - Απλές συσκευές: Συσκευές της κουζίνας (εκτός αυτές που αναφέρονται στις άλλες κατηγορίες), συσκευές για την ψυχαγωγία (τηλεοράσεις κτλ), την επικοινωνία (τηλέφωνο,modem κτλ), και γενικά συσκευές που δεν υπάρχει ιδιαίτερος λόγος να ελέγχονται.
  - Ελεγχόμενες συσκευές ή συσκευές οι οποίες επιτελούν ένα task συγκεκριμένης χρονικής διάρκειας: Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται το πλυντήριο πιάτων, το πλυντήριο ρούχων, το στεγνωτήριο, η φόρτιση ηλεκτρικού αυτοκινήτου κ.α.).
  - Συσκευές που αλληλεπιδρούν με τις συνθήκες περιβάλλοντος: Σε αυτήν την κατηγορία ανήκει το air condition , το ψυγείο, πιθανών ο φωτισμός και όλες αυτές οι συσκευές που λειτουργούν προκειμένου να διαμορφώνουν κάποιους παράγοντες.

Οι δύο τελευταίες κατηγορίες έχουν σημαντικό ρόλο στη διαχείριση ζήτησης. Πιο συγκεκριμένα οι ελεγχόμενες συσκευές μπορούν να μετακινούνται μέσα στη μέρα ανάλογα με τη δυσφορία που αυτό προκαλεί στον καταναλωτή και το αντίστοιχο οικονομικό αντίκρισμα. Επιπλέον, οι συσκευές που αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον μπορούν να ελέγχονται σύμφωνα με τις εντολές του χρήστη έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται τυχόν περιττή κατανάλωση ενέργειας και να υπάρχει βέλτιστος έλεγχος της λειτουργίας του φορτίου.

- Πρωτόκολλο επικοινωνίας ηλεκτρικών συσκευών:

Οι «έξυπνες» συσκευές και μετρητές θα συγκροτούν όπως περιγράψαμε παραπάνω ένα δίκτυο εντός ενός κτηρίου. Ένα επίπεδο πάνω από αυτό το δίκτυο θα βρίσκεται ο κεντρικός ελεγκτής του κτηρίου. Αυτός ο ελεγκτής θα πρέπει να μπορεί να συλλέγει τις πληροφορίες από τους μετρητές αλλά και να μπορεί να ελέγξει τις «έξυπνες» συσκευές. Αυτό προϋποθέτει και το ανάλογο τηλεπικοινωνιακό υπόβαθρο ασύρματης επικοινωνίας (π.χ. Bluetooth,wifi κτλ) μέσα στο σπίτι, το οποίο πρέπει να είναι τυποποιημένο ενιαία για όλους τους κατασκευαστές.

- Δυνατότητα ελέγχου φορτίου:

Εφόσον υπάρχει η υποδομή του κτηριακού αυτοματισμού και του δικτύου των συσκευών, ο κεντρικός ενεργειακός ελεγκτής πρέπει να μπορεί να ελέγχει τις υπόλοιπες συσκευές του δικτύου, είτε ελέγχοντας ένα ρελέ που διακόπτει το φορτίο, είτε στέλνοντας ψηφιακά σήματα τα οποία θα καθορίζονται από το πρωτόκολλο επικοινωνίας συσκευών. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας έχει σχεδιαστεί μία εφαρμογή ελέγχου ρελέ, και έχει προσομοιωθεί ο έλεγχος φορτίων μέσω επικοινωνίας ελεγκτή και προσομοιωτή.

- Μαθηματικά μοντέλα για πολύπλοκα φορτία:

Έχουμε περιγράψει και παραπάνω ότι υπάρχουν φορτία όπως το θερμοσίφωνο, όπου πρέπει να μοντελοποιηθούν η λειτουργία τους και οι απώλειες τους σε συνάρτηση με τις περιβαλλοντικές συνθήκες για να αξιοποιούνται βέλτιστα. Πάνω σε αυτό το τομέα γίνονται τα τελευταία αρκετά βήματα από την επιστημονική κοινότητα [3].

- Βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης:

Ο ενεργειακός ελεγκτής θα πρέπει συνυπολογίζοντας όλες τις παραμέτρους να εκπονεί τον ενεργειακό σχεδιασμό του κτηρίου για τις επόμενες ώρες. Ο σχεδιασμός αυτός θα πρέπει να μεγιστοποιεί το κόστος της κατανάλωσης και να πετυχαίνει την ικανοποίηση των αναγκών των ενοίκων κάτω από τους πιθανούς περιορισμούς που θα υπάρχουν.

- Νευρωνικό δίκτυο για την εκπαίδευση στη λήψη αποφάσεων:

Ο κεντρικός ενεργειακός ελεγκτής θα καλείται να παίρνει συνεχώς αποφάσεις προκειμένου να συντονίζει την ενεργειακή κατανάλωση του κτηρίου. Ένας σύγχρονος ελεγκτής λοιπόν πρέπει να έχει τη δυνατότητα να «εκπαιδευτεί» αναπτύσσοντας το δικό του νευρωνικό δίκτυο. Η παρούσα εργασία δεν έχει εστιάσει σε αυτόν τον τομέα αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι στη διεθνή επιστημονική κοινότητα η χρήση νευρωνικών δικτύων προκρίνεται για πολλά πεδία όπως η πρόβλεψη φορτίου [4], η χρονοδρομολόγηση φορτίων [5] κ.α.

- Πρόβλεψη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας:

Με τα νέα δεδομένα ένα κτήριο όπως το περιγράψαμε αναμένεται να έχει τοπική παραγωγή από ΑΠΕ, και η αξιοποίησή τους θα παίζει σημαντικό ρόλο στην εξοικονόμηση ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, αφού οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι διαθέσιμες για συγκεκριμένες ώρες της ημέρας, ένα σύστημα που θα δίνει τη δυνατότητα προγραμματισμού των φορτίων σε πραγματικό χρόνο θα επιτρέπει τη μέγιστη αξιοποίηση αυτών των πηγών ενέργειας. Η

πρόβλεψη λοιπόν της τοπικής παραγωγής θα βοηθήσει στον ενεργειακό προγραμματισμό του κτηρίου.

- Πρόβλεψη φορτίου:

Εφόσον αρχίζει να «χτίζεται» ένα τέτοιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ο κεντρικός ελεγκτής κάθε κτηρίου θα μπορεί να συλλέγει αναλυτικές πληροφορίες για το «προφίλ» της ενεργειακής ζήτησης. Αυτό θα βοηθήσει σε δύο επίπεδα. Αφενός ο ελεγκτής θα μπορεί να «εκπαιδευτεί» έτσι ώστε να παίρνει κάποιες αποφάσεις βασισμένος στα στοιχεία που συλλέγει και αφετέρου ο διαχειριστής δικτύου θα μπορεί να έχει πιο αναλυτικό και ακριβές ιστορικό της ενεργειακής ζήτησης. Αυτό θα του δώσει τη δυνατότητα να κάνει καλύτερο προγραμματισμό της επόμενης μέρας με στόχο την οικονομικότερη και πιο αξιόπιστη λειτουργία.

- Βελτιστοποίηση της κατανομής ορίων ισχύος:

Ο aggregator, όπως θα εξηγηθεί αναλυτικά στην αντίστοιχη ενότητα της εργασίας, θα διαμεσολαβεί μεταξύ μίας ομάδας καταναλωτών και της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν προγράμματα διαχείρισης ζήτησης. Προκειμένου να αλλάξει το ενεργειακό προφίλ των καταναλωτών στη χαμηλή τάση, θα πρέπει να γίνονται συνδιαλλαγές οι οποίες θα καταλήγουν και σε όρια ισχύος για τους καταναλωτές που επιθυμούν να συμμετέχουν στα προγράμματα. Η βέλτιστη κατανομή αυτών των φορτίων είναι ένα πρόβλημα με το οποίο αυτή η διπλωματική έχει ασχοληθεί και θα παρουσιαστεί στην αντίστοιχη ενότητα.

- Μεταβαλλόμενη τιμολόγηση της ενέργειας:

Ο διαχειριστής της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (το πως θα λέγεται και τι αρμοδιότητες θα έχει αποτελεί ένα μικρότερο μέρος της δημιουργίας ενός μοντέλου για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας) θα πρέπει να έχει εκείνα τα οικονομικά μοντέλα και τα εργαλεία που χρειάζονται ώστε να μπορεί να καθορίζει την τιμή της κιλοβατώρας σύμφωνα με την κατάσταση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα αυτή αποτελεί από μόνη της ένα τεράστιο βήμα για την διαχείριση ζήτησης καθώς οι καταναλωτές ανταποκρινόμενοι σε αυτές τις μεταβολές θα μειώνουν τα φορτία τους τις ώρες αιχμής προκειμένου να αποφύγουν την υψηλή τιμολόγηση.

## 1.5. Προγράμματα διαχείρισης ζήτησης στην Ευρώπη

Τα περισσότερα κράτη μέλη δεν διαθέτουν τις παραπάνω αναφερόμενες προϋποθέσεις για την εφαρμογή προγραμμάτων διαχείρισης ζήτησης οπότε στο στάδιο που βρισκόμαστε εφαρμόζονται πιλοτικά πρόγραμμα. Αυτά τα προγράμματα διαρκούν ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και πιο πολύ έχουν σαν στόχο να αποτελέσουν μία πρώτη μελέτη για τα οικονομικά οφέλη της διαχείρισης ζήτησης και την απόκριση των καταναλωτών. Μάλιστα, υπάρχουν κάποιες ευρωπαϊκές οδηγίες που δείχνουν προς την κατεύθυνση της διαχείρισης ζήτησης αλλά γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η διαχείριση ζήτησης στην Ευρώπη βρίσκεται ακόμα σε πρωτόλειο στάδιο. Ενδεικτικά αναφέρουμε την αναφορά που συντάξε ο ENTSO-E (European Network Transmission System Operator for Electricity) [6], στην οποία αναφέρεται πως η απόκριση ζήτησης αποτελεί ένα βασικό κομμάτι στην εξέλιξη των ηλεκτρικών δικτύων δημιουργώντας οφέλη σε όλα τα επίπεδα.

Στο επόμενο κομμάτι θα αναφέρουμε συνοπτικά κάποια προγράμματα που δοκιμάστηκαν σε διάφορα κράτη της Ευρώπης:

**Σουηδία:** Στη Σουηδία εφαρμόστηκε ένας προσωρινός νόμος από το 2003 έως το 2008 [7]. Μελέτες έδειξαν ότι οι πιο πολλές βιομηχανίες της Σουηδίας θα μπορούσαν να συμμετέχουν σε ένα πρόγραμμα μείωσης του φορτίου από τριάντα λεπτά έως τρεις ώρες. Έτσι διοργανώθηκαν δημοπρασίες ώστε να εξασφαλιστεί απόθεμα έως 2000MW για να χρησιμοποιηθεί σε αιχμές του φορτίου.

**Γαλλία:** Στη Γαλλία εφαρμόστηκε ένα πρόγραμμα με διαφορετικές χρεώσεις. Ο τίτλος του προγράμματος είναι: Electricite de France's Tempo tariff [8]. Περίπου 350 χιλιάδες οικιακοί καταναλωτές και 100 χιλιάδες μικροί επαγγελματίες χρησιμοποίησαν την «Tempo» χρέωση. Κάθε καταναλωτής εφοδιάστηκε με ένα σήμα το οποίο άλλαζε χρώμα ανάλογα με το επίπεδο χρεώσεων της ημέρας και επίσης είχε και ένδειξη για κάθε ώρα της ημέρας αν θεωρείται ώρα αιχμής. Οι χρήστες μπορούσαν να αλλάξουν την κατανάλωση τους χειροκίνητα ή συμμετέχοντας σε ένα πρόγραμμα για αυτόματη σύνδεση και αποσύνδεση του θερμοσίφωνα. Οι μελέτες έδειξαν ότι οι καταναλωτές μείωσαν τον λογαριασμό τους κατά 10% κατά μέσο όρο, ενώ η ζήτηση των μικρών νοικοκυριών μειώθηκε κατά 15% στις «άσπρες μέρες» [8] και 45% στις «κόκκινες μέρες» [8].

**Ιταλία:** Η Ιταλία είναι η ευρωπαϊκή χώρα όπου έχει προχωρήσει περισσότερο η εγκατάσταση των «έξυπνων» μετρητών. Επίσης σήμερα στην Ιταλία το 6.5% της τιμής αιχμής μπορεί να αποκοπεί σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης. Αυτό γίνεται μέσω δύο προγραμμάτων [9] στα οποία συμμετέχουν μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές. Η αποκοπή φορτίων γίνεται είτε από τους χρήστες είτε από ειδικό εξοπλισμό ο οποίος συνδέεται σε φορτία της βιομηχανία και δίνει την δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου.

**Αγγλία:** Στην Αγγλία τα έτη 2007-2010 εφαρμόστηκε το πρόγραμμα EDRP Trials [10]. Χρησιμοποιήθηκε Time of Use μέθοδος απόκρισης ζήτησης σε συνδυασμό με εγκατεστημένους μετρητές στους καταναλωτές. Οι συμμετέχοντες στην διατίμηση TOU λάμβαναν αναλυτικό λογαριασμό, συσκευή για

απεικόνιση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και τους παρεχόταν, ταχυδρομικώς, συμβουλές για ενεργειακή αποδοτικότητα. Η μείωση του φορτίου κατά την περίοδο αιχμής έφτασε το 10%. Η έρευνα που έγινε στη συμπεριφορά των καταναλωτών έδειξε διάφορα πράγματα, όπως ότι η υπερβολική πληροφόρηση των καταναλωτών αύξησε την πολυπλοκότητα της συμμετοχής τους και αυτό οδήγησε σε μικρότερη απόκριση τους στα γεγονότα.

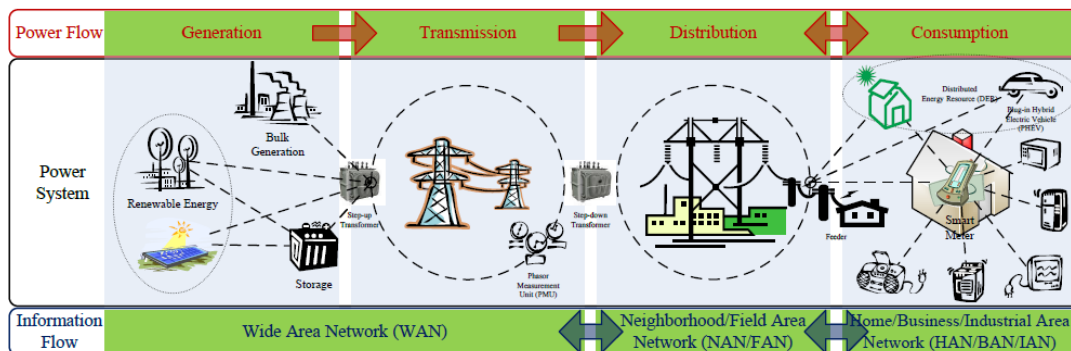
Και άλλες ευρωπαϊκές έχουν δοκιμάσει πιλοτικά προγράμματα όπως η Ισπανία (παρόμοιο με της Ιταλίας), η Νορβηγία κτλ. Γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι είμαστε σε ένα στάδιο όπου η διαχείριση ζήτησης ερευνάται αλλά θα χρειαστούν ακόμα αρκετά χρόνια ώστε να γίνουν στρατηγικές επενδύσεις σε αυτό το τομέα. Αρκετοί λόγοι συντρέχουν σε αυτό όπως το υψηλό κόστος για να δημιουργηθούν όλες εκείνες οι υποδομές για ένα «έξυπνο» δίκτυο. Από εκεί και πέρα οι πιο πρόσφατες ευρωπαϊκές προτάσεις φαίνεται να είναι διστακτικές για την ρητή υιοθέτηση πολιτικών διαχείρισης ζήτησης καθώς υπάρχει ακόμα μία αβεβαιότητα για τα αποτελέσματα τέτοιων προγραμμάτων σε μεγάλη κλίμακα.

## Κεφάλαιο 2ο: Η αρχιτεκτονική ενός «έξυπνου δικτύου»

### 2.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η αρχιτεκτονική ενός συστήματος στο οποίο θα είναι δυνατή η διαχείριση ζήτησης. Η παρουσίαση αυτή θα γίνει από τα κάτω προς τα πάνω, περνώντας δηλαδή από το επίπεδο ενός «έξυπνου σπιτιού» στον aggregator. Αφού παρουσιαστεί η έρευνα και η στοιχειοθέτηση που έχει γίνει σε όλα τα επίπεδα, θα τρέξουμε μία εφαρμογή διαχείρισης ζήτησης παρουσιάζοντας πως αλληλεπιδρούν τα διάφορα επίπεδα μεταξύ τους και πως τελικά μπορεί να ενταχτεί η διαχείριση ζήτησης στον σχεδιασμό ενός ΣΗΕ.

Στο επόμενο σχήμα μπορεί να δει κανείς ένα ΣΗΕ σχεδιασμένο για διαχείριση ζήτησης:



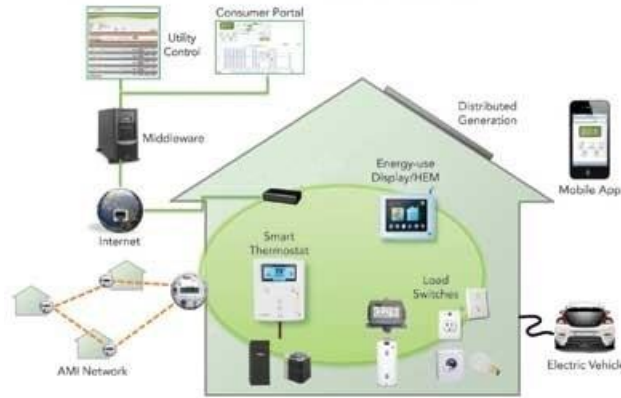
Εικόνα 4: Η απεικόνιση ενός «έξυπνου δικτύου» [11]

Προκειμένου να είναι δυνατή η διαχείριση ζήτησης, χρειάζεται η αμφίδρομη μετάδοση πληροφοριών από την παραγωγή έως και την κατανάλωση. Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα της διαχείρισης ζήτησης είναι ότι το δίκτυο μπορεί να ωφεληθεί σε όλα του τα επίπεδα, αρκεί να γίνει η κατάλληλη έρευνα και παραμετροποίηση των προβλημάτων. Για παράδειγμα η διαχείριση ζήτησης φιλοδοξεί να δώσει έναν επιπλέον βαθμό ελευθερίας στο δίκτυο πέρα από τις μονάδες παραγωγής έτσι ώστε να πετύχει οικονομικότερη και πιο ευέλικτη ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης. Πέρα από αυτό όμως, με τα κατάλληλα μοντέλα προβλέψεων, τηλεμετρίας και τηλεχειρισμών, η διαχείριση ζήτησης θα μπορούσε να ανταποκριθεί σε κάποιο αίτημα αναδιοργανώνοντας την κατανάλωση έτσι ώστε να αποφευχθούν οριακές καταστάσεις και προβλήματα αξιοπιστίας στη διανομή. Η φόρτιση των μετασηματιστών, η τάση και η συχνότητα στους κόμβους του δικτύου αποτελούν μερικούς μόνο από τους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την αξιόπιστη λειτουργία ενός ΣΗΕ, και η διαχείριση ζήτησης μπορεί να προσφέρει και σε αυτό το επίπεδο.

Το «έξυπνο σπίτι» λοιπόν πρέπει να έχει τη δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας με τις άλλες οντότητες του δικτύου. Αυτό πρέπει να γίνεται τακτικά και με αυτόματο τρόπο ώστε να μην επηρεάζεται η διαχείριση ζήτησης από τον ανθρώπινο παράγοντα. Ο καταναλωτής φυσικά είναι αυτός που ορίζει αν θέλει να συμμετάσχει στην διαχείριση ζήτησης και κάτω από ποιους όρους, αλλά πρέπει να υπάρχει η υποδομή για τη συλλογή όλων των απαραίτητων πληροφοριών από ένα σπίτι, τη



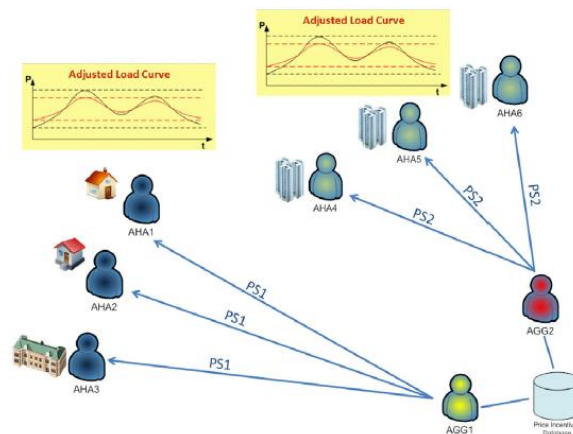
συνδιαλλαγή με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και την εκτέλεση των οδηγιών της διαχείρισης ζήτησης (έλεγχος φορτίων κτλ) αυτόματα. Με αυτόν τον τρόπο δεν εμπλέκεται ο καταναλωτής σε όλες τις απαραίτητες διαδικασίες της αγοράς που διέπονται από αυστηρά πρωτόκολλα οικονομικοτεχνικά πλαίσια. Η ανάγκη αυτή οδηγεί στο σχεδιασμό ενός κεντρικού ενεργειακού ελεγκτή:



Εικόνα 5: Ο ενεργειακός ελεγκτής ως διαχειριστής του «έξυπνου σπιτιού» [12]

Περισσότερα για τον σχεδιασμό του κεντρικού ελεγκτή θα παρουσιαστούν στην αντίστοιχη ενότητα παρακάτω. Αρκεί να σημειώσουμε ότι ο κεντρικός ελεγκτής αναλαμβάνει να «εκπροσωπήσει» τον καταναλωτή στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, να βάλει το «έξυπνο σπίτι» σε προγράμματα διαχείρισης ζήτησης και να οργανώσει βέλτιστα την οικιακή κατανάλωση. Πηγαίνοντας λοιπόν από τα κάτω προς τα πάνω στο «έξυπνο δίκτυο» που περιγράφουμε, γενάτε το ερώτημα με ποιον συνδιαλέγεται ο κεντρικός ενεργειακός ελεγκτής και ποιες πληροφορίες-σήματα ανταλλάσσονται.

Στη δική μας περιγραφή μεταξύ ενός «έξυπνου σπιτιού» και του ηλεκτρικού δικτύου παρεμβάλλεται ο energy market aggregator:



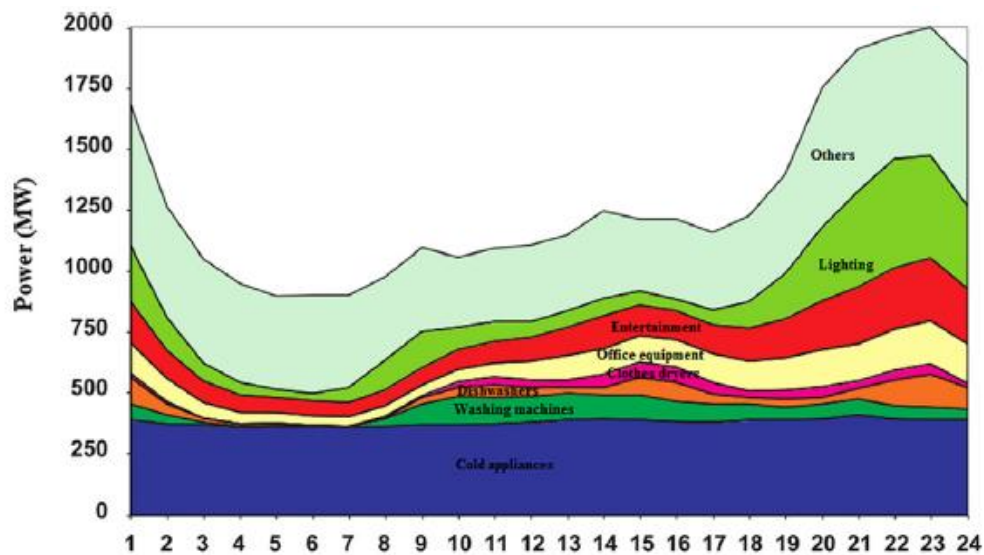
Εικόνα 6: Ο ρόλος του aggregator [13]

Μία πιο αναλυτική περιγραφή του ρόλου του aggregator θα δοθεί στην αντίστοιχη ενότητα αυτού του κεφαλαίου. Για την εισαγωγή θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο aggregator αθροίζει παραγωγές ή καταναλώσεις μικρών «παικτών» του δικτύου έτσι ώστε να μπορεί να γίνει έλεγχος σε μία εύλογη τάξη μεγέθους αλλά και να μην εμπλέκεται άμεσα ο μικρός παραγωγός/ιδιοκτήτης σε διαδικασίες της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας που έχουν αυστηρά οικονομικά και τεχνικά πλαίσια.

Στις επόμενες ενότητες θα προσπαθήσουμε να κοιτάξουμε μέσα στο «έξυπνο δίκτυο», ξεκινώντας από το πιο κάτω επίπεδο, τα οικιακά φορτία, και καταλήγοντας μέχρι τις συνδιαλλαγές με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

## 2.2. Το προφίλ της ζήτησης ενός «έξυπνου σπιτιού»

Προκειμένου να προσομοιώσει κανείς τη συμπεριφορά ενός «έξυπνου σπιτιού» και να εξάγει χρήσιμα συμπεράσματα για τη διαχείριση ζήτησης, αρχικά πρέπει να μελετήσει το προφίλ της ζήτησης. Το προφίλ της ζήτησης ενός σπιτιού αποτελεί τη συνισταμένη όλων των φορτίων του, ελεγχόμενων και μη:



Εικόνα 7: Ένα τυπικό προφίλ της ενεργειακής ζήτησης ενός σπιτιού [14]

Ερευνώντας τα στατιστικά δεδομένα και τις καταναλωτικές συνήθειες μπορεί να καταλάβει κανείς ότι το ημερήσιο προφίλ ζήτησης ενός οικιακού καταναλωτή αποτελεί το αποτέλεσμα πολλών παραγόντων. Μερικοί μόνο από τους παράγοντες που το καθορίζουν είναι:

1. Ο αριθμός των ενοίκων
2. Οι ανάγκες των ενοίκων(καθημερινό πρόγραμμα κτλ)
3. Οι καιρικές συνθήκες
4. Ημερολογιακές συνθήκες(καθημερινή ή αργία κτλ)
5. Το μέγεθος και γενικά οι εγκαταστάσεις του σπιτιού
6. Η τεχνολογία των οικιακών συσκευών κ.α.

Από αυτά μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι θα είναι άτοπο να μιλήσουμε για ένα «πρότυπο» προφίλ ενεργειακής ζήτησης. Για τον ίδιο λόγο μάλιστα καταλαβαίνουμε ότι η πρόβλεψη της κατανάλωσης ενός σπιτιού είναι ένα πρόβλημα του οποίου η προσέγγιση πρέπει να γίνεται ανά σπίτι και προϋποθέτει την καταγραφή της ημερήσιας καμπύλης σε συνάρτηση με όλους τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Πιστεύουμε ότι η εγκατάσταση ενός δικτύου επικοινωνίας και συλλογής των καταναλώσεων τοπικά σε κάθε σπίτι θα βοηθήσει στη λύση αυτού του προβλήματος.

Όσον αφορά τη διαχείριση ζήτησης, τα οικιακά φορτία πρέπει να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον τρόπο που μπορούν να συμμετάσχουν στη διαχείριση ζήτησης. Όπως αναφέραμε και στο πρώτο κεφάλαιο, μια κατηγοριοποίηση των οικιακών συσκευών θα μπορούσε να είναι η εξής:

- Απλές συσκευές: Συσκευές της κουζίνας (εκτός αυτές που αναφέρονται στις άλλες κατηγορίες), συσκευές για την ψυχαγωγία (τηλεοράσεις κτλ), την επικοινωνία (τηλέφωνο, modem κτλ), και γενικά συσκευές που δεν υπάρχει ιδιαίτερος λόγος να ελέγχονται.
- Ελεγχόμενες συσκευές: Οι συσκευές οι οποίες επιτελούν ένα task συγκεκριμένης χρονικής διάρκειας: Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται το πλυντήριο πιάτων, το πλυντήριο ρούχων, το στεγνωτήριο, η φόρτιση ηλεκτρικού αυτοκινήτου κ.α.).
- Συσκευές που αλληλεπιδρούν με τις συνθήκες περιβάλλοντος: Σε αυτήν την κατηγορία ανήκει το air condition , το ψυγείο, πιθανών ο φωτισμός και όλες αυτές οι συσκευές που λειτουργούν προκειμένου να διαμορφώνουν κάποιους παράγοντες

Η πρώτη κατηγορία συσκευών δεν έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από πλευράς διαχείρισης ζήτησης. Η αλλαγή της ζήτησης αυτών των συσκευών έχει να κάνει περισσότερο με την «καταναλωτική κουλτούρα» των ενοίκων, δηλαδή κατά πόσο τους απασχολεί να αλλάξουν λίγο έως πολύ τις συνήθειες τους για οικονομικούς και οικολογικούς λόγους. Από την άλλη οι ελεγχόμενες συσκευές είναι ιδανικές για τα προγράμματα διαχείρισης ζήτησης. Ανάλογα με το οικονομικό αντίκρισμα αλλά και τη δυσφορία που προκαλείται, οι συσκευές αυτές μπορούν να μετατίθενται μέσα στη μέρα αλλάζοντας έτσι τη συνολική καμπύλη ημερήσιας ζήτησης πετυχαίνοντας μείωση των αιχμών, μεγιστοποίηση της αξιοποίησης της τοπικά παραγομένης ενέργειας (ΦΒ) κ.α. Τέλος η τρίτη κατηγορία συσκευών μπορεί να ανταποκριθεί επίσης σε αιτήματα διαχείρισης ζήτησης, ανάλογα πάντα με τους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Μπορεί δηλαδή να επιτευχθεί γενικά μείωση των απωλειών και τυχούσας περιττής κατανάλωσης, αρκεί να υπάρχουν τα μαθηματικά μοντέλα για τις περιβαλλοντικές συνθήκες και όλο το ενεργειακό και τηλεπικοινωνιακό υπόβαθρο που απαιτείται. Να σημειώσουμε εδώ ότι στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής δεν παρουσιάζονται μαθηματικά μοντέλα για την τρίτη κατηγορία συσκευών, όπως στη διεθνή βιβλιογραφία [3], οπότε αν και έχουν παραπάνω βαθμούς ελευθερίας, θα ενταχθούν στη πρώτη κατηγορία των συσκευών που δεν ελέγχονται.

Η διεθνής βιβλιογραφία αλλά και τα πιλοτικά προγράμματα διαχείρισης ζήτησης που περιείχαν «έξυπνους μετρητές» για τους οικιακούς καταναλωτές παρέχουν πολλές πηγές άντλησης δεδομένων.

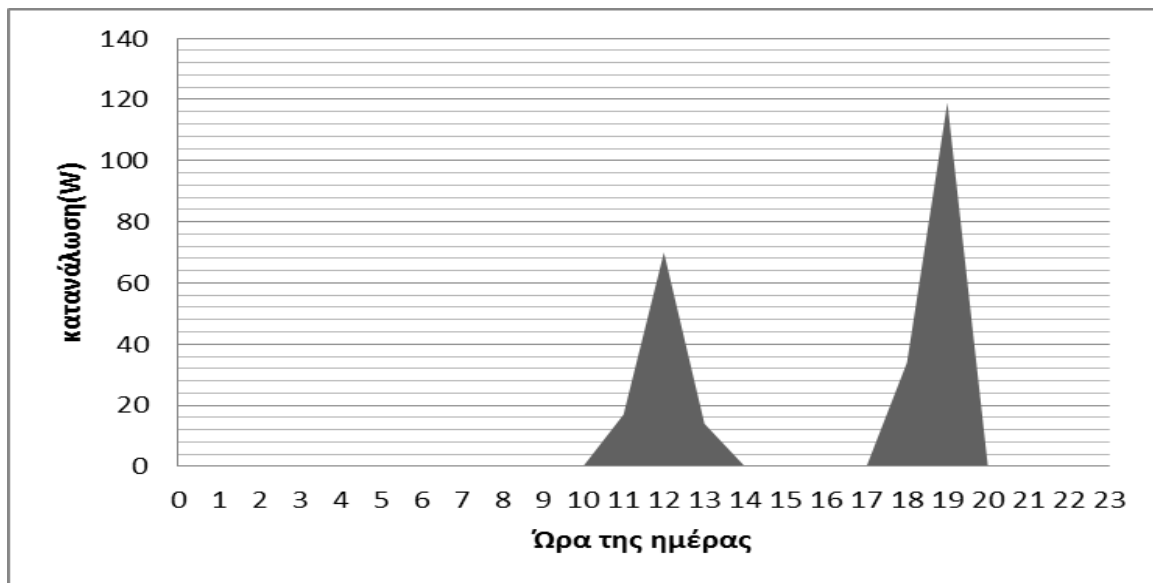
Μάλιστα πέρα από στατιστικά στοιχεία κατανάλωσης, εξαγωγή μέσης ημερήσιας καμπύλης ζήτησης ενός φορτίου κτλ. υπάρχουν και δεδομένα για τη συχνότητα χρήσης των διάφορων συσκευών από τα οποία μπορούν να παραχθούν πιθανοτικές καμπύλες για να εξαχθούν συμπεράσματα για τη συμπεριφορά ενός οικιακού καταναλωτή [15]. Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν κυρίως είναι το [14], η βάση δεδομένων του project Remodece [16], η βάση δεδομένων του smart-a project [17] και τέλος τα στατιστικά δεδομένα του τμήματος ενέργειας και κλιματικής αλλαγής της Αγγλίας που εκδίδονται ετησίως [18]. Όπως αναφέραμε και παραπάνω, η καταγραφή που ακολουθεί δεν φιλοδοξεί να δημιουργήσει το πρότυπο προφίλ οικιακής κατανάλωσης, καθώς αυτό δεν μπορεί να υπάρξει. Φιλοδοξεί να δημιουργήσει ένα εύλογο προφίλ ενεργειακής ζήτησης, το οποίο μάλιστα έγινε προσπάθεια να κινείται γύρω από το μέσο όρο των διάφορων στατιστικών που βρήκαμε. Το προφίλ της ενεργειακής ζήτησης, φορτίο προς φορτίο, ξεκινώντας από τα μη ελεγχόμενα φορτία, έχει ως εξής:

- Ηλεκτρική κουζίνα(φούρνος και εστίες):



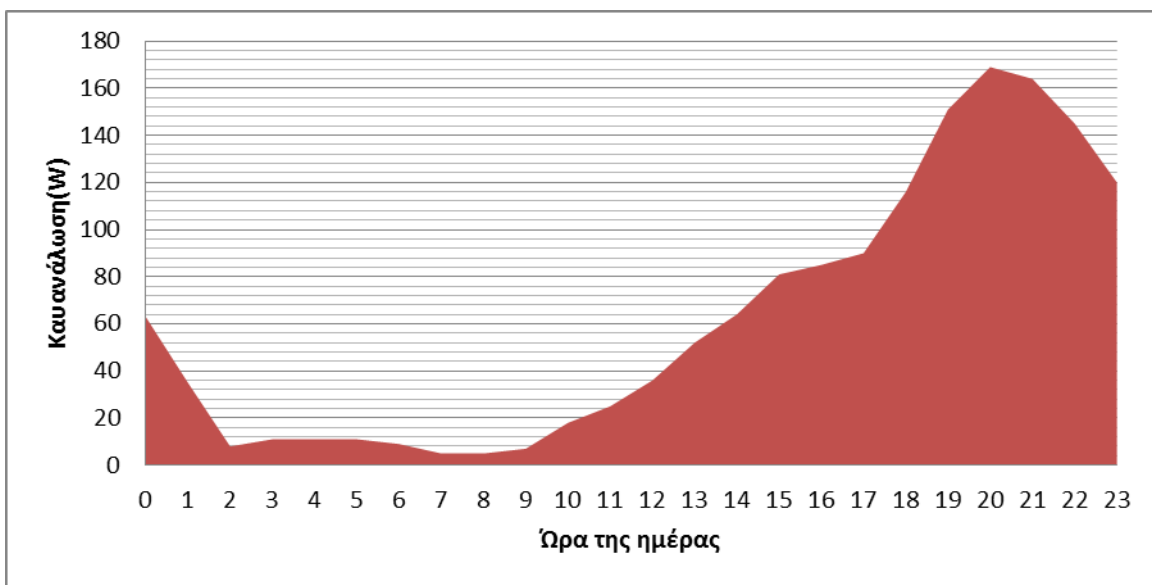
Γράφημα 1: Ημερήσια καμπύλη κατανάλωσης της ηλεκτρικής κουζίνας

- Φούρνος μικροκυμάτων:



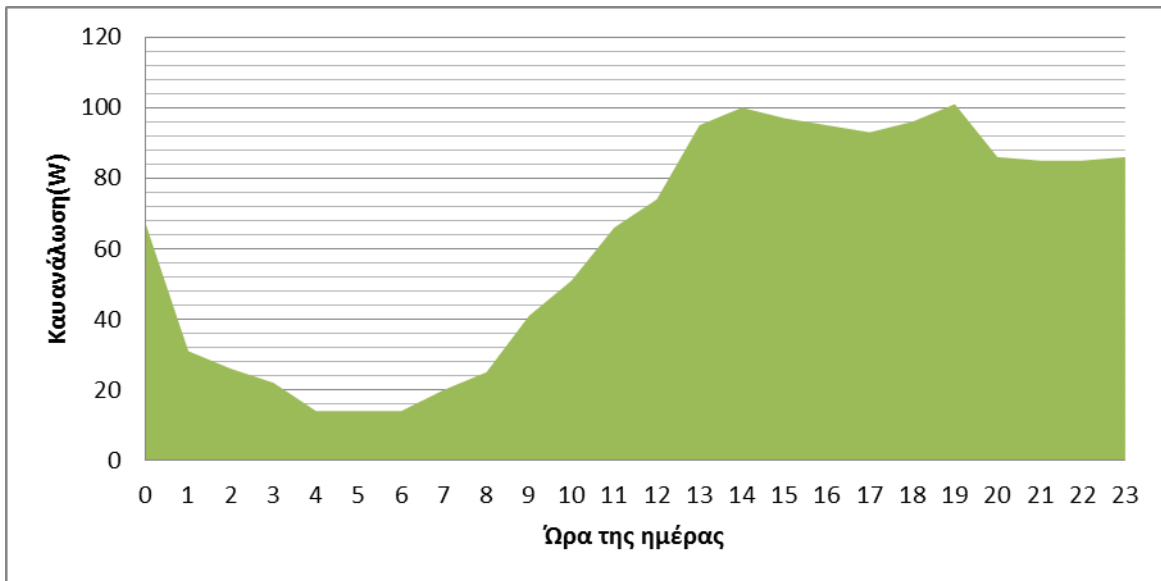
Γράφημα 2: Ημερήσια καμπύλη κατανάλωσης του φούρνου μικροκυμάτων

- Οπτικοακουστικές συσκευές (Τηλεοράσεις, ηχοσυστήματα, ραδιόφωνα κτλ):



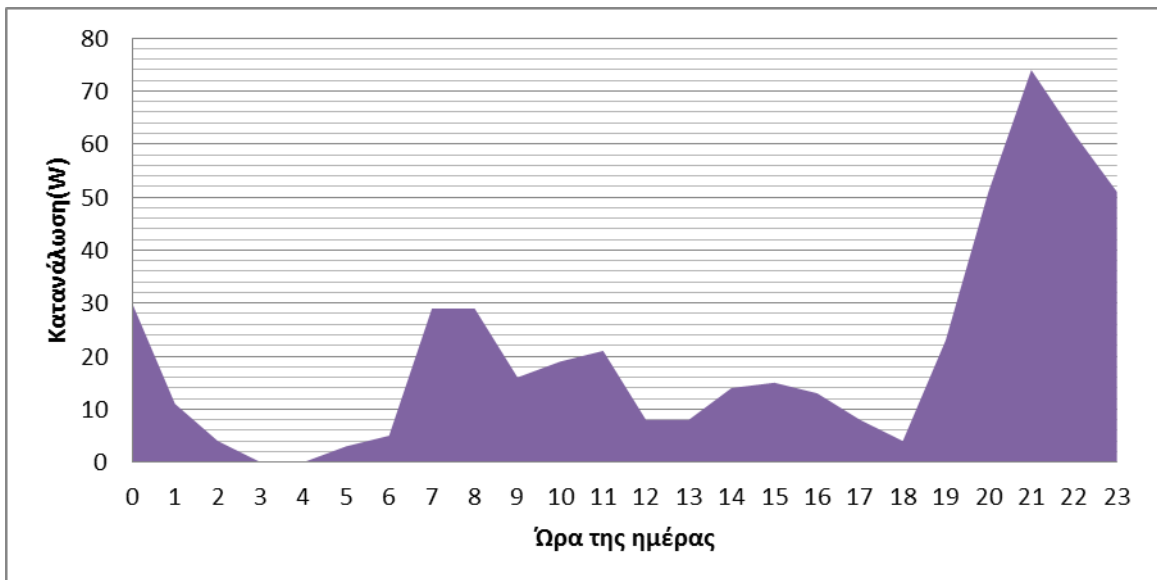
Γράφημα 3: Ημερήσια καμπύλη ζήτησης οπτικοακουστικών συσκευών

- Ηλεκτρονικός υπολογιστής:



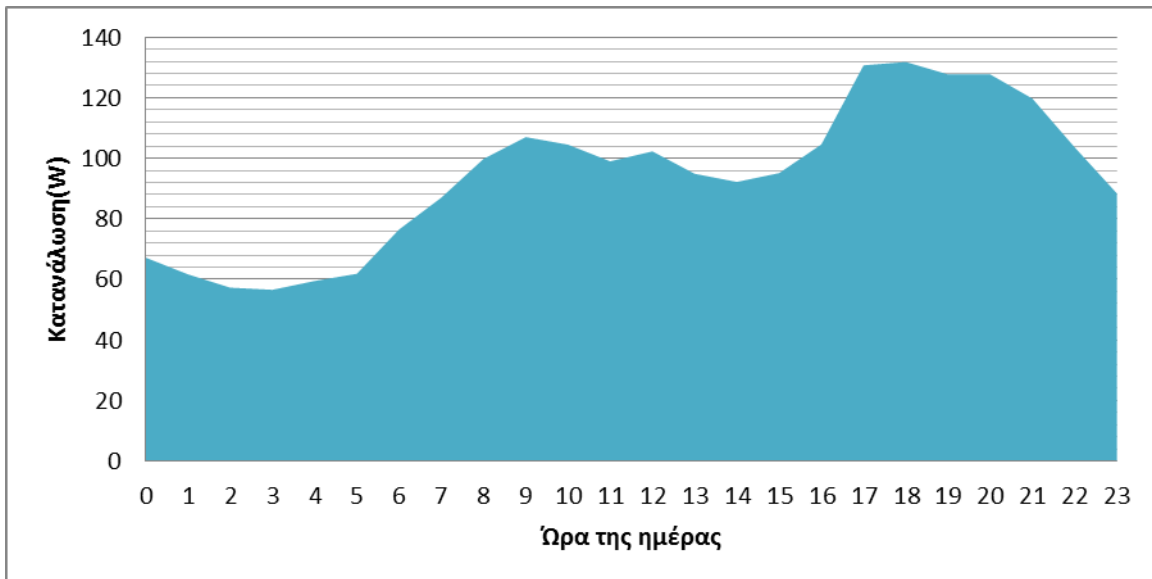
Γράφημα 4: Ημερήσια καμπύλη ζήτησης ηλεκτρονικού υπολογιστή

- Φωτισμός:



Γράφημα 5: Ημερήσια καμπύλη ζήτησης φωτισμού

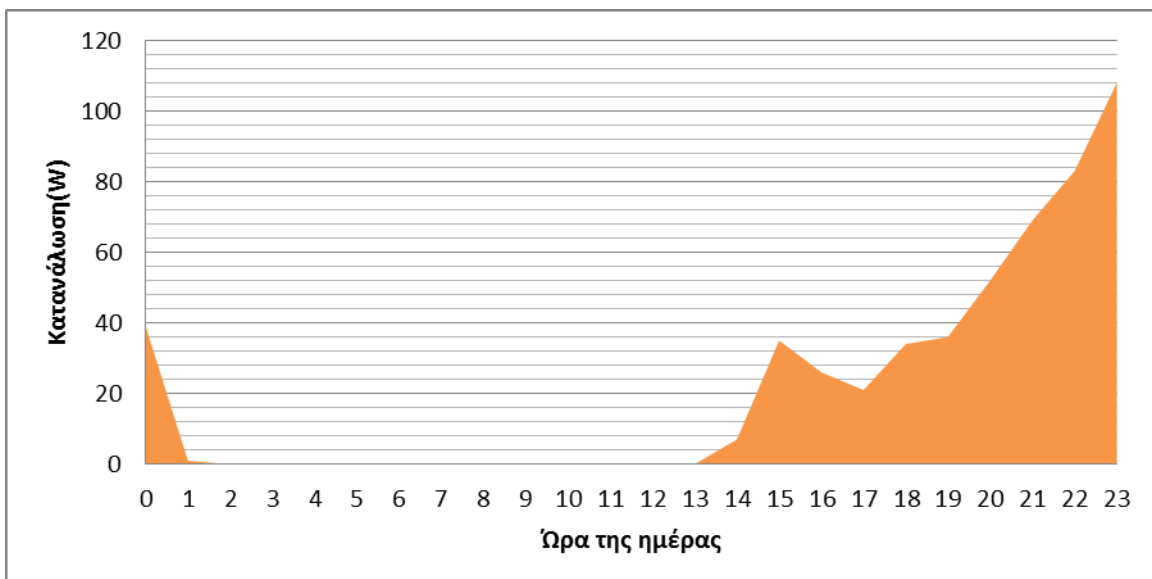
- Λοιπές μικρές ηλεκτρονικές συσκευές(τηλέφωνο,modem κτλ):



Γράφημα 6:Ημερήσια καμπύλη ζήτησης μικρών ηλεκτρονικών συσκευών

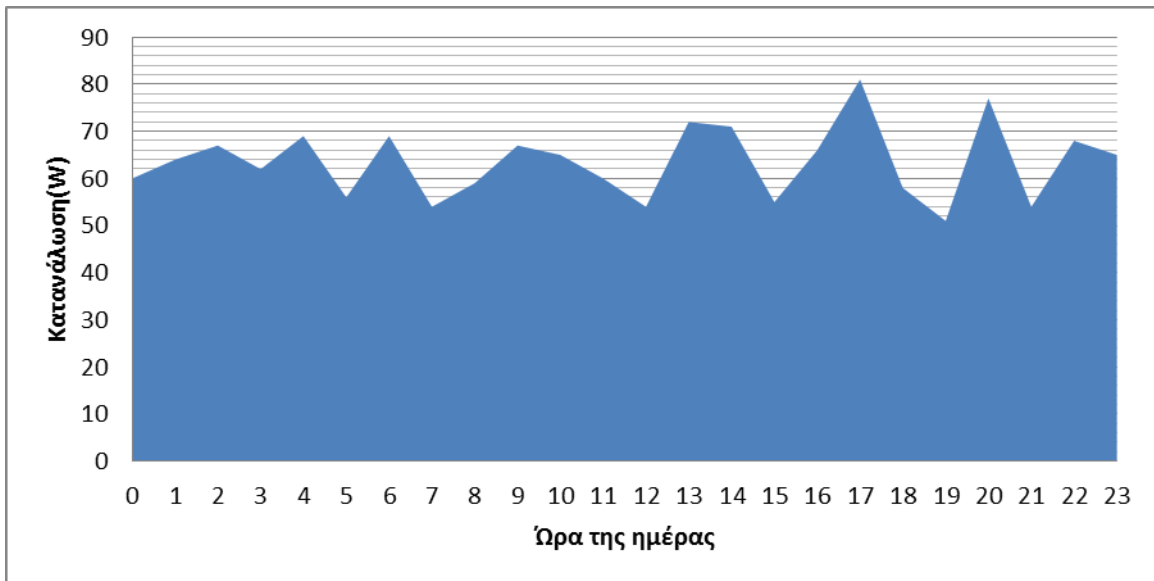
Όλες οι προηγούμενες οικιακές συσκευές είναι μη ελεγχόμενες. Ακολουθούν οι καμπύλες για το air condition και το ψυγείο. Η πλήρης περιγραφή αυτών των συσκευών θα απαιτούσε μαθηματικά μοντέλα που συνδέουν την λειτουργία τους με τη θερμοκρασία, αλλά αυτό δεν έγινε καθώς η διπλωματική αυτή φιλοδοξεί να εστιάσει στον προγραμματισμό του ελεγκτή για τον έλεγχο των φορτίων και τη βελτιστοποίηση των προβλημάτων διαχείρισης ζήτησης που θα παρουσιαστούν παρακάτω. Ως εκ τούτου, και αυτά τα φορτία θα ληφθούν υπόψη ως ημερήσιες καμπύλες ζήτησης:

- Air condition:



Γράφημα 7:Ημερήσια καμπύλη ζήτησης air condition

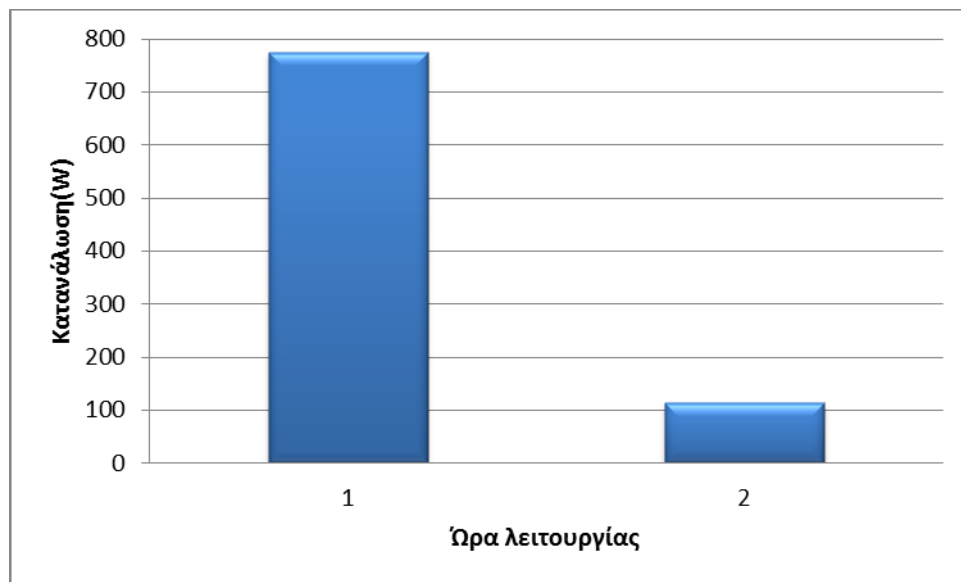
- Ψυγείο:



Γράφημα 8: Ημερήσια καμπύλη ζήτησης ψυγείου

Ακολουθούν τα ελεγχόμενα φορτία. Τα φορτία αυτά δεν έχουν ημερήσια καμπύλη ζήτησης καθώς όπως είπαμε επιτελούν ένα task για όση ώρα χρειάζεται και μετά απενεργοποιούνται:

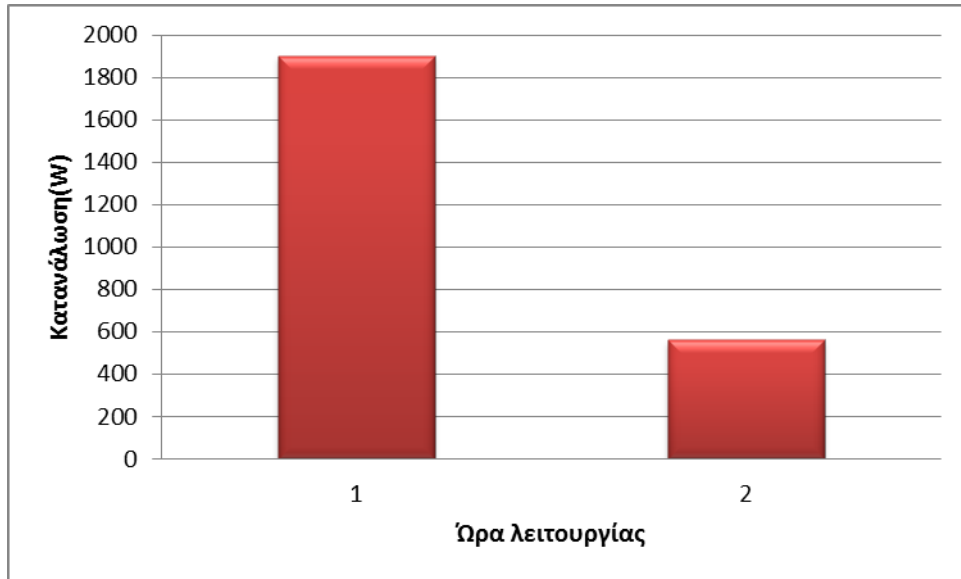
- Πλυντήριο ρούχων:



Γράφημα 9: Προφίλ λειτουργίας πλυντηρίου ρούχων

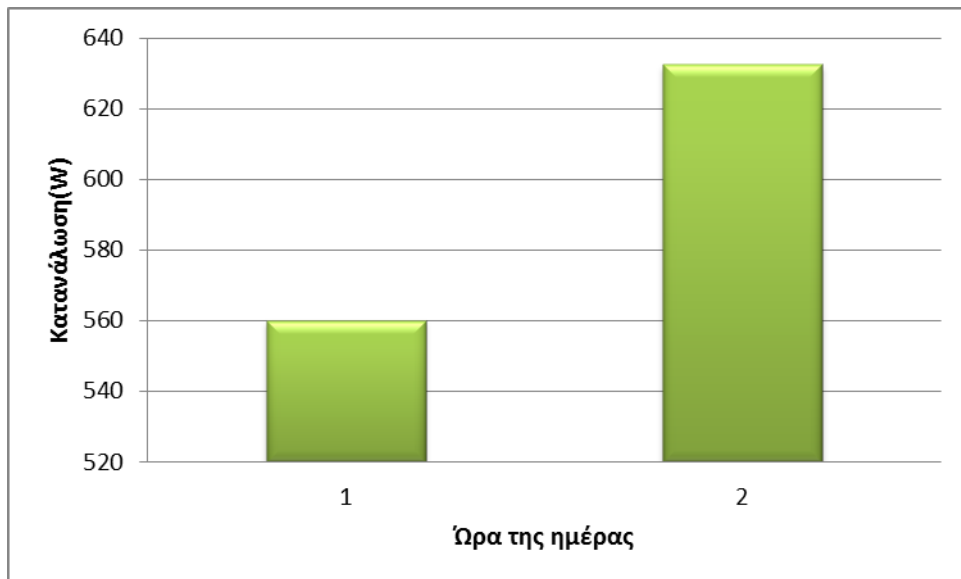


- Στεγνωτήριο ρούχων:



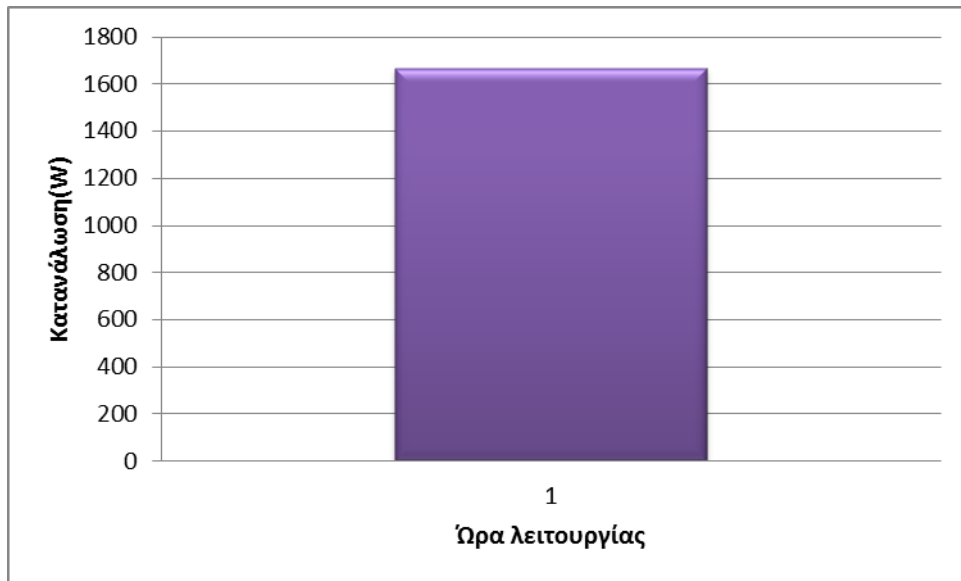
Γράφημα 10: Προφίλ λειτουργίας στεγνωτήριου ρούχων

- Πλυντήριο πιάτων:



Γράφημα 11: Προφίλ λειτουργίας πλυντηρίου πιάτων

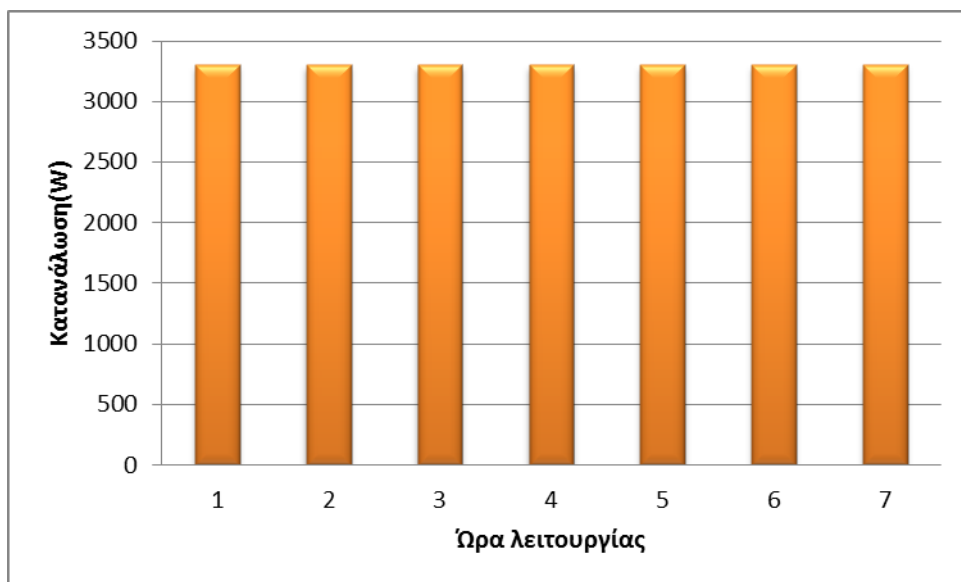
- Θερμοσίφωνο:



Γράφημα 12: Προφίλ λειτουργίας θερμοσίφωνου

Το θερμοσίφωνο θα μπορούσε επίσης να θεωρηθεί μία συσκευή που η λειτουργία της είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Στα πλαίσια της διπλωματικής θεωρούμε ότι πρόκειται για ένα ελεγχόμενο φορτίο και ακόμη θεωρούμε ότι από τη στιγμή που θα τεθεί σε λειτουργία η θερμοκρασία του νερού δεν μειώνεται σημαντικά για τις επόμενες 4 ώρες.

- Ηλεκτρονικό αυτοκίνητο:



Γράφημα 13: Προφίλ φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου

Ο διάλογος για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα στην επιστημονική κοινότητα έχει ανοίξει εδώ και αρκετά χρόνια καθώς η μόλυνση του περιβάλλοντος και η υπέρμετρη χρήση των συμβατικών πηγών ενέργειας θέτουν όλο και πιο επιτακτικά το ζήτημα αντικατάστασης των συμβατικών αυτοκινήτων. Η Ευρωπαϊκή επιτροπή από το 2010 τρέχει προγράμματα που ενθαρρύνουν ερευνητές και κατασκευαστές να καταπιαστούν με το ηλεκτρικό αυτοκίνητο, όπως αναφέρεται και στα reports που εκδίδονται [19]. Από εκεί και πέρα, το ηλεκτρικό αυτοκίνητο λαμβάνεται σοβαρά υπόψη σχεδόν σε όλη τη διεθνή βιβλιογραφία για το demand response [20], καθώς είναι ένα σχετικά μεγάλο οικιακό φορτίο και η ευελιξία στη φόρτιση του θα αποτελεί σημαντικό κομμάτι της ημερήσιας καμπύλης «ενός έξυπνου σπιτιού».

### **2.3. Βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενός «έξυπνου σπιτιού»**

Από το προηγούμενο κεφάλαιο καταλαβαίνουμε ότι μπορούμε να χωρίσουμε τα φορτία ενός σπιτιού σε ελεγχόμενα και μη ελεγχόμενα. Το ερώτημα που τίθεται λοιπόν είναι πότε θα «μπουν» τα ελεγχόμενα φορτία, με ποια κριτήρια και ποιους περιορισμούς.

#### **2.3.1. Το μαθηματικό πρόβλημα της βελτιστοποίησης**

Ο πρώτος περιορισμός που θα μπορούσε να σκεφτεί κανείς είναι η διάθεση και ο σχεδιασμός του καταναλωτή. Σε τελική ανάλυση οι διάφορες συσκευές υπάρχουν και χρησιμοποιούνται για να βελτιώνουν την άνεση του καταναλωτή ο οποίος μπορεί να θέσει εάν το επιθυμεί περιορισμό σε ένα ελεγχόμενο φορτίο: το χρονικό παράθυρο ωρών μέσα στο οποίο θέλει να μπει το φορτίο.

Όπως αναφέραμε και στο πρώτο κεφάλαιο, σκοπός της διαχείρισης ζήτησης είναι η αλλαγή της ημερήσιας καμπύλης φορτίου του ηλεκτρικού δικτύου. Τα οφέλη από την εξομάλυνση της καμπύλης ζήτησης είναι πολλαπλά και είναι λογικό να σκεφτούμε ότι ο οργανισμός που θα αναλάβει να οργανώσει τη διαχείριση ζήτησης θα θέλει, σε συνεννόηση με τον εκάστοτε καταναλωτή, να θέσει όρια ισχύος στην ωριαία κατανάλωση. Εφόσον λοιπόν υπάρχει η ανταποδοτική συμμετοχή του καταναλωτή σε ένα πρόγραμμα διαχείρισης ζήτησης, άλλος ένας περιορισμός της κατανάλωσης, ο οποίος μπορεί να ισχύει μόνο για τα ελεγχόμενα φορτία ή συνολικά για την κατανάλωση είναι το ωριαίο ανώτατο όριο ισχύος. Άλλωστε, μπορούμε να σκεφτούμε ότι αν δεν υπάρχει όριο ισχύος, η διαφορετική τιμολόγηση μέσα στη μέρα θα δημιουργήσει νέα αιχμή στην οικονομικότερη ώρα της ημέρας και άρα δεν θα πετύχει τον αρχικό σκοπό: την εξομάλυνση της καμπύλης ζήτησης.

Η βελτιστοποίηση λοιπόν της κατανάλωσης πρέπει σίγουρα να λαμβάνει υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς. Από εκεί και πέρα, όπως αναφέραμε και στο πρώτο κεφάλαιο, ένας τρόπος για να εφαρμόσεις ένα πρόγραμμα απόκρισης ζήτησης είναι τιμολογώντας διαφορετικά την ηλεκτρική ενέργεια μέσα στην ημέρα. Με αυτό τον τρόπο ωθείς τους καταναλωτές να ανταποκριθούν σε αυτό το πλαίσιο και να αλλάξουν την καμπύλη ζήτησης τους. Άρα λοιπόν, για όποια μέθοδο τιμολόγησης και να μιλάμε, τα ελεγχόμενα φορτία θα μπορούσαν να μετακινούνται σε απόκριση με την τιμολόγηση και αυτό είναι το κριτήριο για το πότε θα μπει ένα ελεγχόμενο φορτίο. Φυσικά, πέρα από τα ελεγχόμενα

φορτία, ο καταναλωτής μπορεί είτε χειροκίνητα είτε μέσω ενός έξυπνου ελεγκτή να ανταποκρίνεται σε αυτά τα σήματα τιμής προσαρμόζοντας και τα σταθερά φορτία.

Όλα τα παραπάνω μας οδηγούν στη σκέψη ότι η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενός «έξυπνου» σπιτιού μπορεί να διατυπωθεί ως ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Ο γραμμικός προγραμματισμός έχει ως στόχο την εύρεση της βέλτιστης λύσης μίας γραμμικής συνάρτησης, λύση η οποία πρέπει να είναι συμβατή με ένα πεπερασμένο σύνολο γραμμικών ανισοτήτων. Θεωρείται σαν μια από τις πιο σπουδαίες μαθηματικές ανακαλύψεις των μέσων χρόνων του εικοστού αιώνα και στις μέρες μας αποτελεί ένα μοντέλο ευρείας χρήσης για καθημερινά ζητήματα των περισσότερων μεσαίου και μεγάλου μεγέθους εμπορικών - βιομηχανικών εταιρειών. Ο όρος προγραμματισμός δεν έχει την έννοια του «προγραμματισμού ηλεκτρονικών υπολογιστών» αλλά αυτήν του σχεδιασμού. Ο γραμμικός προγραμματισμός ασχολείται με τη σχεδίαση των δραστηριοτήτων του συστήματος που περιγράφει για να προκύψει το άριστο αποτέλεσμα, το αποτέλεσμα δηλαδή εκείνο, που μεταξύ όλων των δυνατών εναλλακτικών λύσεων πετυχαίνει τον προκαθορισμένο σκοπό κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Η βελτιστοποίηση λοιπόν πρέπει να αποφασίσει ποια ώρα θα μπει κάθε ελεγχόμενο φορτίο. Πιο συγκεκριμένα, το  $i$ -οστό φορτίο μπορεί να μπει σε μία από τις εικοσιτέσσερις ώρες της ημέρας. Έτσι δημιουργείται λοιπόν η μεταβλητή απόφασης  $U_{ij}$  η οποία μπορεί να πάρει τις τιμές 0 ή 1, και δείχνει αν το φορτίο  $i$  θα τεθεί ή όχι σε λειτουργία την ώρα  $j$ . Αυτή η θεώρηση μας οδηγεί σε μία υποκατηγορία των προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού, αυτή των προβλημάτων μικρού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα προβλήματα που οι άγνωστοι τους είναι ακέραιοι αριθμοί. Μάλιστα, στη περίπτωση μας, που οι άγνωστοι είναι δυαδικοί αριθμοί (0 ή 1), τότε συνηθίζεται να ονομάζονται μεταβλητές απόφασης.

Ο στόχος της βελτιστοποίησης θα μπορούσε να είναι η ελαχιστοποίηση του τιμολογίου του καταναλωτή. Το λογισμικό που θα αναλάβει τη βελτιστοποίηση πρέπει να βρει τη βέλτιστη λύση για τις μεταβλητές απόφασης (και άρα πότε θα μπει κάθε φορτίο) συνυπολογίζοντας την τιμολόγηση και τους περιορισμούς.

Αφού λοιπόν έχουμε περιγράψει και τους περιορισμούς στους οποίους υπόκειται η βελτιστοποίηση και τον στόχο της βελτιστοποίησης, μπορούμε να καταλήξουμε στη διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης:

$$\min \sum_{m=1}^M \sum_{i=I_{Sm}}^{I_{Em}-N_m} \left\{ \sum_{n=i}^{i+N_m-1} P_m[n-i] * C[n] \right\} * u_{mi}$$

Υπό τους περιορισμούς:

$$\sum_{i=I_{Sm}}^{I_{Em}-N_m} u_{mi} = 1$$

$$\sum_{m \in M_k} \left\{ \sum_{i=(k-(N_m-1))^{I_{sm}}}^{k-(k-I_{Em}+N_m)^+} P_m[k-i] * u_{mi} \right\} \leq P_k - SL[k], \text{ όπου:}$$

$$k = S, S + 1, \dots, E - 1$$

$$M_k = \{m: I_{Sm} \leq k \leq I_{Em} - 1\}$$

Προτού περιγράψουμε την διατύπωση ας δώσουμε έναν πίνακα με τα σύμβολα και τους ορισμούς τους:

M	Αριθμός φορτίων
P <sub>m</sub>	Ισχύς του φορτίου m
N <sub>m</sub>	Διάρκεια του φορτίου m(ώρες)
I <sub>sm</sub>	Έναρξη χρονικού παραθύρου του φορτίου m
I <sub>Em</sub>	Λήξη χρονικού παραθύρου του φορτίου m
S	Η μικρότερη τιμή των I <sub>sm</sub> των φορτίων
E	Η μέγιστη τιμή των I <sub>Em</sub> των φορτίων
C	Ο πίνακας τιμολόγησης μέσα στο εικοσιτετράωρο(€/kWh)
u <sub>mi</sub>	Η μεταβλητή απόφασης για το φορτίο m την ώρα i
SL	Ο πίνακας κατανάλωσης των σταθερών φορτίων
P <sub>k</sub>	Ο πίνακας με τα όρια ισχύος

Πίνακας 1:Ορισμοί των συμβόλων του μαθηματικού προβλήματος

Η πρώτη εξίσωση αθροίζει την χρέωση σαν να έμπαιναν όλα τα φορτία όλες τις ώρες της ημέρας. Ακολούθως, ο πρώτος περιορισμός απαιτεί για κάθε φορτίο m το άθροισμα των μεταβλητών απόφασης μέσα στη μέρα να ισούται με 1. Επειδή ακριβώς οι μεταβλητές απόφασης είναι δυαδικές, η βελτιστοποίηση πρέπει να εξασφαλίσει ότι για κάθε φορτίο μόνο μία μεταβλητή απόφασης θα ισούται με 1. Έτσι ορίζει ως ίσες με 1 εκείνες τις μεταβλητές που ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος. Όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές απόφασης είναι 0, και επειδή πολλαπλασιάζουν τα αντίστοιχα κόστη, στο τέλος μένει το πραγματικό κόστος.

Ο δεύτερος περιορισμός φροντίζει έτσι ώστε το άθροισμα των φορτίων που θα μπουν να μην υπερβαίνουν τα όρια ισχύος, τα οποία μειώνονται λόγω της κατανάλωσης των σταθερών φορτίων.

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς όλες οι παράμετροι και οι μεταβλητές του προβλήματος είναι πίνακες, και μάλιστα μονοδιάστατοι εκτός από τις μεταβλητές απόφασης. Καταρτίζοντας λοιπόν ένα υπολογιστικό φύλλο(π.χ. του excel) με τα αντίστοιχα νούμερα μπορεί κανείς να λύσει αυτό το πρόβλημα σε ένα λογισμικό βελτιστοποίησης.

Άλλος ένας στόχος της βελτιστοποίησης θα μπορούσε να είναι η μεγιστοποίηση της αυτοκατανάλωσης. Όπως γνωρίζουμε τα τελευταία χρόνια, στα πλαίσια της έκρηξης της αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι πλέον σύνηθες οικίες και βιομηχανίες να έχουν τοπική παραγωγή ΑΠΕ. Η παραγωγή των ΑΠΕ δεν είναι ελεγχόμενη αλλά εξαρτάται από φυσικούς παράγοντες (ηλιοφάνεια για φωτοβολταϊκά, άνεμος για αιολικά κτλ) και άρα τα ελεγχόμενα φορτία μπορούν να μετακινούνται προκειμένου να έχουμε μέγιστη αξιοποίηση της τοπικής παραγωγής.

Η διατύπωση αυτού του μαθηματικού προβλήματος είναι ίδια με αυτή του προηγούμενου εκτός από τον εξής επιπλέον περιορισμό:

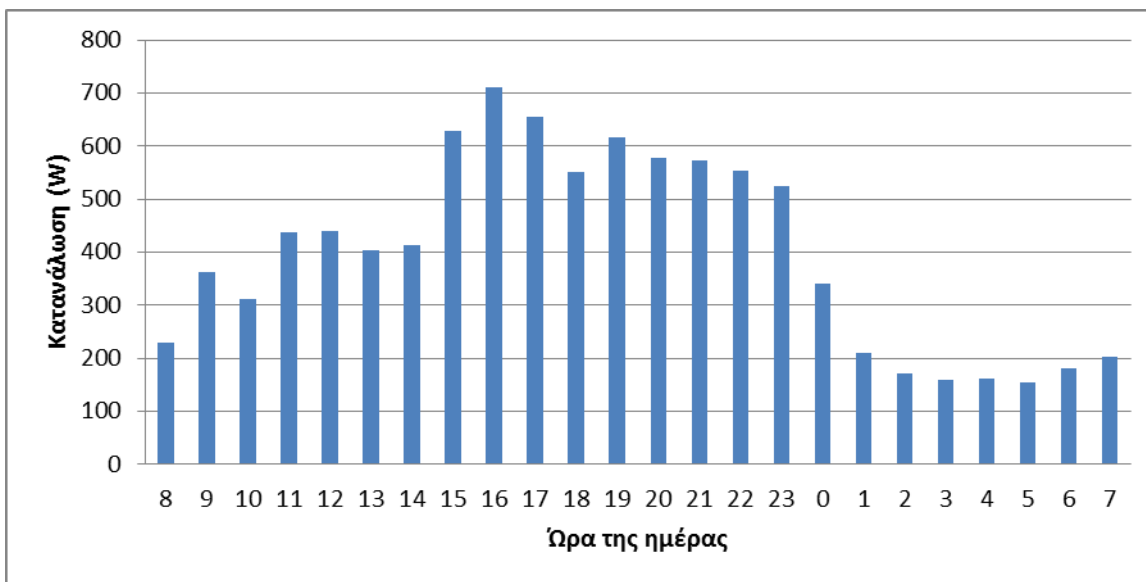
$$\sum_{m \in M_k} \left\{ \sum_{i=(k-(N_m-1))I_{sm}}^{k-(k-I_{Em}+N_m)^+} P_m[k-i] * u_{mi} \right\} \geq P_{prod} - SL[k]$$

Ο περιορισμός αυτός προσπαθεί να εξασφαλίσει ότι το άθροισμα σταθερών και μεταβλητών φορτίων θα ξεπερνάει την τοπική παραγωγή. Αυτό φυσικά δεν είναι πάντα δυνατό οπότε αυτός ο περιορισμός τίθεται υπό «χαλάρωση»(relaxation). Με άλλα λόγια η βελτιστοποίηση προσπαθεί να το επιτύχει, αλλά αν αυτό δεν είναι εφικτό για όλες τις όλες ώρες, συνεχίζει η βελτιστοποίηση προσπαθώντας να το τηρήσει για όσες περισσότερες ώρες γίνεται.

Στην επόμενη ενότητα θα τρέξουμε διάφορες εφαρμογές βελτιστοποίησης προκειμένου να καταδείξουμε τις δυνατότητες του γραμμικού προγραμματισμού ως εργαλείο για τη διαχείριση ζήτησης. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το CPLEX, ένα λογισμικό υψηλής απόδοσης της IBM που θεωρείται από τα πιο αξιόπιστα. Στις εφαρμογές αυτές θα χρησιμοποιηθεί το προφίλ ζήτησης που περιγράφηκε στη προηγούμενη ενότητα και θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τις διάφορες μορφές τιμολόγησης της απόκρισης ζήτησης. Οι βελτιστοποιήσεις θα έχουν στόχο είτε την ελαχιστοποίηση του κόστους είτε την μεγιστοποίηση της αυτοκατανάλωσης.

### 2.3.2. Βελτιστοποίηση της οικιακής κατανάλωσης-εφαρμογές

Για να είναι πιο κοντά στη πραγματικότητα η βελτιστοποίηση θα θεωρούμε ότι ξεκινάει στις 7 το πρωί (όταν ξυπνάει ο καταναλωτής) και ο σχεδιασμός γίνεται για τις επόμενες 24 ώρες. Στις εφαρμογές που ακολουθούν θα χρησιμοποιήσουμε το προφίλ ζήτησης που παρουσιάστηκε στη προηγούμενη ενότητα. Πιο συγκεκριμένα τα σταθερά φορτία του «έξυπνου σπιτιού» αθροιστικά διαμορφώνουν την εξής καμπύλη:



Γράφημα 14: Ημερήσια καμπύλη ζήτησης σταθερών φορτίων

Ακόμη, στην βελτιστοποίηση πρέπει να προγραμματιστούν τα εξής μεταβλητά φορτία:

- Πλυντήριο ρούχων
- Πλυντήριο πιάτων
- Θερμοσίφωνο
- Ηλεκτρικό αυτοκίνητο

Οι καμπύλες κατανάλωσης των φορτίων αυτών δόθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Ο προγραμματισμός των φορτίων χωρίς βελτιστοποίηση αλλά και το χρονικό παράθυρο μέσα στο οποίο πρέπει η βελτιστοποίηση να χρονοδρομολογήσει τα φορτία φαίνονται στον επόμενο πίνακα:

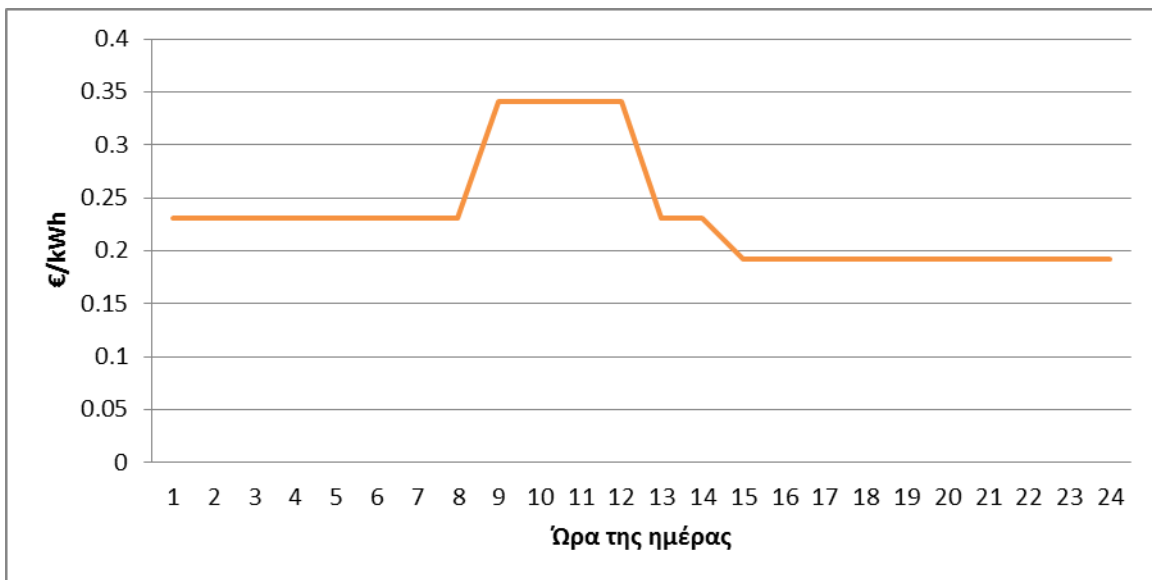
Φορτίο	Ώρα έναρξης (χωρίς βελτιστοποίηση)	Χρονικό παράθυρο (με βελτιστοποίηση)
Πλυντήριο Ρούχων	16:00	8:00-18:00
Πλυντήριο Πιάτων	17:00	17:00-20:00
Θερμοσίφωνο	16:00	15:00-18:00
Ηλεκτρικό αυτοκίνητο	22:00	17:00-6:00

Πίνακας 2: Ημερήσιος σχεδιασμός μεταβλητών φορτίων χωρίς/με βελτιστοποίηση

Προκειμένου να έχουμε ένα μέτρο σύγκρισης, θα τρέξουμε ένα σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση, στο οποίο θα υποθέσουμε κάποιες εύλογες ώρες για να μπουν αυτά τα μεταβλητά φορτία. Ύστερα, αφού υποθέσουμε και το χρονικό παράθυρο μέσα στο οποίο μπορεί να κινηθεί κάθε μεταβλητό φορτίο, θα συγκρίνουμε το κόστος και τη μορφή της καμπύλης ημερήσιας ζήτησης χωρίς και με βελτιστοποίηση. Αυτό θα γίνει για δύο μεθόδους τιμολόγησης:

➤ Βάσει της ώρας χρήσης (Time Of Use)

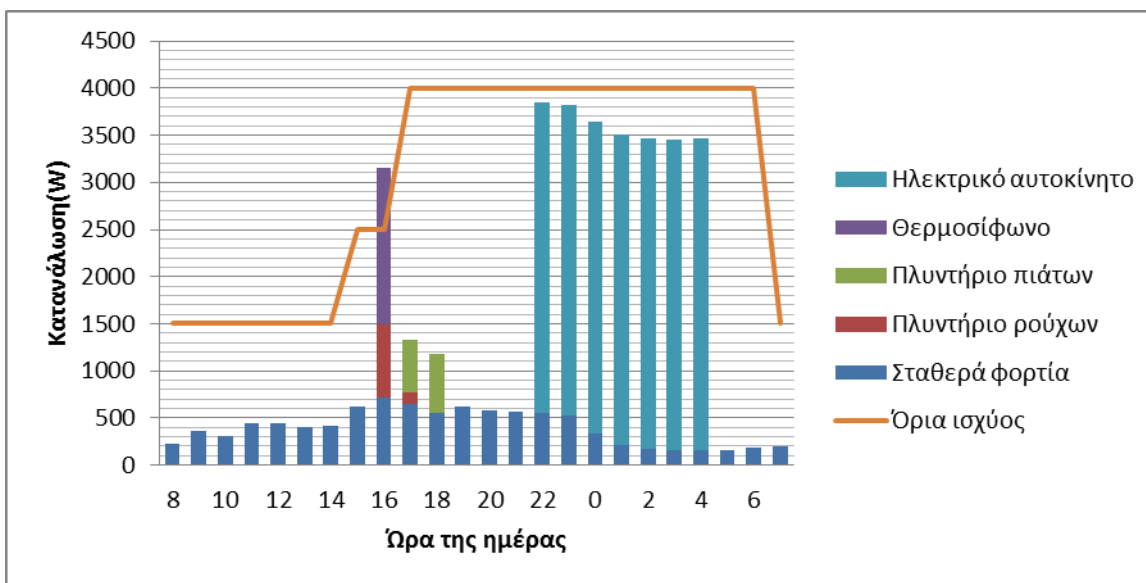
Όπως αναφέραμε και στην πρώτη ενότητα, αυτή η τιμολογιακή πολιτική χωρίζει τη μέρα σε διαφορετικά τμήματα, και χρέωση αλλάζει προκειμένου να ανταποκρίνεται στο κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τιμές της κιλοβατώρας που επιλέξαμε διαμορφώνουν την εξής καμπύλη:



Γράφημα 15: Ημερήσια καμπύλη χρέωσης-TOU

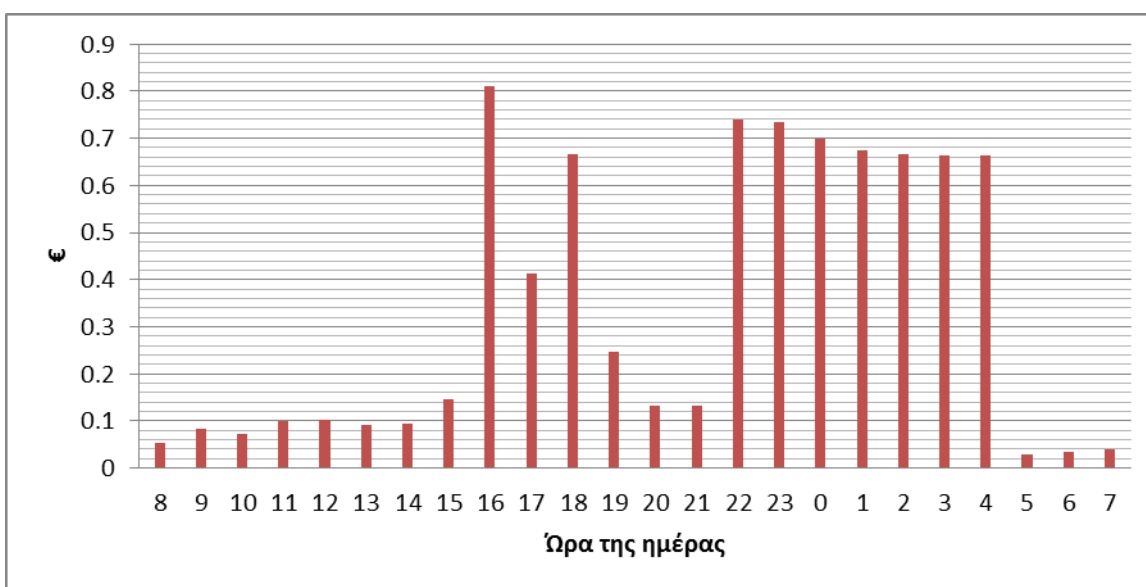


Η καμπύλης ημερήσιας ζήτησης που διαμορφώνεται χωρίς βελτιστοποίηση από το άθροισμα σταθερών και μεταβλητών φορτίων έχει ως εξής:



Γράφημα 16:Τελική καμπύλη ημερήσιας ζήτησης χωρίς βελτιστοποίηση

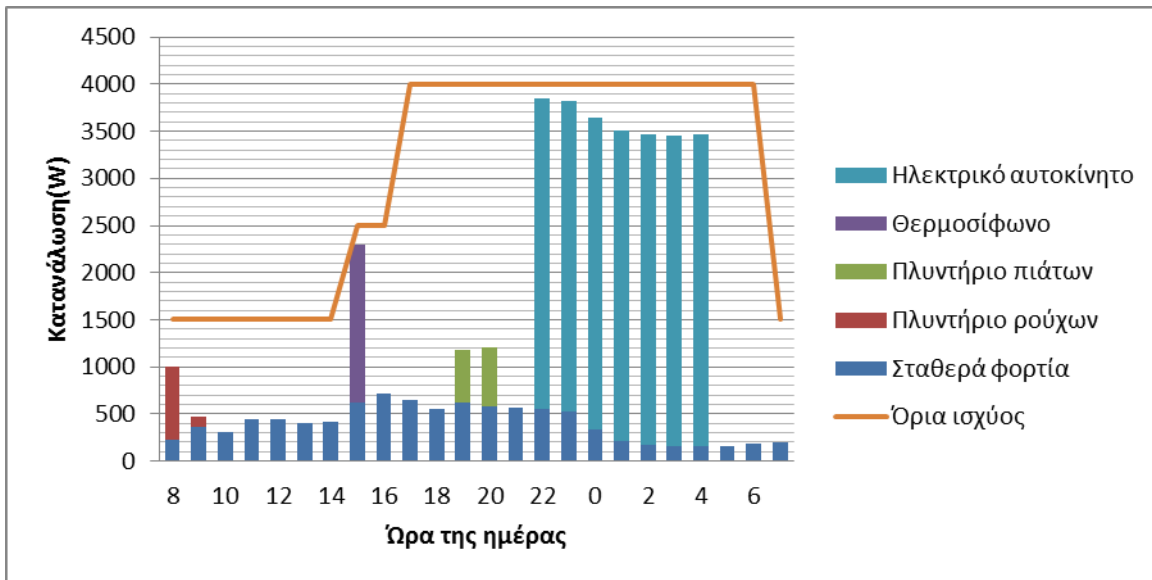
Η χρέωση που προκύπτει για τη συγκεκριμένη καμπύλη έχει ως εξής:



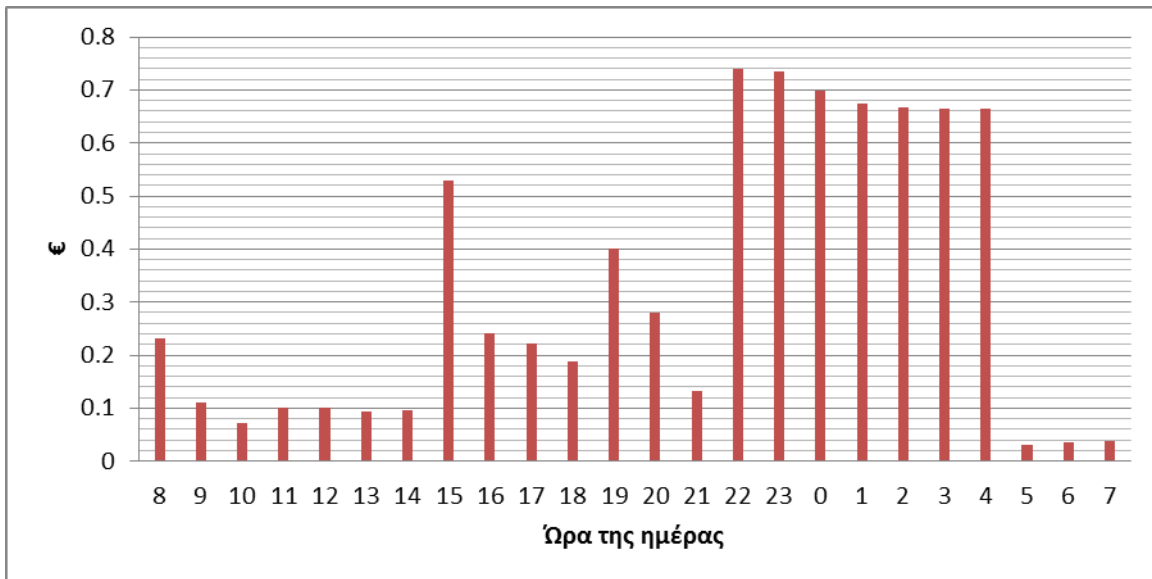
Γράφημα 17:Καμπύλη ημερήσιου κόστους κατανάλωσης χωρίς βελτιστοποίηση(ΤΟΥ)

Το συνολικό κόστος είναι 8,09€

Προχωρήσαμε στη βελτιστοποίηση θέτοντας τα όρια ισχύος που παρουσιάζονται παρακάτω. Η καμπύλη ζήτησης που προκύπτει με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους, μαζί με την καμπύλη κόστους που προκύπτει παρουσιάζονται στις επόμενες γραφικές παραστάσεις:



Γράφημα 18:Τελική καμπύλη ημερήσιας ζήτησης με βελτιστοποίηση(ΤΟΥ)



Γράφημα 19:Καμπύλη ημερήσιου κόστους με βελτιστοποίηση(ΤΟΥ)

Το συνολικό κόστος είναι 7,74€.

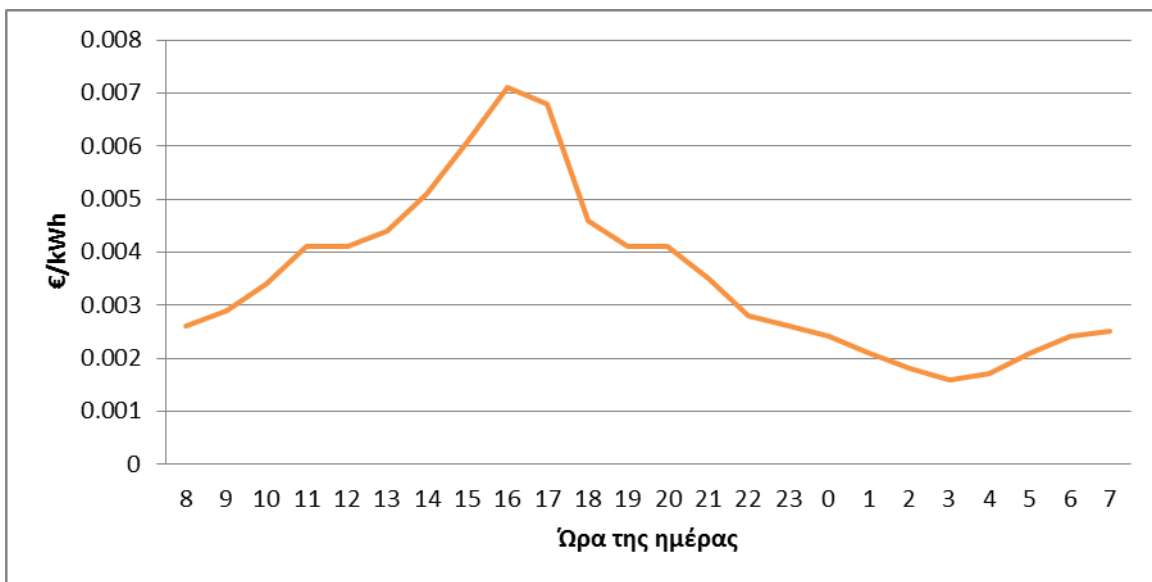
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα και τις γραφικές παραστάσεις μπορούμε να βγάλουμε κάποια πρώτα συμπεράσματα:

- Το οικονομικό όφελος του καταναλωτή είναι 4,31%. Αυτό το νούμερο είναι σχετικά μικρό αν σκεφτεί κανείς ότι μιλάμε για μία υποδομή η οποία θα πρέπει να εγκατασταθεί σε ένα «έξυπνο σπίτι» και θα έχει αναγκαστικά κάποιο κόστος. Αυτό μας βάζει σε σκέψεις καθώς υπάρχει η πιθανότητα η βελτιστοποίηση αυτή να μην χρησιμεύει αρκετά για μικρούς καταναλωτές με σχετικά μικρά ελεγχόμενα φορτία.

- Όπως παρατηρούμε από την καμπύλη ημερήσιας ζήτησης πριν και μετά την βελτιστοποίηση, η προσπάθεια για εύρεση της οικονομικότερης λύσης οδήγησε στο να μπουν όσο το δυνατό λιγότερα φορτία τις ώρες με την υψηλότερη χρέωση(16:00-19:00). Άρα, η βελτιστοποίηση ανταποκρίνεται μπορεί να βοηθήσει «το έξυπνο σπίτι» να ανταποκριθεί στην απόκριση ζήτησης με τον βέλτιστο τρόπο. Παρόλα αυτά, η φόρτιση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι ένα φορτίο αρκετά μεγαλύτερο από τα υπόλοιπα φορτία, και όπως βλέπουμε στην γραφική παράσταση αρκεί από μόνο του για τη δημιουργία αιχμής στην ημερήσια καμπύλη ζήτησης.
- Τα όρια ισχύος τέθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπουν στα φορτία να μπουν μέσα στα χρονικά παράθυρα που δίνει ο χρήστης. Από εκεί και πέρα η βελτιστοποίηση θα βάλει τα φορτία εκείνες τις ώρες ώστε να εξασφαλίσει το ελάχιστο κόστος.

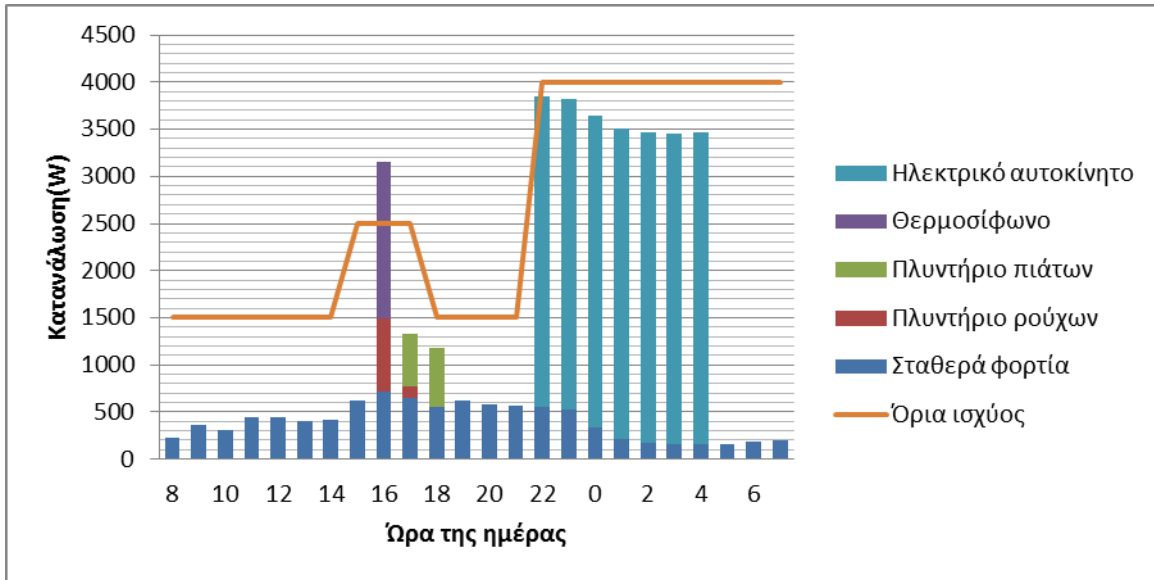
➤ Πραγματικού χρόνου(Real Time Pricing)

Όπως έχουμε αναφέρει και στο πρώτο κεφάλαιο, αυτή η μέθοδος τιμολόγησης έχει σκοπό να αλλάζει τη χρέωση της κιλοβατώρας μέσα στη μέρα προκειμένου να ανταποκρίνεται στο κόστος παραγωγής που υπάρχει κάθε ώρα. Μία εταιρία που εφαρμόζει τέτοια προγράμματα ζήτησης στην Αμερική [21] ,προβλέπει και ανακοινώνει την καμπύλη τιμολόγησης την προηγούμενη μέρα. Από εκεί και πέρα, σε όλη τη διάρκεια του επόμενου 24ώρου οι καταναλωτές ενημερώνονται κάθε ώρα για την πραγματική τιμή της επόμενης ώρας. Για αυτήν την βελτιστοποίηση λοιπόν, διαλέξαμε την καμπύλη μίας συγκεκριμένης μέρας όπως την δίνει η εταιρία:



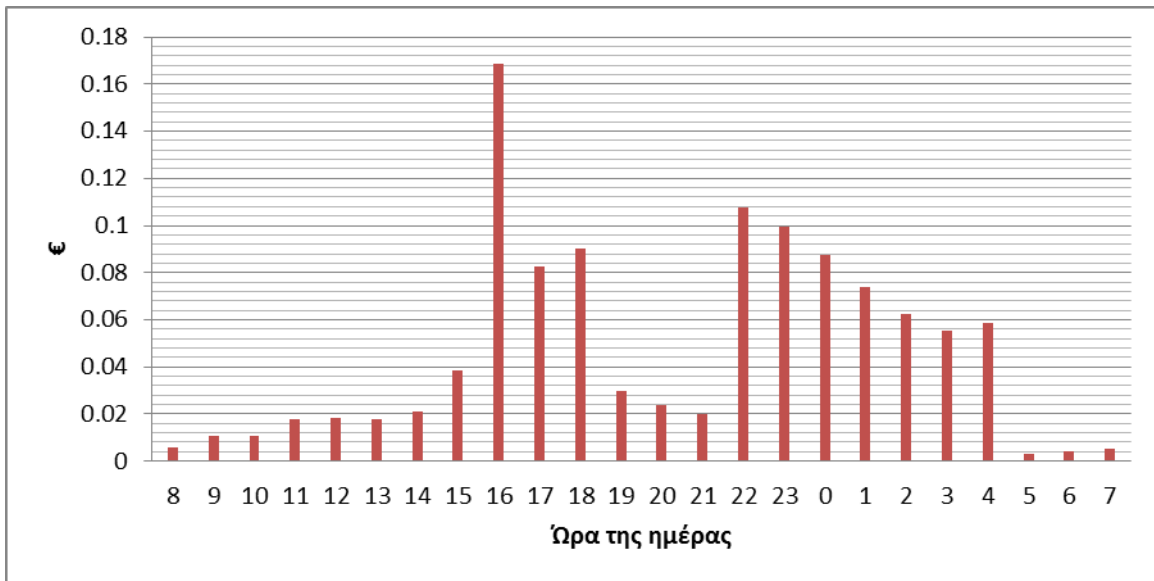
Γράφημα 20: Ημερήσια καμπύλη χρέωσης(RTP)

Η καμπύλη ζήτησης, με το σενάριο που έχουμε υποθέσει χωρίς βελτιστοποίηση, παραμένει φυσικά ίδια. Για να είναι πιο εύκολο να συγκριθούν οι γραφικές, παρατίθεται ξανά:



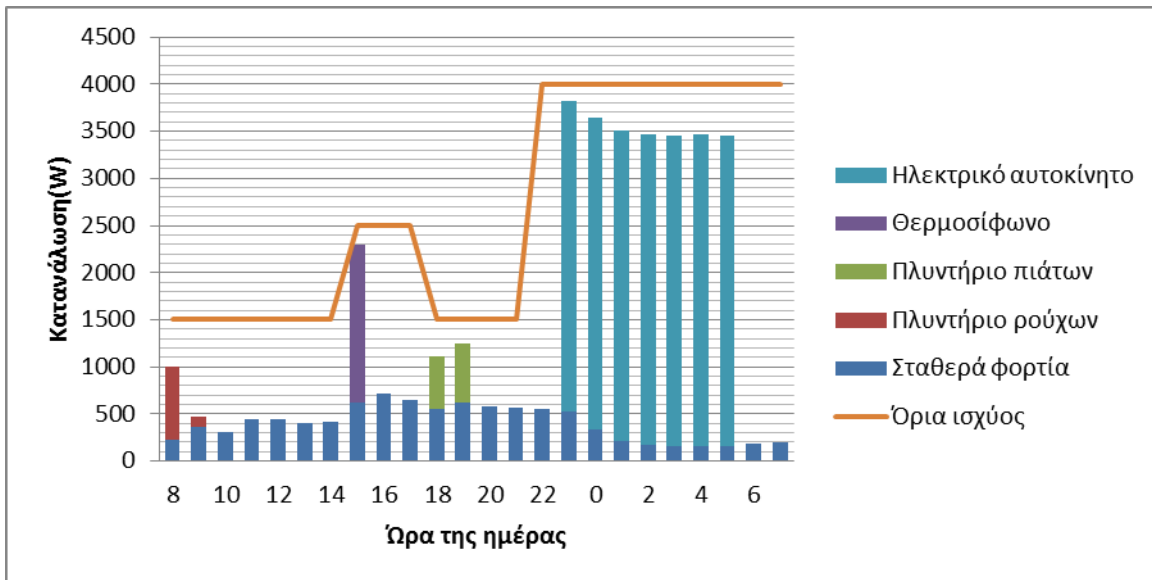
Γράφημα 21:Τελική καμπύλη ημερήσιας ζήτησης χωρίς βελτιστοποίηση

Η χρέωση που προκύπτει για τη συγκεκριμένη καμπύλη ζήτησης έχει ως εξής:

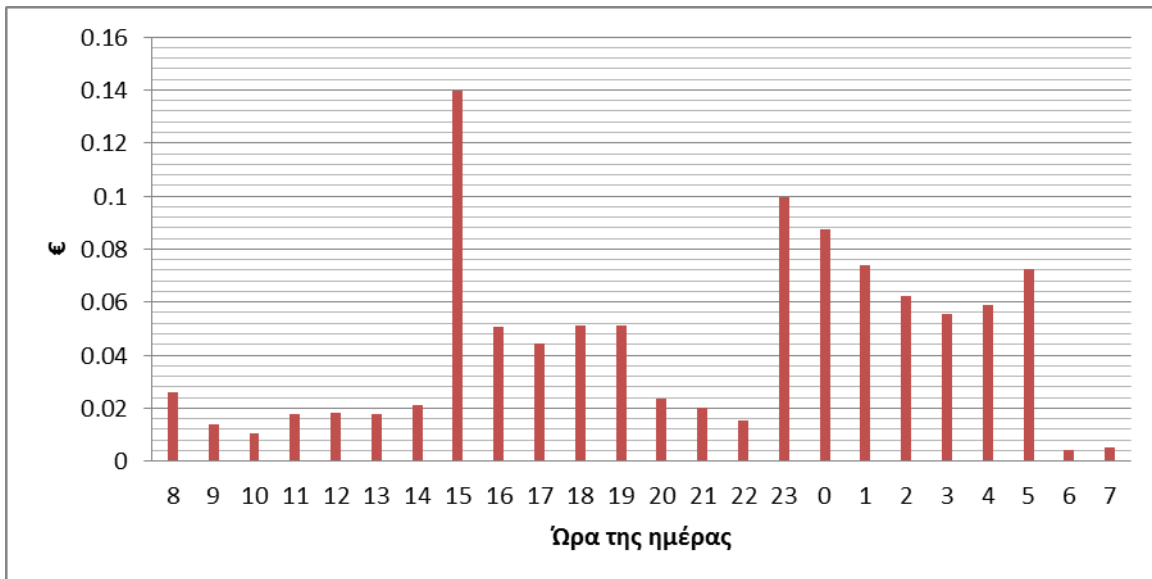


Γράφημα 22:Καμπύλη ημερήσιου κόστους κατανάλωσης χωρίς βελτιστοποίηση(RTP)

Το συνολικό κόστος είναι 1,13 \$. Το ποσό αυτό δεν είναι προφανώς η μόνη χρέωση στο λογαριασμό. Εμείς το κρατάμε ως έχει για μέτρο σύγκρισης. Τρέχοντας τη βελτιστοποίηση προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:



Γράφημα 23:Τελική καμπύλη ημερήσιας ζήτησης με βελτιστοποίηση(RTP)



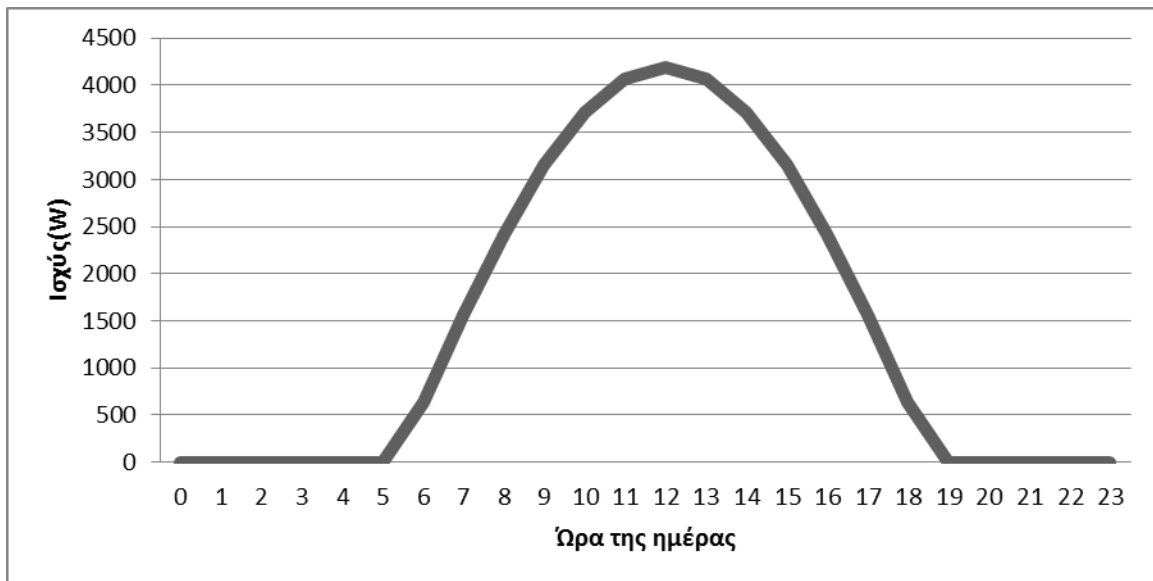
Γράφημα 24:Καμπύλη ημερήσιου κόστους κατανάλωσης με βελτιστοποίηση(RTP)

Το συνολικό κόστος είναι 1,04 \$.

Η διαφορά προ και μετά βελτιστοποίησης είναι 16,8%. Να σημειώσουμε εδώ ότι η μέθοδος τιμολόγησης (Real Time Pricing) έχει διαφορετική χρέωση της κιλοβατώρας για κάθε ώρα. Για αυτό ακριβώς τον λόγο αφήνει γενικά μεγαλύτερα περιθώρια εξοικονόμησης σε σχέση με την μέθοδο Time Of Use η οποία στην ουσία έχει 3 διαφορετικές χρεώσεις μέσα στη μέρα, αφού χωρίζει την μέρα σε 3 ζώνες.

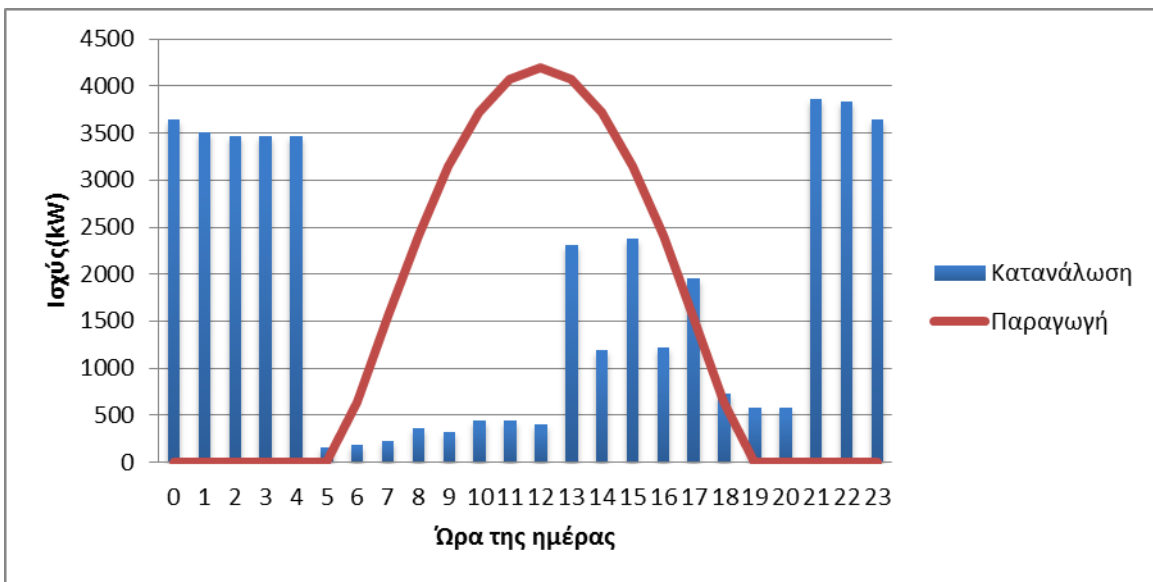
Πριν περάσουμε στην επόμενη ενότητα, όπου θα παρουσιάσουμε το ρόλο του aggregator και πως θα μπορούσε να βοηθήσει η βελτιστοποίηση στο δικό του κομμάτι, θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα άλλης μίας εφαρμογής. Θα χρησιμοποιήσουμε το προηγούμενο προφίλ ζήτησης, με τη

προσθήκη ενός ακόμη ελεγχόμενου φορτίου, και θα ζητήσουμε από το πρόγραμμα βελτιστοποίησης να μεγιστοποιήσει την αυτοκατανάλωση. Η φωτοβολταϊκή παραγωγή που θα υποθέσουμε φαίνεται στην επόμενη καμπύλη:



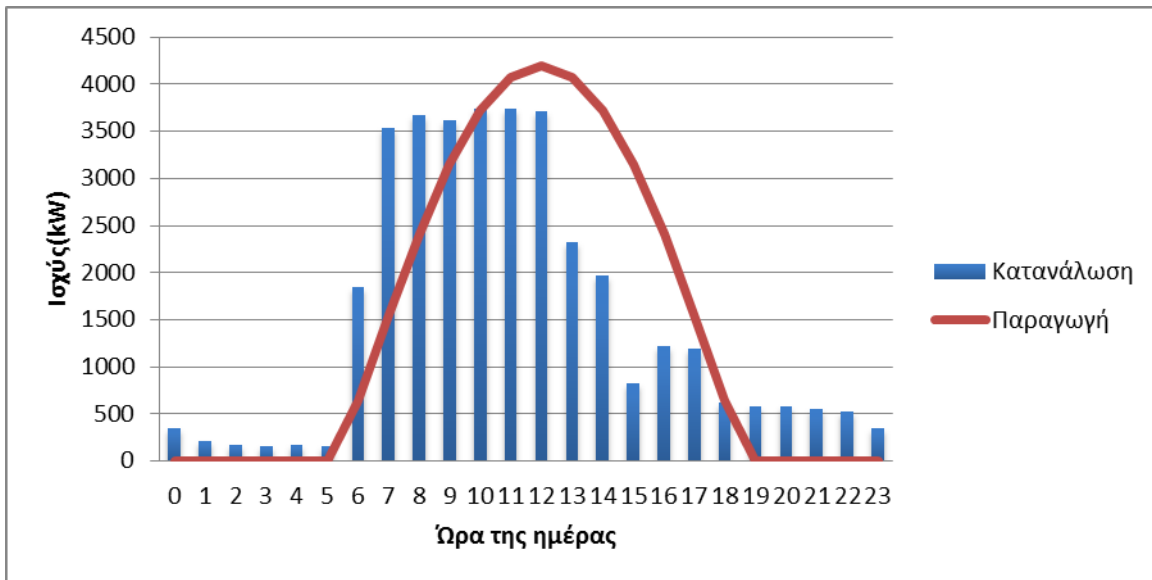
Γράφημα 25: Ημερήσια φωτοβολταϊκή παραγωγή

Με το προηγούμενο προφίλ ζήτησης λοιπόν μπορούμε να δούμε την αξιοποίηση της παραγωγής στο επόμενο γράφημα:



Γράφημα 26: Αξιοποίηση της τοπικής παραγωγής χωρίς βελτιστοποίηση

Οι ώρες που έχουμε φωτοβολταϊκή παραγωγή είναι από τις 6:00 έως τις 18:00. Ως χρονικό παράθυρο θα θεωρήσουμε όλο το εικοσιτετράωρο, προκειμένου να δείξουμε τη χρησιμότητα της βελτιστοποίησης για τη λύση αυτού του προβλήματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο επόμενο γράφημα:



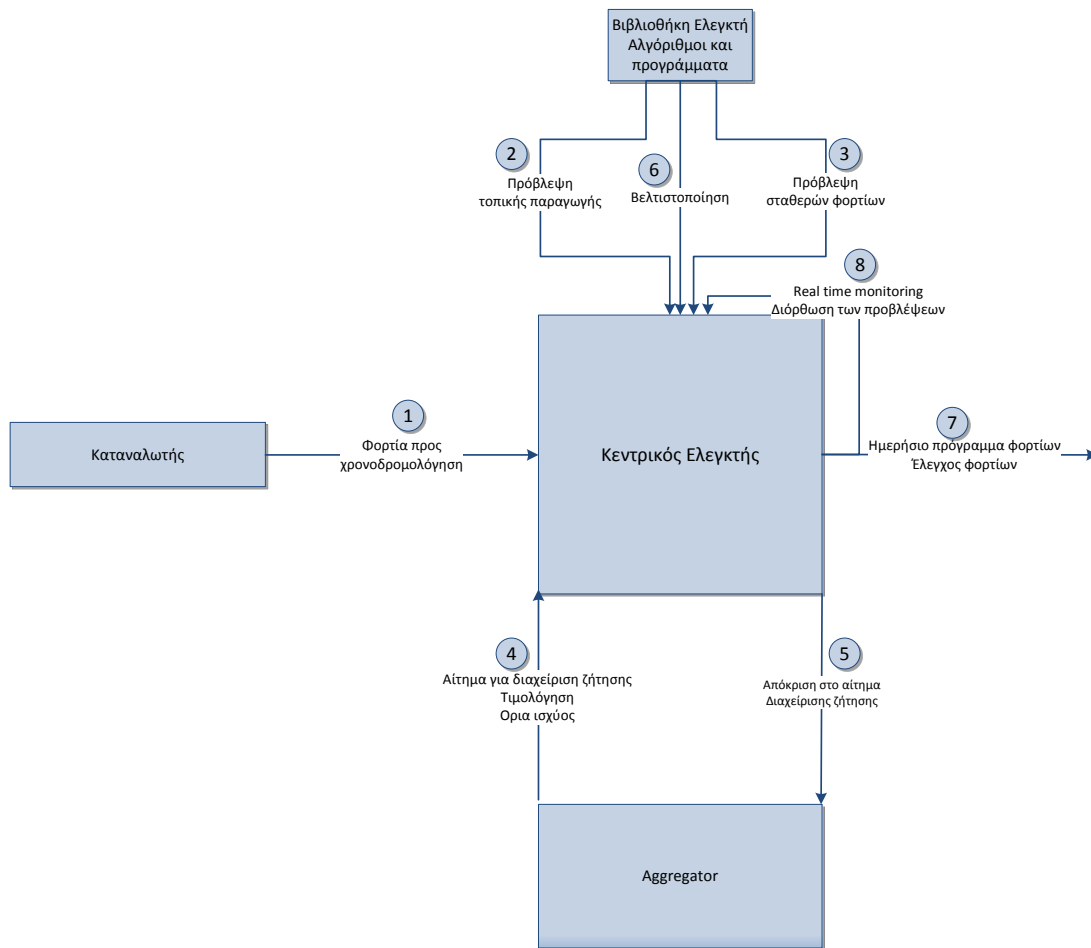
Γράφημα 27: Αξιοποίηση της τοπικής παραγωγής μετά τη βελτιστοποίηση

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η βελτιστοποίηση προσπαθεί να εκμεταλλευτεί τη Φωτοβολταϊκή παραγωγή μετακινώντας τα φορτία εντός της παραγωγής. Φυσικά το κατά πόσο το πετυχαίνει σχετίζεται και με το πόσα ελεγχόμενα φορτία υπάρχουν αλλά και με τις τιμές που θα τύχει να έχουν τα σταθερά φορτία και η παραγωγή.

Από τις προηγούμενες εφαρμογές φαίνεται ότι ο γραμμικός προγραμματισμός σαν εργαλείο μπορεί να βοηθήσει έτσι ώστε ένας οικιακός καταναλωτής να ανταποκριθεί με τον καλύτερο τρόπο σε ένα πρόγραμμα διαχείρισης ζήτησης. Γυρνώντας λοιπόν στο μοντέλο ενός «έξυπνου σπιτιού», ένας σύγχρονος ελεγκτής θα έχει τη δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας με το ΣΗΕ, και φυσικά τη δυνατότητα συλλογής όλων των δεδομένων από τα φορτία και τις προτιμήσεις του καταναλωτή. Με το κατάλληλο λογισμικό βελτιστοποίησης λοιπόν εκτιμούμε ότι θα μπορεί συγχρονίσει βέλτιστα τον ενεργειακό σχεδιασμό του σπιτιού με τις οδηγίες του ΣΗΕ. Έτσι περιορίζονται και οι έγνοιες για τον καταναλωτή, που αφήνει όλες τις πολύπλοκες αποφάσεις για τον ελεγκτή, ο οποίος φυσικά θα μπορεί να εκτελέσει όλο αυτό το πρόγραμμα ακόμα και χωρίς την παρουσία του.

## 2.4. Ο κεντρικός ελεγκτής του «έξυπνου σπιτιού»

Το μοντέλο του «έξυπνου δικτύου» που περιγράψαμε στη πρώτη ενότητα του κεφαλαίου προϋποθέτει έναν κεντρικό ενεργειακό ελεγκτή εντός του έξυπνου σπιτιού. Ο ελεγκτής αυτός βρίσκεται στο κέντρο όλων των πληροφοριών. Ένα διάγραμμα της λειτουργίας του ελεγκτή και των πληροφοριών που ανταλλάσσονται φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 8:Ο ρόλος του κεντρικού ελεγκτή μέσα στο <<έξυπνο δίκτυο>>

Στο σχήμα αυτό υπάρχει αρίθμηση που υποδεικνύει τη χρονική σειρά των σημάτων. Εξηγώντας αυτά τα σήματα περιγράφουμε αναλυτικά τις σχεδιαστικές απαιτήσεις για τον μικροελεγκτή:

### 1. Φορτία προς χρονοδρομολόγηση:

Ο ελεγκτής πρέπει να υποστηρίζει την επικοινωνία με μία εξωτερική συσκευή, η οποία θα δίνει τη δυνατότητα στον καταναλωτή να δώσει στον ελεγκτή τις προτιμήσεις του για τα φορτία που θα μπουν μέσα στη μέρα. Είναι ζητούμενο για αυτήν την εξωτερική συσκευή να έχει ένα φιλικό και απλό γραφικό περιβάλλον για να διευκολύνει τον χρήστη.

### 2. Πρόβλεψη τοπικής παραγωγής:



Ο ελεγκτής προκειμένου να τρέξει την βελτιστοποίηση αλλά και να ελέγχει το ισοζύγιο ισχύος του σπιτιού, χρειάζεται να έχει την πρόβλεψη της τοπικής παραγωγής. Το θέμα αυτό απασχολεί τη διεθνή κοινότητα και υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις, είτε πρόκειται για φωτοβολταϊκά [22] είτε για αιολική ενέργεια [23]. Η πρόοδος που υπάρχει είναι αξιοσημείωτη και μάλιστα σήμερα στην Ελλάδα ο ΑΔΜΗΕ χρησιμοποιεί προγράμματα πρόβλεψης παραγωγής από ΑΠΕ. Η δυνατότητα αυτή κρίνεται σημαντική καθώς η τοπική παραγωγή αλλάζει το ισοζύγιο ισχύος και άρα την ημερήσια καμπύλη ζήτησης σε σημαντικό βαθμό και άρα ο ελεγκτής πρέπει να μπορεί να συμπεριλάβει την παραγωγή στους υπολογισμούς του. Η εγκατάσταση ενός δικτύου έξυπνων μετρητών θα βοηθήσει τον ελεγκτή να διορθώνει real time την πρόβλεψη ζήτησης και να μειώνει συνεχώς το σφάλμα της πρόβλεψης.

### 3. **Πρόβλεψη σταθερών φορτίων:**

Όπως έχουμε αναφέρει στην αρχή του κεφαλαίου, η κατανάλωση ενός σπιτιού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Ένας γενικός αλγόριθμος για αυτό το πολυπαραγοντικό πρόβλημα δεν θα δίνει αξιόπιστα προβλήματα καθώς δεν μπορούν να παραμετροποιηθούν πλήρως οι ανάγκες και η νοοτροπία του καταναλωτή. Αυτό που χρειάζεται είναι ένα δίκτυο έξυπνων μετρητών μέσα στην οικία να στέλνει όλες τις μετρήσεις στον ελεγκτή. Ο ελεγκτής πρέπει να έχει τα αντίστοιχα προγράμματα ώστε να συλλέγει τις πληροφορίες και να δημιουργεί αποδοτικά μοντέλα για την κατανάλωση. Για παράδειγμα οι ημέρες της εβδομάδας μπορούν να χωριστούν σε εργάσιμες και μη, όπου αλλάζει το προφίλ της ζήτησης. Επίσης κατά τη διάρκεια του χρόνου αλλάζουν οι καιρικές συνθήκες και αυτό επηρεάζει τις ανάγκες του καταναλωτή. Σήμερα στην Ελλάδα ο ΑΔΜΗΕ χρησιμοποιεί αλγόριθμους για πρόβλεψη ζήτησης, αλλά το πρόβλημα της πρόβλεψης για έναν μόνο καταναλωτή χρειάζεται διαφορετική σχεδίαση. Και αυτό το θέμα επίσης έχει απασχολήσει τη διεθνή επιστημονική κοινότητα και μπορεί κανείς να βρει πολλές ενδιαφέρουσες προσεγγίσεις, όπου προκρίνεται η χρήση νευρωνικών δικτύων και όχι μόνο [24].

### 4. **Αίτημα για διαχείριση ζήτησης:**

Όπως έχουμε αναφέρει συνοπτικά ως εδώ, ο aggregator αναλαμβάνει να συνδιαλέγει με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνδιαλλαγή αυτή μπορεί να αφορά κάποιο έκτακτο αίτημα του διαχειριστή να μειωθεί το φορτίο για κάποιες συγκεκριμένες ώρες της ημέρας για οικονομικούς λόγους ή λόγους αξιοπιστίας. Περισσότερα για αυτά τα αιτήματα και τις πληροφορίες που ανταλλάσσονται θα αναφερθούν στην επόμενη ενότητα. Για τώρα αρκεί να πούμε ότι ο aggregator συλλέγει πληροφορίες από τα έξυπνα σπίτια που συνεργάζεται και από την αγορά και φροντίζει να εκτελούνται τα προγράμματα διαχείρισης ζήτησης.

### 5. **Απόκριση στο αίτημα διαχείρισης ζήτησης:**

Τα διάφορα προγράμματα διαχείρισης ζήτησης πιθανώς να χρειάζονται την απόκριση του καταναλωτή σε κάποιο αίτημα. Για παράδειγμα λόγω ενός έκτακτου γεγονότος μπορεί να ζητήσει ο aggregator το προβλεπόμενο ισοζύγιο ισχύος κάθε έξυπνου σπιτιού, την τυχούσα δυνατότητα αποκοπής φορτίου κτλ. Ο ελεγκτής, εφόσον από τα προηγούμενα έχει τη δυνατότητα να φτιάξει το προφίλ της ημερήσιας ζήτησης, πρέπει να έχει και τη δυνατότητα να απαντήσει σε αυτά τα αιτήματα μεταδίδοντας τα κατάλληλα σήματα. Να σημειώσουμε για άλλη μία φορά ότι το επικοινωνιακό κομμάτι του έξυπνου δικτύου είναι ένα σημαντικό κομμάτι της έρευνας που γίνεται σήμερα για τη διαχείριση ζήτησης.

## 6. Βελτιστοποίηση:

Όταν τελειώσει το κομμάτι της ανταλλαγής πληροφοριών, ξεκινάει το πρόγραμμα διαχείρισης ζήτησης. Ο ελεγκτής πρέπει να βελτιστοποιήσει τον ενεργειακό προγραμματισμό σύμφωνα με την τιμολόγηση και τα όρια ισχύος που λαμβάνει από τον aggregator, με τον τρόπο που είδαμε στην προηγούμενη ενότητα.

## 7. Ημερήσιο πρόγραμμα φορτίων:

Ο ελεγκτής συνυπολογίζοντας τις ανάγκες του καταναλωτή και τα προγράμματα διαχείρισης ζήτησης χρησιμοποιεί μεθόδους βελτιστοποίησης και ότι άλλο χρειαστεί ώστε να δημιουργήσει το ημερήσιο πρόγραμμα για τα οικιακά φορτία. Το κομμάτι αυτό θα περιλαμβάνει επίσης τον έλεγχο της λειτουργίας των φορτίων, της ώρα που χρησιμοποιούνται κτλ. Οι τεχνικές προδιαγραφές ενός τέτοιου ελεγκτή που θα ελέγχει φορτία μέσα σε ένα δίκτυο είναι εφικτές με τη σημερινή τεχνολογία. Το μόνο κενό που φαίνεται να υπάρχει αυτή τη στιγμή είναι η έρευνα για την σχεδίαση ελεγχόμενων έξυπνων οικιακών συσκευών, οι οποίες θα μπορούν να μιλάνε με τον κεντρικό ελεγκτή με ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο. Με αυτόν τον τρόπο κάθε νέα συσκευή που θα κατασκευάζεται θα μπορεί να ενσωματώνεται εύκολα σε ένα οικιακό έξυπνο δίκτυο και να συμμετέχει στον ενεργειακό προγραμματισμό δίνοντας πληροφορίες για τις λειτουργίες του αλλά και με το να δέχεται αιτήματα ελέγχου.

## 8. Real time monitoring:

Η δυνατότητα καταγραφής της κατάστασης του έξυπνου δικτύου σε πραγματικό χρόνο είναι επίσης μία απαραίτητη λειτουργία του ελεγκτή. Έτσι εξασφαλίζεται η ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο του καταναλωτή, η ενημέρωση των στατιστικών στοιχείων ώστε να βελτιώνονται οι προβλέψεις αλλά και η έγκαιρη ανταπόκριση σε έκτακτα γεγονότα. Λέγοντας έκτακτα γεγονότα εννοούμε για παράδειγμα ότι ο χρήστης μπορεί να προγραμματίσει τη φόρτιση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου για το βράδυ αλλά να γυρίσει απρόσμενα πιο νωρίς και να θέλει να φορτίσει το αυτοκίνητο. Είναι σημαντικό ο ελεγκτής να μπορεί να ανταποκριθεί στις αλλαγές στο περιβάλλον του και να επαναπρογραμματίζει τα φορτία, για να μπορεί να είναι χρήσιμος στα πλαίσια ενός «έξυπνου σπιτιού».

Προτού να προχωρήσουμε στην επόμενη ενότητα, που φιλοδοξεί να παρουσιάσει τον ρόλο του aggregator στο έξυπνο δίκτυο, να κάνουμε μία μικρή αναφορά για την τεχνολογία του hardware των ελεγκτών σήμερα. Στα ενεργειακά συστήματα συνηθίζεται η χρήση PLC καθώς έχουν κατασκευαστικά υψηλές προδιαγραφές αξιοπιστίας. Ακόμη οι περισσότερες εφαρμογές(τηλεμετρία, απομακρυσμένος έλεγχος διακοπών κτλ) δεν απαιτούν μεγάλη επεξεργαστική ισχύ αλλά περισσότερο γρήγορη απόκριση στον έλεγχο των εισόδων και τη διαμόρφωση των εξόδων. Από την άλλη, στα συστήματα ηλεκτρονικής(ασύρματη επικοινωνία, ρομποτική κτλ) χρησιμοποιούνται μικροελεγκτές. Η βιομηχανία των μικροελεγκτών έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο τα τελευταία χρόνια. Με ένα σχετικά πολύ χαμηλό κόστος μπορεί ο καθένας να αποκτήσει έναν μικροελεγκτή με δυνατότητα προγραμματισμού σε γραφικό περιβάλλον και άλλα καλούδια(θύρα Ethernet, θύρες usb, δυνατότητα επέκτασης μνήμης, ολοκληρωμένο λειτουργικό σύστημα, υπόβαθρο επέκτασης μέσω αγοράς εξωτερικού hardware κτλ).

[25]

Οι απαιτήσεις της εφαρμογής μας θέτουν νέες προδιαγραφές για τους ελεγκτές. Στην πραγματικότητα πρέπει να πέσει βάρος στη σχεδίαση ελεγκτών που να συνδυάζουν την αξιοπιστία των PLC και την ευελιξία των μικροελεγκτών. Φαίνεται πως οι μεγάλοι κατασκευαστές έχουν ήδη αρχίσει να μελετάνε τέτοιες μονάδες [26]. Τέλος είναι πολύ σημαντικό να αρχίζουν να διαμορφώνονται επίσημα πρότυπα από οργανισμούς όπως ο IEEE κτλ. για την επικοινωνία των συσκευών και ότι άλλο χρειάζεται ώστε να αρχίζουν να κατασκευάζονται έξυπνες συσκευές με τη δυνατότητα να συνδεθούν και να επικοινωνούν όλες μεταξύ τους σε ένα δίκτυο.

## **2.5. Ο ρόλος του aggregator στο «έξυπνο δίκτυο»**

### **2.5.1. Εισαγωγή**

Μέχρι σήμερα ο οικιακός καταναλωτής έχει παθητικό ρόλο στο ΣΗΕ. Στο μοντέλο που περιγράφουμε εμείς, αλλά και γενικά από την έννοια του «έξυπνου δικτύου», ο καταναλωτής θα πρέπει να γίνει άλλος ένας βαθμός ελευθερίας του διαχειριστή του δικτύου. Προκειμένου να γίνει αυτό, πρέπει το «έξυπνο σπίτι» να είναι σε θέση να στείλει πληροφορίες για την κατανάλωση του, και να μπορεί να αποκριθεί σε αιτήματα διαχείρισης ζήτησης. Περισσότερα για το πώς θα γίνεται αυτό αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα, και προτείναμε την σχεδίαση ενός κεντρικού ελεγκτή με συγκεκριμένες προδιαγραφές.

Αν θεωρήσουμε λοιπόν ότι υπάρχει αυτή η υποδομή, μπορούμε να ξεκινήσουμε να συζητάμε με ποιο μοντέλο αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι εφικτή μία αποτελεσματική διαχείριση ζήτησης. Στο υπάρχον μοντέλο στην Ελλάδα, οι παραγωγοί και οι προμηθευτές συναντιούνται στην χονδρεμπορική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Κάθε κάτοχος άδειας παραγωγής υποβάλλει μία προσφορά έγχυσης, που υποδεικνύει την τιμή στην οποία προτίθεται να πουλήσει κάθε επίπεδο της ενέργειας που παράγει. Η Προσφορά Έγχυσης είναι μια κλιμακωτή συνάρτηση τιμής και ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας, κάθε βαθμίδα της οποίας αποτελείται από ένα ζεύγος τιμής ενέργειας (€ ανά MWh) και ποσότητας ενέργειας (MWh). Η συνάρτηση περιλαμβάνει έως δέκα βαθμίδες, στην οποία οι τιμές της ενέργειας για τις διαδοχικές βαθμίδες πρέπει να είναι μονοτόνως μη φθίνουσες. Ύστερα, το πρόγραμμα ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού επιλύει το πρόβλημα ικανοποίησης του ενεργειακού ισοζυγίου φροντίζοντας επίσης για υπηρεσίες εφεδρείας. Έτσι προκύπτει και η οριακή τιμή συστήματος.

Σε αυτές τις συνδιαλλαγές η τάξη μεγέθους είναι τα MW. Όλα τα αποτελέσματα προκύπτουν από αλγόριθμους και οικονομικά εργαλεία, και επίσης διέπονται από νομικές συμβάσεις, απαιτούνται τεχνικές εκθέσεις και γενικά κάθε άδεια παραγωγής κρύβει από πίσω της ένα αντίστοιχο υπόβαθρο ανθρώπων, εγκαταστάσεων και υποδομών. Σε αυτό το επίπεδο γίνεται πολύ δύσκολο να συμμετάσχει άμεσα ένας οικιακός καταναλωτής με σωστούς όρους. Η μετακίνηση των φορτίων και γενικά η απόκριση σε προγράμματα διαχείρισης ζήτησης μπορεί να οδηγήσει σε ωφέλιμη αλλαγή του μοτίβου της κατανάλωσης, αλλά η αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος απαιτεί φερέγγυους παραγωγούς και προγραμματισμό σε επίπεδο MW και όχι συσκευή τη συσκευή στο ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο.

Ο προκρινόμενος τρόπος λοιπόν για να συμμετάσχει ένας οικιακός καταναλωτής στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας είναι μέσω ενός διαμεσολαβητή. Ο διαμεσολαβητής αυτός θα μπορεί να συμμετέχει στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς θα είναι ένας οργανισμός φτιαγμένος για αυτό το σκοπό, που θα φροντίζει να έχει τις απαραίτητες υποδομές που περιγράψαμε παραπάνω. Ο οργανισμός αυτός θα μπορεί να συμμετάσχει στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας με διάφορους τρόπους. Η κουβέντα γύρω από το ποιος θα είναι αυτός ο οργανισμός και τι θα παρέχει είναι στην ουσία η κουβέντα γύρω από το τι μοντέλο αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας χρειαζόμαστε. Το θέμα αυτό έχει απασχολήσει τη διεθνή επιστημονική κοινότητα αλλά και τους διαχειριστές ηλεκτρικής ενέργειας σε όλες τις ανεπτυγμένες χώρες. Παρόλα αυτά, η μελέτη της χονδρεμπορικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι έξω από τους στόχους αυτής της διπλωματικής. Αυτό που θα προσπαθήσουμε να περιγράψουμε είναι τι αιτήματα ανταλλάσει με ο διαμεσολαβητής με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και με τους καταναλωτές.

Στο μοντέλο που περιγράφουμε εμείς ο οργανισμός αυτός έχει τον ρόλο του electricity aggregator. Αθροίζει (aggregates) δηλαδή την κατανάλωση πολλών καταναλωτών χαμηλής ή/και μεσαίας τάσης και την διαχειρίζεται. Ο ρόλος του aggregator θα μπορούσε να είναι αυτός του ρυθμιστή του προφίλ της ενεργειακής ζήτησης. Πιο συγκεκριμένα, ο διαχειριστής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να έχει συμφέρον να πληρώσει για τις υπηρεσίες του aggregator, επειδή αυτός δεσμεύεται για ένα προφίλ κατανάλωσης το οποίο εξοικονομεί χρήματα στον διαχειριστή. Για παράδειγμα μπορεί η προσφορά του aggregator για αγορά ηλεκτρικής ενέργειας με ένα συγκεκριμένο προφίλ κατανάλωσης να αποπλέκει τον διαχειριστή από το να αγοράσει ηλεκτρική ενέργεια σε υψηλή τιμή από τους παραγωγούς προκειμένου να ικανοποιήσει μία υψηλή αιχμή ισχύος του συστήματος.

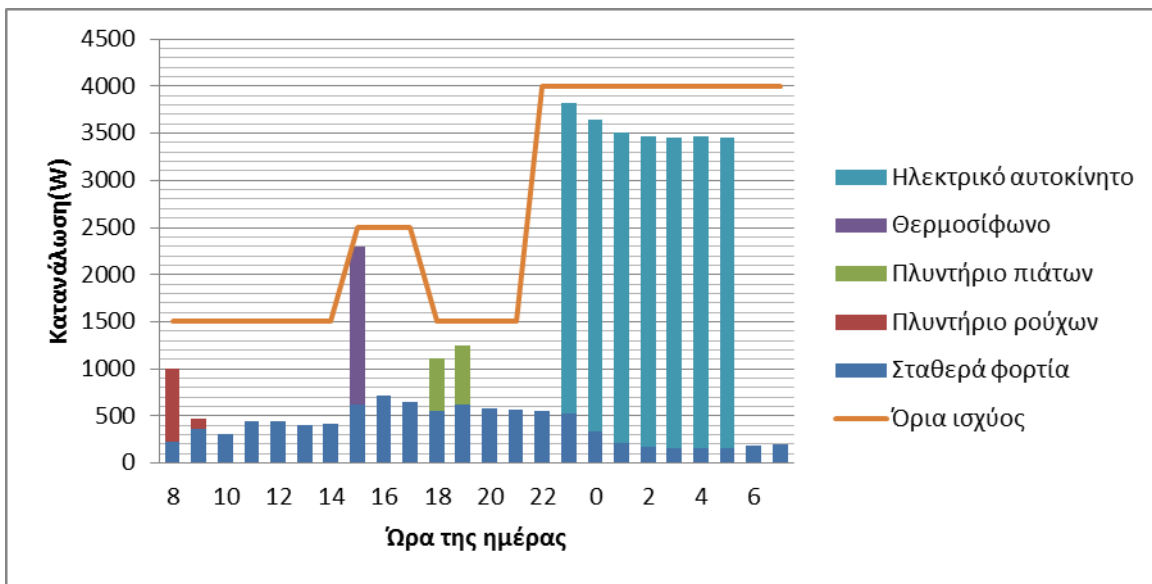
Άλλος ένας σχετικά πιο απλός ρόλος που θα μπορούσε να έχει ο aggregator είναι να συνεισφέρει επικουρικά σε οριακές καταστάσεις του συστήματος ως ένας άλλος τύπος εφεδρείας. Πιο συγκεκριμένα μπορεί ο διαχειριστής να προσεγγίζει τον aggregator προκειμένου να του ζητήσει να μειώσει την ζητούμενη ισχύ για ένα διάστημα της ημέρας. Αυτό το αίτημα μπορεί να γίνεται για λόγους τεχνικούς και αξιοπιστίας, όπως την πρόβλεψη για υπερφόρτωση ενός μετασχηματιστή ή την απορρύθμιση της συχνότητας λόγω ενός έκτακτου γεγονότος, ή και για οικονομικούς λόγους όπως την μείωση μίας υψηλής αιχμής.

Ας υποθέσουμε ότι γίνεται μία τέτοια συναλλαγή. Τότε ο aggregator γυρίζει στην πλευρά του καταναλωτή, συλλέγει τις πληροφορίες για τη διαθεσιμότητα περικοπής φορτίου, και καταθέτει την πρόταση του στον διαχειριστή. Η πρόταση αυτή είναι δεσμευτική οπότε γυρίζοντας πάλι στη πλευρά του καταναλωτή προσπαθεί να εξασφαλίσει την μείωση φορτίου που υποσχέθηκε. Για να είναι δεσμευτικές και υλοποιήσιμες οι προτάσεις του aggregator πρέπει να προβλεφθούν μία σειρά από παράγοντες. Όπως ο διαχειριστής δεσμεύει με συμβόλαια και πρόστιμα τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας έτσι πρέπει να δεσμεύει και τον aggregator. Αυτός με τη σειρά του για να αποφύγει τα πρόστιμα πρέπει να συνυπολογίζει τον ανθρώπινο παράγοντα και να μην καταθέτει άπληστες και οριακά υλοποιήσιμες προτάσεις.

## 2.5.2. Demand bidding-Εφαρμογή βελτιστοποίησης για τον aggregator

Ας υποθέσουμε ότι ο διαχειριστής προσεγγίζει τον aggregator προκειμένου να ελαττώσει την φόρτιση ενός μετασχηματιστή στις 18:00 λόγω ενός απρόβλεπτου γεγονότος. Η συνδιαλλαγή αυτή λαμβάνει χώρα στις 14:00. Τότε ο aggregator απευθύνεται στους οικιακούς καταναλωτές, ζητώντας πληροφορίες για το τι φορτία μπορούν να κόψουν σε αυτές τις ώρες και με τι κόστος.

Ας δούμε τι γίνεται στο εσωτερικό ενός έξυπνου σπιτιού. Για αρχή ας υποθέσουμε ότι έχουμε έναν οικιακό καταναλωτή με το προφίλ ζήτησης της προηγούμενης ενότητας που συμμετέχει σε πρόγραμμα Real Time Pricing. Η καμπύλη ημερήσιας ζήτησης, με την προβλεπόμενη κατανάλωση από σταθερά φορτία έχει ως εξής:



Γράφημα 28:Τελική καμπύλη ημερήσιας ζήτησης με βελτιστοποίηση(RTP)

Ο controller ανταποκρίνεται στο αίτημα δηλώνοντας ότι αυτή την ώρα μπορεί να μετακινήσει το πλυντήριο πιάτων, εξοικονομώντας 0,56 kW. Φυσικά ο controller δεν μπορεί να δρα αυτοβούλως. Ο καταναλωτής έχει ορίσει στην αρχή της ημέρας πόσο τον δυσαρεστεί η τυχόν μετακίνηση κάθε φορτίου. Το ίδιο συμβαίνει για όλα τα έξυπνα σπίτια που είναι συμβεβλημένα με τον aggregator.

Ο aggregator συλλέγει τις πληροφορίες από τους συμβεβλημένους καταναλωτές, σταθμίζει τους οικονομικούς όρους και καταθέτει στον διαχειριστή την προσφορά του. Ο διαχειριστής συλλέγει τα δεδομένα από όλους τους aggregators, χρησιμοποιεί τα οικονομικά του εργαλεία και δίνει σε κάθε aggregator ένα set point ισχύος.

Μετά από αυτές τις συνδιαλλαγές ο aggregator πρέπει να λύσει ένα πρόβλημα: Πώς θα καταμερίσει αυτό το set point στους καταναλωτές με βέλτιστο τρόπο. Πώς δηλαδή θα επιτύχει την ισχύ που θέλει να αποκοπεί με το ελάχιστο κόστος. Από όσα έχουμε αναφέρει για τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού καταλαβαίνουμε ότι αυτό το πρόβλημα είναι ένα σχετικά απλό MILP

πρόβλημα. Εφόσον ο aggregator έχει στη βάση του ζεύγη τιμών για κάθε φορτίο, τι ισχύ μπορεί να αποκοπεί και σε τι κόστος, πρέπει να λύσει το εξής πρόβλημα σε κλασική διατύπωση προβλημάτων βελτιστοποίησης:

$$\min \sum_{m=1}^M u[m] * cost[m]$$

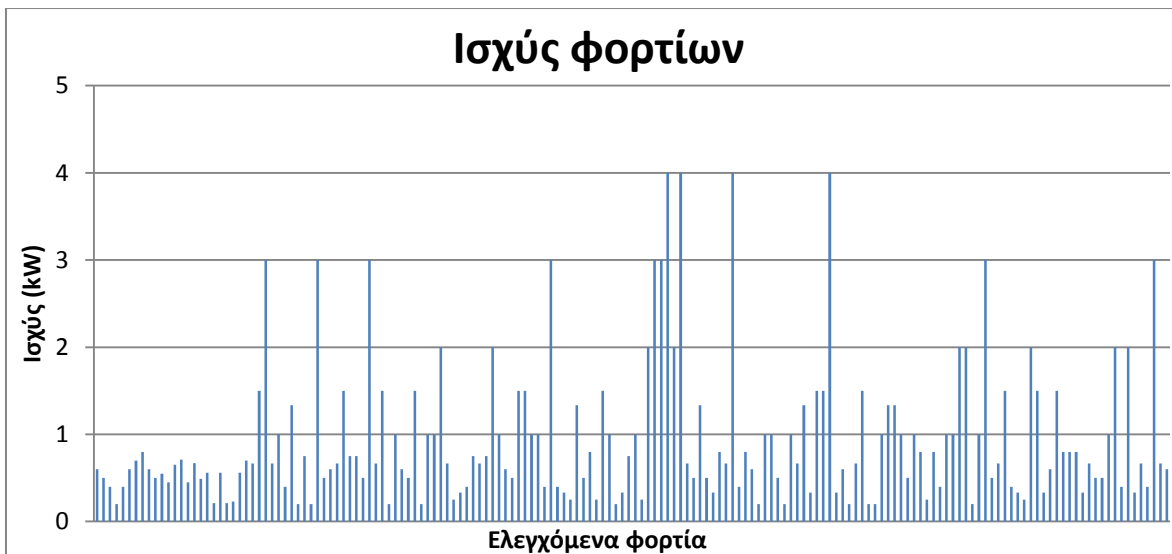
Υπό τους περιορισμούς:

$$\sum_{m=1}^M P[m] * u[m] \leq 1.05 * SetPoint$$

$$\sum_{m=1}^M P[m] * u[m] \geq SetPoint$$

Οι μεταβλητές του προβλήματος είναι ένα υποσύνολο της προηγούμενη βελτιστοποίησης και δεν χρειάζονται ιδιαίτερη εξήγηση. Να σημειώσουμε μόνο ότι από τους περιορισμούς φαίνεται ότι έχουμε βάλει ένα όριο ανοχής 5% από το set point που δόθηκε στον aggregator. Η περικοπή φορτίων από πλευράς aggregator δεν είναι ένα συνεχές νούμερο καθώς αποτελεί το άθροισμα διακριτών τιμών και άρα ένα όριο ανοχής είναι απαραίτητο για να προχωρήσει η επίλυση του προβλήματος.

Προκειμένου να παρουσιάσουμε μία εφαρμογή αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης, θα υποθέσουμε κάποια φορτία με την ισχύ και τα κόστη που έχουν. Αυτά τα φορτία τα παρουσιάζουμε στα επόμενα γραφήματα:

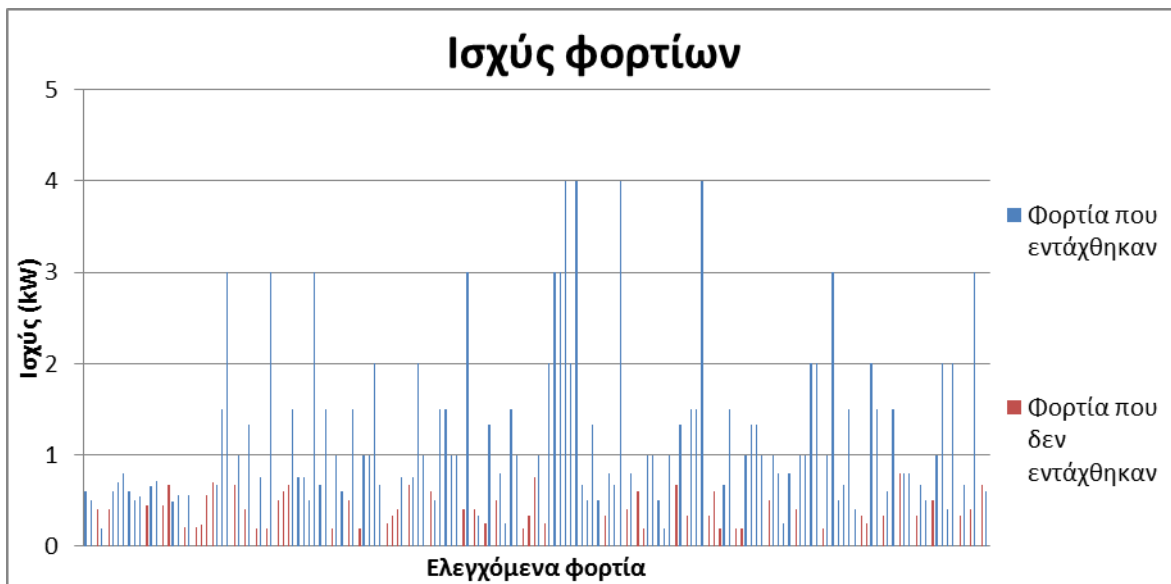


Γράφημα 29: Η ισχύς των φορτίων προς περικοπή

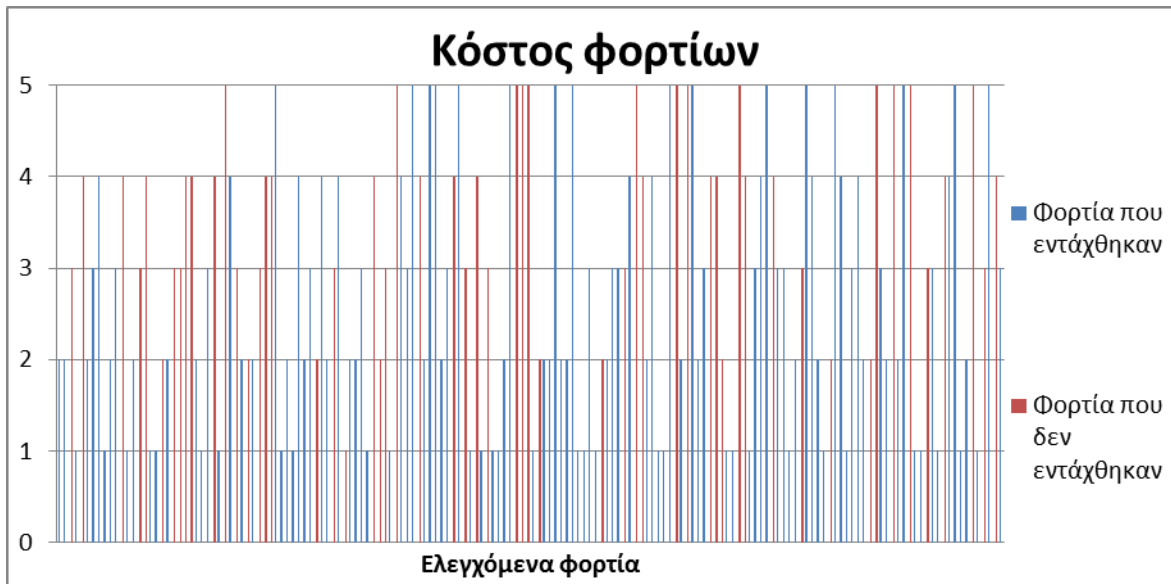


Γράφημα 30: Το κόστος των φορτίων προς περικοπή

Αυτά είναι τα φορτία που δύναται να περικόψει ο aggregator από τα ελεγχόμενα φορτία των καταναλωτών. Το κόστος περικοπής κάθε φορτίου είναι ένας ακέραιος αριθμός από το 1 έως το 5, και η τιμή του προκύπτει από την δυσφορία που δηλώνουν οι καταναλωτές και γενικά τους οικονομικούς όρους αυτών των συνδιαλλαγών. Η συνολική διαθεσιμότητα περικοπής φορτίων ανέρχεται στα 168,23 kW. Ας υποθέσουμε ότι το set point ισχύος τίθεται στα 150kW. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης λύνεται από τον solver Cplex της IBM (όπως και στη προηγούμενη ενότητα). Τα φορτία μετά τη βελτιστοποίηση χωρίζονται σε αυτά που εντάσσονται στο πρόγραμμα διαχείρισης ζήτησης από τον aggregator και σε αυτά που δεν εντάσσονται:



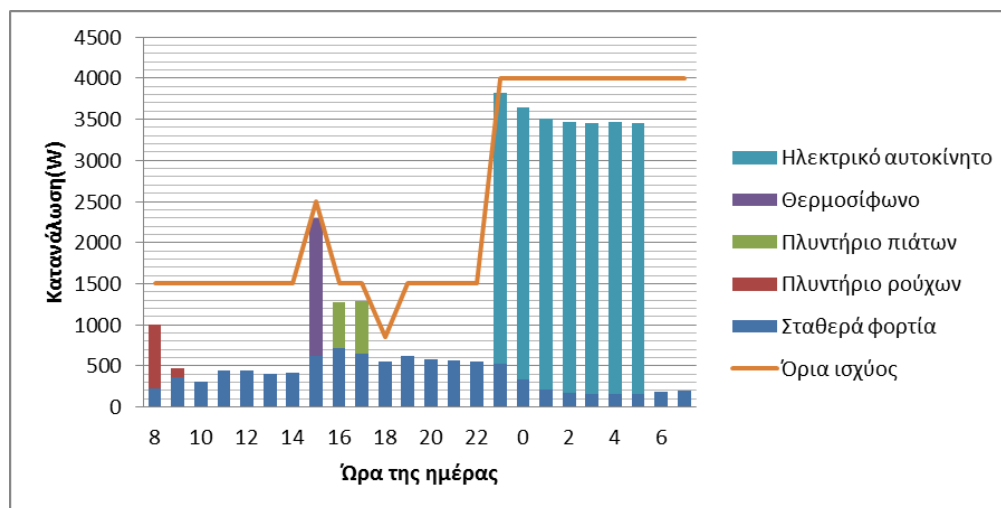
Γράφημα 31: Η ισχύς των φορτίων προς περικοπή



Γράφημα 32: Το κόστος των φορτίων προς περικοπή

Το άθροισμα των φορτίων προς περικοπή φτάνει τα 150,2 kW. Όπως σημειώσαμε και παραπάνω, επειδή ακριβώς έχουμε φορτία με διακριτές τιμές, η συνολική ισχύς δεν είναι ένα συνεχές νούμερο. Παρόλα αυτά, εάν υπάρχει μία μεγάλη δεξαμενή με ελεγχόμενα φορτία διαφορετικών καταναλώσεων, η βελτιστοποίηση θα μπορεί να πετύχει το όριο ισχύος που της δίνεται, ακόμα και αν πρέπει να εντάξει στο πρόγραμμα διαχείρισης ζήτησης φορτία με μεγαλύτερο κόστος.

Ας υποθέσουμε λοιπόν ότι το πλυντήριο πιάτων στον οικιακό καταναλωτή που παρακολουθούμε σε αυτήν την ενότητα εντάσσεται στο πρόγραμμα διαχείρισης ζήτησης. Τότε, ο ελεγκτής του έξυπνου σπιτιού λαμβάνει το αντίστοιχο σήμα ορίου ισχύος για τις 18:00 το οποίο στην ουσία δεν επιτρέπει το πλυντήριο πιάτων να μπει εκείνη την ώρα. Τότε μπαίνει στη διαδικασία να τρέξει μία νέα βελτιστοποίηση για το υπόλοιπο της ημέρας με τα εναπομείναντα ελεγχόμενα φορτία. Η καμπύλη ημερήσιας ζήτησης που προκύπτει έχει ως εξής:



Γράφημα 33: Καμπύλη ημερήσιας ζήτησης (RTP) μετά από βελτιστοποίηση για συμμετοχή σε πρόγραμμα demand bidding



## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Προσομοίωση λειτουργίας κεντρικού ενεργειακού ελεγκτή

### 3.1. Εισαγωγή

Προκειμένου να προχωρήσουμε ένα βήμα παρακάτω αυτή την εργασία, αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε έναν ελεγκτή του εμπορίου προκειμένου να σχεδιάσουμε όσο πιο ρεαλιστικά γίνεται έναν ενεργειακό ελεγκτή. Αφού λοιπόν δημιουργήσουμε αυτές τις σχετικά ελάχιστες(σε σύγκριση με την πραγματική εφαρμογή) δυνατότητες που πρέπει να έχει ο ελεγκτής, χρειαζόμαστε και ένα σύστημα με φορτία, που να προσεγγίζει τις καταναλώσεις και τη συμπεριφορά μίας οικιακής εγκατάστασης. Ο ελεγκτής θα πρέπει να μπορεί να ελέγξει τα φορτία αυτού του συστήματος ώστε να τα χρονοδρομολογήσει. Έτσι θα πετυχαίνουμε τις αλλαγές στο μοτίβο της κατανάλωσης του συστήματος μας, το οποίο είναι το ζητούμενο.

Αποφασίστηκε η οικιακή εγκατάσταση να προσομοιωθεί με τη χρήση ενός εξομοιωτή πραγματικού χρόνου που χρησιμοποιείται από την ερευνητική ομάδα smartRUE [27]του εργαστηρίου ΣΗΕ του ΕΜΠ. Από την σχεδίαση αυτού του συστήματος αναμένεται να μας δοθεί η δυνατότητα να συγκρίνουμε την κατανάλωση μίας «συνηθισμένης» μέρας ενός σπιτιού σε σχέση με την κατανάλωση μετά από την χρονοδρομολόγηση των φορτίων με την ακρίβεια που μας παρέχει ο εξομοιωτής. Ακόμη αναμένεται να αποκαλυφθούν οι δυνατότητες ενός μικροεπεξεργαστή γενικού σκοπού αλλά και τελικά ποιες είναι οι απαιτήσεις ενός κεντρικού ενεργειακού ελεγκτή προκειμένου να μπορεί να διαχειριστεί πλήρως μία οικιακή εγκατάσταση.

### 3.2. Κεντρικός ενεργειακός ελεγκτής

Από τα προηγούμενα κεφάλαια και την περιγραφή του ρόλου του ενεργειακού ελεγκτή καταλήγουμε ότι ο μικροεπεξεργαστής πρέπει να έχει ως ελάχιστες δυνατότητες:

- Την ανάγνωση αναλογικών και ψηφιακών τιμών στην είσοδο του. Αυτές οι τιμές μπορεί να είναι μετρήσεις από «έξυπνους» μετρητές και αισθητήρες ή οτιδήποτε άλλο πρέπει να γνωρίζει ο ελεγκτής.
- Τον χειρισμό ψηφιακών ή/και αναλογικών εξόδων προκειμένου να μπορεί να θέσει σε λειτουργία φορτία και γενικά να αλληλεπιδράσει με το περιβάλλον του.
- Τη δυνατότητα ενσωμάτωσης του απαραίτητου λογισμικού για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του συστήματος. Σε αυτό το κομμάτι αξίζει γενικά να αφιερωθεί αρκετός χρόνος, καθώς ένας πραγματικός ενεργειακός ελεγκτής θα έπρεπε να τρέχει γραφικά περιβάλλοντα για να τα χρησιμοποιεί ο καταναλωτής, να έχει δυνατότητα ασύρματης μετάδοσης και λήψης πληροφοριών real time(webserver κτλ) αλλά και άλλα πιο σημαντικά εργαλεία για τις τεχνικές πτυχές του θέματος όπως δημιουργία και αξιοποίηση στατιστικών μοντέλων, μαθηματικών μοντέλων πρόβλεψης κτλ. Στα πλαίσια της διπλωματικής θεωρήθηκε απαραίτητο να μπορεί να τρέξει πάνω στον μικροεπεξεργαστή λογισμικό βελτιστοποίησης.

Με τις παραπάνω δυνατότητες μπορούμε να φτιάξουμε έναν μικροεπεξεργαστή με τη δυνατότητα να ελέγχει τον εξομοιωτή πραγματικού χρόνου. Ο μικροεπεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο Raspberry Pi 2 model B [28]. Ο ελεγκτής αυτός βγήκε στην αγορά τον Φεβρουάριο του 2015 και οι προδιαγραφές του είναι ικανοποιητικές για να υποστηρίξουν την σχεδίαση του ενεργειακού ελεγκτή στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής. Πιο συγκεκριμένα (μεταξύ άλλων) διαθέτει 40 ακίδες (pins) εισόδου/εξόδου, θύρα Ethernet και επεξεργαστή 900 MHz ARM Cortex που υποστηρίζει την εγκατάσταση λειτουργικού συστήματος. Θεωρείται ιδανικός για εκπαιδευτικά projects αλλά οι προδιαγραφές του αρκούν και για πιο σύνθετα project ειδικού σκοπού. Το λογισμικό γραμμικού προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε είναι το Gnu Linear Programming Kit [29]. Το πρόγραμμα αυτό παρέχει όλες τις δυνατότητες που παρέχει και το Cplex της IBM (περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο) με εξαίρεση το φιλικό περιβάλλον προγραμματισμού. Τα προγράμματα που γράφτηκαν, η συνδεσμολογία και γενικά οι σχεδιαστικές απαιτήσεις του συστήματος θα περιγραφούν αναλυτικά στο παράρτημα για τον προγραμματισμό του ενεργειακού ελεγκτή.

### **3.3. Ψηφιακός εξομοιωτής πραγματικού χρόνου**

Ο ψηφιακός εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (Real Time Digital Simulator) είναι μία συσκευή που έχει τη δυνατότητα εξομοίωσης ηλεκτρικών μοντέλων και συστημάτων [30]. Χρησιμοποιείται σε τομείς της βιομηχανίας όπως τη δοκιμή και τον έλεγχο ηλεκτρικών συσκευών αλλά και στα πλαίσια πανεπιστημιακών διδακτικών εφαρμογών. Μέσω ενός υπολογιστή, με το σχεδιαστικό εργαλείο του RTDS, μπορούμε να σχεδιάσουμε και να προσομοιώσουμε διάφορα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Ο εξομοιωτής παρέχει αυτή τη δυνατότητα λύνοντας σε πραγματικό χρόνο τις εξισώσεις του προσομοιωμένου συστήματος και διαμορφώνοντας ταυτόχρονα τις εξόδους του. Στον υπολογιστή που επικοινωνεί με το RTDS μπορούμε επίσης σε πραγματικό χρόνο να διαμορφώσουμε εισόδους για το RTDS αλλά και να καταγράψουμε σε γραφικές παραστάσεις τα μεγέθη του προσομοιωμένου ηλεκτρικού συστήματος.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας σκοπεύουμε να προσομοιώσουμε μία οικιακή εγκατάσταση με σταθερά και ελεγχόμενα φορτία. Είσοδοι σε αυτό το σύστημα θα είναι οι καταστάσεις των διακοπών των ελεγχόμενων φορτίων και ο μικροεπεξεργαστής θα πρέπει να μπορεί να θέσει τα φορτία σε λειτουργία σύμφωνα με το πρόγραμμα που βγάζει μετά τη βελτιστοποίηση. Καταγράφοντας τις τάσεις και τα ρεύματα στα διάφορα σημεία της εγκατάστασης θα μελετήσουμε αν το σύστημα λειτουργεί σύμφωνα με τον σχεδιασμό και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα σε σχέση με το σύστημα χωρίς βελτιστοποίηση. Καθώς προχωράμε στο κεφάλαιο θα αποσαφηνίζονται οι διάφορες πτυχές του συστήματος όπως το σχέδιο της προσομοιωμένης ηλεκτρικής εγκατάστασης, τα σήματα που ανταλλάζουν RTDS και μικροεπεξεργαστής κτλ.

### 3.4. Επικοινωνία μεταξύ RTDS και μικροεπεξεργαστή

Ο μικροεπεξεργαστής Raspberry Pi 2 model b έχει ψηφιακές εισόδους και εξόδους. Το λογικό «1» είναι στα 3.3V και το λογικό «0» στα 0V. Μάλιστα, με τη χρήση της βιβλιοθήκης WiringPi [31], ο προγραμματισμός των εισόδων/εξόδων γίνεται πολύ εύκολος. Προκειμένου όμως να έχουμε τη δυνατότητα να διαβάσουμε αναλογικές τιμές, και να μπορούμε να έχουμε έναν κλειστό βρόγχο ελέγχου με το RTDS, επιλέξαμε να προμηθευτούμε τον μικροελεγκτή Arduino XinoRF [32].



Εικόνα 9: Σύνδεση arduino και Raspberry Pi

Ο Arduino έχει αναλογικές εισόδους και εξόδους και υπάρχουν ελεύθερα στο διαδίκτυο οι σχετικές βιβλιοθήκες [32] έτσι ώστε να μεταφέρονται σειριακά εντολές και αναλογικές τιμές μεταξύ των δύο επεξεργαστών. Με αυτές τις βιβλιοθήκες λοιπόν μπορούμε να θεωρούμε ότι ο Raspberry Pi χρησιμοποιεί τις αναλογικές εισόδους/εξόδους του Arduino σαν να είναι δικές του και από εδώ και πέρα όποτε αναφέρουμε ότι το Raspberry διαβάζει αναλογικές τιμές, θα παραλείψουμε το κομμάτι της μεταξύ τους επικοινωνίας. Στο αντίστοιχο παράρτημα θα αναφερθούμε πιο αναλυτικά στον κώδικα που τρέχει πάνω στο Arduino έτσι ώστε να δρα συμπληρωματικά στα pins του Arduino.

Το RTDS έχει κάρτες με αναλογικές εισόδους και εξόδους. Όπως αναφέραμε και παραπάνω, η real time προσομοίωση του RTDS μας δίνει τη δυνατότητα να καθορίζουμε τη λειτουργία του προσομοιωμένου συστήματος σε πραγματικό χρόνο ελέγχοντας αυτές τις εισόδους. Επιλέξαμε λοιπόν να συνδέσουμε τις εισόδους του RTDS με τα ρελέ που ελέγχουν τα ελεγχόμενα φορτία στην προσομοιωμένη οικιακή εγκατάσταση. Με αυτό τον τρόπο ο ενεργειακός ελεγκτής μπορεί να θέτει σε λειτουργία τα ελεγχόμενα φορτία σύμφωνα με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης. Ακόμη, στη δεύτερη ενότητα των προσομοιώσεων (κλειστού βρόγχου-closed loop) σχεδιάσαμε το κύκλωμα της

προσομοίωσης έτσι ώστε στις εξόδους του RTDS να λαμβάνουμε τιμές τάσεων και ρευμάτων του κυκλώματος προκειμένου να πετύχουμε τον έλεγχο που θέλουμε.



Εικόνα 10: Φωτογραφία του RTDS

Για να γίνει αυτό πρέπει φυσικά να υπάρχει η απαραίτητη αντιστοίχιση των ηλεκτρικών μεγεθών και των εξόδων του RTDS μέσω ενός look-up table ή μίας γραμμικής συνάρτησης πρώτου βαθμού. Για να αποσαφηνίσουμε πως γίνεται αυτή η ανάγνωση μίας τιμής του κυκλώματος στην έξοδο του RTDS θα κάνουμε ένα παράδειγμα:

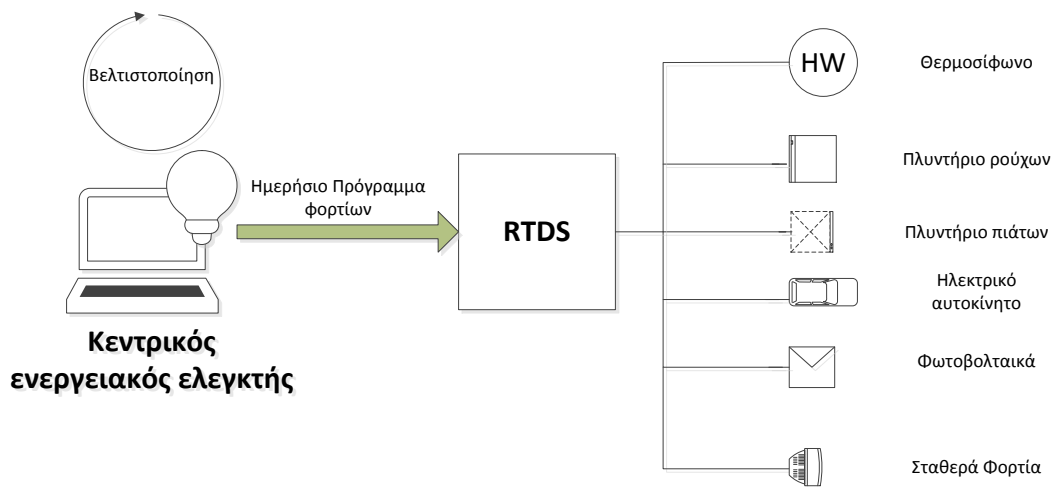
Έστω ότι παρακολουθούμε την τάση στην κεντρική παροχή της οικιακής εγκατάστασης προκειμένου π.χ. για να διαπιστώσουμε εάν μεταβάλλεται η τιμή της με τις απότομες μεταβολές του φορτίου. Υποθέτουμε ότι η τιμή της τάσης αυτής μπορεί να κινηθεί από τα 0 V έως τα 250 V με αναμενόμενη τιμή τα 230V (AC τάση). Αφού κάνουμε τις απαραίτητες ρυθμίσεις με το σχεδιαστικό εργαλείο, το RTDS δίνει σε μία αναλογική έξοδο την RMS τιμή της τάσης αυτού του κόμβου. Εάν η αναλογική έξοδος του RTDS παίζει στα όρια 0 V έως 5 V (DC τάση) τότε τα 250 V αντιστοιχίζονται με τα 5V της αναλογικής εξόδου. Άρα το Raspberry πρέπει να διαβάζει αυτήν την αναλογική τιμή και να την πολλαπλασιάζει με 50 για να παίρνει την RMS τιμή της τάσης. Ακολούθως, ελέγχοντας αυτή τη τιμή ο

μικροεπεξεργαστής μπορεί να κάνει τους υπολογισμούς που απαιτούνται και να χειριστεί τα ελεγχόμενα φορτία δημιουργώντας έτσι τον κλειστό βρόγχο ελέγχου.

### 3.5. Οι προσομοιώσεις ανοικτού βρόγχου (open loop)

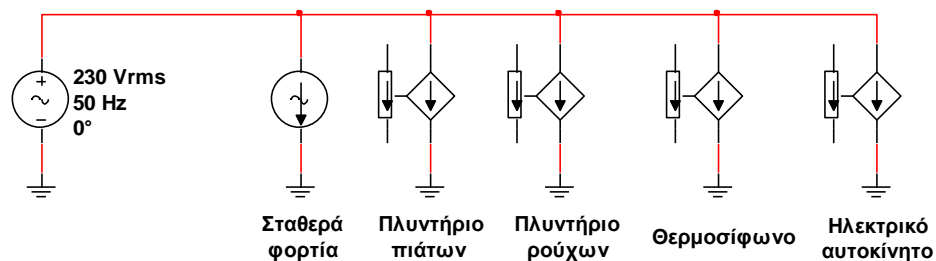
#### 3.5.1. Εισαγωγή

Προκειμένου λοιπόν να δοκιμαστεί ο ενεργειακός ελεγκτής, σχεδιάσαμε την εξής διάταξη:



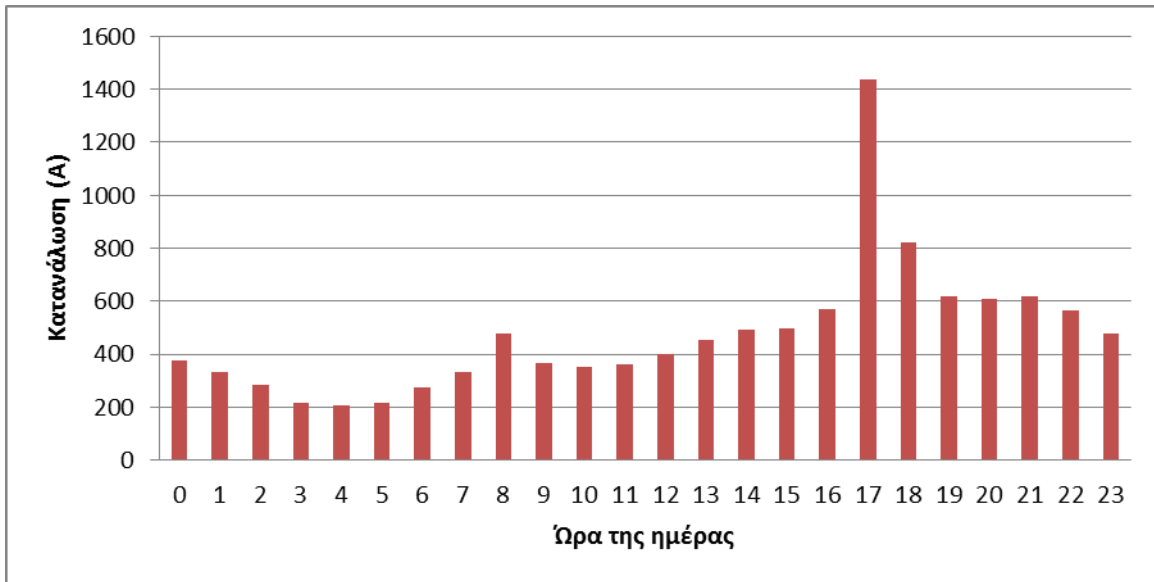
Εικόνα 11: Η διάταξη στις προσομοιώσεις ανοικτού βρόγχου

Ο κεντρικός ελεγκτής, όπως περιγράφηκε αναλυτικά και στο δεύτερο κεφάλαιο, πρέπει να δέχεται τις προτιμήσεις του καταναλωτή, τα όρια ισχύος και την τιμολόγηση ώστε να βελτιστοποιεί και να εξάγει τον ενεργειακό σχεδιασμό της μέρας. Το κύκλωμα που σχεδιάστηκε στο RTDS έχει ως εξής:



Εικόνα 12: Κύκλωμα της οικιακής εγκατάστασης

Η ηλεκτρική εγκατάσταση λοιπόν τροφοδοτείται από μία σταθερή μονοφασική πηγή τάσης στα 230 V, 50 Hz. Ακόμη, στο κύκλωμα βλέπουμε 5 πηγές ρεύματος. Από τα αριστερά προς τα δεξιά, η πρώτη πηγή ρεύματος είναι μία ανεξάρτητη πηγή ρεύματος η οποία «τραβάει» αθροιστικά το ρεύμα των σταθερών φορτίων που θα χρησιμοποιήσουμε στο σενάριο μας. Τα σταθερά φορτία που θα χρησιμοποιήσουμε σχηματίζουν μέσα στο εικοσιτετράωρο την εξής καμπύλη:

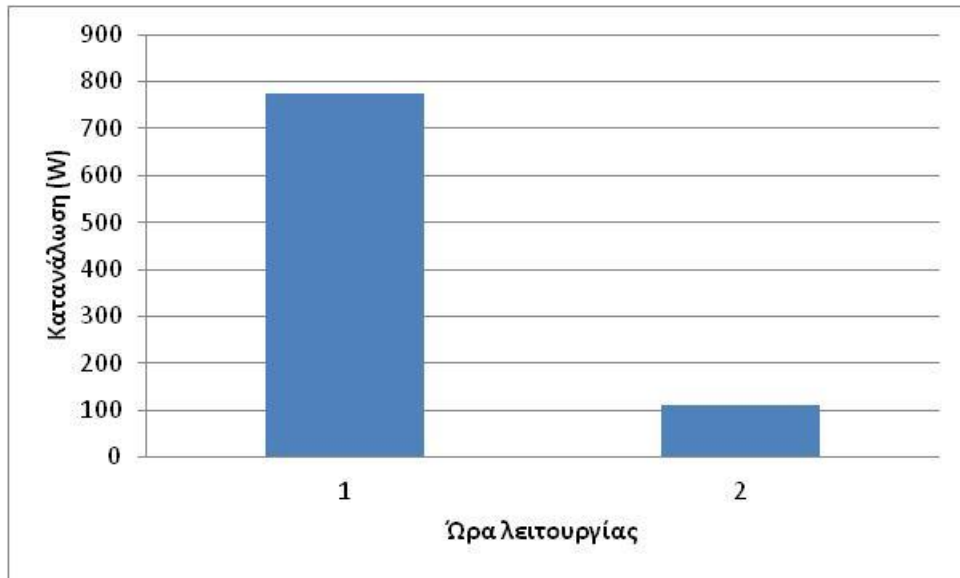


Γράφημα 34: Τα σταθερά φορτία των προσομοιώσεων

Οι υπόλοιπες τέσσερις πηγές ρεύματος είναι ελεγχόμενες πηγές ρεύματος οι οποίες όταν πάρουν εντολή από το ενεργειακό ελεγκτή, τραβάνε το ρεύμα που τους έχει οριστεί. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε στην ουσία προσομοιώσει την επικοινωνία που πρέπει να έχει ο ενεργειακός ελεγκτής με τα ελεγχόμενα φορτία προκειμένου να μπορεί να τα χρονοδρομολογεί. Περισσότερα για τον κώδικα και τις ρουτίνες που τρέχουν στον μικροεπεξεργαστή Raspberry θα παρατεθούν στο αντίστοιχο παράρτημα της διπλωματικής.

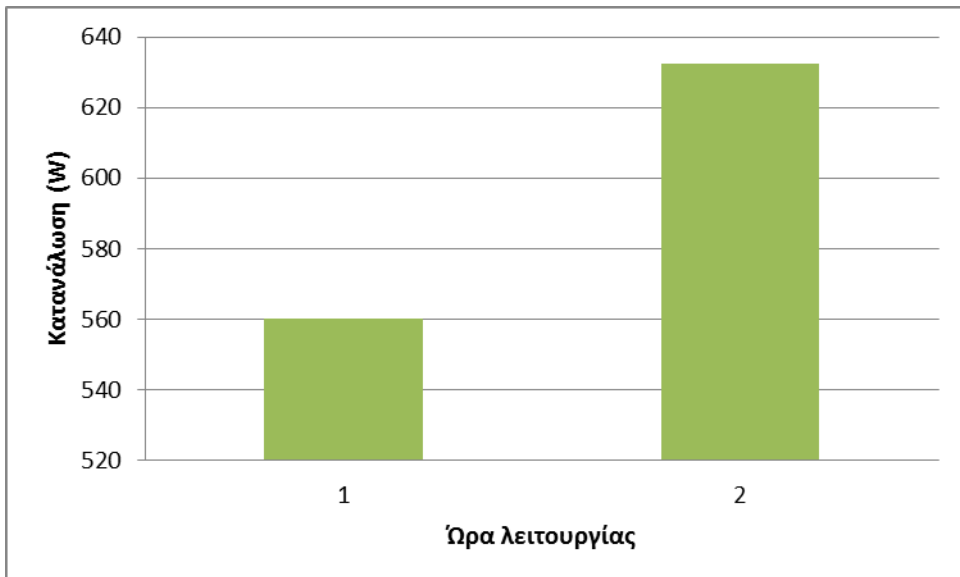
Οι τέσσερις ελεγχόμενες πηγές ρεύματος όπως τις βλέπουμε από τα αριστερά προς τα δεξιά αντιστοιχούν στα εξής φορτία:

- Πλυντήριο ρούχων:



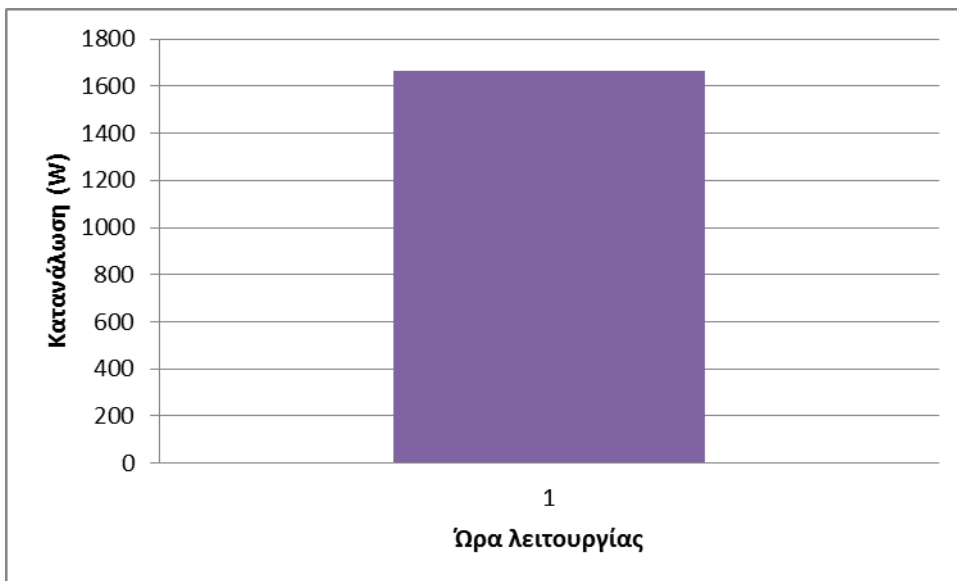
Γράφημα 35: Καμπύλη πλυντηρίου ρούχων

- Πλυντήριο πιάτων:



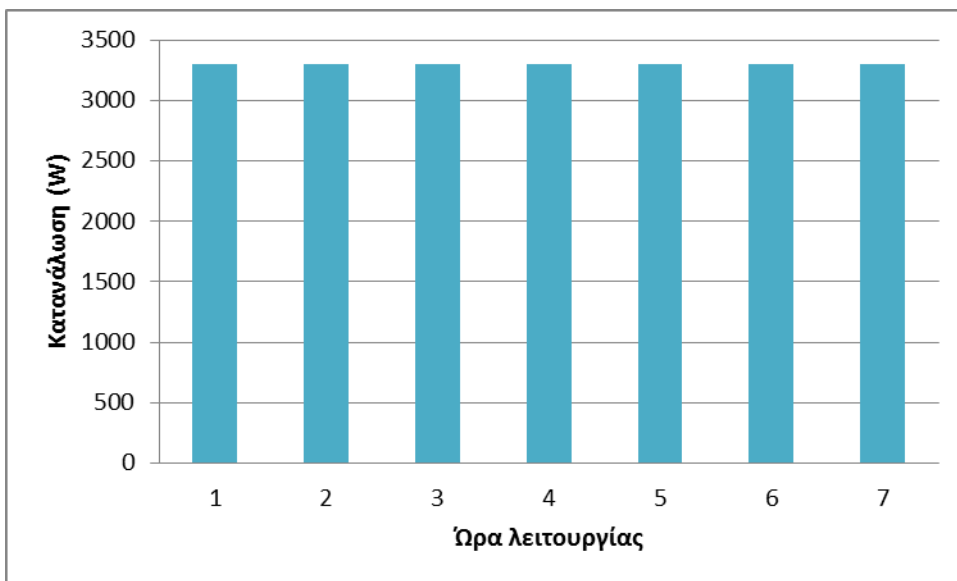
Γράφημα 36: Καμπύλη πλυντηρίου πιάτων

- Θερμοσίφωνο:



Γράφημα 37: Καμπύλη θερμοσίφωνα

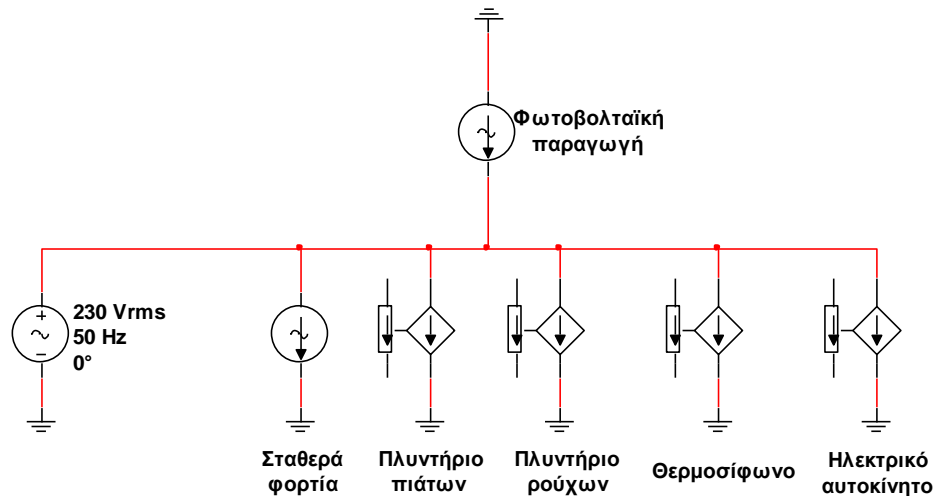
- Ηλεκτρικό αυτοκίνητο:



Γράφημα 38: Καμπύλη ηλεκτρικού αυτοκινήτου

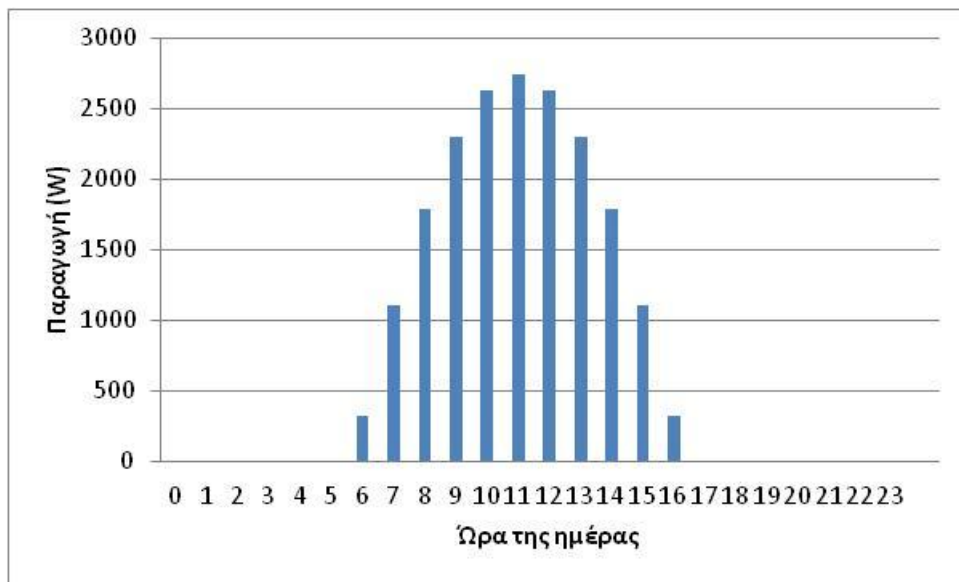
Ακόμη, σε όποια σενάρια συμπεριλαμβάνεται, στην οικιακή ηλεκτρική εγκατάσταση θα προστεθεί άλλος ένας κλάδος με πηγή ρεύματος η οποία τροφοδοτεί (και δεν τραβάει) ισχύ στην ηλεκτρική εγκατάσταση προκειμένου να προσομοιωθεί η λειτουργία τοπικής φωτοβολταϊκής παραγωγής. Η οικιακή εγκατάσταση τότε θα έχει το εξής κύκλωμα:





Εικόνα 13: Κύκλωμα οικιακής εγκατάστασης

Η καμπύλη της τοπικής φωτοβολταϊκής παραγωγής έχει ως εξής:



Γράφημα 39: Η φωτοβολταϊκή παραγωγή των προσομοιώσεων

Στις επόμενες ενότητες θα παρατεθούν τα διάφορα σενάρια προς προσομοίωση μαζί με τις απαραίτητες γραφικές παραστάσεις και τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης που τρέχει ο ενεργειακός ελεγκτής με το λογισμικό GLPK, τα οποία θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του RTDS.

### 3.5.2. Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση

Στο σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση όπως καταλαβαίνουμε ο ενεργειακός ελεγκτής δεν έχει ιδιαίτερο ρόλο. Τα ελεγχόμενα φορτία μπαίνουν κατ'επιλογή του χρήστη σε συγκεκριμένες ώρες που φαίνονται στον επόμενο πίνακα:

Φορτίο	Ώρα
Πλυντήριο πιάτων	15:00
Ηλεκτρικό αυτοκίνητο	17:00
Θερμοσίφωνο	14:00
Πλυντήριο ρούχων	11:00

Πίνακας 3: Προτιμήσεις καταναλωτή

Προς επιβεβαίωση, θα παραθέσουμε τις γραφικές παραστάσεις που δημιουργεί το RTDS για τα σταθερά αλλά και τα ελεγχόμενα φορτία. Να σημειώσουμε εδώ ότι αν και έχουν καταγραφεί, δεν έχει νόημα να παρουσιάσουμε τις γραφικές παραστάσεις των ρευμάτων καθώς είναι ημιτονοειδής με συχνότητα 50 Hz και σε μία γραφική παράσταση 24 ωρών χάνεται η μορφή της. Γι' αυτό θα παραθέσουμε τις RMS τιμές των ρευμάτων, τις οποίες επίσης κατέγραψε το RTDS:



Γράφημα 40: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Σταθερά φορτία



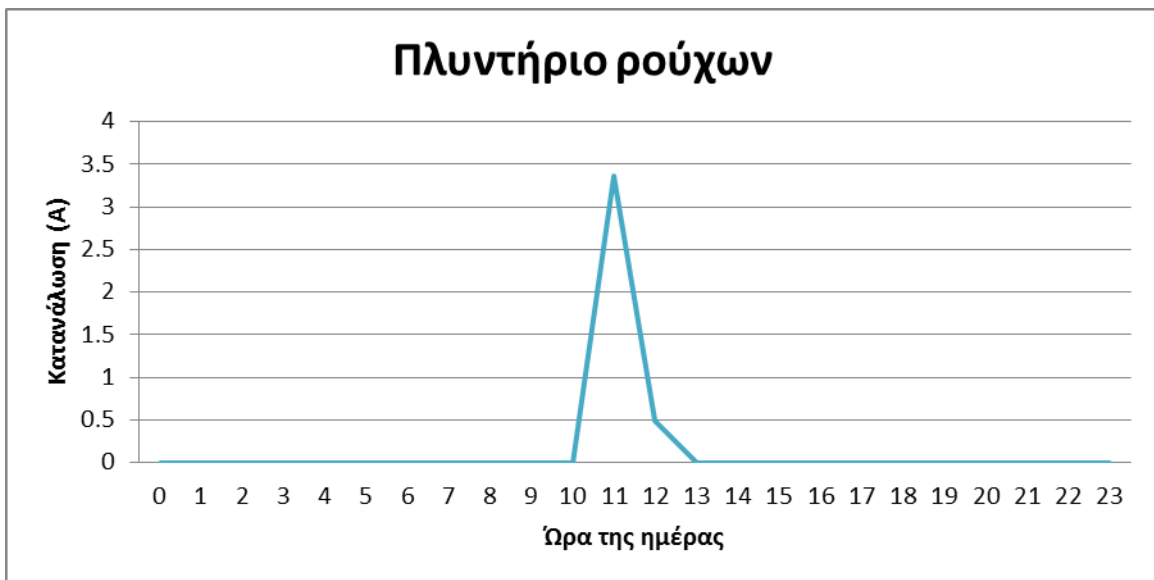
Γράφημα 41: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Πλυντήριο πιάτων



Γράφημα 42: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Ηλεκτρικό αυτοκίνητο



Γράφημα 43: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Θερμοσίφωνο



Γράφημα 44: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Πλυντήριο ρούχων

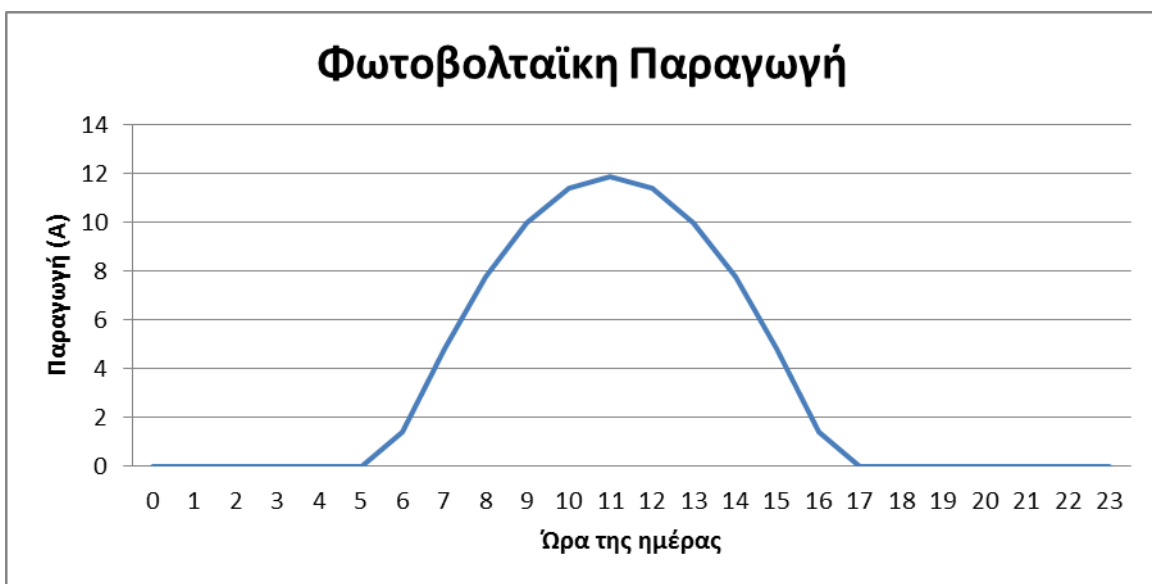
Το άθροισμα σταθερών και μεταβλητών φορτίων της εγκατάστασης δημιουργεί το εξής προφίλ ζήτησης:



Γράφημα 45: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Προφίλ κατανάλωσης

Το συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης παρουσιάζει αιχμές και γενικά ανομοιομορφίες που οφείλονται και στη καθημερινή ρουτίνα των ενοίκων. Μία τέτοιου τύπου καμπύλη ακριβώς είναι που θα θέλαμε να εξομαλύνουμε με τη βελτιστοποίηση.

Εάν εντάξουμε και φωτοβολταϊκή παραγωγή τότε το ισοζύγιο ισχύος αλλάζει. Η παραγωγή των φωτοβολταϊκών, όπως την κατέγραψε το RTDS, έχει ως εξής:



Γράφημα 46: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Φωτοβολταϊκή παραγωγή

Η καθαρή καμπύλη ζήτησης, μετά τον συμψηφισμό με τη φωτοβολταϊκή παραγωγή έχει την εξής μορφή:



Γράφημα 47: Σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση - Ισοζύγιο ισχύος

Από την τελευταία καμπύλη και την καμπύλη τοπικής παραγωγής μπορούμε να συμπεράνουμε ότι δεν γίνεται αποδοτική αξιοποίηση της τοπικής παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν ώρες που το ισοζύγιο κατανάλωσης είναι αρνητικό, πράγμα που σημαίνει ότι η παραγωγή ξεπερνάει την κατανάλωση, και λόγω της ώρας η αιχμή στις 17:00 δεν μειώνεται ούτε λίγο.

Στα επόμενα σενάρια θα εξετάσουμε κατά πόσο ο ενεργειακός ελεγκτής λειτουργεί όπως προβλέπεται. Ανάλογα με το σενάριο θα αλλάζει ο στόχος της βελτιστοποίησης και θα εξετάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Προς εξέταση είναι επίσης κατά πόσο ο ενεργειακός ελεγκτής λειτουργεί σωστά σαν χρονοδρομολογητής των ελεγχόμενων φορτίων σύμφωνα με τη βελτιστοποίηση.

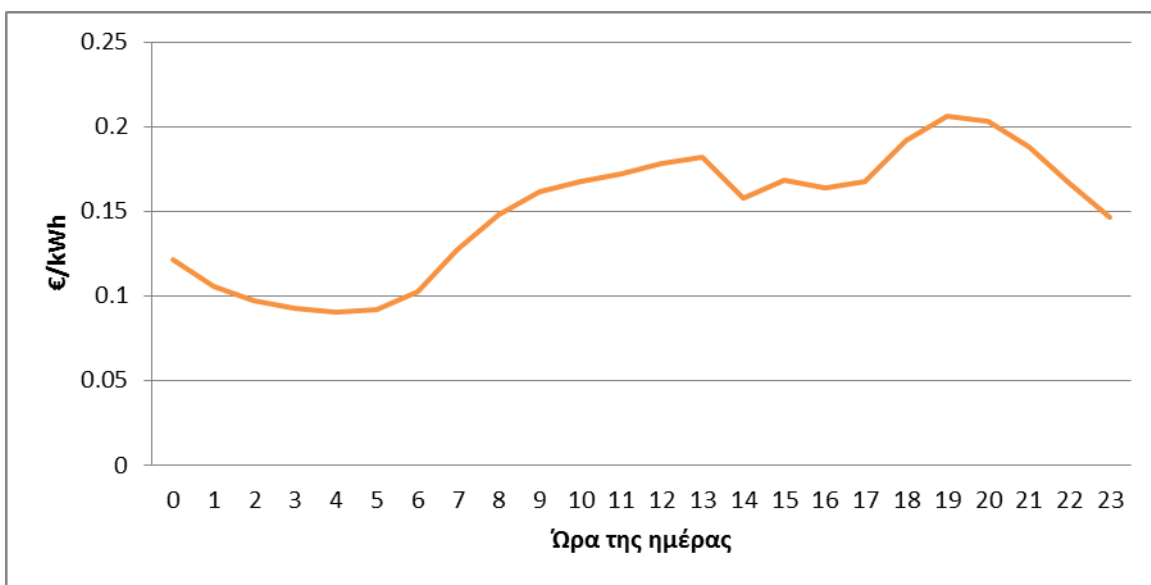
### 3.5.3. Σενάριο βελτιστοποίησης 1: Ελαχιστοποίηση του κόστους

Στο πρώτο σενάριο βελτιστοποίησης στόχος του ενεργειακού ελεγκτή είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους. Η εγκατάσταση και τα φορτία του σπιτιού είναι όπως ακριβώς και στο σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση. Το χρονικό παράθυρο μέσα στο οποίο μπορεί να μπει κάθε φορτίο φαίνεται στον επόμενο πίνακα:

Φορτίο	Χρονικό παράθυρο
Πλυντήριο ρούχων	7:00-16:00
Πλυντήριο πιάτων	7:00-16:00
Θερμοσίφωνο	12:00-16:00
Ηλεκτρικό αυτοκίνητο	17:00-23:00

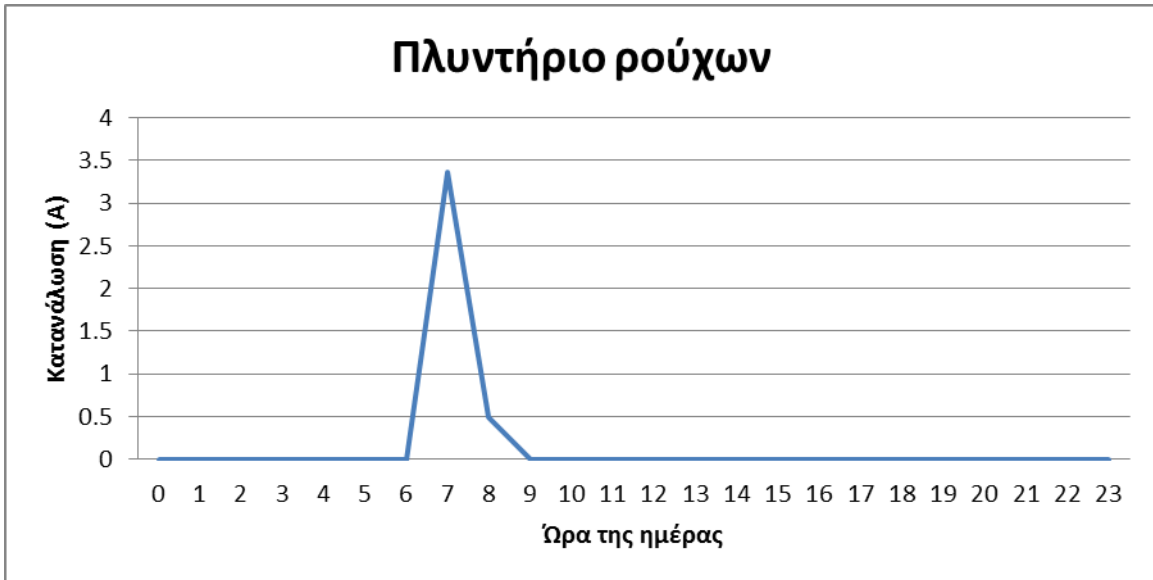
Πίνακας 4: Το χρονικό παράθυρο των ελεγχόμενων φορτίων - Σενάριο βελτιστοποίησης 1

Σε αυτό το σενάριο δεν έχουμε φωτοβολταϊκή παραγωγή. Λαμβάνεται υπόψη η εξής τιμολόγηση:



Γράφημα 48: Σενάριο 1 - RTP τιμολόγηση

Όπως καταλαβαίνουμε η τιμολόγηση αυτή είναι τύπου Real Time Pricing. Οι καταναλώσεις των ελεγχόμενων φορτίων (RMS τιμές), όπως τις παράγει το RTDS ακολουθούν:



Γράφημα 49: Σενάριο 1 - Πλυντήριο ρούχων



Γράφημα 50: Σενάριο 1 - Πλυντήριο πιάτων



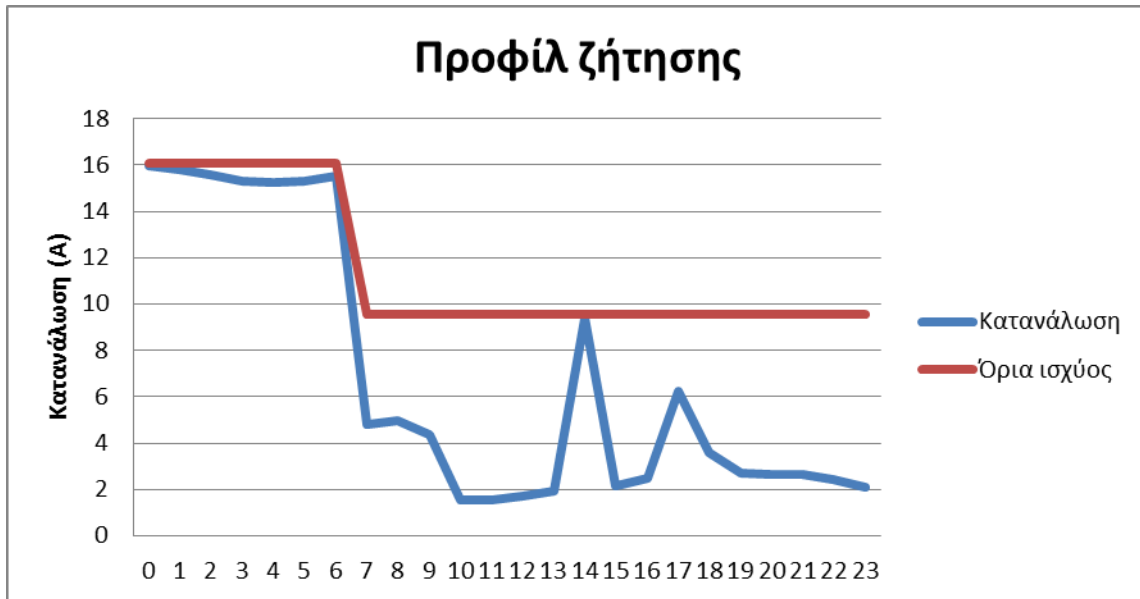


Γράφημα 51: Σενάριο 1 – Θερμοσίφωνο



Γράφημα 52: Σενάριο 1 - Ηλεκτρικό αυτοκίνητο

Αθροιστικά το προφίλ ζήτησης μετά την βελτιστοποίηση είναι το ακόλουθο:



Γράφημα 53: Σενάριο 1 - Προφίλ ζήτησης

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα ελεγχόμενα φορτία λειτουργούν τις προβλεπόμενες ώρες πράγμα που επιβεβαιώνει τη σωστή λειτουργία του ενεργειακού ελεγκτή. Η βελτιστοποίηση διαμορφώνει το προφίλ ζήτησης με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να εξομαλύνεται η καμπύλη. Παρόλα αυτά, δεν μπορεί να αποφευχθεί η αιχμή που δημιουργεί το θερμοσίφωνο και το ηλεκτρικό αυτοκίνητο, καθώς τα δύο αυτά φορτία είναι αρκετά μεγαλύτερα από τα υπόλοιπα. Σε κάθε περίπτωση η βελτιστοποίηση φροντίζει για την μέγιστη αξιοποίηση της RTP τιμολόγησης.

### 3.5.3. Σενάριο βελτιστοποίησης 2: Μεγιστοποίηση της αυτοκατανάλωσης

Σε αυτό το σενάριο προσπαθούμε να εκμεταλλευτούμε το μέγιστο δυνατό ποσοστό της τοπικής παραγωγής, όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 2. Συνοπτικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι αυτή η βελτιστοποίηση έχει έναν επιπλέον περιορισμό σε σχέση με την προηγούμενη: Τίθεται υπό χαλάρωση (relaxation) ο περιορισμός να είναι το φορτίο κάθε ώρα μεγαλύτερο από την τοπική παραγωγή. Σε αυτόν το πρόβλημα θα αφήσουμε ελεύθερο το χρονικό παράθυρο των φορτίων έτσι ώστε να διαπιστώσουμε αν ο επιπλέον περιορισμός τοποθετεί όλα τα φορτία μέσα στις ώρες που έχουμε παραγωγή. Ακόμη, στο πλαίσιο αυτής της βελτιστοποίησης θα θέσουμε ενιαία τιμολόγηση της κιλοβατώρας ώστε να καταστήσουμε μοναδικό στόχο της βελτιστοποίησης την μεγιστοποίηση της αυτοκατανάλωσης. Τα αποτελέσματα, όπως τα κατέγραψε το RTDS ακολουθούν:



Γράφημα 54: Σενάριο 2 - Πλυντήριο ρούχων



Γράφημα 55: Σενάριο 2 - Πλυντήριο πιάτων



Γράφημα 56: Σενάριο 2 - Θερμοσίφωνο



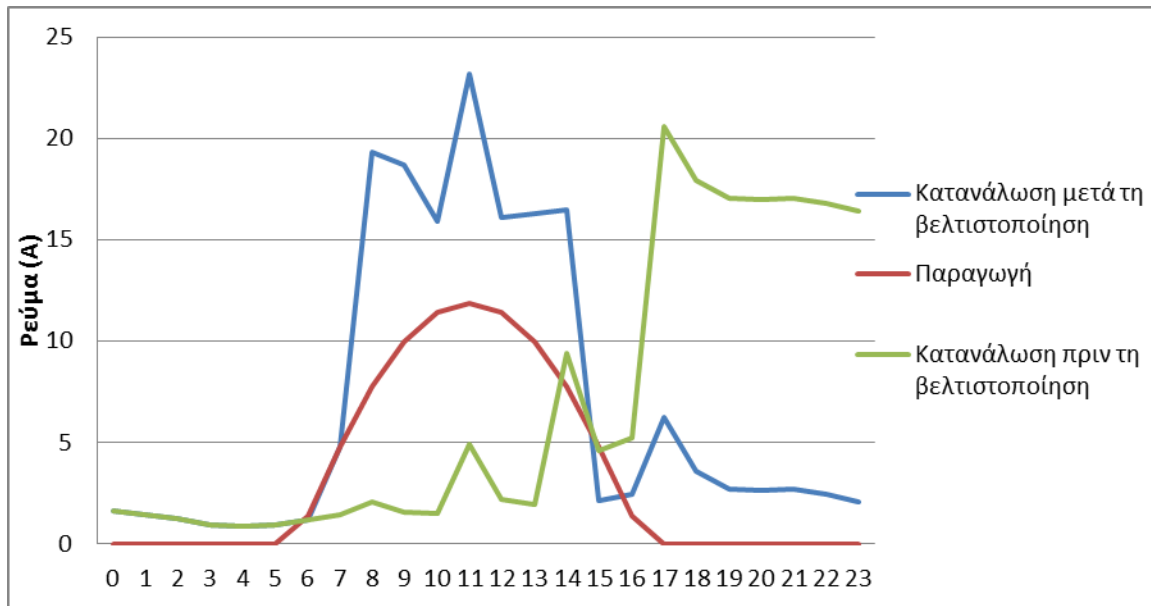
Γράφημα 57: Σενάριο 2 - Ηλεκτρικό αυτοκίνητο

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όλα τα φορτία μπαίνουν εντός του χρονικού παραθύρου που έχουμε παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά. Το τελικό προφίλ της ζήτησης διαμορφώνεται ως εξής:



Γράφημα 58: Σενάριο 2 - Προφίλ ζήτησης

Όπως μπορούμε να καταλάβουμε από το τελικό προφίλ της ζήτησης το πρόγραμμα βελτιστοποίησης κατέληξε σε ένα σχεδιασμό που αφήνει τις λιγότερες δυνατές ώρες με αρνητικό ισοζύγιο. Προκειμένου να έχουμε καλύτερη εικόνα της αξιοποίησης της τοπικής παραγωγής, παραθέτουμε στο ίδιο γράφημα την παραγωγή και την κατανάλωση:



Γράφημα 59: Σενάριο 2 - Αντιπαραβολή παραγωγής και κατανάλωσης πριν και μετά τη βελτιστοποίηση

Από τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι και σε αυτή τη προσομοίωση ο ενεργειακός ελεγκτής είχε σωστή επικοινωνία με το RTDS ώστε να χρονοδρομολογήσει τα ελεγχόμενα φορτία. Τέλος, να σημειώσουμε ότι αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να φανεί χρήσιμο για τον ενεργειακό σχεδιασμό της ζήτησης ενός σπιτιού ανάλογα με το μοντέλο της αγοράς και της χρέωσης για την κατανάλωσης. Μάλιστα, το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί πολύ εύκολα να προσαρμοστεί έτσι ώστε να μην επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της αυτοκατανάλωσης αλλά να επιτευχθεί η κάλυψη ενός συγκεκριμένου ποσοστού της παραγωγής, επειδή για παράδειγμα το υπόλοιπο το αγοράζει ο πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας.

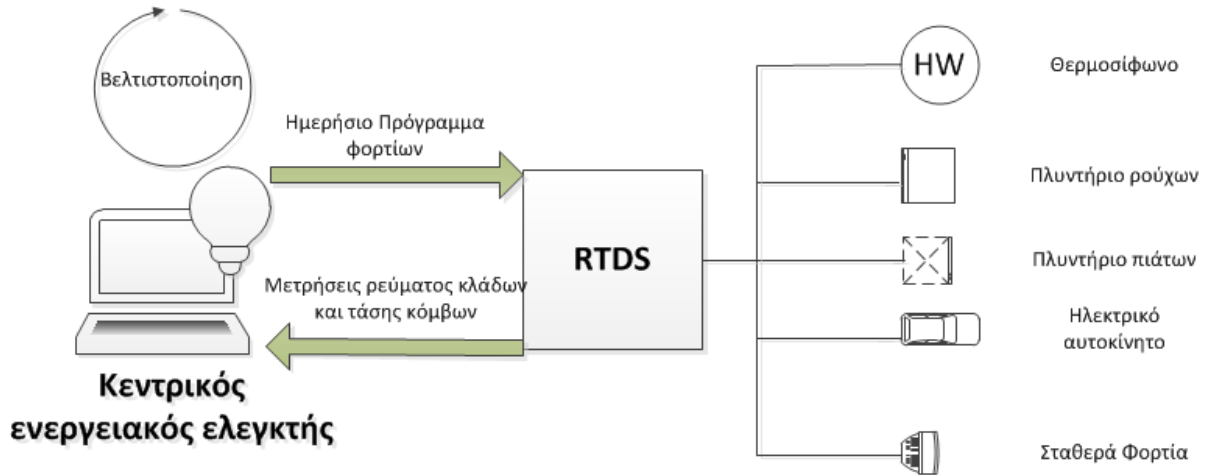
### **3.6. Οι προσομοιώσεις κλειστού βρόγχου (closed loop)**

#### **3.6.1. Εισαγωγή**

Οι προσομοιώσεις της προηγούμενης ενότητας μας επιτρέπουν να πούμε ότι από άποψη hardware, η σχεδίαση ενός ενεργειακού ελεγκτή είναι εφικτή. Μάλιστα, στο επόμενο κεφάλαιο θα χρησιμοποιήσουμε τον ίδιο ενεργειακό ελεγκτή για να καταδείξουμε τις δυνατότητες του να ελέγχει ρελέ και φορτία συνυπολογίζοντας παραμέτρους και εκτελώντας παράλληλα πολύπλοκους υπολογισμούς.

Παρόλα αυτά δεν μπορούμε να παραβλέψουμε όλες τις υποθέσεις και τις απλουστεύεις που κάναμε στο προηγούμενο κεφάλαιο προκειμένου να προχωρήσουν κανονικά οι προσομοιώσεις. Για παράδειγμα, έχει γίνει η υπόθεση ότι η αποκλίσεις από τις προβλέψεις για την τοπική παραγωγή είναι αρκετά μικρές ώστε να μην επηρεάζουν τον σχεδιασμό. Ακόμη, ότι οι οδηγίες που στέλνει ο aggregator (τιμολόγηση και όρια ισχύος) δεν θα χρειαστούν αλλαγή αν και στέλνονται από την προηγούμενη μέρα, για τις 24 επόμενες ώρες. Τέλος, δεν γίνεται να παραβλέψουμε τον ανθρώπινο παράγοντα. Η βελτιστοποίηση βασίζεται στον σχεδιασμό του καταναλωτή, και ένα εργαλείο που δεν παρέχει ευελιξία στον χρήστη του, έχει τελικά μειωμένη χρηστικότητα.

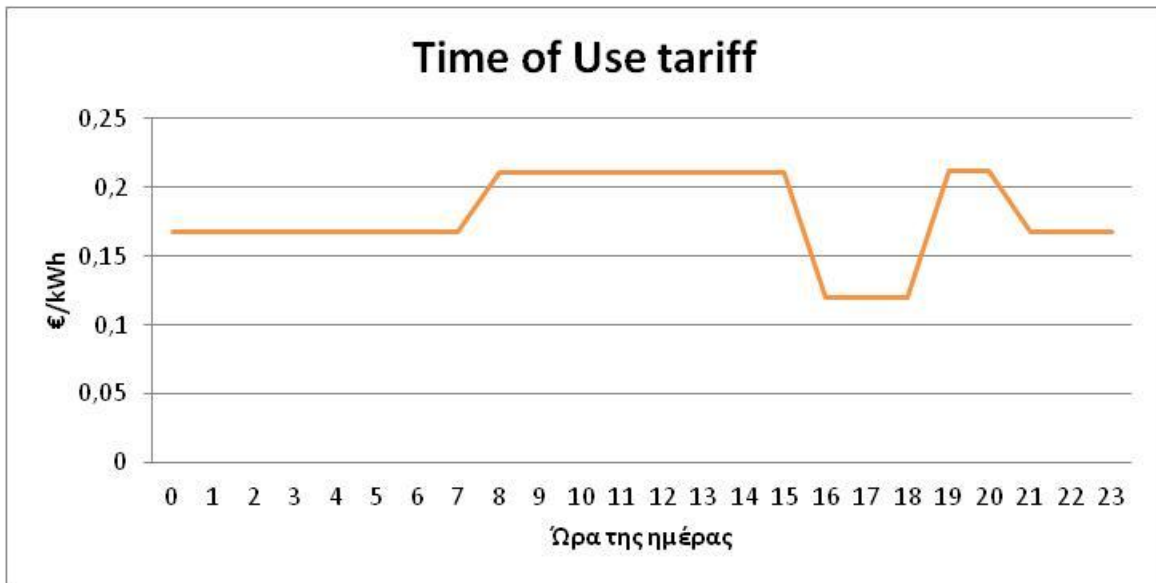
Το να επαναλαμβάνεται μέσα στη μέρα ο ενεργειακός προγραμματισμός για τις ώρες που απομένουν χαρακτηρίζεται λοιπόν απαραίτητη λειτουργικότητα του ενεργειακού ελεγκτή. Από άποψη βελτιστοποίησης αυτή η δυνατότητα δεν χρειάζεται επιπλέον σχεδιασμό. Ο τομέας που αξίζει να δοθεί βάρος είναι η ικανότητα του ελεγκτή να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του προκειμένου να αντιλαμβάνεται τις αλλαγές και να ξανασχεδιάζει την κατανάλωση του σπιτιού. Προκειμένου λοιπόν να περιγραφούν οι βασικές κατευθύνσεις για να αποκτήσει αυτή τη λειτουργικότητα ο ενεργειακός ελεγκτής, σε αυτό το κεφάλαιο θα σχεδιάσουμε τρία διαφορετικά σενάρια. Στα σενάρια αυτά θα αλλάζουν μέσα στη μέρα βασικοί παράμετροι της βελτιστοποίησης και θα φροντίσουμε να προγραμματίσουμε τον ενεργειακό ελεγκτή ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει σε αυτές τις αλλαγές σχεδιάζοντας ξανά την κατανάλωση του σπιτιού. Παράλληλα, περιγράφοντας αυτά τα σενάρια, θα σημειώσουμε και τις αλλαγές που πρέπει να γίνουν σε επίπεδο υλικού μέσα στο «έξυπνο δίκτυο» ενός σπιτιού ώστε να υπάρχει η απαραίτητη υποδομή. Η διάταξη στα πλαίσια των προσομοιώσεων κλειστού βρόγχου φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 14: Η διάταξη στις προσομοιώσεις κλειστού βρόγχου

### 3.6.2. Το σενάριο βάσης

Το σενάριο βάσης, πάνω στο οποίο θα γίνεται ξανά ο προγραμματισμός, έχει μέθοδο τιμολόγησης Time of Use tariff:



Γράφημα 60: Η μέθοδος τιμολόγησης στις προσομοιώσεις κλειστού βρόγχου

Τα σταθερά φορτία του βασικού σεναρίου φαίνονται στις επόμενες γραφικές:



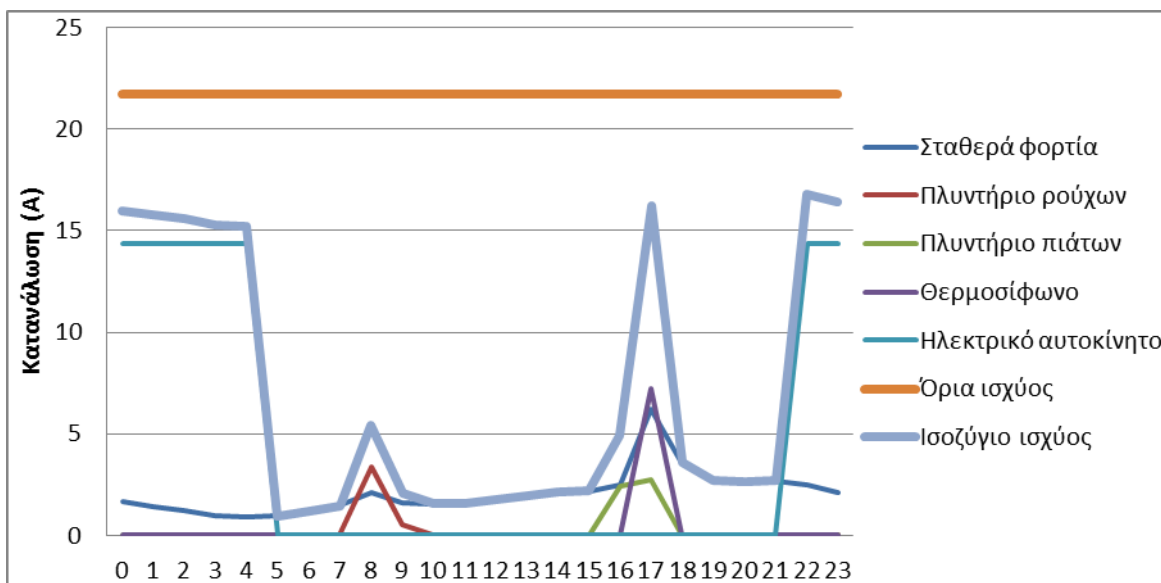
Γράφημα 61: Τα σταθερά φορτία στις προσομοιώσεις κλειστού βρόγχου

Το χρονικό παράθυρο μέσα στο οποίο μπορούν να μπουν τα τέσσερα ελεγχόμενα φορτία φαίνονται στον επόμενο πίνακα:

Φορτίο	Χρονικό παράθυρο
Πλυντήριο ρούχων	7:00-16:00
Πλυντήριο πιάτων	7:00-17:00
Θερμοσίφωνο	14:00-18:00
Ηλεκτρικό αυτοκίνητο	18:00-6:00

Πίνακας 5: Το χρονικό παράθυρο των ελεγχόμενων φορτίων - Σενάριο βάσης προσομοιώσεων κλειστού βρόγχου

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης διαμορφώνουν το εξής προφίλ ζήτησης, όπως καταγράφηκε από το RTDS:

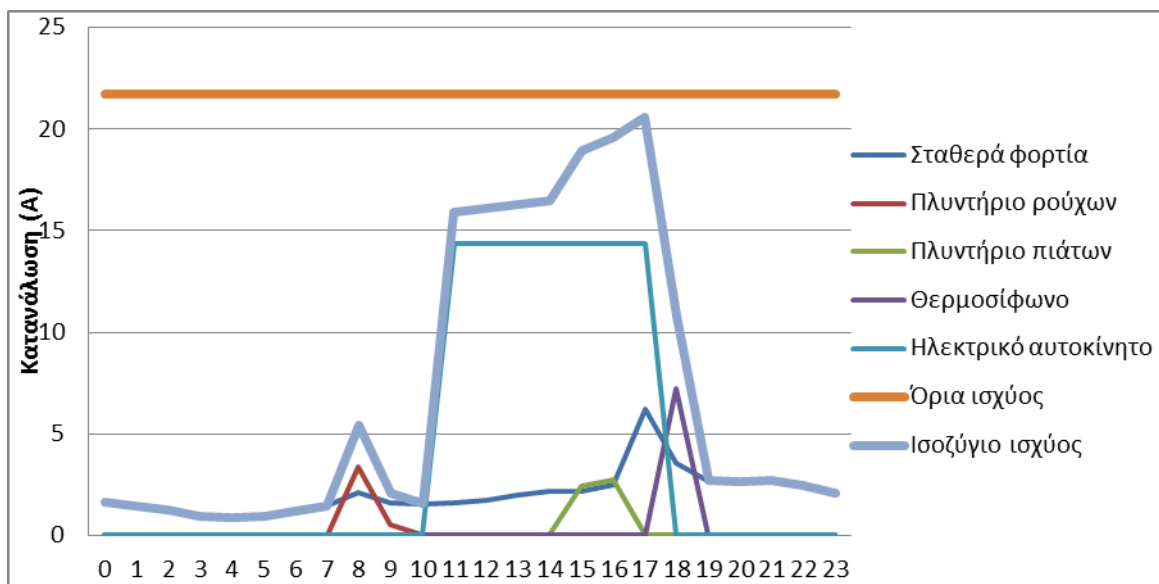


Γράφημα 62: Το προφίλ ζήτησης στο σενάριο βάσης - Προσομοίωση κλειστού βρόγχου



### 3.6.3. Σενάριο επαναπρογραμματισμού 1: Αλλαγή της ώρας φόρτισης του αυτοκινήτου

Ας υποθέσουμε ότι η χρήστης γυρίζει σπίτι νωρίτερα από την προγραμματισμένη ώρα, στις 11:00, και θέλει να φορτίσει το αυτοκίνητο του μέχρι τις 22:00. Αυτό μπορεί να το αντιληφθεί ο ενεργειακός ελεγκτής είτε με αίτημα του χρήστη είτε ελέγχοντας τον έξυπνο μετρητή στην παροχή που φορτίζει το ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Εμείς στα πλαίσια της προσομοίωσης επιλέξαμε να οδηγήσουμε την κατανάλωση του κλάδου που τροφοδοτεί το ηλεκτρικό αυτοκίνητο σε μία αναλογική έξοδο του RTDS. Μετά, μέσω εσωτερικών χειρισμών από το RTDS θα ενεργοποιήσουμε το ηλεκτρικό αυτοκίνητο και θα εξετάσουμε πως αποκρίνεται ο ελεγκτής. Αναμένουμε να τρέξει μία καινούργια βελτιστοποίηση στην οποία δεν θα εντάσσεται το πλυντήριο ρούχων (επειδή έχει μπει νωρίτερα από τις 11:00), και να υπολογίσει τις νέες ώρες έναρξης των φορτίων. Σημειώνεται ότι ο κώδικας του ενεργειακού ελεγκτή θα παρουσιαστεί στο παράρτημα, στην αντίστοιχη ενότητα για τις προσομοιώσεις κλειστού βρόγχου. Το νέο προφίλ ζήτησης παρουσιάζεται στην επόμενη καμπύλη:

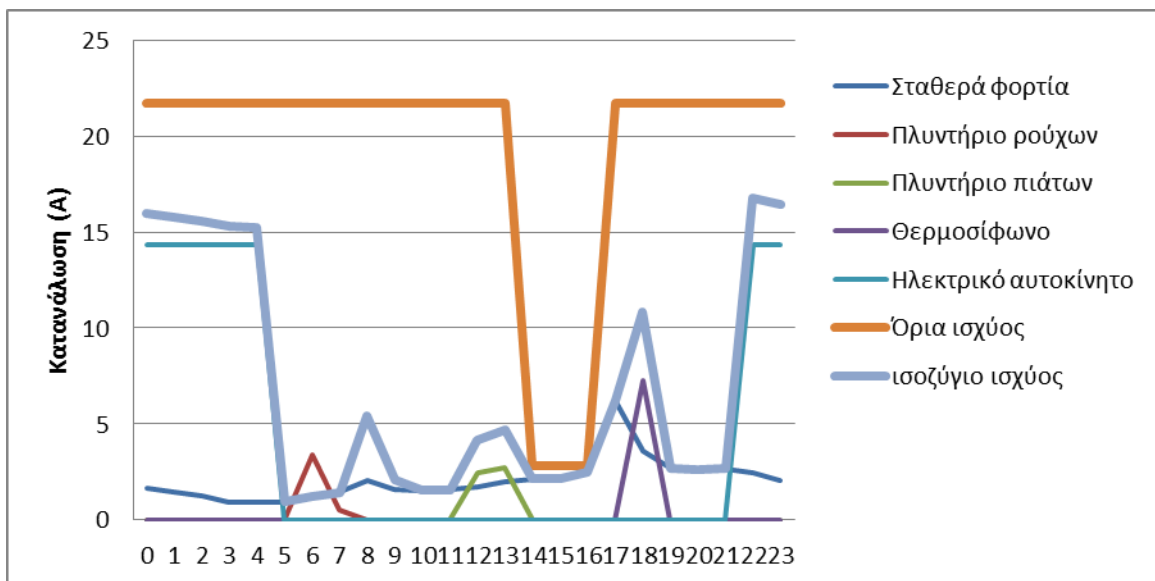


Γράφημα 63: Το προφίλ της ζήτησης στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης κλειστού βρόγχου

Η φόρτιση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου ξεκινάει στις 11:00 οπότε ο ελεγκτής τρέχει ξανά βελτιστοποίηση για το υπόλοιπο της ημέρας και αναδιοργανώνει το προφίλ ζήτησης. Το θερμοσίφωνο λοιπόν μπαίνει 1 ώρα αργότερα από το σενάριο βάσης, το πλυντήριο πιάτων μία ώρα νωρίτερα από το σενάριο βάσης και έτσι τηρούνται τα όρια ισχύος.

### 3.6.4. Σενάριο επαναπρογραμματισμού 2: Έκτακτα όρια ισχύος

Σε αυτό το σενάριο στις στέλνεται ένα έκτακτο σήμα από τον aggregator στον ενεργειακό ελεγκτή: Πρέπει από τις 14:00 έως τις 16:00 να τηρηθεί ένα ανώτατο όριο ισχύος στα 650 W. Ο ενεργειακός ελεγκτής πρέπει να προγραμματίσει την κατανάλωση του σπιτιού ώστε να σεβαστεί αυτά τα όρια. Στον επαναπρογραμματισμό δεν θα ενταχθεί ξανά το πλυντήριο ρούχων επειδή έχει ήδη μπει στις 8:00 στο σενάριο βάσης. Στα πλαίσια της προσομοίωσης σχεδιάσαμε μία ειδική ρουτίνα που στην αρχή της εκτέλεσης ρωτάει αν πρόκειται να μειωθούν τα όρια. Στην πραγματικότητα αυτό το σενάριο δεν απαιτεί τίποτα παραπάνω από ότι απαιτεί γενικά η ιδέα που περιγράφεται σε αυτή τη διπλωματική: Την υποδομή για την επικοινωνία μεταξύ του aggregator και των ενεργειακών ελεγκτών. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην επόμενη γραφική:



Γράφημα 64: Το προφίλ ζήτησης στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης κλειστού βρόγχου

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης μετακινούν το πλυντήριο πιάτων από τις 16:00 στις 12:00 προκειμένου να τηρηθούν τα ανώτατα όρια ισχύος.

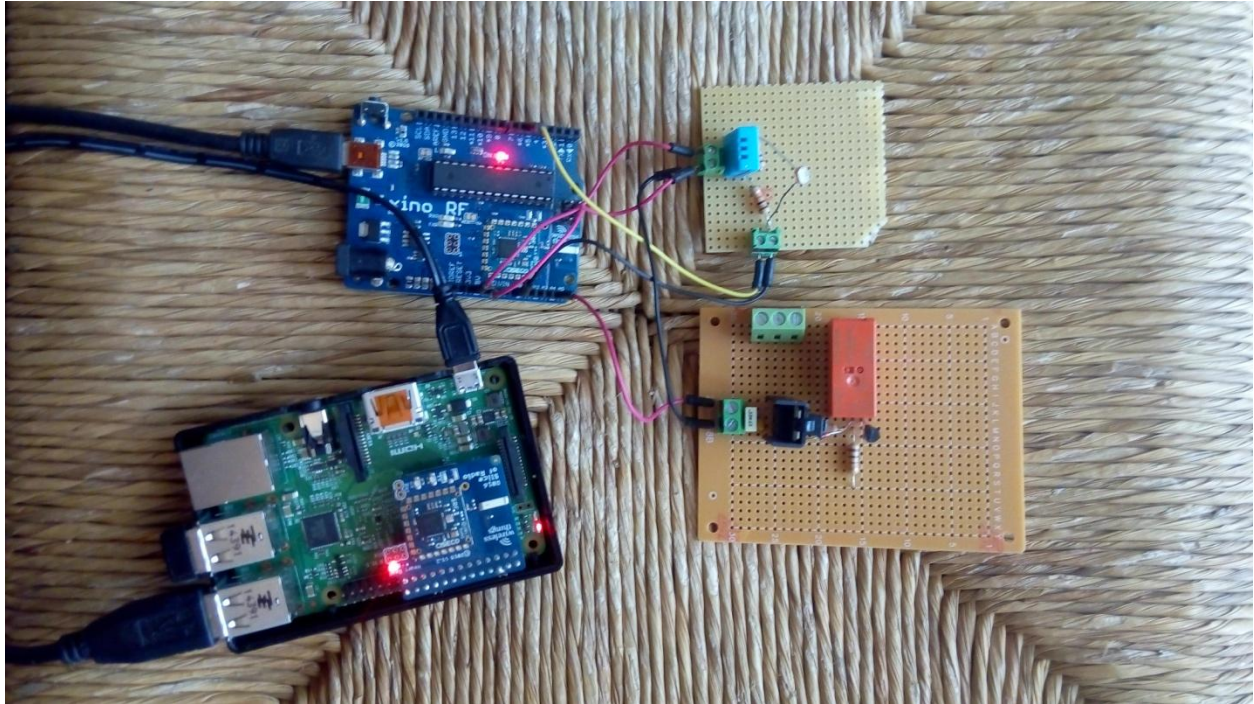
## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Κύκλωμα ελέγχου ρελέ με αισθητήρες με τη χρήση του ελεγκτή

### 4.1. Εισαγωγή

Όπως είδαμε και στα προηγούμενα κεφάλαια, μία από τις βασικές δυνατότητες ενός ελεγκτή είναι να διαβάζει στις εισόδους του αναλογικά και ψηφιακά σήματα, να τα επεξεργάζεται και αν χρειαστεί να διαμορφώνει τις εξόδους αλληλεπιδρώντας έτσι με το περιβάλλον. Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου θα περιγράψουμε πως σχεδιάσαμε ένα τέτοιο σύστημα το οποίο αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:

- Ένα κύκλωμα από αισθητήρες που μετράνε θερμοκρασία, υγρασία και επίπεδο φωτισμού στον χώρο στον οποίο βρίσκονται.
- Ένα κύκλωμα ελέγχου ρελέ μέγιστης έντασης 8A μέσω transistor BJT.
- Τον μικροελεγκτή Arduino XinoRF. Ο μικροελεγκτής Arduino είναι ιδανικός για polling (συνεχής μέτρηση) των εισόδων του και χειρισμό των εξόδων του. Μάλιστα, μπορεί να δειγματοληπτεί με συχνότητα έως 10000 φορές το δευτερόλεπτο. Ακόμη μπορεί να μεταφέρει δεδομένα στον Raspberry Pi 2.
- Τον κεντρικό ελεγκτή Raspberry Pi 2. Ο ελεγκτής αυτός έχει σύστημα μνήμης(και άρα λειτουργικό σύστημα), θύρα Ethernet , usb εισόδους, έξοδο για γραφικά κ.α. Κοινώς παρέχει όσα πράγματα μπορεί να παρέχει ένας κλασικός προσωπικός υπολογιστής οπότε δεν ενδείκνυται για μέτρηση αναλογικών τιμών(θέματα χρονοδρομολόγησης λειτουργικών κτλ). Συνεχίζει όμως να αποτελεί την καλύτερη λύση για τον κεντρικό ελεγκτή ενός «έξυπνου» σπιτιού οπότε θα δουλέψουμε με τον Arduino συνδεδεμένο στον Raspberry Pi 2, επειδή ακριβώς και σε ένα πραγματικό δίκτυο ενός «έξυπνου» σπιτιού ο κεντρικός ελεγκτής θα συντονίζει όλες τις άλλες οντότητες.

Ολόκληρη η διάταξη φαίνεται στην επόμενη εικόνα:

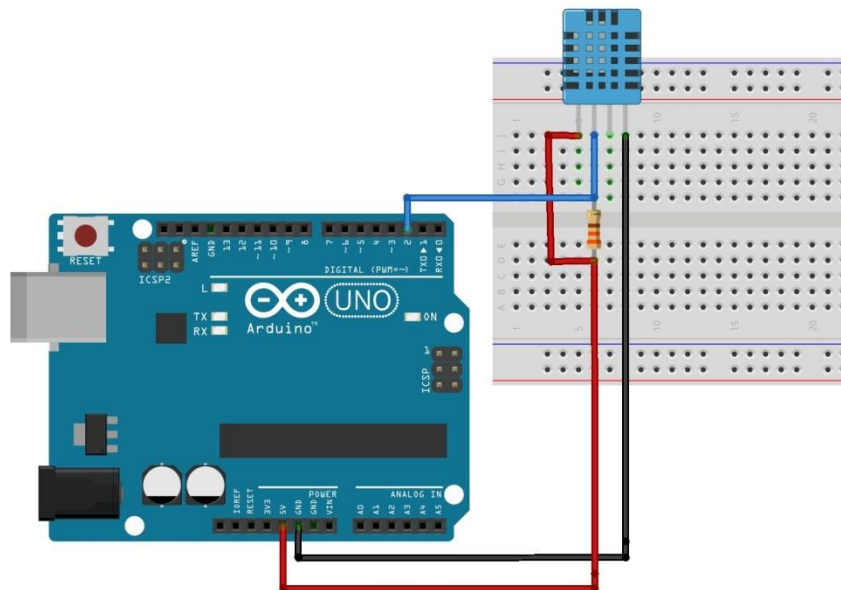


Για να καταδείξουμε τις δυνατότητες αυτού του υποσυστήματος θα το στήσουμε ώστε να δειγματοληπτεί κάθε 10 λεπτά τις περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία, φωτισμό) και εφόσον ισχύουν κάποιες προϋποθέσεις να δίνει εντολή για το κλείσιμο ενός ρελέ. Προτού όμως τρέξουμε την εφαρμογή ας περιγράψουμε πιο συγκεκριμένα κάθε υποσύστημα.

#### 4.2. Κύκλωμα αισθητήρων

Το κύκλωμα αποτελείται στην ουσία από δύο block: Το κύκλωμα του DHT11 και το κύκλωμα της φωτοαντίστασης(Light Dependent Resistor). Πιο αναλυτικά:

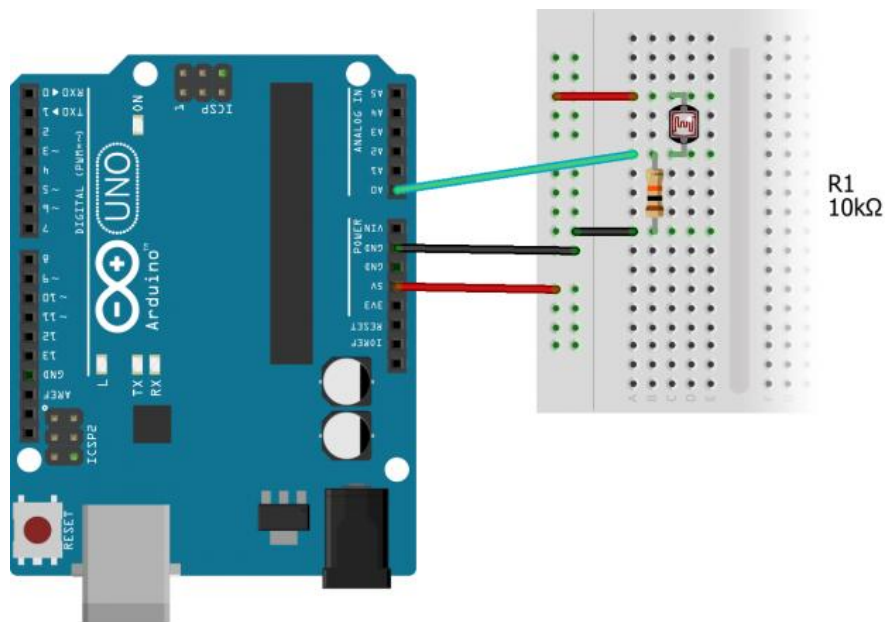
DHT11: Ο DHT11 είναι ένας ψηφιακός αισθητήρας χαμηλού κόστους που μετράει θερμοκρασία και υγρασία σε ένα χώρο. Περισσότερα για τον αισθητήρα μπορεί να βρει κανείς στο datasheet του [31]. Η συνδεσμολογία του αισθητήρα με τον Arduino φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 15:Σύνδεση DHT11 και Arduino

Πέρα από την τροφοδοσία λοιπόν το μόνο που χρειάζεται είναι η σύνδεση του ψηφιακού pin εξόδου του DHT11 με μία ψηφιακή είσοδο του Arduino, ενώ το 3<sup>ο</sup> pin του αισθητήρα μένει στον αέρα. Σημειώνεται ότι η αντίσταση από την τροφοδοσία στο pin σήματος προτείνεται να είναι 10kΩ. Ένα pin μόνο αρκεί για τη μετάδοση όλων των σημάτων (εντολή ανάγνωσης στον αισθητήρα, αποστολή των τιμών από τον αισθητήρα) αρκεί να έχεις προγραμματίσει κατάλληλα τον μικροελεγκτή. Όπως μπορεί να δει κανείς αναλυτικά στο datasheet ο αισθητήρας με ένα συγκεκριμένο μοτίβο στέλνει 40 bit πληροφορίας τα οποία εμπεριέχουν την θερμοκρασία και την υγρασία του χώρου. Από εκεί και πέρα έχουν γραφτεί πλήρως λειτουργικές open-source βιβλιοθήκες [32] για την μετάφραση αυτής της πληροφορίας έτσι ώστε να μπορούμε να διαβάσουμε στο επίπεδο του μικροελεγκτή τις πραγματικές τιμές.

Φωτοαντίσταση(LDR): Η φωτοαντίσταση δίνει την δυνατότητα για μέτρηση του φωτισμού σε ένα χώρο με τον πιο απλό και οικονομικό τρόπο. Η αντίσταση στα άκρα της μεταβάλλεται ανάλογα με τον φωτισμό, και μάλιστα ελαττώνεται όσο γίνεται πιο φωτεινός ο χώρος. Επειδή συμπεριφέρεται σαν αντίσταση δεν μπορεί κανείς να πάρει ακριβή μέτρηση σε LUX. Η χρησιμότητα της είναι αφού την συνδέσεις σε ένα κύκλωμα διαιρέτη τάσης να συγκρίνεις το επίπεδο φωτισμού σε σχέση με μία τιμή που θεωρείς ως τιμή αναφοράς. Έτσι μπορείς να γνωρίζεις αν το δωμάτιο είναι πιο σκοτεινό ή πιο φωτεινό από την αναφορά σου, άρα αν άλλαξαν οι συνθήκες περιβάλλοντος, αν πέρασε κάποιο σώμα από κάποιο σημείο διακόπτοντας το φως στιγμιαία κτλ. Η συνδεσμολογία του διαιρέτη τάσης είναι πολύ απλή και φαίνεται στο επόμενο σχήμα:

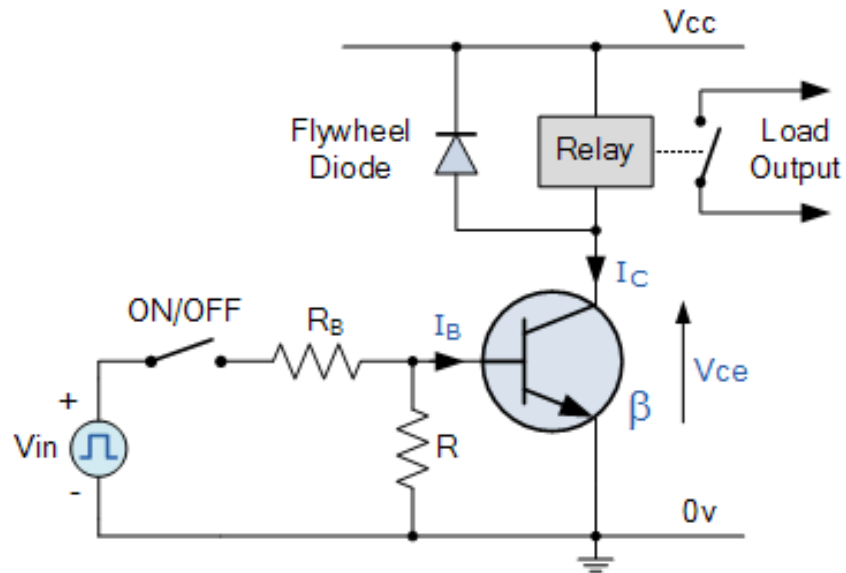


Εικόνα 16:Σύνδεση LDR και Arduino

Πέρα από την τροφοδοσία, αρκεί να συνδέσουμε το κοινό pin της αντίστασης και της φωτοαντίστασης με ένα αναλογικό pin εισόδου του Arduino. Η αναλογική τιμή της τάσης σε αυτόν τον κόμβο μπορεί να κυμανθεί από 0V έως 5V. Τα 5V από τη λειτουργία του διαιρέτη τάσης αντιστοιχούν σε πολύ χαμηλή τιμή αντίστασης για την φωτοαντίσταση και άρα σε ένα δωμάτιο με πολύ έντονο φωτισμό, ενώ το ακριβώς ανάποδο ισχύει για τα 0V. Σε επίπεδο προγραμματισμού, το μόνο που απαιτείται είναι το διάβασμα της τάσης στο αναλογικό pin του Arduino, η οποία γίνεται scale σε μία κλίμακα 0 έως 1023. Ο κώδικας που εκτελείται στο Arduino για την ανάγνωση και των δύο παραπάνω αισθητήρων αλλά και για τον έλεγχο του ρελέ θα παρατεθεί στην υποενότητα του ελεγκτή παρακάτω.

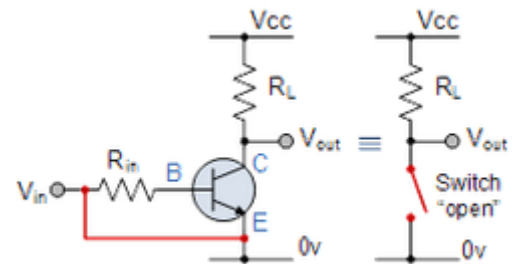
### 4.3 Κύκλωμα ελέγχου ρελέ

Η θεωρία της λειτουργίας ενός τρανζίστορ θεωρείται δεδομένη για τον αναγνώστη αυτής της εργασίας οπότε η ανάλυση της κυκλωματικής λειτουργίας θα είναι σχετικά συνοπτική. Το BJT τρανζίστορ είναι ένα στοιχείο που ελέγχεται από το ρεύμα που διαπερνά στη βάση του. Ανάλογα με την τιμή του ρεύματος στη βάση του, ένα τρανζίστορ μπορεί να λειτουργήσει σε τρεις περιοχές: στην ενεργό περιοχή, την περιοχή κορεσμού και την περιοχή αποκοπής. Αν φροντίσουμε έτσι ώστε να λειτουργούμε το τρανζίστορ μόνο στις δύο περιοχές κορεσμού και αποκοπής, τότε έχουμε ένα διακόπτη ικανό να οδηγήσει ένα ρελέ. Η συνδεσμολογία που θα χρησιμοποιήσουμε (γνωστή ως κοινού εκπομπού) φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



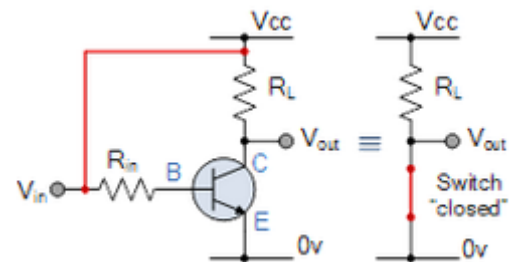
Εικόνα 3:Κύκλωμα ελέγχου ρελέ με τρανζίστορ BJT

- Εάν φροντίσουμε ώστε η τάση μεταξύ της βάσης και του εκπομπού να είναι μικρότερη από 0,7V τότε το τρανζίστορ μένει στην περιοχή αποκοπής οπότε δεν περνάει ρεύμα από τον συλλέκτη στον εκπομπό.



Εικόνα 4: BJT στην περιοχή αποκοπής

- Εάν επιβάλουμε τάση μεγαλύτερη των 0,7V μεταξύ βάσης και συλλέκτη τότε το τρανζίστορ θα λειτουργεί στην περιοχή κορεσμού και θα επιτρέπει να περνάει το μέγιστο δυνατό ρεύμα από τον συλλέκτη μέχρι τον εκπομπό.



Εικόνα 5:BJT στην περιοχή κορεσμού

Αυτό που χρειαζόμαστε λοιπόν είναι κάποιοι υπολογισμοί για την διαστασιολόγηση των στοιχείων. Από το datasheet [33] βρίσκουμε ότι το ρελέ έχει ονομαστικά χαρακτηριστικά 5V, 8A και άγει εφόσον η τάση στα άκρα του ξεπεράσει τα 3,5V. Επίσης χρειάζονται 200mA για να διεγείρουν το εσωτερικό μαγνητικό κύκλωμα του ρελέ να βραχυκυκλώσει τις επαφές του. Χρησιμοποιώντας κλασική ηλεκτρονική κάνουμε τους ακόλουθους υπολογισμούς:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{200\text{mA}}{200} = 1\text{mA}$$

$$R_B = \frac{V_{in} - V_{BE}}{I_B} = \frac{5.0\text{V} - 0.7\text{V}}{1 \times 10^{-3}} = 4.3\text{k}\Omega$$

Για να είμαστε ασφαλώς εντός της περιοχής και να μπορούμε να παρέχουμε περισσότερο ρεύμα αν χρειαστεί, διαλέγουμε  $R_B = 1\text{k}\Omega$ . Ακόμη θα διαλέξουμε μία αντίσταση  $R = 1\text{k}\Omega$  από την βάση στον εκπομπό. Αυτή η αντίσταση σταθεροποιεί κάπως το κύκλωμα στις αλλαγές θερμοκρασίας αλλά σταθεροποιεί επίσης το κύκλωμα σε περίπτωση που η είσοδος είναι ακαθόριστη τιμή, πράγμα που μπορεί να συμβεί στην εκκίνηση του μικροελεγκτή ή σε άλλες καταστάσεις «εκτός σχεδιασμού». Στην περίπτωση λοιπόν που η είσοδος είναι ακαθόριστη τιμή (ή High-Z στη διεθνή βιβλιογραφία) τότε αυτή η αντίσταση οδηγεί τα ρεύματα διαρροής προς τη Γη. Γενικά η συμβολή αυτής της αντίστασης θεωρείται αμελητέα αλλά θα την χρησιμοποιήσουμε εδώ. Τέλος το κύκλωμα χρειάζεται μία δίοδο αντεπίστροφης παράλληλα με το ρελέ για να αποσβέσει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που παράγει το ρελέ κατά το άνοιγμά του, το οποίο μπορεί να βλάψει το τρανζίστορ.

#### 4.4 Μικροελεγκτής Arduino XinoRF

Ο μικροελεγκτής Arduino XinoRF χρησιμεύει ως επέκταση του κεντρικού ελεγκτή. Μπορεί να κάνει rolling των αναλογικών εισόδων του σε συντονισμό με τον κεντρικό ελεγκτή (βασικά κατόπιν αιτήματος του κεντρικού ελεγκτή) και με τον ίδιο τρόπο να οδηγεί τις εξόδους του. Στην εφαρμογή μας οι αισθητήρες και το κύκλωμα ελέγχου φορτίου με ρελέ συνδέονται πάνω στον μικροελεγκτή ο οποίος βρίσκεται σε ένα αέναο βρόχο ελέγχου των εισόδων του. Μέσα σε αυτό το βρόχο θα μεταφέρει τις μετρήσεις μέσω σειριακής επικοινωνίας στον κεντρικό ελεγκτή. Ο κώδικας του Arduino έχει ως εξής:

```

1. #include <dht.h>
2.
3. dht DHT;
4. int LDR_Pin=A0;
5. int relay=13;
6. int control=0;
7.
8. #define DHT11_PIN 5
9.
10. void setup()
11. {
12.   Serial.begin(115200);
13.   pinMode(relay,OUTPUT);
14. }
15.
16. void loop()
17. {
18.   // READ DATA
19.   Serial.print("DHT11, \t");
20.   int chk = DHT.read11(DHT11_PIN);

```



```

21. int LDRReading=analogRead(LDR_Pin);
22.
23. switch (chk)
24. {
25.     case DHTLIB_OK:
26.         Serial.print("OK,\t");
27.         break;
28.     case DHTLIB_ERROR_CHECKSUM:
29.         Serial.print("Checksum error,\t");
30.         break;
31.     case DHTLIB_ERROR_TIMEOUT:
32.         Serial.print("Time out error,\t");
33.         break;
34.     case DHTLIB_ERROR_CONNECT:
35.         Serial.print("Connect error,\t");
36.         break;
37.     case DHTLIB_ERROR_ACK_L:
38.         Serial.print("Ack Low error,\t");
39.         break;
40.     case DHTLIB_ERROR_ACK_H:
41.         Serial.print("Ack High error,\t");
42.         break;
43.     default:
44.         Serial.print("Unknown error,\t");
45.         break;
46. }
47. if ((LDRReading>450) && (DHT.temperature>=30) && (DHT.humidity>32))
48. {
49.     digitalWrite(relay,HIGH);
50.     control=1;
51. }
52. else
53. {
54.     digitalWrite(relay,LOW);
55.     control=0;
56. }
57. // DISPLAY DATA
58. Serial.print(DHT.humidity, 1);
59. Serial.print(",\t");
60. Serial.print(DHT.temperature, 1);
61. Serial.print(",\t");
62. Serial.print(LDRReading);
63. Serial.print(",\t");
64. Serial.println(control);
65. delay(600000);
66. }

```

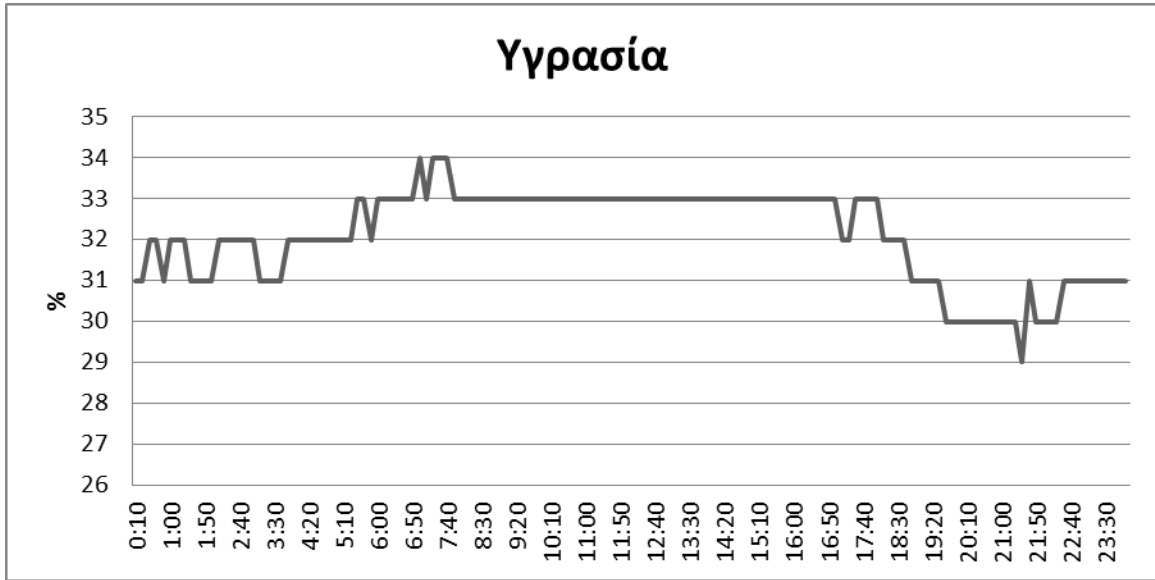
Σημειώνεται ότι η γλώσσα προγραμματισμού του Arduino είναι ίδια ακριβώς με την γλώσσα προγραμματισμού C, εμπλουτισμένη με κάποιες βιβλιοθήκες ώστε να υπάρχουν εύχρηστες χαμηλού επιπέδου bitwise εντολές. Όπως φαίνεται και από τον κώδικα, χάριν εφαρμογής, οι τρεις συνθήκες που πρέπει να ισχύουν ταυτόχρονα, ώστε να δοθεί εντολή στο ρελέ να κλείσει, είναι οι εξής:

*Υγρασία > 32%*

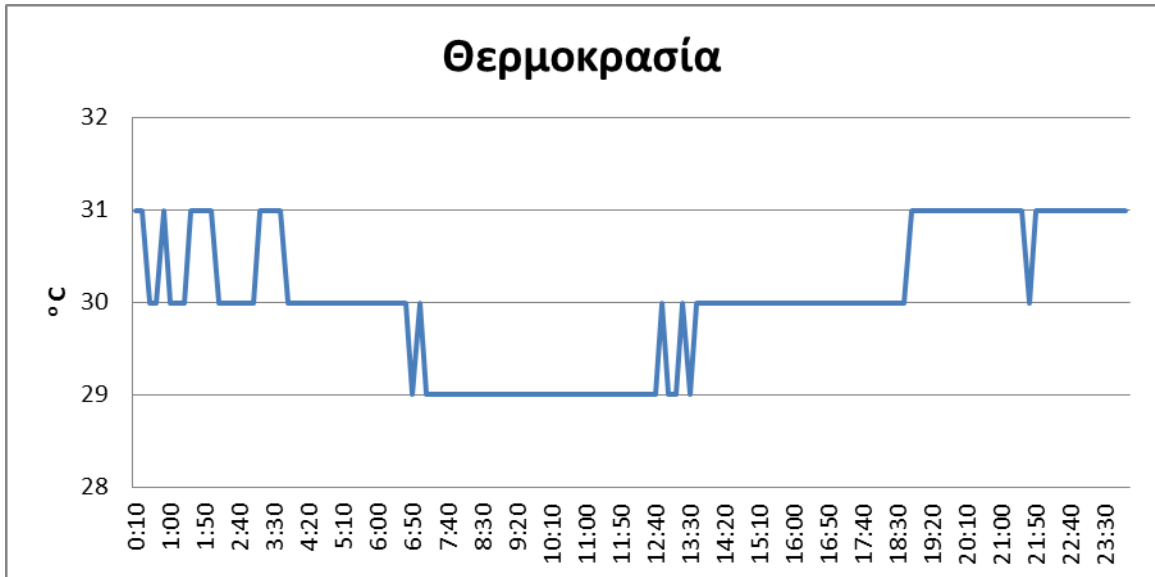
*Θερμοκρασία  $\geq 30^{\circ} C$*

*Επίπεδο φωτισμού > 450*

Εφόσον λοιπόν ισχύουν ταυτόχρονα αυτές οι τρεις συνθήκες, το ρελέ κλείνει δίνοντας ρεύμα στο φορτίο. Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις των συνθηκών περιβάλλοντος και της κατάστασης του ρελέ:



Γράφημα 65: Υγρασία περιβάλλοντος



Γράφημα 66: Θερμοκρασία περιβάλλοντος



Γράφημα 67: Επίπεδο φωτισμού περιβάλλοντος



Γράφημα 68: Κατάσταση ρελέ

Οι μετρήσεις έγιναν σε συνθήκες δωματίου την 6<sup>η</sup> Αυγούστου 2015. Όπως παρατηρούμε η θερμοκρασία και η υγρασία σε συνθήκες δωματίου μεταβάλλονται σχετικά λίγο μέσα στο εικοσιτετράωρο. Ο φωτισμός έχει μία σχετικά αναμενόμενη καταγραφή, εκτός από το διάστημα από τις 17:30 έως τις 18:30. Αυτές η μετρήσεις επηρεάστηκαν από την παρουσία του προγραμματιστή στο δωμάτιο, που από ότι φαίνεται ελάττωσε ελαφρώς το φως που φτάνει στη φωτοαντίσταση. Παρατηρώντας τα γραφήματα αλλά και τους πίνακες με τις μετρήσεις μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι το σύστημα είχε ακριβώς την αναμενόμενη συμπεριφορά.

## 4.5 Ελεγκτής Raspberry Pi 2

Ο ελεγκτής Raspberry Pi 2 στην εφαρμογή μας λαμβάνει μέσω σειριακής επικοινωνίας τις τιμές των συνθηκών αλλά δεν επιτελεί κάποιο άλλο έργο, καθώς ο μικροελεγκτής αναλαμβάνει τον έλεγχο του ρελέ. Το σημαντικό είναι ότι μέσω αυτής της εφαρμογής καταδεικνύονται οι δυνατότητες του ελεγκτή να χρησιμοποιήσει ως δικές του εισόδους και εξόδους τα pins του μικροελεγκτή και να χρησιμοποιήσει τις μετρήσεις σε πιο πολυπαραγοντικά προβλήματα. Σε αυτή τη κατηγορία εντάσσεται η βελτιστοποίηση της χρήσης συσκευών που δουλεύουν σε αλληλεπίδραση με το περιβάλλον όπως το air condition, το ψυγείο κτλ. Για αυτό το πρόβλημα υπάρχουν αναφορές και εφαρμογές στη διεθνή βιβλιογραφία [34] [3] , και πιστεύουμε ότι αυτό το κομμάτι θα είναι απαραίτητο στη ολοκληρωμένη σχεδίαση ενός κεντρικού ελεγκτή-συντονιστή ενός «έξυπνου» σπιτιού.

## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προοπτικές συνέχισης

Η διπλωματική αυτή είχε σκοπό να μελετήσει τις υποδομές και τα εργαλεία που απαιτούνται προκειμένου να μπορεί ένα ΣΗΕ να εφαρμόσει προγράμματα διαχείρισης ζήτησης, ειδικά με την συμμετοχή των οικιακών καταναλωτών.

Μελετώντας ποια δεδομένα είναι απαραίτητα προκειμένου να μπορεί ένας οικιακός καταναλωτής να συμμετάσχει σε προγράμματα διαχείρισης ζήτησης, έγινε κατανοητό ότι ένα σύγχρονο έξυπνο σπίτι δεν μπορεί παρά να έχει ένα έξυπνο δίκτυο από μετρητές και αισθητήρες, καθώς και μία λειτουργική υποδομή ενεργειακού αυτοματισμού. Έτσι θα μπορεί κανείς να μελετήσει τις ενεργειακές καταναλώσεις και να σχεδιάσει πώς θα ελέγχεται ένα κτήριο προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η κατανάλωση του. Αυτό το δίκτυο θα πρέπει να δίνει την δυνατότητα στον συντονιστή του, τον κεντρικό ενεργειακό ελεγκτή, να ελέγχει όλα τα φορτία και να μπορεί να συλλέξει από παντού όλες τις πληροφορίες και τις μετρήσεις. Αυτή η δομή λοιπόν απαιτεί ειδικευμένη μελέτη πάνω στον κτηριακό αυτοματισμό καθώς και στο τηλεπικοινωνιακό υπόβαθρο για να λειτουργήσει αποτελεσματικά ένα έξυπνο κτήριο.

Ακόμη, στα πλαίσια αυτής της εργασίας, έγινε μία πρωτόλεια μελέτη των οικιακών φορτίων. Η εξέταση των οικιακών φορτίων και τελικά του προφίλ ζήτησης μίας κατοικίας αποτελεί βασική γνώση προκειμένου να εξετάσει κανείς τη δυνατότητα διαχείρισης ζήτησης. Μέσα από αυτή την μελέτη έγινε κατανοητό ότι τα ηλεκτρικά φορτία ενός και μόνο σπιτιού δίνουν τη δυνατότητα στον οικιακό χρήστη να συμμετάσχει σε προγράμματα διαχείρισης ζήτησης και με αυτόν τον τρόπο να εξοικονομήσει χρήματα. Παρόλα αυτά, στα πλαίσια ενός «έξυπνου» ΣΗΕ, δεν μπορούμε να μην παρατηρήσουμε ότι ο σχεδιασμός και η εφαρμογή προγραμμάτων διαχείρισης ζήτησης πρέπει να γίνεται συντονισμένα για πολλούς οικιακούς καταναλωτές, προκειμένου να υπάρχει αξιοσημείωτη επίδραση στο συνολικό φορτίο του δικτύου.

Βέβαια, από αυτήν την μελέτη των οικιακών φορτίων, πρέπει να αναγνωριστεί ότι τα φορτία δεν απαιτούν όλα τον ίδιο χειρισμό. Κάποια φορτία δεν ελέγχονται, κάποια άλλα χρονοδρομολογείται η λειτουργία τους κανονικά, και κάποια άλλα απαιτούν μαθηματικά μοντέλα που συνυπολογίζουν όλους τις παραμέτρους προκειμένου να γίνει βέλτιστος ο έλεγχος τους. Σε αυτήν την κατεύθυνση γίνονται ήδη προσπάθειες από την επιστημονική κοινότητα να μοντελοποιηθούν τέτοια φορτία και να ενταχθούν σε προγράμματα διαχείρισης ζήτησης. Μέσα από την παρούσα μελέτη φαίνεται πως αυτά φορτία αποτελούν σημαντικό κομμάτι της συνολικής κατανάλωσης ενός σπιτιού.

Μέσα σε αυτό το περιβάλλον με τα ελεγχόμενα φορτία, τις προτιμήσεις του καταναλωτή και τις απαιτήσεις του διαχειριστή προκειμένου να συμμετάσχει κανείς σε προγράμματα διαχείρισης ζήτησης, φαίνεται πως για να είναι αποτελεσματική η σχεδίαση των επόμενων ωρών πρέπει να υπάρχει αποτελεσματική πρόβλεψη των καταναλώσεων και της τοπικής παραγωγής ενός κτηρίου. Με τα κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα αλλά και με τη δημιουργία μίας υποδομής για τη συνεχή βελτίωση των προβλέψεων, θα είναι θέμα χρόνου μέχρι οι προβλέψεις αυτές να είναι αξιόπιστες. Φυσικά, ο ενεργειακός ελεγκτής πρέπει να έχει τη δυνατότητα να συλλέγει τα διορθωμένα στοιχεία από

πραγματικές μετρήσεις και να διορθώνει τις προβλέψεις του. Για την «εκπαίδευση» του ελεγκτή προκρίνεται στη διεθνή βιβλιογραφία μεταξύ άλλων η σχεδίαση νευρωνικών δικτύων. Αν και η παρούσα εργασία δεν επικεντρώθηκε σε αυτόν τον τομέα, η μελέτη πάνω στις προβλέψεις φορτίου αλλά και τοπικής παραγωγής χαρακτηρίζεται απαραίτητη.

Στις προσομοιώσεις που έγιναν σε αυτή τη διπλωματική κάναμε την υπόθεση ότι στον κεντρικό ενεργειακό ελεγκτή φτάνουν σήματα τιμολόγησης και ορίων ισχύος προκειμένου να τον κατευθύνουν στη συμμετοχή του στα προγράμματα διαχείρισης ζήτησης. Αν και αυτή η υπόθεση φάνηκε πολύ λειτουργική για να διαμορφώνεται το προφίλ ζήτησης ενός σπιτιού, αναγνωρίζεται ότι χρειάζεται μελέτη για το πώς θα προκύπτουν αυτά τα σήματα. Ο διαχειριστής της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα έχει διάφορα εργαλεία που του επιτρέπουν να ελέγχει την ποιότητα της τάσης και της συχνότητας σε όλο το δίκτυο. Είναι πολύ σημαντικό να εμπλουτιστούν μέσα στα επόμενα χρόνια αυτά τα εργαλεία έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνουν την πιθανή περικοπή φορτίου σαν βαθμό ελευθερίας στον σχεδιασμό της επόμενης μέρας. Με αυτόν τον τρόπο θα αποφεύγονται υπερφορτίσεις γραμμών και μετασχηματιστών. Ακόμη, μέσω της περικοπής φορτίου μπορεί να εξομαλύνεται η συνολική ζήτηση του δικτύου και να αποφεύγεται η ένταξη ακριβών μονάδων για την εξυπηρέτηση των αιχμών.

Φυσικά όλη αυτή η συζήτηση για την ένταξη των οικιακών καταναλωτών στα προγράμματα διαχείρισης ζήτησης γεννάει αντικειμενικά και τη ανάγκη να προσδιοριστούν οι αλλαγές που πρέπει να γίνουν στο μοντέλο του ΣΗΕ και γενικά της αγοραπωλησίας της ηλεκτρικής ενέργειας. Εφόσον οι καταναλωτές, με κάποιο τρόπο, δεν θα ζητάνε απλά ενέργεια από το δίκτυο αλλά θα παρέχουν και υπηρεσίες, φαίνεται ότι πρέπει να υπάρξει το αντίστοιχο νομικό και οικονομικό πλαίσιο ώστε να μπορεί να γίνει εφικτή η συμμετοχή στην αγοραπωλησία ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η εργασία υπέθεσε ότι θα υπάρχει μία νέα οντότητα, ο electricity aggregator, ο οποίος θα αθροίζει τη δυνατότητα περικοπής φορτίου πολλών καταναλωτών και θα καταθέτει προσφορές στον διαχειριστή δικτύου. Αν και αυτή η υπόθεση εργασίας φάνηκε λειτουργική, είναι πρόδηλο ότι πρέπει να εξετασθεί το μοντέλο του σύγχρονου ΣΗΕ από επιστημονικούς φορείς αλλά και από τους αρμόδιους οργανισμούς διεθνών, όπως ο ENTSOE (european network of transmission system operators for electricity).

Μέσα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας προγραμματίστηκε ένας μικροεπεξεργαστής του εμπορίου προκειμένου να μπορεί να ανταποκριθεί στις βασικές δυνατότητες που πρέπει να έχει ένας κεντρικός ενεργειακός ελεγκτής. Προκειμένου να γίνουν οι προσομοιώσεις έγινε αρκετή δουλειά έτσι ώστε όχι μόνο να λειτουργεί ο ελεγκτής, αλλά να μπορεί να επικοινωνήσει και με το RTDS. Μέσα από αυτή τη διαδικασία που στην ουσία ενείχε και τον σχεδιασμό της διεπαφής (interface) μεταξύ των δύο συσκευών, μπορούμε να βγάλουμε μερικά χρήσιμα συμπεράσματα για τις απαιτήσεις των υπολογιστικών συστημάτων που χρειαζόμαστε.

Από όσα περιγράφηκαν για τον κτηριακό αυτοματισμό αλλά και την απαιτούμενη αξιοπιστία και ποιότητα κατασκευής ενός τέτοιου συστήματος, φαίνεται ότι ο κεντρικός ενεργειακός ελεγκτής πρέπει να έχει κάποια χαρακτηριστικά που προσομοιάζουν στην τεχνολογία των PLC σήμερα. Έτσι θα εξασφαλίζεται η αδιάκοπη λειτουργία σε πραγματικές συνθήκες (υγρασία, σκόνη κτλ) αλλά και η αλληλεπίδραση και ο έλεγχος στοιχείων που λειτουργούν στα 230V.

Από την άλλη, κάποιες απαραίτητες υποδομές που αναφέρθηκαν σε αυτήν την εργασία, όπως τα νευρωνικά δίκτυα, η δυνατότητα βελτιστοποίησης, η επικοινωνία με web servers, πιθανών και γραφικά περιβάλλοντα για την ενημέρωση του χρήστη κ.α. δείχνουν προς την κατεύθυνση του μικροεπεξεργαστή. Οι προδιαγραφές των PLC προφανώς δεν είναι τέτοιες ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν γραφικά περιβάλλοντα και γενικά πολύπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς.

Οι σχεδιάστρες απαιτήσεις του συστήματος που περιγράφουμε πρέπει σίγουρα να εξεταστούν και να εξειδικευτούν, αλλά φαίνεται πως προκειμένου να μπορούμε να έχουμε όλες τις υποδομές που απαιτούνται, θα πρέπει να συνδυάσουμε αλλά και να υπερβούμε τις σημερινές προδιαγραφές και για τις δύο κατηγορίες συσκευών. Ο σχεδιασμός αυτού του συστήματος αποτελεί προτεραιότητα για την εφαρμογή προγραμμάτων διαχείρισης ζήτησης τα επόμενα χρόνια. Από ότι εξετάζεται αυτή τη στιγμή από τους κατασκευαστές και την επιστημονική κοινότητα φαίνεται ότι θα πρέπει να υπάρξει ένα σύστημα ιεραρχικό. Στο πιο κάτω μέρος της ιεραρχίας θα βρίσκονται οι μετρητές και τα έξυπνα φορτία και πιο πάνω θα βρίσκεται ο ενεργειακός ελεγκτής που θα συντονίζει το «έξυπνο δίκτυο» εντός του σπιτιού. Παρόλα αυτά, σχεδιάζοντας αυτό το σύστημα για να ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα θα προκύψουν ζητήματα και θα πρέπει να παρθούν σχεδιαστικές επιλογές. Για παράδειγμα είναι αμφίβολο ότι η ίδια μονάδα που θα έχει όλο τον υπολογιστικό φόρτο από τα νευρωνικά δίκτυα, τις βελτιστοποιήσεις κτλ θα είναι αυτή που θα εξυπηρετεί τα γραφικά περιβάλλοντα και αυτή που θα αναλαμβάνει να δέχεται τα σήματα από το υπόλοιπο ΣΗΕ. Όλο το μοντέλο και οι επιμέρους σχεδιάστρες επιλογές πρέπει να εξεταστούν ενδελεχώς.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ

Θεωρήθηκε δόκιμο ο κώδικας του ελεγκτή να παρατεθεί ξεχωριστά από την υπόλοιπη εργασία, έτσι ώστε να έχουμε το χώρο και τη δομή να εξηγήσουμε συνοπτικά τις διάφορες ρουτίνες. Η γλώσσα που χρησιμοποιήθηκε είναι η C, αφενός λόγω εξοικείωσης του συγγραφέα και αφετέρου επειδή ο ελεγκτής arduino έχει δική του γλώσσα προγραμματισμού που μοιάζει πολύ με την C.

Θα περιγράψουμε τον κώδικα με την ακολουθία που εκτελείται για το κομμάτι των προσομοιώσεων ανοιχτού βρόγχου. Μετά, θα περιγράψουμε τις προσθήκες που χρειάστηκαν για τις προσομοιώσεις κλειστού βρόγχου. Η εκτέλεση ξεκινάει με την εκτέλεση ενός απλού script, το οποίο έχει ως εξής:

```
1. #!/bin/bash
2.
3. #script.sh The script that carries the execution
4.
5. glpsol --cpxlp Tscenario1th.lp -o output.txt
6. ./printarray.sh 4
7. gcc -Wall -o Raspberry0 Raspberry0.c -lwiringPi
8. ./Raspberry0
```

Στη σειρά 5 δίνεται η εντολή στο λογισμικό GLPK να βελτιστοποιήσει το πρόβλημα των φορτίων το οποίο είναι διατυπωμένο με ειδικό τρόπο στο αρχείο .lp [33]. Ακόμη, σύμφωνα με την εντολή τα αποτελέσματα πρέπει να γραφτούν στο αρχείο output.txt.

Ακολούθως καλείται το script printarray.sh. Ως όρισμα στην εντολή δίνεται ο αριθμός των φορτίων (εδώ 4). Αυτό έγινε για διευκόλυνση του συγγραφέα, αλλά θα μπορούσε πολύ εύκολα το script να αναγνωρίζει αυτόματα τον αριθμό των φορτίων από το μοτίβο του output.txt. Ο κώδικας του printarray.sh έχει ως εξής:

```
1. #!/bin/bash
2.
3. #printarray.sh The script that writes the optimization result in a more plain format
4.
5. args=("$@")
6. echo "Script will print optimization results for ${args[0]} loads to OPTarray.txt "
7. rm OPTarray.txt
8. for (( i=1; i<=${args[0]}; i++ ))
9. do
10.     for j in {0..9}
11.     do
12.         if (grep -q "u($i)($j)          \*"          1" 'output.txt')
13.         then
14.             echo "1" >> OPTarray.txt
15.         else
16.             echo "0" >> OPTarray.txt
17.         fi
```



```

18.     done
19.
20.     for j in {10..23}
21.     do
22.         if (grep -q "u($i)($j) \*" 1" 'output.txt')
23.         then
24.             echo "1" >> OPTarray.txt
25.         else
26.             echo "0" >> OPTarray.txt
27.         fi
28.     done
29. done

```

Το script αυτό παίρνει τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης (αρχείο output.txt) και τα γράφει στο αρχείο OPTarray.txt με ένα πολύ πιο απλό μοτίβο για να είναι εύκολα προσπελάσιμα από τον ελεγκτή. Από εκεί και πέρα, η περιγραφή του κώδικα, εντολή-την-εντολή δεν έχει και τόσο νόημα. Αρκεί να πούμε ότι το script ψάχνει μέσα στο συγκεκριμένο μοτίβο του αρχείου, αναγνωρίζει τις τιμές των μεταβλητών απόφασης, και τις γράφει στο OPTarray.txt χωρίς κανέναν άλλο χαρακτήρα.

Στην σειρά 7 του βασικού script δίνεται η εντολή για μεταγλώττιση του βασικού αρχείου κώδικα RaspberryO.c. Η παράμετρος -lwiring.pi δίνεται γιατί ένα σημαντικό κομμάτι του κώδικα, ο χειρισμός των εισόδων/εξόδων του ελεγκτή, βασίζεται στη βιβλιοθήκη WiringPi. Ο πηγαίος κώδικας του RaspberryO εκτελείται αμέσως μετά, έχει ως εξής:

```

1. //RaspberryO.c The source code executed by the controller, the main body of the project
2. #include <stdio.h>
3. #include <stdlib.h>
4. #include <wiringPi.h>
5. #define windowtime 24
6. #define STEP 1000
7. #define RSTpin 24
8.
9. int readtxt(int u[4][24]);
10. void loadsinit(int u[4][24],int NOL);
11. void tableprint(int u[4][24],int loads);
12. int clockplus(int input);
13. void Writepins(int line,int u[4][24]);
14. int decimal2binary(int n);
15. void myWrite(int pin,int cmd);
16. void shutdown();
17. void RTDSrst(int i);
18.
19. int main(void)
20. {
21.     printf("RaspberryO starting...\n");
22.
23.     int u[4][24];
24.     int i,NOL;
25.
26.     NOL=readtxt(u);//Number of Loads=NOL in 0..NOL-1
27.     loadsinit(u,NOL);
28.     wiringPiSetup();
29.     RTDSrst(1);
30.     printf("fire me\n");
31.     scanf("%d",&i);
32.     RTDSrst(0);

```

```

33. i=0;
34. while (i<windowtime){
35.     Writepins(i % 24,u);
36.     i=clockplus(i);
37.
38. }
39. shutdown();
40. return 0;
41. }
42.
43. int readtxt(int u[4][24]){
44.     int i=0,j=0;
45.     //Opening file
46.     FILE *fptr;
47.     if ((fptr=fopen("OPTarray.txt","r"))==NULL){
48.         printf("Error! opening file OPTarray.txt\n");
49.         exit(1);          /* Program exits if file pointer returns NULL. */
50.     }
51.     //Reading procedure
52.     int c;
53.     while ((c=fgetc(fptr)) != EOF){
54.         u[i][j]=c-48;
55.         j++;
56.         if (j==24) { i++;j=0;}
57.         c=fgetc(fptr);
58.     }
59.     fclose(fptr);
60.     return i;
61. }
62.
63. void loadsinit(int u[4][24],int NOL)
64. {
65.     int Nmtable[4]={2,2,1,7};
66.     /*Load list:
67.     Washing machine
68.     Dishwasher
69.     Water heat
70.     Electric Vehicle
71.     */
72.     int i,j;
73.
74.
75.     for (i=0;i<NOL;i++){
76.         for (j=0;j<24;j++){
77.             if ((u[i][j]==1) && (Nmtable[i]>1)) u[i][j+1]=2;
78.             if ((u[i][j]==2) && (Nmtable[i]>2)) u[i][j+1]=3;
79.             if ((u[i][j]==3) && (Nmtable[i]>3)) u[i][j+1]=4;
80.             if ((u[i][j]==4) && (Nmtable[i]>4)) u[i][j+1]=5;
81.             if ((u[i][j]==5) && (Nmtable[i]>5)) u[i][j+1]=6;
82.             if ((u[i][j]==6) && (Nmtable[i]>6)) u[i][j+1]=7;
83.         }
84.     }
85. }
86.
87. void tableprint(int u[4][24],int loads)
88. {
89.     int i,j;
90.
91.     for (i=0;i<loads;i++){
92.         printf("Load %d\n",i);
93.         for (j=0;j<24;j++){

```

```

94.     printf("%d\n",u[i][j]);
95.     }
96. }
97.
98. }
99.
100.    int clockplus(int input){
101.        delay(STEP);
102.        return input+1;
103.    }
104.
105.    int decimal2binary(int n)
106.    {
107.        int rem, i=1, binary=0;
108.        while (n!=0)
109.        {
110.            rem=n%2;
111.            n/=2;
112.            binary+=rem*i;
113.            i*=10;
114.        }
115.        return binary;
116.    }
117.
118.    void Writepins(int line, int u[5][24]){
119.        /* *****
120.            PIN MAP
121.            LOAD    :MSB 2 1 0 LSB
122.
123.            0-PHYSICAL:  12 11
124.            0-WIRINGPI:  1  0
125.            1-PHYSICAL:  15 13
126.            1-WIRINGPI:  3  2
127.            2-PHYSICAL:  18 16
128.            2-WIRINGPI:  5  4
129.            3-PHYSICAL:  29 7 22
130.            3-WIRINGPI:  21 7 6
131.            *****
132.        */
133.
134.        int temp,temp0;
135.        /* LOAD 0*/
136.        printf("Line %d:\n",line);
137.        temp=decimal2binary(u[0][line]);
138.        myWrite(0,temp % 10);printf("PIN 0:%d\n",temp % 10);
139.        myWrite(1,temp / 10); printf("PIN 1:%d\n",temp / 10);
140.        /* LOAD 1*/
141.        temp=decimal2binary(u[1][line]);
142.        myWrite(2,temp % 10);printf("PIN 2:%d\n",temp % 10);
143.        myWrite(3,temp / 10);printf("PIN 3:%d\n",temp / 10);
144.        /* LOAD 2*/
145.        temp=decimal2binary(u[2][line]);
146.        myWrite(4,temp % 10);printf("PIN 4:%d\n",temp % 10);
147.        myWrite(5,temp / 10);printf("PIN 5:%d\n",temp / 10);
148.        /*LOAD 3*/
149.        temp=decimal2binary(u[3][line]);
150.        myWrite(6,temp % 10);printf("PIN 6:%d\n",temp % 10);
151.        temp0=temp / 10;
152.        myWrite(7,temp0 % 10);printf("PIN 7:%d\n",temp0 % 10);
153.        myWrite(21,temp0 / 10);printf("PIN 8:%d\n",temp0 / 10);
154.    }

```

```

155.
156.     void myWrite(int pin,int cmd)
157.     {
158.
159.         if (cmd==1){
160.             pinMode(pin,INPUT);
161.         }
162.         else if (cmd==0){
163.             pinMode(pin,OUTPUT);
164.             digitalWrite(pin,0);
165.         }
166.         return;
167.     }
168.
169.     void shutdown()
170.     {
171.         int i;
172.
173.         for(i=0;i<=7;i++) myWrite(i,1);
174.         for(i=21;i<=23;i++) myWrite(i,1);
175.         return;
176.
177.     }
178.
179.     void RTDSrst(int i)
180.     {
181.         myWrite(RSTpin,i);
182.         return ;
183.
184.     }

```

Για να εξηγηθεί δομημένα η εκτέλεση του προγράμματος θα ξεκινήσουμε περιγράφοντας τις συναρτήσεις που εκτελούνται. Με τη σειρά που είναι γραμμένες στον πηγαίο κώδικα έχουμε:

- `int readtxt(int u[4][24])`

Η συνάρτηση αυτή παίρνει από το αρχείο κειμένου OPTarray.txt τις τιμές των μεταβλητών απόφασης (δηλαδή το πότε λειτουργεί το φορτίο σύμφωνα με τον προγραμματισμό) και τις περνάει στη μνήμη του προγράμματος σε έναν πίνακα u[4][24].

- `void loadsinit(int u[4][24],int NOL)`

Αυτή η συνάρτηση γράφτηκε για να εξασφαλίσει την σωστή λειτουργία της προσομοίωσης. Από το OPTarray.txt ξέρουμε πότε λειτουργεί ένα φορτίο, αλλά πρέπει επίσης να γνωρίζουμε πόσο καταναλώνει. Οι καταναλώσεις των φορτίων έχουν μπει στο κύκλωμα του RTDS με look-up tables, τα οποία παίρνουν ως είσοδο την ώρα λειτουργίας του φορτίου(και όχι την ώρα του εικοσιτετραώρου) και δίνουν την αντίστοιχη τιμή κατανάλωσης ως είσοδο στην εξαρτημένη πηγή ρεύματος. Αυτή η συνάρτηση λοιπόν εξασφαλίζει ότι όταν έρχεται η δεύτερη ώρα λειτουργίας ενός φορτίου, θα καταναλώνει τη δεύτερη είσοδο της πηγής ρεύματος. Παρατηρώντας τη συνάρτηση, καταλαβαίνουμε ότι αυτό γίνεται για έως και 7 ώρες λειτουργίας. Αυτό χρειάζεται γιατί το ηλεκτρικό αυτοκίνητο έχει 7 ώρες λειτουργίας και άρα πρέπει ο ελεγκτής να δίνει εντολή στην προσομοιωμένη πηγή ρεύματος να καταναλώνει κάθε ώρα την αντίστοιχη τιμή.

- `void tableprint(int u[4][24],int loads)`

Συνάρτηση που εκτυπώνει στο terminal τις μεταβλητές απόφασης. Είναι χρήσιμη για debugging αλλά δεν είναι κομμάτι της εκτέλεσης.

- `int clockplus(int input)`

Η συνάρτηση που αλλάζει το ρολόι του προγράμματος. Μέσα έχει την καθυστέρηση για την αλλαγή της ώρας.

- `void Writepins(int line, int u[5][24])`

Η συνάρτηση αυτή τρέχει σε κάθε αλλαγή ώρας και αναλαμβάνει να γράψει στα σωστά pins τις σωστές τιμές ώστε να προσομοιώνεται σωστά η κατανάλωση των φορτίων. Επειδή η επικοινωνία γίνεται ψηφιακά, η συνάρτηση αυτή πρέπει να γράφει στα pins λογικό 0 ή 1. Την μετατροπή αυτή αναλαμβάνει η συνάρτηση `decimal2binary()`.

- `int decimal2binary(int n)`

Χρησιμοποιώντας κλασσική αριθμητική με διαιρέσεις και υπόλοιπα, η συνάρτηση αυτή μετατρέπει έναν δεκαδικό αριθμό σε δυαδικό.

- `void myWrite(int pin,int cmd)`

Αυτή η συνάρτηση έπρεπε να γραφτεί ώστε να προσαρμοστεί ο ελεγκτής στον προσομοιωτή RTDS. Ο προσομοιωτής αντιλαμβάνεται το γειωμένο pin ως λογικό 0, και όλες τις άλλες τιμές ως λογικό 1. Για αυτό και η `myWrite()` αναλαμβάνει όταν γράφεται 1, να γυρνάει το pin σε λειτουργία εισόδου. Το λογικό 0 τίθεται κανονικά.

- `void shutdown()`

Η συνάρτηση `shutdown()` αφήνει όλα τα pins του Raspberry σε λειτουργία εισόδου έτσι ώστε να μην υπάρξει κάποιο σφάλμα σε κάποια ακαθόριστη στιγμή της λειτουργίας του προσομοιωτή. Για παράδειγμα δεν ξέρουμε τι τάση φτάνει στα pins του RTDS όταν το ανοίγουμε, και δεν θέλουμε εκείνη την στιγμή το συνδεδεμένο pin του Raspberry να έχει διαφορετικό επίπεδο τάσης.

- `void RTDSrst(int i)`

Χρησιμοποιούμε αυτή τη συνάρτηση για να μηδενίσουμε το ρολόι του RTDS, ώστε να ξεκινάει μαζί με το Raspberry τη χρονομέτρηση. Αυτό είναι απαραίτητο για να παίρνουμε σωστές γραφικές από το RTDS, και επίσης χρειάζεται αν θέλει κάποιος να κάνει reverse engineering για να βρει κάποιο bug όσο είναι στη διαδικασία της ανάπτυξης.

Ας δούμε τώρα τη ροή εκτέλεσης του κυρίως προγράμματος. Αρχικά ο ελεγκτής παίρνει με τη συνάρτηση `loadsinit()` τις μεταβλητές απόφασης στη μνήμη του. Μετά μηδενίζει το ρολόι του

προσομοιωτή και περιμένει την εντολή από το terminal για να αρχίσει την εκτέλεση της προσομοίωσης. Αφού έχει ξεκινήσει η προσομοίωση λοιπόν, κάθε ώρα γράφει στα pins του RTDS τις σωστές τιμές ώστε τα φορτία να κάνουν αυτό που πρέπει: είτε να διαβάζουν 0 και να μην καταναλώνουν τίποτα είτε κάποια άλλη τιμή που αντιστοιχεί στην ώρα λειτουργίας τους με την αντίστοιχη κατανάλωση.

Εδώ τελειώνει ο κώδικας για τις προσομοιώσεις ανοικτού βρόγχου. Οι προσομοιώσεις κλειστού βρόγχου χρησιμοποιούν τις ίδιες ακριβώς συναρτήσεις. Η επιπλέον δυνατότητα που πρέπει να σχεδιαστεί, είναι η δυνατότητα του ελεγκτή να διαβάζει κάποια αναλογική τιμή από κάποιο σημείο του κυκλώματος (π.χ. το ρεύμα που παρέχει η φωτοβολταϊκή παραγωγή) και να παίρνει κάποια απόφαση. Εφόσον έχουμε τη πρόσβαση σε αυτές τις αναλογικές τιμές κάθε ώρα της προσομοίωσης, μπορούμε να μετατρέπουμε αυτό το αναλογικό σήμα τάσης σε «φυσικό» μέγεθος (προερχόμενο από προσομοίωση. Κεφάλαιο 3). Μετά, μπορούμε σχετικά εύκολα να κάνουμε ότι έλεγχο θέλουμε σε αυτό το μέγεθος και να διαμορφώνουμε ανάλογα τις εξόδους. Για παράδειγμα, σε μία προσομοίωση κλειστού βρόγχου του κεφαλαίου 3, ελέγαμε την κατανάλωση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου και αν δεν ήταν μηδενική μία ώρα που θα έπρεπε (δηλαδή γύρισε πρόωρα ο χρήστης), ξανατρέχαμε τη βελτιστοποίηση και έτσι η υπόλοιπη μέρα συνεχιζόταν με τον καινούργιο προγραμματισμό.

Ο πιο εύκολος και λειτουργικός τρόπος για να αποκτήσει τη δυνατότητα αυτή ο ελεγκτής είναι να τρέχει παράλληλα με την προσομοίωση ένα πρόγραμμα το οποίο καταγράφει τις αναλογικές τιμές, όπως τις βλέπει στα pins του το XinoRF, σε ένα αρχείο κειμένου. Έτσι, το κυρίως πρόγραμμα του ελεγκτή μπαίνει οποιαδήποτε στιγμή μέσα στο αρχείο κειμένου, διαβάζει τις αναλογικές τιμές και πράττει αναλόγως. Το πρόγραμμα που τρέχει παράλληλα πρέπει να αλλάζει εγκαίρως και με τον σωστό ρυθμό δειγματοληψίας το αρχείο κειμένου. Αυτό το πρόγραμμα υπάρχει στη βιβλιοθήκη που παρέχει ο κατασκευαστής του XinoRF [10], και η παράλληλη εκτέλεση των προγραμμάτων είναι μία βασική και δεδομένη λειτουργία των λειτουργικών συστημάτων.

Τελειώνοντας την παρουσίαση του κώδικα πρέπει να σημειωθεί ότι στην ουσία ο κώδικας του ελεγκτή γράφτηκε ώστε να εξυπηρετεί την προσομοίωση που εκτελείται στο RTDS. Αυτό φυσικά οδηγεί σε απόκλιση από τον κώδικα που θα χρειαζόταν ένας ελεγκτής για να εγκατασταθεί σε ένα πραγματικό σύστημα. Από εκεί και πέρα, στη σχεδίαση ενός πραγματικού συστήματος καμία λειτουργία δεν μπορεί να περιγραφεί αφαιρετικά. Για να μπορεί να δίνει εντολή ο ελεγκτής σε ένα «έξυπνο φορτίο», πρέπει να καθοριστούν αυστηρά τα πρωτόκολλα και οι διάλογοι επικοινωνίας για όλα αυτά τα σήματα.

## Βιβλιογραφία

- [1] R. Deng, Z. Yang, M.-Y. Chow και J. Chen, «A Survey on Demand Response in Smart Grids:Mathematical Models and Approaches».
- [2] O. Gulich, «TECHNOLOGICAL AND BUSINESS CHALLENGES OF SMART GRIDS Aggregator's Role in Current Electricity Market,» 2010.
- [3] L. Paull, H. Li και L. Chang, «A novel domestic electric water heater model for a multi-objective demand side management program,» 2010.
- [4] K. L. M. L. Z. M.R. Xue, «Using Artificial Neural Network to Execute Demand Response Considering Indoor Thermal Comfort and Forecast Load-Shedding».
- [5] E. Holtschneider, «Optimization of electricity pricing considering neural network based model of consumers' demand response».
- [6] «<https://www.entsoe.eu/Pages/default.aspx>,» ENTSOE.
- [7] V. J., «Survey of regulatory and technical development concerning smart metering in the European Union electricity market,» Florence School of, Florence, 2008.
- [8] T. R., «Ensuring adequate generation capacity,» 2003.
- [9] G. W., «Demand side management priorities in Italy. In: Proceedings of,» London, 2006.
- [10] «<https://www.ofgem.gov.uk/gas/retail-market/metering/transition-smart-meters/energy-demand-research-project>».
- [11] R. Deng, Z. Yang, M.-Y. Chow και J. Chen, «A Survey on Demand Response in Smart Grids:Mathematical Models and Approaches,» 2015.
- [12] «Breaking Down Barriers to Residential Demand Response,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://www.elp.com/articles/powergrid\\_international/print/volume-17/issue-10/features/breaking-down-barriers-residential-demand.html](http://www.elp.com/articles/powergrid_international/print/volume-17/issue-10/features/breaking-down-barriers-residential-demand.html).
- [13] Chrysopoulos, Diou, Symeonidis και Mitkas, «Bottom-up modeling of small-scale energy consumers for effective Demand Response Applications,» 2014.
- [14] A. Soares, ÁlvaroGomes και C. H. Antunes, «Categorization of residential electricity consumption as a basis for the assessment of the impacts of demand response actions,» 2013.

- [15] J. V. Paateron και P. D. Lund, «A model for generating household electricity load profiles,» 2005.
- [16] Σ. οργανισμών, «Residential Monitoring to Decrease Energy Use».
- [17] «<http://www.smart-a.org/index.php>,» Oeko-Institut e.V. - Institute for Applied Ecology.
- [18] U. Department of Energy & Climate Change, «Energy Consumption in the United Kingdom' (ECUK)».
- [19] E. COMMISSION, «A European strategy for clean and energy efficient vehicles».
- [20] S. S., P. M. και RahmanS., «Demand Response as a Load Shaping Tool in an Intelligent Grid With Electric Vehicles».
- [21] Comed, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://rrtp.comed.com/>.
- [22] I. i. E. Agency, «Photovoltaic and Solar Forecasting:State of the Art,» Report IEA PVPS T14-01:2013.
- [23] G. N. Kariniotakis, «Advanced Short-term Forecasting of Wind Generation - Anemos.».
- [24] M. K. Haider, A. K. Ismail και I. A. Qazi, «Markovian Models for Electrical Load Prediction in Smart Buildings».
- [25] «Raspberry PI 2 Model b,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>.
- [26] «Siemens rolls out smart grid remote terminal units for decentralized energy resources,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2014/infrastructure-cities/smart-grid/icsg201402045.htm&content\[\]=ICSG&content\[\]=EM&content\[\]=EMSG](http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2014/infrastructure-cities/smart-grid/icsg201402045.htm&content[]=ICSG&content[]=EM&content[]=EMSG).
- [27] [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.smartrue.gr/>.
- [28] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>.
- [29] [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.gnu.org/software/glpk/>.
- [30] Κ. Βασιλείος, «Μελέτη προσομοίωσης "Power hardware in the loop" και διερεύνηση ανύψωσης της τάσης εξαιτίας της διείσδυσης φωτοβολταϊκών στη χαμηλή τάση».
- [31] «<http://www.micropik.com/PDF/dht11.pdf>».
- [32] «<http://playground.arduino.cc/main/DHT11Lib>».



[33] «[http://www.mouser.com/ds/2/418/NG\\_DS\\_RT2\\_1014-736201.pdf](http://www.mouser.com/ds/2/418/NG_DS_RT2_1014-736201.pdf)».

[34] «Modeling of a hybrid domestic solar/electric water heater for hardware implementation,» 2004.

[35] L. Gkatzikis, I. Koutsopoulos και T. Salonidis, «The Role of Aggregators in Smart Grid Demand Response Markets».

[36] E. Commission, «Communication on a first assessment of National Energy Efficiency Action,» Brussels, 2006.

[37] H. L. L. C. Liam Paull, «A novel domestic electric water heater model for a multi-objective demand side management program».