



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

Συμβολή Τεχνικών Διαχείρισης Ζήτησης Στη Μείωση Του Κόστους Λειτουργίας Των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλειος Δ. Κάλλος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2015



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

Συμβολή Τεχνικών Διαχείρισης Ζήτησης Στη Μείωση Του Κόστους Λειτουργίας Των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλειος Δ. Κάλλος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9^η Μαρτίου 2015.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2015

.....
Βασίλειος Δ. Κάλλος

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

Copyright © Βασίλειος Δ. Κάλλος, 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.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	i
Πρόλογος.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract	v
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Διαχείριση της ζήτησης και απόκριση της ζήτησης.....	1
1.2.1 Ορισμός εννοιών	1
1.2.2 Προγράμματα απόκρισης της ζήτησης.....	3
1.3 Διαχείριση της ζήτησης και σχεδιασμός ενός Σ.Η.Ε.....	5
1.3.1 Στάδια προγραμματισμού ενός Σ.Η.Ε.	5
1.3.2 Ένταξη της διαχείρισης της ζήτησης στο σχεδιασμό ενός Σ.Η.Ε.	7
1.4 Οφέλη από τη Διαχείριση της Ζήτησης	8
1.5 Πιλοτικά προγράμματα Διαχείρισης της Ζήτησης.....	9
1.5.1 Κοινά ευρήματα των πιλοτικών προγραμμάτων	9
1.5.2 Αποτελέσματα όπου εμφανίζονται ασάφειες	10
1.5.3 Ανασκόπηση πιλοτικών προγραμμάτων στις Η.Π.Α. και στην Ευρώπη	11
1.6 Μοντελοποίηση συσκευών ψύξης και του ελέγχου τους	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΙΧΜΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	19
2.1 Εισαγωγή.....	19
2.2 Τροποποίηση της καμπύλης φορτίου	19
2.3 Υπολογισμός τροποποιημένης καμπύλης.....	20
2.3.1 Περιγραφή του προβλήματος.....	20
2.3.2 Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος.....	20
2.3.3 Επίλυση του προβλήματος	21
2.3.4 Αποτελέσματα	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΧΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	25
3.1 Εισαγωγή.....	25
3.2 Θερμικές μονάδες του Σ.Η.Ε Κρήτης	25
3.3 Διαδικασία υπολογισμού του κόστους των θερμικών μονάδων του Σ.Η.Ε Κρήτης.....	26
3.3.1 Απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό του κόστους του συστήματος	26
3.3.2 Μέθοδος υπολογισμού του συνολικού ετήσιου κόστους του συστήματος	26

3.4	Αποτελέσματα	28
3.5	Παράρτημα	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΘΕΡΜΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ		41
4.1	Εισαγωγή	41
4.2	Μοντελοποίηση θερμικών φορτίων	41
4.2.1	Υπολογισμός εσωτερικής θερμοκρασίας μίας συσκευής για ένα 24ωρο	42
4.2.2	Υπολογισμός εσωτερικής θερμοκρασίας περισσότερων συσκευών	46
4.3	Εφαρμογή ελέγχου στις συσκευές ψύξης	46
4.3.1	Καμπύλη ζήτησης των συσκευών	46
4.3.2	Κατασκευή λίστας προτεραιότητας	47
4.3.3	Υπολογισμοί κατά την εφαρμογή ελέγχου στις συσκευές	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΘΕΡΜΟΣΤΑΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ		55
5.1	Εισαγωγή	55
5.2	Δεδομένα εισόδου	55
5.2.1	Φυσιολογική εξέλιξη της θερμοκρασίας και υπολογισμός συνολικής ισχύος χωρίς έλεγχο θερμοστατικών φορτίων	56
5.2.2	Εξέλιξη θερμοκρασίας και υπολογισμός ισχύος με εφαρμογή ελέγχου των θερμοστατικών φορτίων	57
5.3	Αποτελέσματα	57
5.3.1	Φυσιολογική εξέλιξη θερμοκρασίας και κατάστασης θερμοστατικών φορτίων.	57
5.3.2	Εφαρμογή ελέγχου κατάστασης θερμοστατικών φορτίων	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		73
6.1	Σύνοψη	73
6.2	Συμπεράσματα	73
Βιβλιογραφία		77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ		79
8.1	Φυσιολογική εξέλιξη θερμοκρασίας σε μία ημέρα	79
8.2	Εξαναγκασμένη αλλαγή κατάστασης συσκευών	80
8.3	Λίστα προτεραιότητας	84
8.4	Υπολογισμός τροποποιημένης καμπύλης συστήματος	86

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία αποτελεί την Διπλωματική Εργασία του φοιτητή Βασιλείου Κάλλου στα πλαίσια των σπουδών του στη Σχολή στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ. Η εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή του Ε.Μ.Π. της Σχολής του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος Νικόλαου Δ. Χατζηαργυρίου και της Υποψήφιας Διδάκτορος Γεωργίας Ασημακοπούλου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την Υποψήφια Διδάκτορα Γεωργία Ασημακοπούλου για την καθοδήγησή και τις συμβουλές της κατά την εκπόνησή της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές κ. Γεώργιο Κορρέ και κ. Παύλο Γεωργιλάκη για τη συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή έγκρισης της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και ιδιαιτέρως τη μητέρα μου, για την αμέριστη υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Στο Κεφάλαιο 1 έγινε αναφορά στις έννοιες της απόκρισης ζήτησης και της διαχείρισης ζήτησης, τα οφέλη που προκύπτουν από την πολιτική διαχείρισης της ζήτησης και πώς μπορεί να ενταχθεί μια τέτοια πολιτική στα πλαίσια λειτουργίας ενός Σ.Η.Ε.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκε μεθοδολογία με την οποία μπορεί να επιτευχθεί τροποποίηση της καμπύλης φορτίου ενός συστήματος, ως αποτέλεσμα της εφαρμογής μεθόδων διαχείρισης της ζήτησης. Υπολογίστηκε η τροποποιημένη καμπύλη ζήτησης για το απομονωμένο σύστημα της Κρήτης, βάσει των δεδομένων φορτίου του έτους 2013, για διάφορα σενάρια μείωσης της αιχμής.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκε μεθοδολογία για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους του συστήματος και μελετήθηκε η συμβολή στη μείωση του κόστους για κάθε επιλεγμένο σενάριο μείωσης της αιχμής.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκε η μοντελοποίηση των θερμοστατικών φορτίων και συγκεκριμένα των συσκευών ψύξης, με σκοπό να μελετηθεί η συμβολή της εφαρμογής ελέγχου στις συσκευές αυτές στην επίτευξη του στόχου της μείωσης της αιχμής. Παρουσιάστηκε αλγόριθμος για την εφαρμογή του ελέγχου στις συσκευές.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του αλγορίθμου που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB.

Στο Κεφάλαιο 6 καταγράφονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τους υπολογισμούς και προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση.

Περίληψη

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιχειρείται να μελετηθεί η συμβολή των τεχνικών διαχείρισης της ζήτησης στη μείωση του κόστους λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιώντας ως δεδομένο την καμπύλη φορτίου του απομονωμένου συστήματος της Κρήτης, για το έτος 2013, υπολογίζεται η τροποποιημένη καμπύλη φορτίου για επιλεγμένα σενάρια μείωσης της αιχμής. Εν συνεχεία, υπολογίζεται το συνολικό κόστος του συστήματος για κάθε σενάριο και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, ώστε να αποτιμηθεί η συμβολή της εφαρμογής τεχνικών διαχείρισης της ζήτησης στη μείωση του κόστους. Επιπλέον, επιχειρείται να καθοριστεί η συνεισφορά του ελέγχου της λειτουργίας θερμοστατικών φορτίων ώστε να επιτευχθεί ο απαιτούμενος στόχος μείωσης της αιχμής του συστήματος, στα πλαίσια εφαρμογής πολιτικών διαχείρισης της αιχμής. Παρουσιάζεται μοντελοποίηση των συσκευών ψύξης (με έμφαση στα ψυγεία) και διατυπώνεται αλγόριθμος που υλοποιεί την εφαρμογή ελέγχου της λειτουργίας τους. Εν τέλει, τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου επιτρέπουν την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την επάρκεια του ελέγχου λειτουργίας των ψυγείων, σε καθένα από τα επιλεγμένα σενάρια μείωσης της αιχμής.

Λέξεις-κλειδιά

Κόστος συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, διαχείριση ζήτησης, απόκριση ζήτησης, έλεγχος θερμοστατικών φορτίων, τροποποιημένη καμπύλη ζήτησης.

Abstract

The present diploma thesis aims at studying the contribution of demand side management (DSM) programmes in reducing the operating cost of a power system. Using the load curve of the isolated power system of Crete for the year 2013 as input, a modified load curve is calculated for selected scenarios of peak reduction. After that, the total operating cost of the power system is calculated for every scenario, followed by the presentation of the results in order to define the contribution of DSM programmes in reducing the cost. Furthermore, there is an attempt to define the contribution of controlling thermostatic loads so that the desired goal of peak reduction, set by DSM policies, can be achieved. A model describing the operation of cooling devices (mainly refrigerators) is presented and used in designing an algorithm that performs the control of the refrigerators. Finally, the results of the aforementioned algorithm's execution are presented, in order to determine the sufficiency of controlling this type of device, towards achieving the desired goal for peak reduction.

Key words

Power system cost, demand side management, demand response, control of thermostatic loads, modified load curve.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ

1.1 Εισαγωγή

Επί μακρόν, η παραδοσιακή προσέγγιση κατά τη λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ήταν η πλήρης κάλυψη της ζήτησης όπως αυτή προέκυπτε. Με το πέρασμα του χρόνου η αγορά ενέργειας από καθετοποιημένη και υπό καθεστώς κρατικού ελέγχου, απελευθερώθηκε κι υπόκειται πλέον σε ανταγωνισμό. Στο πλαίσιο αυτής της μετάβασης, διαμορφώθηκε μια νέα προσέγγιση που υπαγορεύει ότι η αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος προϋποθέτει τη μικρότερη δυνατή διακύμανση του φορτίου (1).

Η αδυναμία αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας με οικονομικό τρόπο κι οι απότομες ή απρόβλεπτες διακυμάνσεις στη ζήτηση που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τη σταθερότητα του συστήματος, προάγουν την τάση για εξισορρόπηση, όσο είναι δυνατόν, μεταξύ προσφοράς και ζήτησης ενέργειας, σε πραγματικό χρόνο, ως έναν αξιόπιστο τρόπο διαχείρισης του συστήματος. Είναι γεγονός ότι η επένδυση σε εγκαταστάσεις παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι δαπανηρή και η απόσβεση της γίνεται σε βάθος χρόνων. Δεδομένου ότι η ζήτηση αυξάνεται διαχρονικά, ο σχεδιασμός και η διαχείριση του ηλεκτρικού δικτύου γίνεται με μακροπρόθεσμο πλάνο. Επίσης, στο πλαίσιο της αγοράς, με τη δεδομένη αβεβαιότητα στο κόστος παραγωγής ενέργειας που εξαρτάται άμεσα από την επάρκεια φυσικών πόρων, το ηλεκτρικό δίκτυο πρέπει να καλύπτει ανάγκες σε πραγματικό χρόνο. Συνεπώς, παρατηρείται το φαινόμενο να αγοράζονται οι αναγκαίοι για την παραγωγή πόροι παίρνοντας το ρίσκο της παραγωγής ικανής ποσότητας ενέργειας ώστε να καλυφθεί η ζήτηση, σε περιβάλλον αβεβαιότητας για το επίπεδο που αυτή θα κυμανθεί μελλοντικά, αλλά και της μελλοντικής κατάστασης του ίδιου του δικτύου (2).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η διαχείριση της ζήτησης (demand-side management) παρουσιάζεται ως μια πολιτική που εξυπηρετεί με επάρκεια την προαναφερθείσα τάση εξισορρόπησης, με χαμηλό κόστος και προσφέροντας ευελιξία στο πώς θα επιτευχθούν οι εκάστοτε στόχοι (1).

1.2 Διαχείριση της ζήτησης και απόκριση της ζήτησης

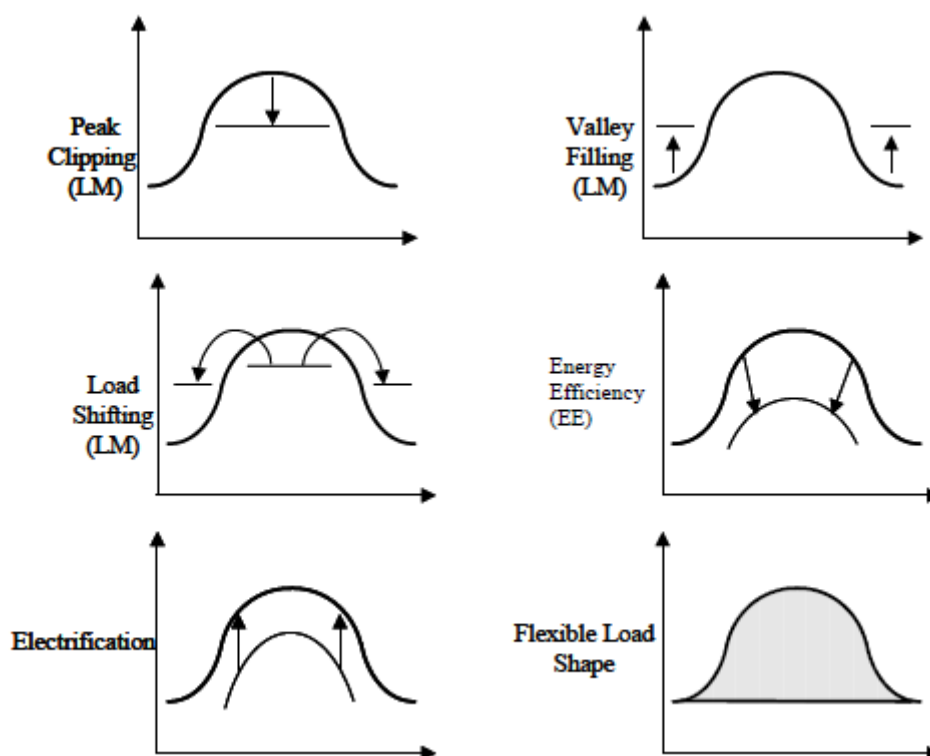
1.2.1 Ορισμός εννοιών

Ως απόκριση ζήτησης (demand side response-DSR ή DR) ορίζεται η αλλαγή στον τρόπο που χρησιμοποιούν οι καταναλωτές (οικιακοί, εμπορικοί, βιομηχανικοί) την ηλεκτρική ενέργεια, ανταποκρινόμενοι στις υψηλές τιμές που μπορεί να επικρατούν εντός του πλαισίου της χονδρεμπορικής αγοράς ή με σκοπό να αποφευχθούν δυσμενείς επιπτώσεις για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας από κινδύνους, όπως η αναγκαστική διακοπή της παροχής ενέργειας.

Οι ενέργειες των οργανισμών κοινής ωφέλειας (παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στη συγκεκριμένη περίπτωση) και των κυβερνήσεων, που μπορούν να επιφέρουν αυτές τις αλλαγές στο μοτίβο της κατανάλωσης, έχουν ως απώτερο σκοπό την προσκόμιση οφέλους για τους καταναλωτές, τους οργανισμούς αλλά και το κοινωνικό σύνολο. Οι ενέργειες αυτές συνιστούν τη διαχείριση της ζήτησης (demand side management-DSM) (3).

Οι πελάτες, δηλαδή οι καταναλωτές που συμμετέχουν σε προγράμματα με αντικείμενο τη διαχείριση ζήτησης, μπορούν να προβούν σε διαφορετικές ενέργειες. Καταρχήν, είναι πιθανό να μειώσουν την κατανάλωσή τους τις ώρες αιχμής του φορτίου, για παράδειγμα, χωρίς να αυξήσουν την κατανάλωσή τους σε ώρες εκτός αιχμής. Σε αυτή την περίπτωση αναμένεται να προκληθεί δυσφορία στον καταναλωτή. Ένα άλλο ενδεχόμενο είναι η μετάθεση κατανάλωσης από ώρες αιχμής σε ώρες εκτός αιχμής. Σε αυτή την περίπτωση οι συνέπειες στην άνεση του καταναλωτή είναι μικρότερες. Τέλος, σε περιπτώσεις βιομηχανικών καταναλωτών, είναι δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ιδιόκτητες εγκαταστάσεις, επί τόπου. Πέραν του οικονομικού κόστους που εμπεριέχεται σε αυτή την ενέργεια για τον καταναλωτή, πρακτικά το μοτίβο κατανάλωσής του μένει ανεπηρέαστο. Παράλληλα, το φορτίο το οποίο απαιτεί από το δίκτυο μειώνεται (1).

Οι διαφορετικοί στόχοι που μπορούν να τεθούν σε μια πολιτική διαχείρισης της ζήτησης φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Σχήμα 1-1 – Διαφορετικές καμπύλες φορτίου ανάλογα με τη μέθοδο DSM (3)

Στα τρία πρώτα διαγράμματα, έχουμε διαχείριση του φορτίου με τη μορφή της περικοπής της αιχμής (peak clipping), της πλήρωσης των ‘κοιλιάδων’ της καμπύλης φορτίου (valley filling), δηλαδή αύξηση της ζήτησης σε ώρες εκτός αιχμής και της μετατόπισης φορτίου (load shifting) από τις ώρες αιχμής προς τις υπόλοιπες ώρες.

Η μέθοδος της ενεργειακής αποδοτικότητας (energy efficiency) εφαρμόζεται σε βάθος χρόνου κι όχι για τον περιορισμό του φορτίου σε ώρες ή μέρες με αυξημένη αιχμή. Συνιστά τη συνολική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, όπου αυτή καταναλώνεται για φωτισμό,

θέρμανση, ψύξη και τη λειτουργία κινητήρων. Για το σκοπό αυτό απαιτείται αναβάθμιση ή αντικατάσταση του υπάρχοντος εξοπλισμού ώστε να μειωθεί η ποσότητα ενέργειας που χρειάζεται για αυτές τις λειτουργίες.

Ο εξηλεκτρισμός (electrification) περιλαμβάνει την ανάπτυξη της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να επιτευχθούν κι άλλοι αντικειμενικοί στόχοι όπως η οικονομική ανάπτυξη. Δηλαδή, συμπεριλαμβάνει την ανάπτυξη της αγοράς και του αριθμού καταναλωτών.

Τέλος, η ευέλικτη καμπύλη φορτίου (flexible load shape), υπαγορεύει ότι το φορτίο πρέπει να ανταποκρίνεται ανάλογα με την αξιοπιστία του συστήματος κάθε στιγμή, κάτι που είναι δύσκολο να επιτευχθεί.

1.2.2 Προγράμματα απόκρισης της ζήτησης

Κατά τη χάραξη της πολιτικής για τη διαχείριση της ζήτησης μπορούν να εφαρμοσθούν διαφορετικά προγράμματα που θα πετύχουν την επιθυμητή απόκριση ζήτησης. Τα προγράμματα που θα εφαρμοσθούν πρέπει να είναι οικονομικά αποδοτικά, διότι δε πρέπει να αμεληθούν παράγοντες όπως είναι οι συνέπειες των μεταβολών της ζήτησης, το κόστος εφαρμογής του προγράμματος και το επίπεδο στο οποίο μπορεί να κυμανθούν μελλοντικά οι τιμές της αγοράς (3).

Μπορούμε να διαχωρίσουμε τα προγράμματα αυτά σε δύο κατηγορίες:

Απόκριση ζήτησης βάσει κινήτρων:

Τα προγράμματα αυτά έχουν στόχο να μειώσουν την κατανάλωση των χρηστών του δικτύου κατά τη διάρκεια κρίσιμων γεγονότων. Εναλλακτικά, ονομάζονται και προγράμματα περικοπής φορτίου. Τα κίνητρα που δίνονται στους καταναλωτές ώστε να αλλάξουν τη συμπεριφορά τους ως προς τον τρόπο που καταναλώνουν, έχουν τη μορφή πίστωσης στο λογαριασμό τους ή και την αποδοχή πληρωμής ανάλογα με τη μείωση που καταφέρνουν να πετύχουν στη κατανάλωσή τους. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις οι χρήστες που έχουν ενταχθεί σε ένα τέτοιο πρόγραμμα, ενδέχεται να δεχθούν επιπλέον οικονομική επιβάρυνση, σε περίπτωση απόκλισης από το συμφωνηθέντα στόχο (2).

Εκτός από τα κλασσικά προγράμματα που προβλέπουν άμεσο έλεγχο του φορτίου δίνοντας τη δυνατότητα στο διαχειριστή του δικτύου να προβεί σε διακοπή της παροχής ισχύος όταν κρίνεται απαραίτητο, έχουν αναπτυχθεί και προγράμματα στο πλαίσιο της αγοράς ενέργειας. Τα προγράμματα που βασίζονται στην αγορά, εκτός του δεδομένου στόχου για αυξημένη αξιοπιστία του συστήματος, αντιμετωπίζουν και φαινόμενα όπως η υπέρμετρη αύξηση των τιμών χονδρεμπορικής.

Ακολουθεί απαρίθμηση των προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης βάσει κινήτρων (2):

- *Άμεσος έλεγχος στο φορτίο (Direct Control)*: το πρόγραμμα αυτό απευθύνεται κυρίως σε οικιακούς καταναλωτές με κίνητρο την πίστωση στο λογαριασμό τους. Ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να επέμβει με διακοπή της λειτουργίας του οικιακού εξοπλισμού που επιβαρύνει το σύστημα σε περίοδο που απειλείται η εύρυθμη λειτουργία του.

- *Προγράμματα περικοπής/διακοπής (Curtailable/Interruptible Programs):* απευθύνονται σε χρήστες που καταναλώνουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας, άρα κυρίως σε βιομηχανικούς και σε δεύτερο λόγο σε εμπορικούς καταναλωτές. Οι συμμετέχοντες χρήστες εφόσον συμφωνήσουν στη μείωση της κατανάλωσής τους σε κάποιο συμφωνηθέν όριο, σε περίοδο που το σύστημα τίθεται σε κίνδυνο, απολαμβάνουν έκπτωση ή πίστωση στο λογαριασμό τους. Αν, όμως, παρατηρηθεί απόκλιση από το συμφωνηθέν όριο για την κατανάλωσή τους ενδέχεται να υποστούν ποινές με τη μορφή αύξησης στο λογαριασμό τους.
- *Προγράμματα πλειοδοσίας/επαναγοράς (Demand Bidding):* οι χρήστες με μεγάλη συμμετοχή στην κατανάλωση ενέργειας ορίζουν, μετά από διαδικασία πλειοδοσίας στο πλαίσιο της αγοράς, σε ποια τιμή διατίθενται να περικόψουν το φορτίο τους. Εναλλακτικά, ο πάροχος της ενέργειας ορίζει μια τιμή κι ο χρήστης έχει την επιλογή να ορίσει πόσο φορτίο διατίθεται να περικόψει σε αυτή την τιμή. Στα προγράμματα αυτά είναι πιθανότερο να υπάρξει ποινή στον καταναλωτή αν δε τηρηθούν τα συμφωνηθέντα.
- *Προγράμματα έκτακτης ανάγκης (Emergency DR Programs):* σε καταστάσεις όπου το σύστημα εμφανίζει μειωμένη αξιοπιστία, οι συμμετέχοντες δέχονται πληρωμές εφόσον μετρηθεί μείωση της κατανάλωσής τους για όσο το σύστημα βρίσκεται σε κίνδυνο, συμβάλλοντας στην αποφόρτισή του.
- *Προγράμματα χωρητικότητας της αγοράς (Capacity Market):* οι καταναλωτές προχωρούν σε μια προκαθορισμένη μείωση του φορτίου σε περιπτώσεις ανάγκης του συστήματος. Σε αντάλλαγμα δέχονται προπληρωμή και ανάλογα με το πρόγραμμα, πληρωμές όταν μειώνουν την κατανάλωση σε έκτακτα περιστατικά. Σε τέτοιου είδους προγράμματα κι εφόσον έχουν προηγηθεί συμφωνίες εκ των προτέρων είναι δεδομένο ότι οι συμμετέχοντες που δε συμμορφώνονται θα δεχτούν ποινές.
- *Προγράμματα αγοράς επικουρικών υπηρεσιών (Ancillary services market):* προγράμματα στα οποία οι καταναλωτές πλειοδοτούν την περικοπή του φορτίου τους, όπου το φορτίο που περικόπτεται χρησιμοποιείται ως εφεδρεία. Αν η προσφορά τους γίνει αποδεκτή ανταμείβονται για να είναι σε θέση να μειώσουν την κατανάλωση όταν αυτό χρειαστεί. Σε περίπτωση που όντως υπάρχει ανάγκη να περικοπεί το φορτίο υπάρχει επιπρόσθετη αμοιβή.

Παρά τα οικονομικά οφέλη που υπάρχουν για τους καταναλωτές, είναι απαραίτητο να γίνει εύστοχα η προώθηση του επιλεγμένου προγράμματος, ώστε να πεισθούν και να συμμετέχουν. Θα πρέπει δηλαδή να είναι ξεκάθαρα τα οφέλη που μπορούν να αποκομίσουν, αν και τι θα τους κοστίζει για να συμμετάσχουν, καθώς και οι συνέπειες από τη συμμετοχή και στη συνέχεια, μη συμμόρφωση τους ως προς τους όρους που έχουν συμφωνηθεί (3).

Απόκριση ζήτησης βάσει τιμής:

Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλεται σύμφωνα με τις μεταβολές στο κόστος που καταβάλλεται προκειμένου να παραχθεί. Τα προγράμματα που προσβλέπουν σε απόκριση της ζήτησης βασίζόμενα στην τιμή, χρησιμοποιούν μεταβαλλόμενες ταρίφες αντί μιας σταθερής τιμής που μένει αμετάβλητη για μεγάλο χρονικό διάστημα κι αντιπροσωπεύει το μέσο κόστος της παραγωγής ενέργειας. Με τη συμμετοχή τους, οι καταναλωτές μπορούν να

εξοικονομήσουν χρήματα, καταναλώνοντας τις ώρες της ημέρας που επικρατούν χαμηλές τιμές και μειώνοντας την κατανάλωση τις ώρες που επικρατούν υψηλές τιμές.

Οι επιλογές για τέτοιου είδους προγράμματα είναι οι εξής (2):

- *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 και μπορεί να μείνει αμετάβλητη για διάστημα μηνών. Τέτοιου είδους προγράμματα είναι ευρέως διαδεδομένα, είναι απαραίτητη όμως εγκατάσταση εξοπλισμού για τη μέτρηση του μέσου φορτίου που καταναλώνεται σε κάθε τμήμα της ημέρας.
- *Τιμολόγηση κρίσιμης αιχμής (Critical Peak Pricing- CPP)*: καθορίζεται υψηλή τιμολόγηση της κατανάλωσης, για μια περίοδο κατά την οποία ο πάροχος έχει ορίσει ως κρίσιμη αιχμή. Αυτή 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. Σε σχετικά σύντομο διάστημα πριν τεθεί σε ισχύ η τιμολόγηση, υπάρχει σχετική ενημέρωση των πελατών. Οι πελάτες, συνήθως, λαμβάνουν έκπτωση στο λογαριασμό για τη συμμετοχή τους στο πρόγραμμα.
- *Τιμολόγηση ακραίας ημέρας (Extreme Day Pricing- EDP)*: ισχύει ότι και στην προηγούμενη επιλογή, μόνο που εφαρμόζονται για χρονικό διάστημα μίας ημέρας.
- *Τιμολόγηση κρίσιμης κορυφής και ακραίας ημέρας (ED-CPP)*: αποτελεί συνδυασμό των δύο προηγούμενων επιλογών.
- *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.

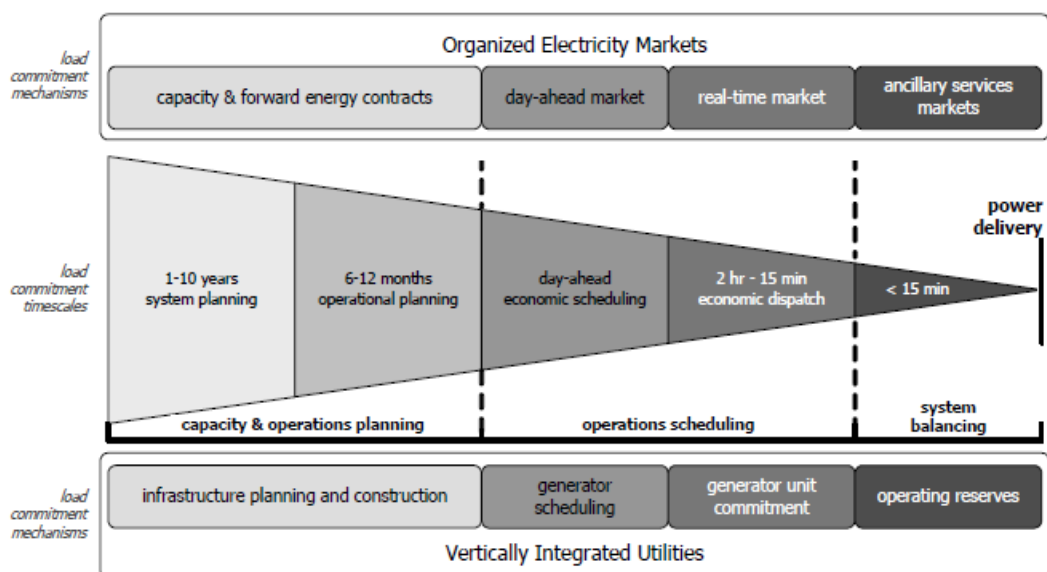
Κάθε μέθοδος τιμολόγησης επιφέρει διαφορετικές συνέπειες για καταναλωτές και τους οργανισμούς που παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια. Με την τιμολόγηση σε πραγματικό χρόνο (RTP), γίνεται μετακύλιση του κόστους της χονδρεμπορικής αγοράς, χωρίς πρόσθετο κόστος για τον παραγωγό. Με τιμολόγηση CPP, οι καταναλωτές προειδοποιούνται για το πότε αυτή θα τεθεί σε εφαρμογή κι η διάρκεια που αυτή εφαρμόζεται είναι περιορισμένη (3).

1.3 Διαχείριση της ζήτησης και σχεδιασμός ενός Σ.Η.Ε.

1.3.1 Στάδια προγραμματισμού ενός Σ.Η.Ε.

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, οι αποφάσεις κατά τη διαχείριση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζονται από δύο βασικούς παράγοντες του ηλεκτρισμού. Πρώτον, η αδυναμία αποθήκευσής του απαιτεί ισορροπία μεταξύ ζήτησης και προσφοράς, ώστε να μη προκληθούν προβλήματα στη λειτουργία του συστήματος. Δεύτερον, οι απαιτήσεις σε κεφάλαιο για την επέκταση του συστήματος είναι μεγάλες. Γι αυτούς τους λόγους ο προγραμματισμός της λειτουργίας ενός Σ.Η.Ε. γίνεται σε ευρύτατη χρονική

κλίμακα. Περιλαμβάνει σχεδιασμό σε βάθος δεκαετιών αλλά και σχεδιασμό για την επόμενη ώρα.



Σχήμα 1-2 – Προγραμματισμός ενός Σ.Η.Ε. σε κλίμακα χρόνου και μηχανισμοί λήψης αποφάσεων (3)

Όπως προκύπτει από το παραπάνω σχήμα, η διαφορά μιας οργανωμένης αγοράς με ένα καθιερωμένο σύστημα είναι στο μηχανισμό με τον οποίο εντάσσονται οι μονάδες, ενώ ο μακροχρόνιος σχεδιασμός είναι παρόμοιος. Στην ανταγωνιστική αγορά δεν υπάρχει περιθώριο για μεγάλη σπατάλη χρόνου κατά την εξεύρεση πόρων ή μέσων για την κάλυψη της ζήτησης.

Επένδυση και σχεδιασμό σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα περιλαμβάνει ο σχεδιασμός της εγκατάστασης νέας ισχύος και της λειτουργίας του συστήματος (capacity and operations planning). Πρέπει να ληφθούν υπόψη οι μελλοντικές ανάγκες για επέκταση ή εκσυγχρονισμό των εγκαταστάσεων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής. Οι εργασίες αυτές χρειάζονται έτη για την ολοκλήρωσή τους. Ο σχεδιασμός του τρόπου διαχείρισης περιλαμβάνει την εκτίμηση της ζήτησης που πρέπει να ικανοποιηθεί σε ορίζοντα ενός έτους ή κάποιων μηνών.

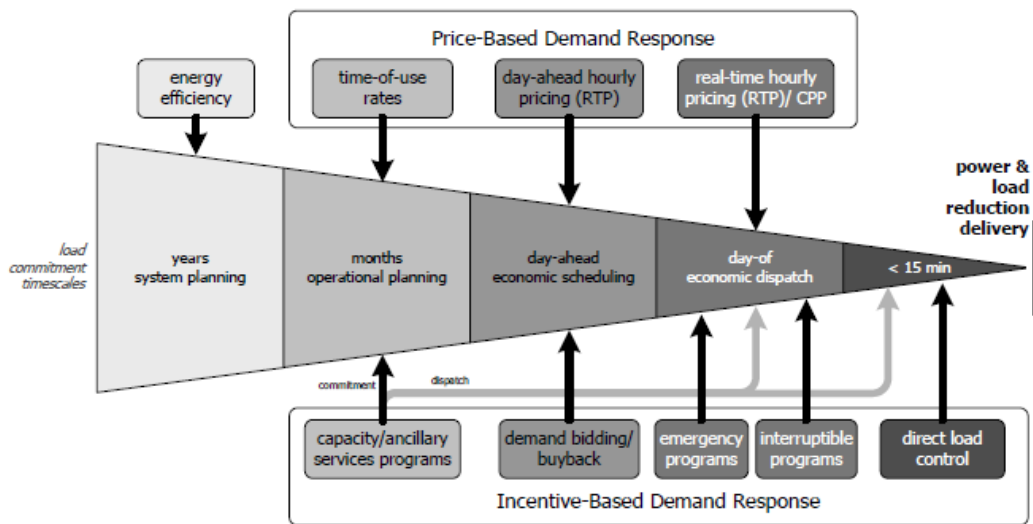
Ο προγραμματισμός της λειτουργίας (operations scheduling) αποτελεί τη διαδικασία κατά την οποία αποφασίζεται ποιες μονάδες παραγωγής θα ενταχθούν προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση βραχυπρόθεσμα. Η λειτουργία των μονάδων προγραμματίζεται μία ημέρα πριν από εκείνη για την οποία γίνεται σχεδιασμός, βάσει των προβλέψεων για το επίπεδο της ζήτησης. Σε διάστημα ωρών ή και λεπτών απαιτείται, όμως, εναρμόνιση λόγω αστοχιών στην πρόβλεψη της ζήτησης ή λόγω διακοπής λειτουργίας κάποιας μονάδας παραγωγής.

Η εξισορρόπηση του συστήματος (system balancing) περιλαμβάνει την κάλυψη αναγκών που μπορεί να προκύψουν την τελευταία στιγμή. Τα μέσα που χρησιμοποιούνται γι' αυτό το σκοπό είναι για παράδειγμα η στρεφόμενη εφεδρεία, έλεγχος της ποσότητας ενέργειας που παράγεται και της τάσης και άλλα μέσα υποστήριξης, απαραίτητα για τη λειτουργία του δικτύου.

1.3.2 Ένταξη της διαχείρισης της ζήτησης στο σχεδιασμό ενός Σ.Η.Ε.

Ενώ ο ηλεκτρισμός δεν μπορεί να αποθηκευτεί, αξιόπιστα, για μελλοντική χρήση, οι ανάγκες για ενέργεια προκύπτουν και πρέπει να ικανοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο.

Διαφορετικές επιλογές προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης έχουν θέση σε όλη την χρονική κλίμακα της διαχείρισης ενός συστήματος. Επιπρόσθετα, μπορεί να γίνει συγχρονισμός της μεθόδου τιμολόγησης και της ένταξης μονάδων με τον χρονικό ορίζοντα στον οποίο τοποθετείται το πρόγραμμα. Για παράδειγμα αν το πρόγραμμα ενημερώνει τους πελάτες μια μέρα πριν για το ότι πρόκειται να μουν σε διαδικασία διαχείρισης της ζήτησης, η τιμολόγηση μπορεί να γίνει με βάση την κατάσταση της αγοράς της επόμενης μέρας κατά την οποία θα παρατηρηθεί η απόκριση ζήτησης.



Σχήμα 1-3 – Ένταξη της διαχείρισης ζήτησης στο σχεδιασμό του Σ.Η.Ε. (3)

Στο σχήμα παρατηρούμε τα εξής:

Όσον αφορά την απόκριση ζήτησης βάσει τιμής, η τιμολόγηση βάσει της ώρας χρήσης εντάσσεται με σκοπό να διατηρηθεί για μήνες, άλλωστε όπως έχει προαναφερθεί είναι η τιμολόγηση που μεταβάλλεται λιγότερο με το πέρασμα του χρόνου. Η τιμολόγηση σε πραγματικό χρόνο εντάσσεται στο σχεδιασμό της επόμενης ημέρας, ενώ ο συνδυασμός της τιμολόγησης πραγματικού χρόνου και κρίσιμης αιχμής εντάσσεται στο σχεδιασμό της τρέχουσας ημέρας.

Όσον αφορά την απόκριση ζήτησης βάσει κινήτρων, ο άμεσος έλεγχος επί του φορτίου εντάσσεται σε διάστημα λίγων λεπτών πριν παρουσιαστεί η ανάγκη. Τα προγράμματα περικοπής φορτίου κι έκτακτης ανάγκης εντάσσονται στο σχεδιασμό της τρέχουσας ημέρας, ενώ τα προγράμματα πλειοδοσίας στο σχεδιασμό της επόμενης ημέρας. Τα προγράμματα ισχύος και επικουρικών υπηρεσιών εντάσσονται στο σχεδιασμό των επόμενων μηνών, αλλά εφαρμόζονται στην πράξη όταν υπάρξει ανάγκη στην τρέχουσα ημέρα ή στα επόμενα λεπτά.

Η μέθοδος της ενεργειακής αποδοτικότητας εντάσσεται στο σχεδιασμό του συστήματος για τα επόμενα έτη και παρότι τα αποτελέσματά της δε μπορούν να παραδοθούν κατά βούληση, τα οφέλη της είναι μόνιμα σε ό,τι αφορά τη μείωση της κατανάλωσης κι ακολούθως εξοικονόμηση ενέργειας.

1.4 Οφέλη από τη Διαχείριση της Ζήτησης

Οφέλη για τους συμμετέχοντες στη Διαχείριση της Ζήτησης

Το απτό όφελος για τους συμμετέχοντες στα προγράμματα διαχείρισης της ζήτησης είναι το οικονομικό. Ανάλογα με το εκάστοτε πρόγραμμα, είτε εξοικονομούν χρήματα καταναλώνοντας λιγότερη ενέργεια όταν οι τιμές είναι υψηλές είτε λαμβάνουν πληρωμές για συμμετοχή σε πρόγραμμα περικοπής φορτίου. Πέραν του οικονομικού οφέλους όμως, η μικρότερη έκθεση του δικτύου σε κίνδυνο αποσταθεροποίησης, αποτρέπει δυσάρεστες καταστάσεις (διακοπές της παροχής) που προκαλούν αίσθημα δυσφορίας στον καταναλωτή ή οικονομική επιβάρυνση για μεγάλους καταναλωτές.

Οφέλη για την αγορά και τη σταθερότητα του συστήματος

Τα οφέλη αυτά αφορούν όλους τους καταναλωτές. Το δίκτυο αξιοποιείται αποδοτικότερα με αποτέλεσμα το μεταβλητό κόστος για τον παραγωγό να είναι μικρότερο. Επομένως, το κόστος παραγωγής της ενέργειας μειώνεται και κατά συνέπεια μειώνεται η οικονομική επιβάρυνση των καταναλωτών. Επιπλέον, η μικρότερη κατανάλωση σε ώρες αιχμής μπορεί να προκαλέσει μείωση της τιμής της χονδρεμπορικής αγοράς ηλεκτρισμού. Η ανταγωνιστικότητα της αγοράς είναι άλλο ένα σημείο στο οποίο παρατηρείται όφελος. Λόγω δομικών προβλημάτων η ζήτηση ενέργειας είναι ανελαστική. Εφαρμόζοντας προγράμματα περικοπής φορτίου αυξάνεται η ελαστικότητα της ζήτησης, συνεπώς αυξάνεται η ανταγωνιστικότητα. Επιπρόσθετα, καθώς μετατοπίζεται σε βάθος χρόνου ή αποτρέπεται η ανάγκη για επέκταση των υποδομών παραγωγής, μεταφοράς και διανομής, υπάρχει εξοικονόμηση κεφαλαίου (2).

Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί το όφελος για το σύστημα και τη λειτουργία του. Η Διαχείριση της Ζήτησης παρέχει ασφάλεια έναντι αρνητικών γεγονότων όπως διακοπές της λειτουργίας μεγάλων μονάδων παραγωγής κι αποτρέπει τη ζήτηση να φτάσει σε ακραία επίπεδα σε περίοδο που πολλές μονάδες τελούν υπό συντήρηση. Όσον αφορά την εφεδρεία του συστήματος, καθώς μειώνεται το φορτίο στις ώρες αιχμής, μειώνεται κι η απαραίτητη ισχύς που προορίζεται για εφεδρεία (4). Επίσης, η εφεδρεία του συστήματος μπορεί πιο εύκολα να επανέλθει στο επίπεδο που βρισκόταν πριν την εμφάνιση ενός απροσδόκητου συμβάντος. Συνεπώς, καθίσταται μικρότερος ο κίνδυνος εμφάνισης μιας διακοπής στην παροχή ενέργειας, ο χρόνος που αυτή μπορεί να διαρκέσει, αν συμβεί κι οι συνέπειές της (2). Τέλος, παρέχονται περισσότερες επιλογές στο διαχειριστή του δικτύου, που διευκολύνουν το έργο του.

Αδιόρατα οφέλη

Με την εφαρμογή πολιτικών για Διαχείριση της Ζήτησης, προσφέρονται επιλογές στους καταναλωτές για το πώς αυτοί θα διαχειριστούν το κόστος τους για την κατανάλωση ενέργειας.

Όπου εφαρμόζονται προγράμματα απόκρισης της ζήτησης ως προς την τιμή, αποφεύγεται η πιθανότητα να εκμεταλλευτούν οι παραγωγοί ενέργειας την αγορά, όπου αυτή έχει απελευθερωθεί, μειώνοντας την προσφορά ενέργειας ώστε να προκληθεί αύξηση των τιμών. Αυτό οφείλεται στο ότι οι καταναλωτές ασκούν επιρροή στην αγορά με τον τρόπο που καταναλώνουν ενέργεια. Εν τέλει, συντελείται μικρότερη αυξομείωση στις τιμές (1).

Οφέλη για το περιβάλλον

Βασικό όφελος για το περιβάλλον και ειδικότερα των περιοχών με μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας αποτελεί η μείωση των εκπομπών ρύπων. Ωστόσο, εφιστάται προσοχή ώστε οι εκπομπές που αποφεύγονται τις ώρες αιχμής να μην καταλήγουν μικρότερες από αυτές κατά τη λειτουργία τις υπόλοιπες ώρες ή κατά την παραγωγή ενέργειας από τους ίδιους τους καταναλωτές, σε ιδιόκτητες εγκαταστάσεις, στο πλαίσιο της απόκρισης της ζήτησης (2). Άλλο ένα όφελος για το περιβάλλον είναι ότι οι καταναλωτές αποκτούν μεγαλύτερη επίγνωση της κατανάλωσής τους και του κόστους που αυτή συνεπάγεται.

1.5 Πιλοτικά προγράμματα Διαχείρισης της Ζήτησης (5)

Η ανασκόπηση δοκιμαστικών προγραμμάτων (pilots) που έχουν εφαρμοστεί διεθνώς στα πλαίσια της μελέτης της απόκρισης ζήτησης που αφορά τους οικιακούς καταναλωτές, παρέχει ορισμένα χρήσιμα ευρήματα αλλά για ορισμένες πτυχές της απόκρισης ζήτησης χρειάζεται περαιτέρω έρευνα ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

Τα πιλοτικά προγράμματα για τα οποία γίνεται λόγος εξετάζουν κυρίως τις αλλαγές στο μοτίβο κατανάλωσης των οικιακών καταναλωτών, παρά τη μείωση του φορτίου ποσοτικά. Επιπλέον, εξετάζονται είδη απόκρισης της ζήτησης που στοχεύουν στη μείωση του φορτίου κατά τη διάρκεια μιας αιχμής, μέρα με την ημέρα και προκαλούν μεγαλύτερες αλλαγές στις συνήθειες των καταναλωτών και είδη απόκρισης της ζήτησης που προκαλούν μείωση στην κατανάλωση σε μια κρίσιμη αιχμή της ζήτησης (περίοδο στην οποία παρατηρείται αυξημένο κόστος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας).

1.5.1 Κοινά ευρήματα των πιλοτικών προγραμμάτων

- ✓ Καταρχήν, επιβεβαιώνεται ότι οι οικιακοί καταναλωτές ανταποκρίνονται σε μεταβολές της τιμής της ενέργειας (π.χ. υψηλές τιμές σε περίοδο αιχμής της ζήτησης) ακόμα κι όταν δε λαμβάνουν εκπτώσεις, αλλά ενημερώνονται για το επίπεδο στο οποίο πρόκειται να κυμανθούν οι τιμές. Το ποσοστό του φορτίου που μετατίθεται από την περίοδο αιχμής δεν είναι εύκολο να γενικευθεί, διότι υπάρχουν διαφορές από πρόγραμμα σε πρόγραμμα.

- ✓ Οι διαδικασίες αυτοματοποίησης της απόκρισης του οικιακού φορτίου παρέχουν καλύτερα αποτελέσματα όπου εφαρμόζονται. Η κατανάλωση οικιακών συσκευών που μπορούν να ανταποκριθούν αυτόματα στις επιταγές της διαχείρισης της ζήτησης, μπορεί με αυτό τον τρόπο να μετατίθεται αξιόπιστα.
- ✓ Πέραν των διαδικασιών αυτοματοποίησης, η ενημέρωση των καταναλωτών είναι παράγοντας που επηρεάζει θετικά την απόκριση της ζήτησης. Οι πληροφορίες, για παράδειγμα, για το επίπεδο των τιμών παρέχονται είτε μέσω καναλιών ενημέρωσης είτε μέσω μετρητών εγκατεστημένων στην οικία του καταναλωτή.
- ✓ Δίνοντας τη δυνατότητα στους καταναλωτές να εκφράσουν τη γνώμη τους για το πρόγραμμα και τα επίπεδα της τιμολόγησης, προκύπτουν επίσης πιο ενθαρρυντικά αποτελέσματα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προγραμμάτων, η ζήτηση μειώνεται κατά την εφαρμογή τιμολόγησης βάσει της ώρας χρήσης (Time of Use- TOU), τιμολόγησης κρίσιμης αιχμής (Critical Peak Price- CPP) κι έκπτωσης κρίσιμης αιχμής (Critical Peak Rebate- CPR).

Με την τιμολόγηση TOU, η ημέρα χωρίζεται σε 2 ή περισσότερα μέρη που αντιστοιχούν σε διαφορετική τιμή της ενέργειας. Οι τιμές όμως είναι προκαθορισμένες και παραμένουν σταθερές για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Κατά την τιμολόγηση CPP η ενέργεια έχει μια υψηλή προκαθορισμένη τιμή όταν υπάρχει υψηλή ζήτηση ή μια κρίσιμη αιχμή, ενώ με την τιμολόγηση CPR οι καταναλωτές λαμβάνουν έκπτωση αν περιορίσουν την κατανάλωση την περίοδο της κρίσιμης αιχμής. Οι δύο αυτές κατηγορίες απόκρισης της ζήτησης εφαρμόζονται, συνήθως παράλληλα με τιμολόγηση TOU. Σε αυτή την περίπτωση, ενώ οι καταναλωτές καλούνται να μειώσουν την κατανάλωση στις ώρες αιχμής, σε περίπτωση μιας κρίσιμης αιχμής είναι ακόμα πιο έντονη η παρότρυνση για μείωση της κατανάλωσης.

Συγκρίνοντας τις παραπάνω μεθόδους, παρατηρήθηκε ότι τις ώρες εφαρμογής των μεθόδων κρίσιμης αιχμής, η μείωση του φορτίου είναι μεγαλύτερη συγκρινόμενη με τη μέθοδο TOU. Οι καταναλωτές προτιμούν να αλλάζουν τις συνήθειές τους περιστασιακά κι όταν κρίνεται απολύτως αναγκαίο κι όχι σε τακτική βάση. Επίσης, είναι πιθανότερο να μειώσουν την κατανάλωση όταν δέχονται ισχυρή παρότρυνση για μετάθεση του φορτίου όπως γίνεται στις μεθόδους CPP/CPR.

1.5.2 Αποτελέσματα όπου εμφανίζονται ασάφειες

Ορισμένα από τα ευρήματα των δοκιμαστικών προγραμμάτων χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης καθώς δεν έχουν εξακριβωθεί από πού πηγάζουν.

Πιο συγκεκριμένα, ενώ παρατηρήθηκαν διαφορές στην απόκριση της ζήτησης από τους καταναλωτές με χαμηλότερο εισόδημα, δεν είναι σαφείς οι λόγοι που τις προκαλούν.

Επιπλέον, οι δοκιμές της μεθόδου τιμολόγησης σε πραγματικό χρόνο (Real Time Pricing-RTP) δεν έχουν δώσει αποτελέσματα που μπορούν να γενικευθούν για όλες τις αγορές. Εν τέλει, σε δοκιμές όπου δεν υπάρχει αυτοματοποίηση της απόκρισης ζήτησης κι απουσιάζει ο άμεσος έλεγχος από το διαχειριστή του δικτύου είναι αμφίβολο το διάστημα για το οποίο η διαχείριση της ζήτησης παράγει σταθερά αποτελέσματα.

1.5.3 Ανασκόπηση πιλοτικών προγραμμάτων στις Η.Π.Α. και στην Ευρώπη

Ακολουθούν αναφορές σε πιλοτικά προγράμματα, από τα οποία τα δύο έχουν λάβει χώρα στις Η.Π.Α. όπου έχει λάβει χώρα η πλειοψηφία τέτοιων δοκιμών κι ένα στο Ηνωμένο Βασίλειο (5).

1.5.3.1 BGE Smart Energy Pricing Pilot (2008)

Γενικά στοιχεία

Το συγκεκριμένο πιλοτικό πρόγραμμα έλαβε χώρα στη Βαλτιμόρη των Η.Π.Α. την περίοδο μεταξύ Ιουνίου 2008 – Σεπτεμβρίου 2008 με τη συμμετοχή 1375 οικιακών καταναλωτών, από τους οποίους οι 354 αποτέλεσαν την ομάδα ελέγχου, δηλαδή ήταν το μέτρο σύγκρισης για τους καταναλωτές που συμμετείχαν στο πρόγραμμα απόκρισης ζήτησης.

Κατηγορίες απόκρισης ζήτησης

Χρησιμοποιήθηκαν οι εξής μέθοδοι:

- Δυναμική τιμολόγηση της αιχμής
- Έκπτωση τιμής σχετική με την αιχμή με χαμηλό επίπεδο έκπτωσης
- Έκπτωση τιμής σχετική με την αιχμή με υψηλό επίπεδο έκπτωσης

Χρησιμοποιήθηκαν παράλληλα με τιμολόγηση TOU, όπου η ημέρα ήταν χωρισμένη σε δύο τμήματα. Οι καταναλωτές ενημερώνονταν για την κρίσιμη αιχμή την προηγούμενη ημέρα.

Κίνητρα

Ως κίνητρα, όλοι οι συμμετέχοντες, συμπεριλαμβανομένης και της ομάδας ελέγχου έλαβαν \$25 μετά από τη διεξαγωγή έρευνας στα μισά του προγράμματος, ενώ αυτοί που υποβλήθηκαν στις νέες τιμολογήσεις έλαβαν ακόμα \$25 μετά τη διεξαγωγή έρευνας στο τέλος. Για τους καταναλωτές που υποβλήθηκαν σε δυναμική τιμολόγηση του φορτίου τους, οι τιμές ρυθμίστηκαν ώστε να υπάρχει ισορροπία στα έσοδα.

Διευκολύνσεις για τους καταναλωτές

Παραχωρήθηκαν μετρητές για τη μέτρηση της χρήσης ανά 15 λεπτά σε καταναλωτές που δε τους διέθεταν, ενώ σε ορισμένους παραχωρήθηκαν οθόνες για τη σήμανση των ωρών, κρίσιμης και μη, αιχμής. Επίσης, σε κάποιους παραχωρήθηκαν διακόπτες για την κυκλική λειτουργία των κλιματιστικών συσκευών. Ο πάροχος της ενέργειας (BGE) μείωνε την κατανάλωση των κλιματιστικών κατά 50% σε περίοδο κρίσιμης αιχμής. Για τη διευκόλυνση των καταναλωτών υπήρχαν πληροφορίες διαθέσιμες στο διαδίκτυο ενώ λάμβαναν

ειδοποιήσεις για τις εκπτώσεις και το ποσό που εξοικονομούσαν μετά από περιόδους εμφάνισης κρίσιμης αιχμής.

Αλλαγές στην κατανάλωση

Στα αποτελέσματα του πιλοτικού προγράμματος καταγράφηκε μείωση του φορτίου σε κρίσιμες αιχμές από 18% έως 33%. Με τη χρήση των οθονών για τη σήμανση της περιόδου αιχμής και κρίσιμης αιχμής η μείωση του φορτίου κυμάνθηκε στο 23%- 7%. Με την παράλληλη χρήση οθονών και διακόπτη για τη κεντρική μονάδα κλιματισμού η μείωση ήταν της τάξης του 29%- 33%. Δεν εμφανίστηκαν διαφορές στην ελαστικότητα της υποκατάστασης μεταξύ των μεθόδων CPP και CPR. Σε ημέρες χωρίς κρίσιμη αιχμή η μείωση ήταν 1,8% με δυναμική τιμολόγηση και 4,4% με δυναμική τιμολόγηση, οθόνες σήμανσης και διακόπτη για τον κλιματισμό.

Συμπερασματικά, η ύπαρξη αυτοματισμών προκάλεσε μεγαλύτερη μείωση του φορτίου.

Διαφοροποιήσεις μεταξύ των καταναλωτών

Πρέπει να αναφερθεί ότι βάσει της έρευνας στα πλαίσια του προγράμματος, η ελαστικότητα της υποκατάστασης της χρήσης ηλεκτρισμού κατά την εμφάνιση κρίσιμων αιχμών ήταν μικρότερη για κατοικίες με πολλές οικογένειες και μεγαλύτερη για καταναλωτές με ανώτερη εκπαίδευση ή μεγάλο εισόδημα.

1.5.3.2 EDRP Trials (2007- 2010)

Γενικά στοιχεία

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα έλαβε χώρα στο Ηνωμένο Βασίλειο, κατά τα έτη 2007- 2010. Το μέγεθος του δείγματος ήταν 61.344 εκ των οποίων οι 18.370 διέθεταν μετρητές (smart meters). Στη δοκιμή της εταιρίας EDF συμμετείχαν 194 καταναλωτές, ενώ στη δοκιμή της εταιρίας SSE, 1.352 συμμετέχοντες είχαν κίνητρο για να μειώσουν τη ζήτησή τους.

Κατηγορίες απόκρισης ζήτησης

Η μέθοδος απόκρισης ζήτησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν η διατίμηση TOU (Time of Use) σε συνδυασμό με τους εγκατεστημένους μετρητές και πιο ενεργή συμμετοχή των πελατών των οποίων η γνώμη καταγράφηκε, δίνοντάς τους και κίνητρα για τη μετάθεση της ζήτησης.

Διευκολύνσεις για τους καταναλωτές

Προς διευκόλυνση των καταναλωτών εγκαταστάθηκαν 'έξυπνοι' μετρητές. Οι συμμετέχοντες στην διατίμηση TOU της EDF, λάμβαναν αναλυτικό λογαριασμό, συσκευή για απεικόνιση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και τους παρέχονταν, ταχυδρομικώς, συμβουλές για ενεργειακή αποδοτικότητα. Οι συμμετέχοντες στη διατίμηση TOU της SSE, λάμβαναν βιβλιάριο με πληροφορίες, γραφήματα στο μηνιαίο λογαριασμό, κίνητρο για τη μείωση της κατανάλωσης, συσκευή απεικόνισης πραγματικού χρόνου και πληροφόρηση μέσω internet.

Αλλαγές στην κατανάλωση

Η μείωση του φορτίου κατά την περίοδο αιχμής έφτασε το 10%. Μεγαλύτερη μείωση παρατηρήθηκε τα σαββατοκύριακα σε σχέση με τις καθημερινές. Στη δοκιμή της SSE παρατηρήθηκε μεγαλύτερη μετάθεση του φορτίου εκτός αιχμής από ομάδες που δε διέθεταν πλούσια πληροφόρηση κι ενημέρωση, γεγονός που καταδεικνύει ότι η μεγαλύτερη παρεμβατικότητα για τη διευκόλυνση των καταναλωτών αύξησε την πολυπλοκότητα κι έτσι η απόκριση ήταν μικρότερη.

Εμπόδια

EDF:

Μετά από έρευνα προέκυψε ότι το μόνο το 38% των συμμετεχόντων στην τιμολόγηση ΤΟΥ είχε επίγνωση της συσκευής για απεικόνιση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Ακόμη, το 54% βρήκε τη συσκευή αρκετά χρήσιμη, το 25% όχι αρκετά χρήσιμη και το 12,5% καθόλου χρήσιμη.

Τέλος, το 65% δήλωσε ότι ο έξυπνος μετρητής τους βοήθησε να προγραμματίσουν καλύτερα την κατανάλωσή τους σύμφωνα με τον προϋπολογισμό τους.

SSE:

Η έρευνα νωρίς στη διάρκεια του προγράμματος έδειξε ότι οι καταναλωτές δε θυμούνταν τα πρόσθετα, αναλυτικά δεδομένα της χρέωσής τους.

Μόνο το 9% των καταναλωτών που διέθεταν μετρητή έκανε χρήση και της ιστοσελίδας.

Νωρίς κατά τη διάρκεια του προγράμματος διαπιστώθηκε ότι είχαν εγκαταστήσει τις συσκευές απεικόνισης το 53% των καταναλωτών. Αυτοί που εγκατέστησαν τη συσκευή, εκτίμησαν την πληροφόρηση για το κόστος πιο χρήσιμη από την πληροφόρηση για την ενέργεια.

Το 40% των καταναλωτών, με επίγνωση του κινήτρου για μετάθεση της ζήτησης, δήλωσαν ότι μετατόπισαν τη ζήτηση και εξοικονόμησαν χρήματα, το 33% ότι μετατόπισε τη ζήτηση αλλά δεν εξοικονόμησε χρήματα και το 28% ότι δεν μετατόπισε τη ζήτηση.

Οι καταναλωτές χωρίς κίνητρο να μετατοπίσουν τη ζήτηση δήλωσαν ότι το νυκτερινό τιμολόγιο έπρεπε να είναι 19- 32% φθηνότερο για να προβούν σε μετατόπιση της ζήτησης.

Διαφοροποιήσεις μεταξύ των καταναλωτών

Στη δοκιμή της EDF, η μετατόπιση του φορτίου ήταν μεγαλύτερη για τα μικρά νοικοκυριά. Τα νοικοκυριά με πρόσθετα μέλη ηλικίας κάτω των 16 ετών και με θέρμανση πετρελαίου/παραφίνης σε σχέση με αυτά που είχαν θέρμανση με ηλεκτρισμό/αέριο εμφάνισαν μεγαλύτερη κατανάλωση σε περιόδους αιχμής.

1.5.3.3 Pacific Gas and Electric Company's Time-Based Pricing Tariffs (2008-2010)

Γενικά στοιχεία

Το πρόγραμμα έλαβε χώρα στην πολιτεία της California των Η.Π.Α.. Ορισμένα από τα αποτελέσματα αφορούν την περίοδο 2009- 2010 κι άλλα την περίοδο 2008- 2010. Συμμετείχαν, εθελοντικά, 25.500 καταναλωτές στο σύστημα SmartRate. Το μέσο εισόδημα των συμμετεχόντων ήταν \$62.921, ο μέσος όρος ηλικίας τα 33 έτη, ο μέσος όρος των μελών κάθε νοικοκυριού 3,41 και το 15,4% είχαν λάβει ανώτατη εκπαίδευση.

Κατηγορίες απόκρισης ζήτησης

Χρησιμοποιήθηκαν τριών ειδών ταρίφες:

- i. Η SmartRate, με υψηλή τιμή αιχμής από τις 14:00 έως τις 19:00 σε ημέρες έκτακτων γεγονότων αλλά χαμηλότερες τιμές τις υπόλοιπες ημέρες του καλοκαιριού.
- ii. Τιμή E-7, με περίοδο αιχμής από τις 12:00 έως τις 18:00 και πέντε διαφορετικά επίπεδα κατανάλωσης.
- iii. Τιμή E-6, με τρεις διαφορετικές περιόδους, περίοδο αιχμής τις 13:00 έως τις 19:00 το καλοκαίρι και μια μερική αιχμή από τις 17:00 έως τις 20:00 το χειμώνα και πέντε διαφορετικά επίπεδα κατανάλωσης.

Το έτος 2010, το 20% περίπου των καταναλωτών υπό το καθεστώς της SmartRate διέθεταν τεχνολογικές διευκολύνσεις. Η SmartRate αντικαθιστούσε την αρχική τιμολόγηση των καταναλωτών.

Κίνητρα

Οι καταναλωτές που υπάχθηκαν στην SmartRate ήταν προστατευμένοι τον πρώτο χρόνο της εφαρμογής του προγράμματος, ούτως ώστε ο λογαριασμός τους να μην καταλήξει αυξημένος σε σχέση με την προηγούμενη τιμολόγηση. Το 88% των καταναλωτών υπό την SmartRate είχαν μειωμένους λογαριασμούς σε σχέση με τη προηγούμενη τιμολόγηση. Ο μέσος όρος της εξοικονόμησης για τους καταναλωτές της τιμολόγησης TOU ήταν 18%.

Διευκολύνσεις για τους καταναλωτές

Ορισμένοι καταναλωτές διέθεταν βοηθητικό εξοπλισμό εγκατεστημένο στο σύστημα κλιματισμού τους.

Αλλαγές στην κατανάλωση

SmartRate:

Ο μέσος όρος της μείωσης του φορτίου, κατά την αιχμή, για τις 13 ημέρες γεγονότων εντός του 2010, δηλαδή για τις μέρες που τέθηκε σε ισχύ η υψηλή τιμή αιχμής, ήταν 14,1% ενώ το 2009 ήταν 15%. Η μέση μείωση κατά τη διάρκεια μιας ημέρας γεγονότος κυμαινόταν μεταξύ 5,7% και 22,8%.

Το 36% των καταναλωτών δε μείωσε την αιχμή της ζήτησης σε ημέρες γεγονότων, ωστόσο 1 στους 4, δεν είχε πρότερη γνώση για το ότι επρόκειτο για ημέρα με γεγονός.

ΤΟΥ:

Η μέση μείωση του φορτίου αιχμής για την περίοδο 2009- 2010 ήταν 11%.

Εμπόδια

Ο αντίκτυπος στο φορτίο κατά τις ημέρες γεγονότων ήταν 65% μεγαλύτερος για νοικοκυριά που είχαν πιθανότητα μεγαλύτερη του 75% να διαθέτουν κλιματισμό.

Σπουδαιότητα ύπαρξης αυτοματισμού

Σημειώθηκε 23% περισσότερη μείωση της αιχμής ζήτησης, κατά τη διάρκεια γεγονότων, σε καταναλωτές υπό την SmartRate που διέθεταν βοηθητικό εξοπλισμό για το κλιματιστικό τους, σε σχέση με αυτούς χωρίς βοηθητικό εξοπλισμό.

Διαφοροποιήσεις μεταξύ των καταναλωτών

Η μέση μείωση της αιχμής ζήτησης για καταναλωτές με χαμηλό εισόδημα (για τους οποίους υπάρχει, γενικότερα, πρόνοια για έκπτωση στο λογαριασμό του ηλεκτρισμού) κυμάνθηκε στο 6,6%, ενώ για καταναλωτές με υψηλότερο εισόδημα στο 21,4%. Εντούτοις, αν ληφθούν υπόψη χαρακτηριστικά όπως η κατοχή κλιματιστικού τότε η μέση μείωση δε παρουσιάζει διαφορές.

Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά το σχεδιασμό της ταρίφας ο τρόπος εφαρμογής της έκπτωσης διέφερε ανάλογα με το εισόδημα των συμμετεχόντων, συνεπώς τα οικονομικά κίνητρα ήταν διαφορετικά για τις δύο διαφορετικές αυτές κατηγορίες καταναλωτών.

Σταθερότητα των αποτελεσμάτων

Στα τρία χρόνια εφαρμογής του προγράμματος αυτού, οι μειώσεις στην αιχμή της ζήτησης δεν υποχώρησαν. Επομένως, τα αποτελέσματα του προγράμματος εμφανίζουν συνέπεια.

1.6 Μοντελοποίηση συσκευών ψύξης και του ελέγχου τους

Ακολουθεί μια σύντομη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που μελετήθηκε και στην οποία βασίζονται οι υπολογισμοί και η μοντελοποίηση των συσκευών ψύξης, που αναφέρονται με λεπτομέρειες στο Κεφ. 4. Το αναφερθέν κεφάλαιο πραγματεύεται την επίδραση της εφαρμογής ελέγχου σε θερμοστατικά φορτία και ιδιαίτερα σε ψυγεία, στο πλαίσιο εφαρμογής τεχνικών διαχείρισης της ζήτησης του Σ.Η.Ε. Κρήτης.

Στο άρθρο των Christakou et al. προτείνεται ένας μηχανισμός διαχείρισης της ζήτησης, (ονομαζόμενος Grid Explicit Congestion Notification - GECN) με σκοπό τη χρήση του από τους διαχειριστές ενός ηλεκτρικού δικτύου, για την προσφορά επικουρικών υπηρεσιών, εφαρμόζοντας έλεγχο σε οικιακές ηλεκτρικές συσκευές. Το παραπάνω σχέδιο ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περικοπή της αιχμής του συστήματος και γενικότερα για την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης στο δίκτυο. Επιπλέον, μπορεί να συνεισφέρει στον έλεγχο της αέργου ισχύος που απαιτεί ένα δίκτυο διανομής σε περίπτωση απροσδόκητων, αρνητικών για τη λειτουργία του δικτύου, γεγονότων. Θεωρείται ότι κάθε συσκευή διαθέτει προγραμματιζόμενη συσκευή ελέγχου (controller) της ισχύος που καταναλώνει, βάσει της εσωτερικής κατάστασης της συσκευής και του σήματος ελέγχου που

αποστέλλεται από τον διαχειριστή του δικτύου. Στην περίπτωση που ο μηχανισμός ελέγχου GECN αποστέλλει μη μηδενικό σήμα, η συσκευή ελέγχου μπορεί να ορίσει διαφορετική κατάσταση λειτουργίας από αυτήν που επιτάσσει ο κύκλος λειτουργίας της συσκευής. Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα των δοκιμών του μηχανισμού GECN καταδεικνύουν ότι αυτός ο μηχανισμός ελέγχου μπορεί να περιορίσει τις διακυμάνσεις της τάσης σε ένα μικρό ποσοστό επί τοις εκατό της ονομαστικής τάσης του δικτύου και συνεπώς, να περιορίσει την χρήση συστημάτων ελέγχου όπως τα ΣΑΤΥΦ (6).

Στο άρθρο των Constantopoulos et al. παρουσιάζεται η αντίληψη ότι είναι δυνατή η κοινοποίηση της τρέχουσας τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας, στους καταναλωτές, μέσω τηλεπικοινωνιακών και υπολογιστικών συστημάτων, οπότε οι καταναλωτές με τη σειρά τους μπορούν, μέσω υπολογιστικών συστημάτων, να ελέγξουν τη χρήση των συσκευών εντός του χώρου τους, με στόχο την ισορροπία μεταξύ της κάλυψης των αναγκών τους και ελαχιστοποίησης του κόστους λειτουργίας του ηλεκτρικού εξοπλισμού. Έτσι, θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί παράλληλα το πρόβλημα της αποδοτικής χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε καταστάσεις μειωμένης ικανότητας παραγωγής από τις μονάδες παραγωγής. Η προσέγγιση του άρθρου, βασίζεται σε ένα μοντέλο για τον έλεγχο του φορτίου από κάθε καταναλωτή ξεχωριστά, με σκοπό τον προγραμματισμό της κατανάλωσης ώστε να υπάρχει ο καλύτερος δυνατός συμβιβασμός μεταξύ του συνολικού κόστους και του επιπέδου της εξυπηρέτησης του καταναλωτή. Η συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώνεται στην εφαρμογή ελέγχου σε συσκευές κλιματισμού. Το μοντέλο περιλαμβάνει, επίσης, τα τρία στοιχεία ενός συστήματος κλιματισμού (οι χρήστες, ο εξοπλισμός και το κτήριο). Το σχέδιο για την άμεση εφαρμογή ελέγχου σε συστήματα κλιματισμού που αναπτύχθηκε (ESTIA), καθιστά δυνατή την ικανοποιητική εξοικονόμηση χρημάτων με μικρές αποκλίσεις από την επιθυμητή (για τον καταναλωτή) θερμοκρασία του χώρου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, μάλιστα, υποδεικνύουν ότι το σχέδιο ελέγχου αποδίδει καλύτερα κατά τους θερινούς μήνες του έτους (7).

Στο άρθρο των Stadler et al. τονίζεται ότι η αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, των οποίων η παραγωγή χαρακτηρίζεται από τυχαιότητα, θέτει εμπόδια στην προσπάθεια για εξισορρόπηση μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα όπως το να τίθενται περιορισμοί στην λειτουργία των Α.Π.Ε ή μια ακριβή επέκταση του δικτύου, μπορούν να εφαρμοσθούν τεχνικές διαχείρισης της ζήτησης ώστε να επιτευχθεί μετατόπιση ενός ποσοστού της ζήτησης από τις ώρες αιχμής σε ώρες εκτός αιχμής (load shifting). Για τον σκοπό αυτό μπορεί να εφαρμοσθεί έλεγχος σε οικιακές συσκευές. Το συγκεκριμένο άρθρο εστιάζει στις συσκευές ψύξης (ψυγεία). Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού τέτοιων συσκευών και της χαμηλής κατανάλωσής τους έχει νόημα η θεώρησή τους ως ένα σύνολο το οποίο μπορεί να ελεγχθεί κι όχι η προσπάθεια εφαρμογής ελέγχου σε κάθε συσκευή, ξεχωριστά. Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας, ακολουθείται το μοντέλο που προτείνεται στο άρθρο των Constantopoulos et al. Στις προσομοιώσεις που έγιναν, θεωρήθηκαν 5.000 ψυγεία με ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά (μέγεθος, θερμική αγωγιμότητα, ονομαστική ισχύς, συντελεστής απόδοσης) αλλά διαφορετικά περιεχόμενα και κατά συνέπεια διαφορετική θερμική μάζα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι αυξάνοντας την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια, αυξάνεται το ηλεκτρικό φορτίο και αντίστροφα, μειώνοντας την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια, μειώνεται το φορτίο. Η μετατόπιση του φορτίου επιτυγχάνεται συγχρονίζοντας την λειτουργία του θαλάμου ψύξης ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη ή η ελάχιστη εσωτερική θερμοκρασία για το σύνολο των συσκευών. Συμπερασματικά, προκύπτει

ένα μικρό χρονικό διάστημα (από 30 έως 60 λεπτά) στο οποίο επιτυγχάνεται μετατόπιση του φορτίου. Επομένως, η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια πολλών ψυγείων είναι κατάλληλη για μια μικρής διάρκειας εξισορρόπηση μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης. Το σημαντικότερο πρόβλημα σε αυτή την προσέγγιση του ελέγχου των ψυγείων είναι ότι δε μπορεί να μελετηθεί η ζήτησή τους ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες συσκευές που λειτουργούν στα πλαίσια ενός Σ.Η.Ε. (8).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΙΧΜΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού το οποίο περιγράφει τη διαδικασία υπολογισμού μίας τροποποιημένης καμπύλη φορτίου, με κυριότερη διαφορά την αιχμή που παρουσιάζει, δεδομένης της καμπύλης φορτίου που έχει υπολογιστεί βάσει των πραγματικών δεδομένων ζήτησης του Σ.Η.Ε Κρήτης για το έτος 2013. Η τροποποιημένη καμπύλη φορτίου αναπαριστά την τροποποίηση του ημερήσιου φορτίου του συστήματος, χάρη στην εφαρμογή τεχνικών διαχείρισης της ζήτησης και με τις οποίες μπορεί να επιτευχθεί μείωση της αιχμής της ζήτησης.

Τη νέα καμπύλη φορτίου που θα προκύψει θα τη χρησιμοποιήσουμε, ώστε με τη βοήθεια αλγορίθμου συγκεκριμένου λογισμικού (9) να επιλυθεί το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια μπορούμε να υπολογίσουμε το κόστος της παραγωγής ενέργειας για το σύστημα και να συγκρίνουμε τις δύο περιπτώσεις, υπολογίζοντας το οικονομικό όφελος που μπορεί να προσφέρει η διαχείριση της ζήτησης

Τη νέα καμπύλη φορτίου που θα προκύψει θα τη χρησιμοποιήσουμε, ώστε με τη βοήθεια αλγορίθμου συγκεκριμένου λογισμικού (9) να επιλυθεί το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια μπορούμε να υπολογίσουμε το κόστος της παραγωγής ενέργειας για το σύστημα και να συγκρίνουμε τις δύο περιπτώσεις, υπολογίζοντας το οικονομικό όφελος που μπορεί να προσφέρει η διαχείριση της ζήτησης.

2.2 Τροποποίηση της καμπύλης φορτίου

Έχοντας ως δεδομένο την καμπύλη φορτίου του αυτόνομου συστήματος της Κρήτης για το έτος 2013, θα επιχειρήσουμε αρχικά να την τροποποιήσουμε ώστε να μειωθεί η αιχμή της ζήτησης για κάθε ημέρα και να προκύψει μια νέα καμπύλη ζήτησης που θα αντανάκλα την εφαρμογή μεθόδων διαχείρισης της ζήτησης. Συγκεκριμένα, δεν εστιάζουμε στην ίδια τη μέθοδο διαχείρισης του φορτίου, αλλά στις αλλαγές που επιφέρει η εφαρμογή της στη συνολική καμπύλη ζήτησης του συστήματος. Γίνεται η θεώρηση ότι με την εφαρμογή τεχνικών διαχείρισης φορτίου επιτυγχάνεται εξομάλυνση της καμπύλης φορτίου του συστήματος, καθώς μέρος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας μετατοπίζεται από τις ώρες αιχμής (περικοπή αιχμής) στις ώρες εκτός αιχμής (γέμισμα κοιλάδων). Ως εκ τούτου, η συνολική ημερήσια ενέργεια παραμένει σταθερή. Ωστόσο, η αλλαγή στη μορφή της καμπύλης οδηγεί σε διαφορετική ένταξη των διαθέσιμων μονάδων παραγωγής. Ιδιαίτερως κρίσιμη είναι η μείωση της ημερήσιας αιχμής, η οποία οδηγεί σε μειωμένο πλήθος ωρών λειτουργίας των πιο ακριβών μονάδων και άρα σε μείωση του λειτουργικού κόστους του συστήματος.

2.3 Υπολογισμός τροποποιημένης καμπύλης

Για τον υπολογισμό της νέας καμπύλης ζήτησης μετά την εφαρμογή τεχνικών διαχείρισης ζήτησης θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό MATLAB (The MathWorks Inc.) και τα δεδομένα της καμπύλης φορτίου της Κρήτης για το 2013.

2.3.1 Περιγραφή του προβλήματος

Ας ορίσουμε $P(t)$, $t = 1, 2, \dots, 24$ τη χρονοσειρά που αντιστοιχεί στην αρχική καμπύλη φορτίου (χωρίς εφαρμογή τεχνικών διαχείρισης ζήτησης) κάθε ημέρας για το 2013, όπου t η εκάστοτε ώρα της ημέρας και $P(t)$ το φορτίο σε MW. Ας ορίσουμε $P'(t)$ τη χρονοσειρά που αντιστοιχεί στην τροποποιημένη καμπύλη φορτίου όταν έχει επιτευχθεί μείωση της αιχμής κατά $p\%$ σε σχέση με την αρχική καμπύλη κάθε ημέρα.

Στη προκειμένη περίπτωση, επιθυμούμε να ελαχιστοποιήσουμε την ευκλείδεια απόσταση της νέας καμπύλης $P'(t)$ από την αρχική $P(t)$, ώστε να υπάρχει η μικρότερη δυνατή απόκλιση της τροποποιημένης καμπύλης φορτίου από την αρχική.

Παράλληλα, πρέπει να τηρούνται οι εξής περιορισμοί:

- Το μέγιστο της νέας καμπύλης δεν πρέπει να ξεπερνά το $(1-p\%)$ του μεγίστου της αρχικής καμπύλης.
- Η ενέργεια που καταναλώνεται ανά ημέρα πρέπει να ταυτίζεται μεταξύ των δύο καμπυλών.

Δηλαδή αφενός δεν επιθυμούμε μεγαλύτερη ωριαία κατανάλωση ενέργειας, προφανώς, αφού εφαρμόζουμε τεχνική διαχείρισης της ζήτησης για την μετατόπιση του φορτίου, αφετέρου δεν επιθυμούμε μικρότερη συνολική κατανάλωση σε ημερήσια βάση που θα έχει αρνητικές επιπτώσεις σε ό,τι αφορά τους καταναλωτές και τις καθημερινές συνήθειές τους, προκαλώντας τους την ανάλογη δυσφορία.

2.3.2 Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος

Επομένως, το πρόβλημα που θέλουμε να επιλύσουμε διατυπώνεται ως εξής:

Ζητούμε το $P'(t)$ ώστε

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^{24} (P'(t) - P(t))^2 \right\} \quad (2.1)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$P'(t) \leq (1 - p\%) \cdot \max\{P(t)\} \quad (2.2)$$

$$E'_{day} = E_{day} \Rightarrow \sum_{t=1}^{24} P'(t) = \sum_{t=1}^{24} P(t) \quad (2.3)$$

2.3.3 Επίλυση του προβλήματος

Με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB θα επιλύσουμε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης τετραγωνικού προγραμματισμού. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

Έστω ότι το x ανήκει στο \mathbb{R}^n . Τα x και c είναι διανύσματα-στήλες με n στοιχεία και ο Q ένας συμμετρικός πίνακας $n \times n$. Γίνεται βελτιστοποίηση (ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση) της τετραγωνικής συνάρτησης:

$$f(x) = \frac{1}{2} x^T H x + c^T x \quad (2.4)$$

υπό τους ανισοτικούς και ισοτικούς περιορισμούς:

$$Ax \leq b \quad (2.5)$$

$$A_{eq}x = b_{eq} \quad (2.6)$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (2.7)$$

Ισοδύναμα μπορούμε να γράψουμε:

$$\begin{aligned} \min \left\{ \sum_{t=1}^{24} (P'(t) - P(t))^2 \right\} &= \min \left\{ \sum_{t=1}^{24} (x(t) - P(t))^2 \right\} \\ &= \min \left\{ \sum_{t=1}^{24} (x(t)^2 - 2x(t)p(t) + p(t)^2) \right\} \end{aligned} \quad (2.8)$$

ώστε να φέρουμε το πρόβλημα (2.1)-(2.3) στη μορφή (2.4)-(2.7), όπως χρησιμοποιείται στο λογισμικό MATLAB.

Αγνοώντας τον δευτεροβάθμιο όρο $p(t)^2$, ο οποίος είναι σταθερός και άρα δεν επηρεάζει τη βελτιστοποίηση έχουμε:

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^{24} (x(t)^2 - 2x(t)p(t)) \\ &= x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_{24}^2 - 2 \cdot (x_1 \cdot p_1 + x_2 \cdot p_2 + \dots + x_{24} \cdot p_{24}) \\ &= \frac{1}{2} \cdot (2x_1^2 + 2x_2^2 + \dots + 2x_{24}^2) - 2 \cdot (x_1 \cdot p_1 + \dots + x_{24} \cdot p_{24}) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Εφόσον η μήτρα H αντιστοιχεί στους δευτεροβάθμιους όρους και η μήτρα f στους πρωτοβάθμιους έχουμε ότι:

$$H = \begin{bmatrix} 2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

όπου ο H είναι πίνακας 24×24 με μη μηδενικά στοιχεία αυτά της κύριας διαγωνίου, τα οποία θα έχουν την τιμή 2 και:

$$f^T = [-2p_1 \quad \dots \quad -2p_{24}] = -2 \cdot [P(t)]^T \quad (2.11)$$

$$\text{με } P(t) = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_{24} \end{bmatrix}.$$

Όσον αφορά στους περιορισμούς, ο περιορισμός (2.2) μπορεί να μεταγραφεί στη μορφή (2.7) όπου:

$$lb = \begin{bmatrix} lb_1 \\ \vdots \\ lb_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$ub = \begin{bmatrix} ub_1 \\ \vdots \\ ub_{24} \end{bmatrix} = (1 - p\%) \cdot \begin{bmatrix} \max\{P(t)\} \\ \vdots \\ \max\{P(t)\} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

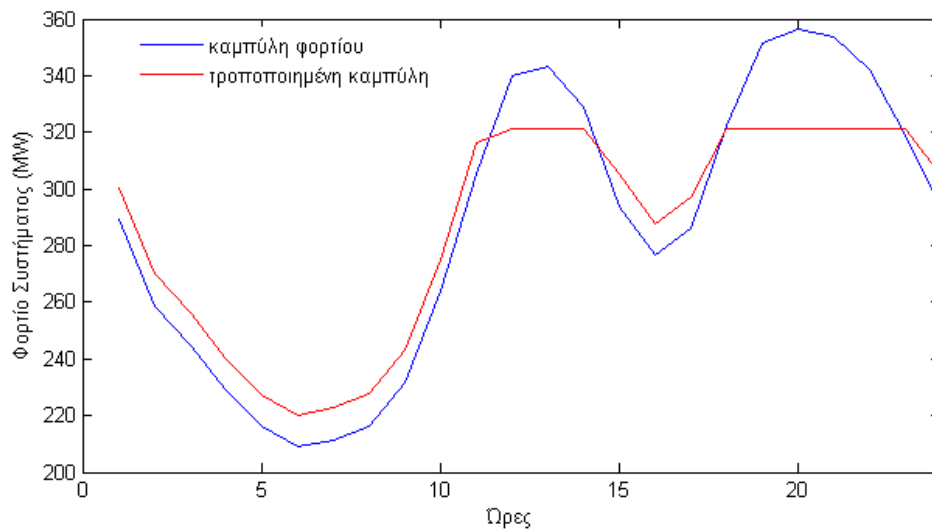
Ο περιορισμός (2.3) μπορεί να μεταγραφεί στη μορφή (2.6), όπου:

$$A_{eq} = [1 \quad \dots \quad 1] \quad (2.14)$$

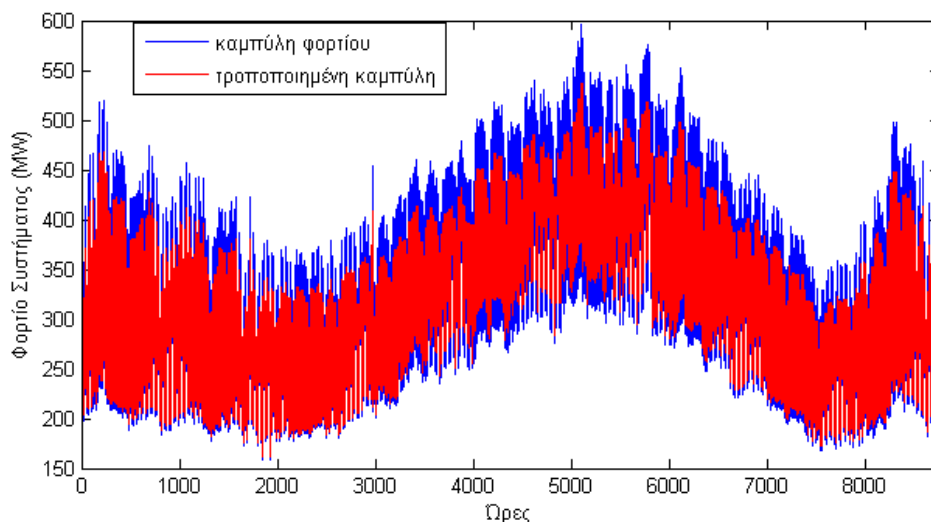
$$b_{eq} = \sum_{t=1}^{24} P(t) \quad (2.15)$$

2.3.4 Αποτελέσματα

Επιλύοντας με τις παραπάνω παραμέτρους το πρόβλημα του τετραγωνικού προγραμματισμού για μία ημέρα προκύπτει η αντίστοιχη τροποποιημένη καμπύλη φορτίου. Στο Σχήμα 2-1 παρουσιάζεται η αρχική και η τροποποιημένη 24ωρη καμπύλη φορτίου του συστήματος. Γενικεύοντας τα παραπάνω για όλες τις ημέρες του έτους 2013, κατά την επίλυση με τη βοήθεια του MATLAB, μπορούμε να απεικονίσουμε μαζί τις δύο καμπύλες φορτίου, αρχική και τροποποιημένη για όλες τις ώρες του έτους (Σχήμα 2-2).



Σχήμα 2-1 – Τροποποίηση της καμπύλης φορτίου με μείωση της αιχμής κατά 10% για την πρώτη ημέρα του 2013.

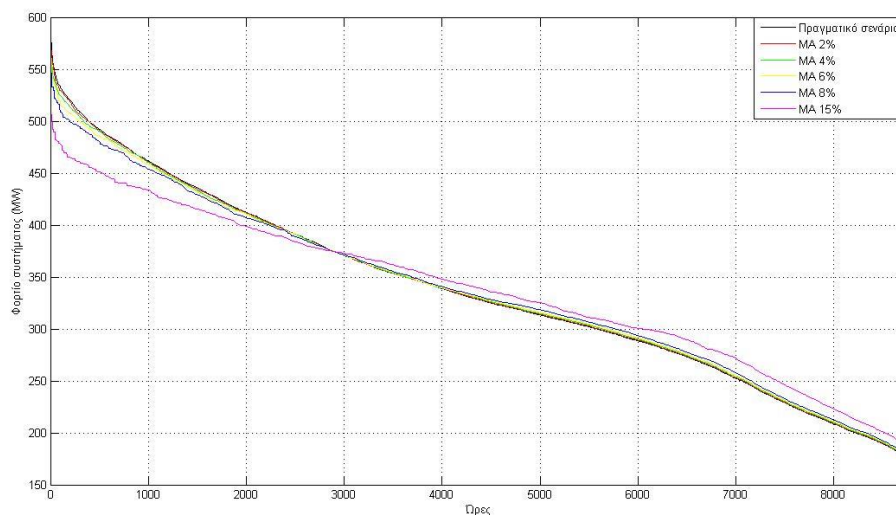


Σχήμα 2-2 – Αρχική και τροποποιημένη καμπύλη φορτίου με μείωση της αιχμής κατά 10% για όλες τις ώρες του 2013

Αλλάζοντας το ποσοστό της επιθυμητής ημερήσιας μείωσης της αιχμής προκύπτουν διαφορετικές καμπύλες φορτίου του συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ θεωρούμε ίδιο ποσοστό μείωσης της αιχμής για όλες τις ημέρες του έτους, ο τρόπος που ορίζεται η παράμετρος αυτή στον κώδικα του MATLAB, μας επιτρέπει να διαφοροποιήσουμε το ποσοστό για διαφορετικές ημέρες, για παράδειγμα, ανάλογα με την εποχή του έτους.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται σενάρια μείωσης της αιχμής κατά 2%, 4%, 6% και 8%. Επιλύοντας το πρόβλημα βάσει αυτών των ποσοστών μείωσης μπορούμε να απεικονίσουμε σε κοινό γράφημα την καμπύλη διάρκειας φορτίου για το βασικό σενάριο (πραγματικό φορτίο του έτους 2013) και των σεναρίων που αναφέρθηκαν. Επίσης, στο γράφημα παρουσιάζεται και ένα σενάριο με ποσοστό μείωσης της αιχμής που ανέρχεται στο 15%. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν εξετάστηκε η υλοποίηση του σεναρίου αυτού, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Για την υλοποίηση των σεναρίων μείωσης της αιχμής, βασιστήκαμε στην εφαρμογή άμεσου ελέγχου σε θερμοστατικά φορτία. Ωστόσο, για να υλοποιηθεί ένα ακραίο σενάριο, όπως αυτό της μείωσης της αιχμής κατά 15%, πιθανότατα απαιτείται ο έλεγχος και άλλων ηλεκτρικών συσκευών. Εν κατακλείδι, συμπεριλαμβάνεται και το ακραίο αυτό σενάριο για λόγους ευκρινέστερης παρουσίασης της διαφοράς στην καμπύλη διάρκειας φορτίου, μεταξύ του βασικού σεναρίου και ενός σεναρίου με μείωση αιχμής, αλλά και επειδή μπορεί να αποτελέσει πεδίο μελλοντικής διερεύνησης η υλοποίηση ενός τέτοιου σεναρίου.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από την κοινή απεικόνιση των καμπυλών διάρκειας φορτίου (Σχήμα 2-3), για τα διάφορα σενάρια, είναι ότι καθώς αυξάνεται το ποσοστό μείωσης της αιχμής, παρατηρείται μείωση του φορτίου αιχμής και της διάρκειάς του. Παράλληλα, παρατηρείται αύξηση του ελάχιστου φορτίου και της διάρκειάς του.



Σχήμα 2-3 – Καμπύλη διάρκειας φορτίου για το βασικό σενάριο και τα σενάρια μείωσης αιχμής

Πίνακας 2-1 – Συνολικό ετήσιο φορτίο συστήματος, αιχμή συστήματος, μέσο φορτίο συστήματος και συντελεστής φορτίου για το Βασικό Σενάριο και για τα Σενάρια Μείωσης της Αιχμής και ποσοστιαία μεταβολή σε σχέση με το Βασικό Σενάριο.

Σενάριο	Συνολικό ετήσιο φορτίο συστήματος (TWh)		Αιχμή συστήματος (MW)		Μέσο φορτίο συστήματος (MW)		Συντελεστής φορτίου	
Βασικό	2,955		595,9885		337,329		0,5660	
MA - 2%	2,955	0%	584,0687	-2%	337,329	0%	0,5776	2,0%
MA - 4%	2,955	0%	572,1489	-4%	337,329	0%	0,5896	4,2%
MA - 6%	2,955	0%	560,2292	-6%	337,329	0%	0,6021	6,4%
MA - 8%	2,955	0%	548,3094	-8%	337,329	0%	0,6152	8,7%

Η μείωση της αιχμής συστήματος (Πίνακας 2-1) αναμενόταν αφού όπως είδαμε στο παρόν κεφάλαιο, περικόπτουμε την αιχμή του συστήματος, μετατοπίζοντας φορτίο από τις ώρες αιχμής σε ώρες εκτός αιχμής. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση του συντελεστή φορτίου συστήματος (υπολογίζεται ως ο λόγος του μέσου φορτίου προς την αιχμή του συστήματος).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΧΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

3.1 Εισαγωγή

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να προσδιοριστεί η επίδραση που έχει η εφαρμογή τεχνικών διαχείρισης της ζήτησης, με σκοπό τη μείωση της αιχμής του φορτίου, στο κόστος των θερμικών μονάδων του συστήματος της Κρήτης.

Έχοντας υπολογίσει την τροποποιημένη καμπύλη φορτίου με τον τρόπο που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, μπορούμε να προχωρήσουμε στην κατανομή, με τη βοήθεια λογισμικού, του φορτίου στις θερμικές μονάδες παραγωγής του Σ.Η.Ε Κρήτης και στη συνέχεια, μέσω του λογισμικού MATLAB, να υπολογίσουμε το συνολικό κόστος του συστήματος. Οι υπολογισμοί αυτοί, θα γίνουν για τη βασική περίπτωση του πραγματικού φορτίου του έτους 2013 και για 4 σενάρια μείωσης της αιχμής (Ποσοστό μείωσης 2%, 4%, 6%, 8%).

3.2 Θερμικές μονάδες του Σ.Η.Ε Κρήτης

Απομονωμένο Σ.Η.Ε καλείται το σύστημα που δε συνδέεται με το ηπειρωτικό δίκτυο κι εντοπίζεται σε νησιωτικές ή αλλιώς γεωγραφικά απομακρυσμένες περιοχές. Το μεγαλύτερο απομονωμένο Σ.Η.Ε της χώρας είναι το σύστημα της Κρήτης. Ένα αυτόνομο σύστημα, όπως αυτό της Κρήτης, χρησιμοποιεί μονάδες με συμβατικό καύσιμο (πετρέλαιο), παρά το κόστος του, χάρη στην ευκολία μεταφοράς του και την αξιοπιστία του ως καυσίμου.

Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην Κρήτη προέρχεται κυρίως από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς (Θ.Η.Σ) της Δ.Ε.Η και σε μικρότερο βαθμό από αιολικά πάρκα και μονάδες φωτοβολταϊκών της Δ.Ε.Η κι από μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε) ιδιωτών.

Οι θερμοηλεκτρικές μονάδες είναι κατανεμημένες σε μεγάλο μέρος της έκτασης του νησιού και πιο συγκεκριμένα η εγκατεστημένη ισχύς κατανέμεται στα Χανιά, στα Λινοπεράματα Ηρακλείου και τον Αθρινόλακκο Λασιθίου. Για την κάλυψη της ζήτησης του νησιού διατίθενται τρεις ατμοηλεκτρικοί σταθμοί, των οποίων η λειτουργία πρέπει να καλύπτει τις ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια σε περιοχές με διαφορετική πληθυσμιακή πυκνότητα και να ανταποκρίνεται επαρκώς σε εποχές του έτους με αυξημένες απαιτήσεις όπως τους θερινούς μήνες.

Οι θερμικές μονάδες του Σ.Η.Ε περιλαμβάνουν ατμοστροβλικές μονάδες, αεριοστροβλικές μονάδες, μηχανές εσωτερικής καύσης (ντίζελ, μαζούτ) και μονάδες συνδυασμένου κύκλου. Περίπτωση μονάδας συνδυασμένου κύκλου, συναντάμε στον Α.Η.Σ Χανίων. Η μονάδα αυτή αποτελείται από ατμοστρόβιλο του Α.Η.Σ και δύο αεριοστρόβιλους (GAS6X, GAS7X).

Οι θερμικές μονάδες του Σ.Η.Ε διαφέρουν ως προς τον τύπο καυσίμου που χρησιμοποιούν αλλά και σε άλλους τομείς όπως η ονομαστική ισχύς, η αποδιδόμενη ισχύς, το τεχνικό ελάχιστο (ελάχιστη δυνατή παραγόμενη ισχύς), ο χρόνος έναρξης και τερματισμού

λειτουργίας της μονάδας και το απαιτούμενο χρονικό διάστημα για τη συντήρηση της μονάδας.

Στον Πίνακα 3-1 του παραρτήματος παρατίθενται τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των θερμικών μονάδων παραγωγής του Σ.Η.Ε Κρήτης.

3.3 Διαδικασία υπολογισμού του κόστους των θερμικών μονάδων του Σ.Η.Ε Κρήτης

3.3.1 Απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό του κόστους του συστήματος

Όπως είδαμε στην παράγραφο 2.3, υπολογίζουμε την τροποποιημένη καμπύλη ισχύος του συστήματος με μειωμένη αιχμή κατανάλωσης, υπολογίζουμε, δηλαδή, την κατανάλωση για κάθε ώρα του έτους. Ένα τέτοιο σενάριο ζήτησης με μειωμένη αιχμή, μας επιτρέπει να συγκρίνουμε το κόστος του συστήματος που σχετίζεται με τις θερμικές μονάδες παραγωγής μεταξύ του υποθετικού σεναρίου και τα πραγματικά δεδομένα που αφορούν τη ζήτηση του έτους 2013. Μέσω της σύγκρισης αυτής επιδιώκουμε να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με το οικονομικό όφελος που μπορεί να παρατηρηθεί με την εφαρμογή μεθόδων διαχείρισης της ζήτησης (DSM).

Τα δεδομένα που προκύπτουν από την επίλυση του προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού, χρησιμοποιούνται ως είσοδος σε πρόγραμμα μέσω του οποίου επιλύεται το πρόβλημα ένταξης των θερμικών μονάδων. Επομένως, λαμβάνουμε τις πληροφορίες της σειράς ένταξης των μονάδων και της κατανομής του φορτίου στις μονάδες παραγωγής. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται για την βασική περίπτωση, δηλαδή, για το πραγματικό φορτίο του έτους 2013 και για τέσσερα σενάρια μείωσης της αιχμής: κατά 2%, 4%, 6% και 8%. Από αυτό το σημείο και μετά μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό του κόστους του συστήματος.

3.3.2 Μέθοδος υπολογισμού του συνολικού ετήσιου κόστους του συστήματος

Ως συνολικό κόστος συστήματος θα θεωρήσουμε το άθροισμα του κόστους των θερμικών μονάδων. Το κόστος των θερμικών μονάδων περιλαμβάνει το συνολικό ετήσιο κόστος αγοράς καυσίμων που χρειάζονται για τη λειτουργία τους και το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπής CO₂. Το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπής CO₂ αποτελεί το πρόστιμο που πρέπει να καταβληθεί βάσει των ποσοτήτων των εκπομπών CO₂ που εκλύονται στην ατμόσφαιρα.

3.3.2.1 Κόστος αγοράς καυσίμου (9)

Το συνολικό κόστος αγοράς καυσίμου για τη λειτουργία των μονάδων μπορεί να υπολογιστεί με τον ακόλουθο τρόπο. Έχοντας τα δεδομένα για την κατανομή του φορτίου στις μονάδες

γνωρίζουμε για κάθε ώρα και κάθε μονάδα το επίπεδο λειτουργίας. Οπότε, μπορούμε να υπολογίσουμε την κατανάλωση καυσίμου κάθε μονάδας για τη συγκεκριμένη ώρα ως εξής:

Υπολογίζουμε την κατανάλωση καυσίμου της μονάδας σε kg/MW ή lt/MW (ανάλογα με τον τύπο καυσίμου που χρησιμοποιείται, για μαζούτ και diesel αντίστοιχα) από τον τύπο:

$$F = A + B \cdot P + C \cdot P^2 \quad (3.1)$$

όπου:

P: το επίπεδο λειτουργίας της θερμικής μονάδας σε MW

A, B, C: συντελεστές που καθορίζουν την κατανάλωση καυσίμου (σε kg/MWh ή lt/MWh) συναρτήσει του επιπέδου παραγωγής.

Επομένως, για την ώρα h και κάθε μονάδα i, υπολογίζουμε τη συνολική κατανάλωση καυσίμου:

$$FF_{i,h} = F_i(P_{i,h}) \times P_{i,h} \quad (3.2)$$

όπου:

$FF_{i,h}$: η κατανάλωση καυσίμου της μονάδας i, σε kg ή lt, την ώρα h

F_i : η τριωνυμική καμπύλη κατανάλωσης καυσίμου της μονάδας i

$P_{i,h}$: το επίπεδο ισχύος σε MW, στο οποίο λειτουργεί η θερμική μονάδα i, την ώρα h

Ακολούθως, υπολογίζουμε το κόστος παραγωγής ενέργειας της μονάδας που σχετίζεται με την αγορά καυσίμου ($K_{i,h}$):

$$K_{i,h} = FF_{i,h} \times K_f \quad (3.3)$$

όπου:

K_f : το αντίτιμο της αγοράς καυσίμου, το οποίο είναι 618 €/tn για το μαζούτ και 1000 €/lt για diesel.

Έτσι, αν αθροίσουμε τις υπολογισθείσες τιμές για τις 8760 ώρες του έτους και για όλες τις θερμικές μονάδες, προκύπτει το κόστος συστήματος για την αγορά καυσίμου.

3.3.2.2 Κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπής CO₂

Το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπής CO₂ υπολογίζεται ως εξής:

Υπολογίζουμε τις εκπομπές CO₂ κάθε μονάδας, σε kg από τον τύπο:

$$E_{i_h} = FF_{i_h} \times CO2coefficient_i \quad (3.4)$$

Όπου,

$CO2coefficient_i$: συντελεστής που καθορίζει το βάρος των εκλυόμενων αερίων σε kg ανά kg μαζούτ ή ανά lt diesel ανά τύπο μονάδας (βλ. Πίνακα 3-2 στο Παράρτημα).

Στη συνέχεια, αθροίζουμε τις εκπομπές CO_2 που έχουν υπολογιστεί για κάθε μήνα του έτους 2013, όλων των μονάδων και πολλαπλασιάζουμε το άθροισμα των εκπομπών με την καθορισμένη τιμή αγοράς δικαιωμάτων CO_2 που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο μήνα, η οποία παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-6 του Παραρτήματος (10).

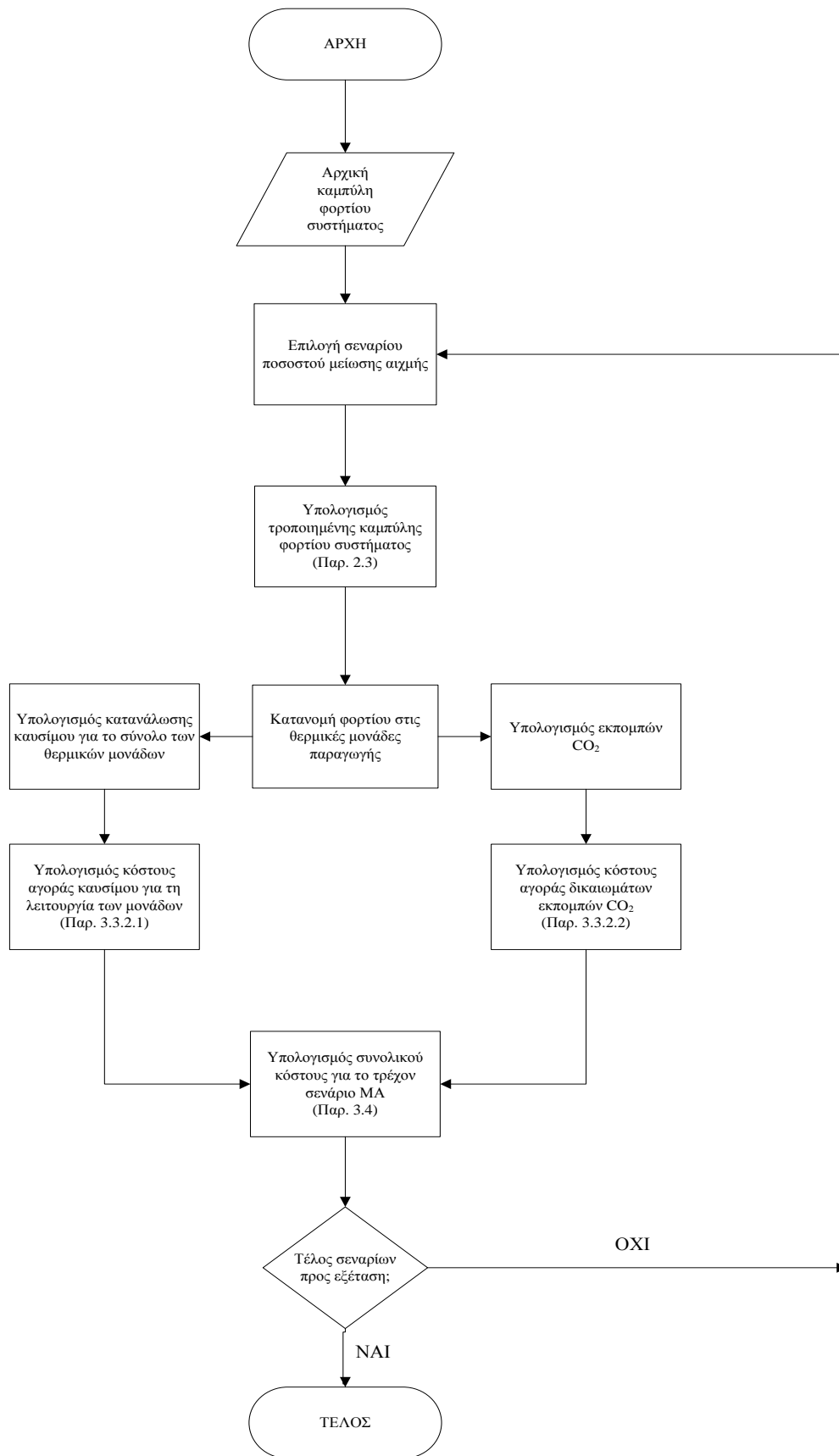
Με αυτόν τον τρόπο και χρησιμοποιώντας το λογισμικό MATLAB για να διαχειριστούμε τον μεγάλο αριθμό δεδομένων και υπολογισμών, υπολογίζουμε για το βασικό σενάριο (πραγματικά δεδομένα του 2013) και τα σενάρια με μειωμένη αιχμή της ζήτησης, το συνολικό κόστος συστήματος. Στη συνέχεια, μπορούμε να προβούμε σε συγκρίσεις μεταξύ των σεναρίων με μειωμένη αιχμή και του βασικού και να διαπιστώσουμε αν υπάρχει πράγματι μείωση του κόστους για το Σ.Η.Ε. και το επίπεδο της μείωσης αυτής, χάρη στη διαχείριση της ζήτησης.

3.4 Αποτελέσματα

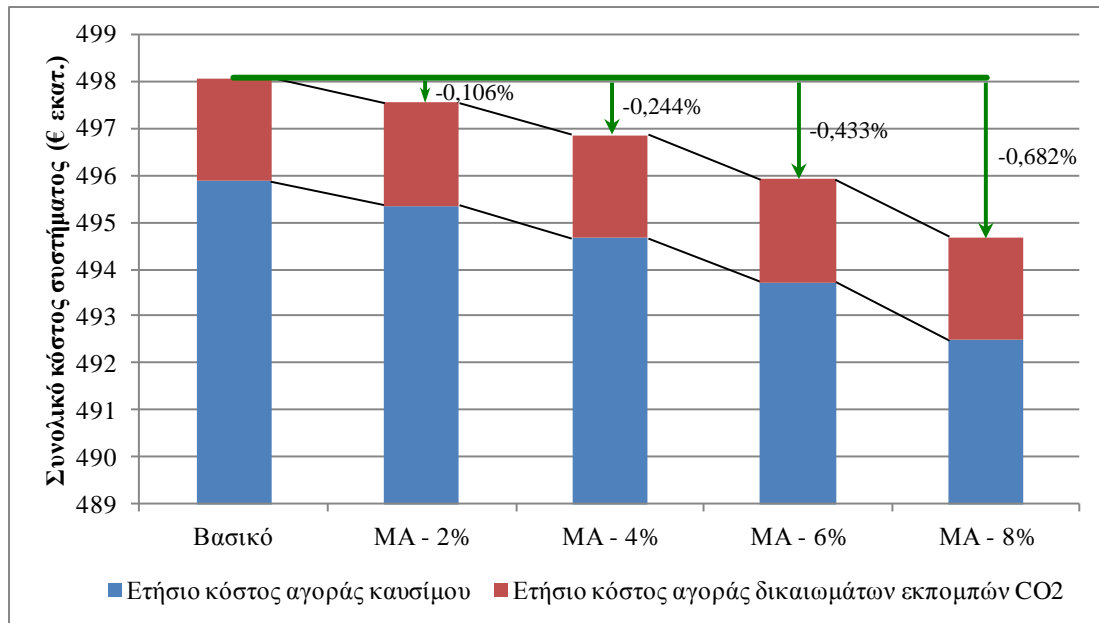
Με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB, υπολογίσαμε το ετήσιο κόστος αγοράς καυσίμου για όλες τις θερμικές μονάδες, καθώς και το κόστος αγοράς δικαιωμάτων CO_2 για όλα τα σενάρια που εξετάζονται (Βασικό και Μείωσης Αιχμής). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1.

Πίνακας 3-1 – Ετήσιο κόστος αγοράς καυσίμου, αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO_2 και συνολικό κόστος συστήματος για το Βασικό Σενάριο και για τα Σενάρια Μείωσης της Αιχμής και ποσοστιαία μεταβολή σε σχέση με το Βασικό Σενάριο.

Σενάριο	Ετήσιο κόστος αγοράς καυσίμου		Ετήσιο κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO_2		Συνολικό κόστος συστήματος	
Βασικό	495.872.065,10 €		2.201.778,13 €		498.073.843,22 €	
MA - 2%	495.345.557,23 €	-0,106%	2.199.969,11 €	-0,082%	497.545.526,33 €	-0,106%
MA - 4%	494.661.017,15 €	-0,244%	2.197.624,53 €	-0,189%	496.858.641,69 €	-0,244%
MA - 6%	493.722.120,54 €	-0,434%	2.194.385,45 €	-0,336%	495.916.505,99 €	-0,433%
MA - 8%	492.486.411,18 €	-0,683%	2.190.699,56 €	-0,503%	494.677.110,74 €	-0,682%



Σχήμα 3-1 - Διάγραμμα ροής της διαδικασίας υπολογισμού του συνολικού κόστους του συστήματος

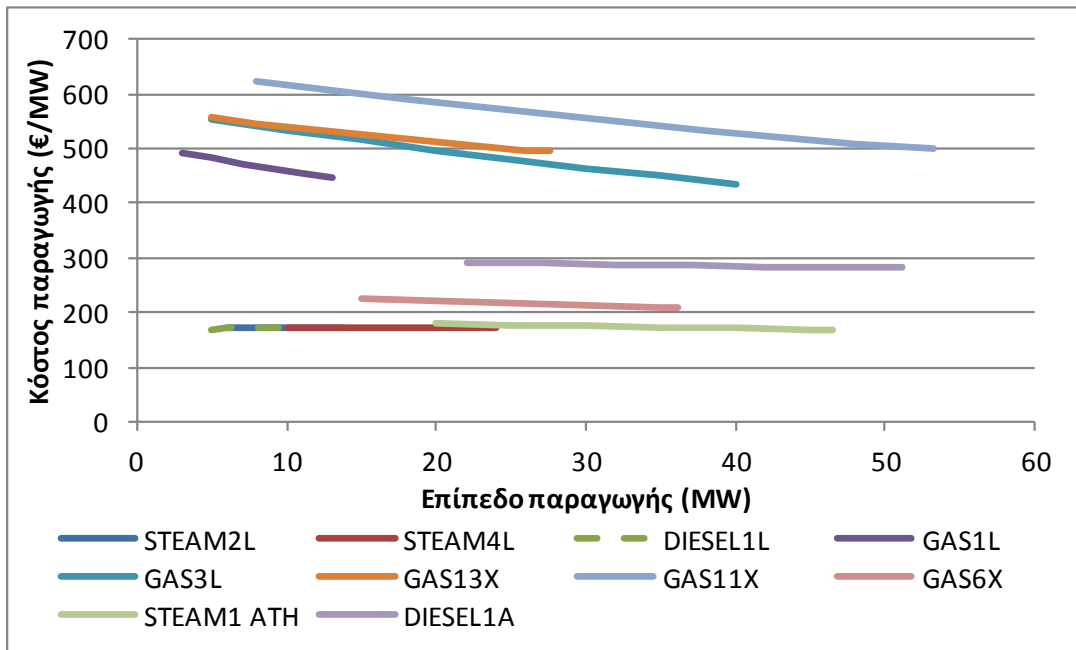


Σχήμα 3-2 – Ετήσιο κόστος αγοράς καυσίμου, αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO₂ και συνολικό κόστος συστήματος για το Βασικό Σενάριο και για τα Σενάρια Μείωσης της Αιχμής και ποσοστιαία μεταβολή σε σχέση με το Βασικό Σενάριο.

Παρατηρούμε ότι το συνολικό κόστος μειώνεται όπως αναμενόταν. Ειδικότερα, το ετήσιο κόστος αγοράς καυσίμου μειώνεται για τα σενάρια μείωσης αιχμής 2%, 4%, 6%, 8% σε σύγκριση με το βασικό σενάριο κατά 0,106%, 0,244%, 0,434% και 0,683% αντίστοιχα. Το ετήσιο κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO₂ μειώνεται κατά 0,082%, 0,189%, 0,336% και 0,503% αντίστοιχα. Τέλος, το συνολικό κόστος συστήματος μειώνεται για τα παραπάνω σενάρια κατά 0,106%, 0,244%, 0,433% και 0,682%.

Τα αποτελέσματα αυτά είναι αναμενόμενα, καθώς η μείωση της αιχμής του φορτίου του συστήματος οδηγεί κάποιες ώρες του έτους τις πιο ακριβές μονάδες παραγωγής είτε σε ολική σβέση (μειωμένος ετήσιος αριθμός ωρών λειτουργίας), είτε σε χαμηλότερο σημείο λειτουργίας (μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και, κατ' επέκταση, μειωμένο κόστος καυσίμου και αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO₂).

Μπορεί να διαπιστωθεί ποιες μονάδες παραγωγής είναι ακριβότερες κατασκευάζοντας την καμπύλη του κόστους παραγωγής συναρτήσει του επιπέδου παραγωγής κάθε μονάδας. Το κόστος παραγωγής κάθε μονάδας (€/MW) υπολογίζεται από τον πολλαπλασιασμό της κατανάλωσης καυσίμου F (kg/MW ή lt/MW) της (3.1) με τη μοναδιαία τιμή του καυσίμου (€/kg ή €/lt) και απεικονίζεται στο Σχήμα 3-3. Οι μονάδες παραγωγής που παραλείπονται έχουν παρόμοιο κόστος παραγωγής με εικονιζόμενες μονάδες. Παράλληλα με τους υπολογισμούς που περιγράφονται στην Παρ. 3.3.2 υπολογίσθηκαν και παρουσιάζονται στους πίνακες του Παραρτήματος, δεδομένα για την ετήσια ενέργεια, τις πραγματικές ώρες και τις ισοδύναμες ώρες λειτουργίας για όλες τις μονάδες παραγωγής. Επιβεβαιώνεται ότι οι ακριβότερες μονάδες λειτουργούν λιγότερες ώρες (Πίνακας 3-4) και παράγουν λιγότερη ενέργεια (Πίνακας 3-3). Οι ακριβότερες μονάδες είναι οι DIESEL4L, GAS1L, GAS2L, GAS3L, GAS4L, GAS5L, GAS1X, GAS4X, GAS5X, GAS11X, GAS12X, GAS13X.



Σχήμα 3-3 – Κόστος παραγωγής μονάδων για διάφορα επίπεδα παραγωγής

3.5 Παράρτημα

Πίνακας 3-2– Τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των θερμικών μονάδων παραγωγής του Σ.Η.Ε Κρήτης

ΑΗΣ ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΩΝ								
Όνομα μονάδας	Τύπος μονάδας	Τύπος καυσίμου	Ονομαστική ισχύς (MW)	Τεχνικό ελάχιστο (MW)	A	B	C	CO ₂
STEAM2L	Ατμοστρόβιλος	μαζούτ	13,8	6	273,6	0,32	-0,0032	0,89
STEAM3L		μαζούτ	13,8	6	273,6	0,32	-0,0032	0,89
STEAM4L		μαζούτ	24	10	273,6	0,32	-0,0032	0,89
STEAM5L		μαζούτ	24,4	10	273,6	0,32	-0,0032	0,89
STEAM6L		μαζούτ	24,4	10	273,6	0,32	-0,0032	0,89
DIESEL1L	Diesel	μαζούτ	10,6	5	273,6	0,32	-0,0032	0,89
DIESEL2L		μαζούτ	10,6	5	273,6	0,32	-0,0032	0,89
DIESEL3L		μαζούτ	10,6	5	273,6	0,32	-0,0032	0,89
DIESEL4L		μαζούτ	10,6	5	273,6	0,32	-0,0032	0,89
GAS1L	Αεριοστρόβιλος	Diesel	13	3	504	-4,44	0,0128	0,89
GAS2L		Diesel	13	3	504	-4,44	0,0128	0,89
GAS3L		Diesel	40	5	576	-4,4	0,0224	0,89
GAS4L		Diesel	13,9	3	576	-4,52	0,0208	0,89
GAS5L		Diesel	30	5	576	-4,52	0,0208	0,89
ΑΗΣ ΧΑΝΙΩΝ								
Όνομα μονάδας	Τύπος μονάδας	Τύπος καυσίμου	Ονομαστική ισχύς (MW)	Τεχνικό ελάχιστο (MW)	A	B	C	CO ₂
GAS1X	Αεριοστρόβιλος	Diesel	11,3	2	576	-4,52	0,0208	0,78
GAS4X		Diesel	18,3	3	576	-4,52	0,0208	0,78
GAS5X		Diesel	30	5	576	-4,52	0,0208	0,78
GAS13X		Diesel	27,55	5	571,68	-3,2	0,0144	0,78

GAS11X		Diesel	53,2	8	655,2	-3,9	0,0184	0,78
GAS12X		Diesel	53,2	8	655,2	-3,9	0,0184	0,78
CCST Chania		Diesel	38,1	7	0	0	1	0,78
GAS6X		Diesel	36,1	15	239,04	-0,94	0,0024	0,78
GAS7X		Diesel	36,1	15	239,04	-0,94	0,0024	0,78
STEAM1 ATH		μαζούτ	46,5	20	300,96	-0,62	0,0008	0,71
STEAM2 ATH		μαζούτ	46,5	20	300,96	-0,62	0,0008	0,71
ΔΗΣ ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΥ								
Όνομα μονάδας	Τύπος μονάδας	Τύπος καυσίμου	Ονομαστική ισχύς (MW)	Τεχνικό ελάχιστο (MW)	A	B	C	CO₂
DIESEL1A	Diesel	Diesel	51,12	22	303,696	-0,62	0,004	0,71
DIESEL2A		Diesel	51,12	24	303,696	-0,62	0,004	0,71
DIESEL3A		μαζούτ	51,12	22	303,696	-0,62	0,004	0,71
DIESEL4A		μαζούτ	51,12	24	303,696	-0,62	0,004	0,71
DIESEL6A		μαζούτ	17	8	303,696	-0,62	0,004	0,89
DIESEL7A		μαζούτ	17	8	303,696	-0,62	0,004	0,89
DIESEL8A		μαζούτ	17	8	303,696	-0,62	0,004	0,89
DIESEL9A		μαζούτ	17	8	303,696	-0,62	0,004	0,89
DIESEL10A		μαζούτ	17	8	303,696	-0,62	0,004	0,89
DIESEL11A		μαζούτ	17	8	303,696	-0,62	0,004	0,89

Πίνακας 3-3- Ετήσια ενέργεια των μονάδων παραγωγής

Μονάδα παραγωγής	Σενάρια								
	Βασικό	ΜΑ - 2%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	ΜΑ - 4%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	ΜΑ - 6%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	ΜΑ - 8%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο
STEAM2L	61023	61036	0,0%	61061	0,1%	61114	0,1%	61221	0,3%
STEAM3L	57113	57130	0,0%	57156	0,1%	57208	0,2%	57313	0,4%
STEAM4L	130129	130132	0,0%	130171	0,0%	130233	0,1%	130404	0,2%
STEAM5L	133187	133205	0,0%	133233	0,0%	133243	0,0%	133370	0,1%
STEAM6L	142730	142750	0,0%	142812	0,1%	142873	0,1%	143018	0,2%
DIESEL1L	38069	38195	0,3%	38404	0,9%	38661	1,6%	39099	2,7%
DIESEL2L	42772	42945	0,4%	43152	0,9%	43488	1,7%	44066	3,0%
DIESEL3L	38832	38955	0,3%	39121	0,7%	39409	1,5%	39821	2,5%
DIESEL4L	25002	25001	0,0%	25032	0,1%	24890	-0,4%	24609	-1,6%
GAS1L	783	681	-13,1%	652	-16,7%	582	-25,7%	461	-41,1%
GAS2L	1121	1043	-6,9%	893	-20,3%	794	-29,2%	619	-44,8%
GAS3L	15605	15296	-2,0%	14812	-5,1%	14255	-8,6%	13309	-14,7%
GAS4L	860	814	-5,4%	637	-26,0%	573	-33,4%	477	-44,5%
GAS5L	6056	5958	-1,6%	5790	-4,4%	5561	-8,2%	5389	-11,0%
GAS1X	1099	1002	-8,8%	924	-15,9%	736	-33,1%	637	-42,0%
GAS4X	661	628	-5,1%	568	-14,0%	478	-27,7%	387	-41,4%
GAS5X	6569	6285	-4,3%	5701	-13,2%	5137	-21,8%	4383	-33,3%
GAS13X	4268	4204	-1,5%	3986	-6,6%	3705	-13,2%	3404	-20,2%
GAS11X	42381	42211	-0,4%	42212	-0,4%	41914	-1,1%	41659	-1,7%
GAS12X	35963	35541	-1,2%	35189	-2,1%	34470	-4,2%	33372	-7,2%
CCST Chania	166018	166025	0,0%	166037	0,0%	166016	0,0%	166127	0,1%
GAS6X	124513	124518	0,0%	124528	0,0%	124512	0,0%	124595	0,1%
GAS7X	124513	124518	0,0%	124528	0,0%	124512	0,0%	124595	0,1%
STEAM1 ATH	286553	286590	0,0%	286667	0,0%	286747	0,1%	287097	0,2%
STEAM2 ATH	294830	294895	0,0%	294999	0,1%	295103	0,1%	295458	0,2%

Μονάδα παραγωγής	Σενάρια								
	Βασικό	ΜΑ - 2%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	ΜΑ - 4%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	ΜΑ - 6%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	ΜΑ - 8%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο
DIESEL1A	254401	254843	0,2%	255593	0,5%	256826	1,0%	258056	1,4%
DIESEL2A	305595	305932	0,1%	306221	0,2%	306580	0,3%	306758	0,4%
DIESEL3A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL4A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL6A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL7A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL8A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL9A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL10A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL11A	0	0	:	0	:	0	:	0	:

Πίνακας 3-4- Πραγματικές ώρες λειτουργίας των μονάδων παραγωγής

Μονάδα παραγωγής	Σενάρια								
	Βασικό	ΜΑ - 2%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	ΜΑ - 4%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	ΜΑ - 6%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	ΜΑ - 8%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο
STEAM2L	5472	5472	0,0%	5472	0,0%	5472	0,0%	5472	0,0%
STEAM3L	5088	5088	0,0%	5088	0,0%	5088	0,0%	5088	0,0%
STEAM4L	7080	7080	0,0%	7080	0,0%	7080	0,0%	7080	0,0%
STEAM5L	7272	7272	0,0%	7272	0,0%	7272	0,0%	7272	0,0%
STEAM6L	7656	7656	0,0%	7656	0,0%	7656	0,0%	7656	0,0%
DIESEL1L	4462	4482	0,4%	4517	1,2%	4559	2,2%	4632	3,8%
DIESEL2L	5106	5132	0,5%	5165	1,2%	5217	2,2%	5305	3,9%
DIESEL3L	4555	4574	0,4%	4602	1,0%	4648	2,0%	4717	3,6%

Μονάδα παραγωγής	Σενάρια								Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο
	Βασικό	MA - 2%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	MA - 4%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	MA - 6%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	MA - 8%	
DIESEL4L	2835	2839	0,1%	2851	0,6%	2844	0,3%	2827	-0,3%
GAS1L	128	116	-9,4%	115	-10,2%	105	-18,0%	83	-35,2%
GAS2L	202	188	-6,9%	158	-21,8%	140	-30,7%	115	-43,1%
GAS3L	1466	1457	-0,6%	1434	-2,2%	1402	-4,4%	1323	-9,8%
GAS4L	145	137	-5,5%	114	-21,4%	107	-26,2%	91	-37,2%
GAS5L	817	813	-0,5%	797	-2,4%	778	-4,8%	761	-6,9%
GAS1X	251	232	-7,6%	214	-14,7%	181	-27,9%	164	-34,7%
GAS4X	82	80	-2,4%	76	-7,3%	63	-23,2%	53	-35,4%
GAS5X	640	622	-2,8%	579	-9,5%	524	-18,1%	452	-29,4%
GAS13X	414	410	-1,0%	391	-5,6%	368	-11,1%	333	-19,6%
GAS11X	3483	3493	0,3%	3520	1,1%	3563	2,3%	3604	3,5%
GAS12X	2701	2699	-0,1%	2700	0,0%	2696	-0,2%	2663	-1,4%
CCST Chania	6600	6600	0	6600	0	6600	0	6600	0
GAS6X	6600	6600	0,0%	6600	0,0%	6600	0,0%	6600	0,0%
GAS7X	6600	6600	0,0%	6600	0,0%	6600	0,0%	6600	0,0%
STEAM1 ATH	7920	7920	0,0%	7920	0,0%	7920	0,0%	7920	0,0%
STEAM2 ATH	8160	8160	0,0%	8160	0,0%	8160	0,0%	8160	0,0%
DIESEL1A	6604	6620	0,2%	6645	0,6%	6689	1,3%	6737	2,0%
DIESEL2A	7713	7727	0,2%	7740	0,4%	7761	0,6%	7783	0,9%
DIESEL3A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL4A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL6A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL7A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL8A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL9A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL10A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL11A	0	0	:	0	:	0	:	0	:

Πίνακας 3-5– Ισοδύναμες ώρες λειτουργίας των μονάδων παραγωγής

Μονάδα παραγωγής	Σενάρια								Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο
	Βασικό	ΜΑ - 2%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	ΜΑ - 4%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	ΜΑ - 6%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	ΜΑ - 8%	
STEAM2L	4422,0	4422,9	0,0%	4424,7	0,1%	4428,5	0,1%	4436,3	0,3%
STEAM3L	4138,7	4139,9	0,0%	4141,7	0,1%	4145,5	0,2%	4153,1	0,4%
STEAM4L	5422,1	5422,2	0,0%	5423,8	0,0%	5426,4	0,1%	5433,5	0,2%
STEAM5L	5458,5	5459,2	0,0%	5460,4	0,0%	5460,8	0,0%	5466,0	0,1%
STEAM6L	5849,6	5850,4	0,0%	5852,9	0,1%	5855,5	0,1%	5861,4	0,2%
DIESEL1L	3591,4	3603,3	0,3%	3623,1	0,9%	3647,3	1,6%	3688,6	2,7%
DIESEL2L	4035,1	4051,4	0,4%	4070,9	0,9%	4102,7	1,7%	4157,2	3,0%
DIESEL3L	3663,4	3675,0	0,3%	3690,6	0,7%	3717,9	1,5%	3756,7	2,5%
DIESEL4L	2358,7	2358,6	0,0%	2361,5	0,1%	2348,1	-0,4%	2321,6	-1,6%
GAS1L	60,2	52,4	-13,1%	50,2	-16,7%	44,7	-25,7%	35,5	-41,1%
GAS2L	86,2	80,3	-6,9%	68,7	-20,3%	61,1	-29,2%	47,6	-44,8%
GAS3L	390,1	382,4	-2,0%	370,3	-5,1%	356,4	-8,6%	332,7	-14,7%
GAS4L	61,9	58,6	-5,4%	45,8	-26,0%	41,2	-33,4%	34,4	-44,5%
GAS5L	201,9	198,6	-1,6%	193,0	-4,4%	185,4	-8,2%	179,6	-11,0%
GAS1X	97,2	88,6	-8,8%	81,7	-15,9%	65,1	-33,1%	56,4	-42,0%
GAS4X	36,1	34,3	-5,1%	31,1	-14,0%	26,1	-27,7%	21,2	-41,4%
GAS5X	219,0	209,5	-4,3%	190,0	-13,2%	171,2	-21,8%	146,1	-33,3%
GAS13X	154,9	152,6	-1,5%	144,7	-6,6%	134,5	-13,2%	123,5	-20,2%
GAS11X	796,6	793,4	-0,4%	793,4	-0,4%	787,9	-1,1%	783,1	-1,7%
GAS12X	676,0	668,1	-1,2%	661,5	-2,1%	647,9	-4,2%	627,3	-7,2%
CCST Chania	4357,43	4357,6	0,0%	4357,93	0,0%	4357,37	0,0%	4360,29	0,1%
GAS6X	3449,1	3449,3	0,0%	3449,5	0,0%	3449,1	0,0%	3451,4	0,1%
GAS7X	3449,1	3449,3	0,0%	3449,5	0,0%	3449,1	0,0%	3451,4	0,1%
STEAM1 ATH	6162,4	6163,2	0,0%	6164,9	0,0%	6166,6	0,1%	6174,1	0,2%
STEAM2 ATH	6340,4	6341,8	0,0%	6344,1	0,1%	6346,3	0,1%	6353,9	0,2%
DIESEL1A	4976,6	4985,2	0,2%	4999,9	0,5%	5024,0	1,0%	5048,0	1,4%
DIESEL2A	5978,0	5984,6	0,1%	5990,2	0,2%	5997,3	0,3%	6000,8	0,4%

Μονάδα παραγωγής	Σενάρια								Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο
	Βασικό	MA - 2%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	MA - 4%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	MA - 6%	Μεταβολή ως προς το Βασικό Σενάριο	MA - 8%	
DIESEL3A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL4A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL6A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL7A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL8A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL9A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL10A	0	0	:	0	:	0	:	0	:
DIESEL11A	0	0	:	0	:	0	:	0	:

Πίνακας 3-6– Μηνιαία τιμή αγοράς δικαιωμάτων εκπομπής CO₂ για το έτος 2013 (10)

Μήνας	Τιμή αγοράς δικαιωμάτων CO₂ (€/tn)
Ιανουάριος	5,14
Φεβρουάριος	4,65
Μάρτιος	4,17
Απρίλιος	3,75
Μάιος	3,53
Ιούνιος	4,32
Ιούλιος	4,23
Αύγουστος	4,44
Σεπτέμβριος	5,26
Οκτώβριος	4,99
Νοέμβριος	4,54
Δεκέμβριος	4,71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΘΕΡΜΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί η τροποποίηση της καμπύλης φορτίου του συστήματος μέσω της εφαρμογής άμεσου ελέγχου σε θερμοστατικά φορτία.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, με την εφαρμογή μεθόδων διαχείρισης της ζήτησης (DSM), μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η εφαρμογή μεθόδων διαχείρισης της ζήτησης για τη μετατόπιση του φορτίου, μπορεί να αποτρέψει προβληματικές καταστάσεις όπως η μη αποδοτική αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η μη αποδοτική και ακριβή παραγωγή ενέργειας ή χρήση μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας, σε περιόδους αυξημένης ζήτησης. Αν επιτευχθεί μετατόπιση του φορτίου, αυτό σημαίνει ότι οι χρήστες του δικτύου κάνουν χρήση ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους που η διαθεσιμότητα ενέργειας είναι αυξημένη και αντίστροφα, περιορίζουν την κατανάλωσή τους σε περιόδους με περιορισμένη διαθεσιμότητα ενέργειας.

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετηθεί η συνεισφορά στη μετατόπιση φορτίου (γέμισμα κοιλιάδων), από ώρες αιχμής σε ώρες εκτός αιχμής, των θερμοστατικών φορτίων, δηλαδή συσκευών που κατά τη λειτουργία τους κρατούν την θερμοκρασία εντός ενός ορισμένου διαστήματος. Οι συσκευές αυτές συνεισφέρουν στη μετατόπιση του φορτίου από το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας που διαθέτουν (8). Επιτρέπουν την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας η οποία έχει μετατραπεί σε θερμική ενέργεια. Ειδικότερα, θα μελετηθεί η συμπεριφορά των συσκευών ψύξης (ψυγεία).

4.2 Μοντελοποίηση θερμικών φορτίων

Θεωρούμε αρχικά, μία συσκευή ψύξης. Η κατάσταση στην οποία βρίσκεται εξαρτάται από τη φάση του κύκλου λειτουργίας στην οποία βρίσκεται και από εξωτερικούς παράγοντες. Επίσης, θεωρούμε ότι μπορεί να βρίσκεται σε μία από δύο καταστάσεις, δηλαδή μπορεί να βρίσκεται στην κατάσταση ON ή στην κατάσταση OFF. Η κατάσταση στο εσωτερικό της συσκευής καθορίζεται από τη θερμοκρασία του θαλάμου ψύξης. Η θερμοκρασία του θαλάμου ψύξης βρίσκεται πάντα εντός ενός διαστήματος $[\Theta_{\min}, \Theta_{\max}]$, όπου οι τιμές Θ_{\min} και Θ_{\max} διαφέρουν ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε συσκευής (6).

Η εξέλιξη της εσωτερικής θερμοκρασίας του θαλάμου ψύξης μπορεί να μοντελοποιηθεί σύμφωνα με τον τύπο (4.1).

$$\theta(t+1) = \epsilon \cdot \theta(t) + (1 - \epsilon) \left(\theta_0 - \eta \cdot \frac{X(t) \cdot Pr}{A} \right) + \omega(t) \quad (4.1)$$

όπου:

θ_0 : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος όπου βρίσκεται η συσκευή ($^{\circ}\text{C}$),

$\epsilon = e^{-\frac{A}{m_c}} = e^{-\frac{1}{T_c}}$: ο συντελεστής αδράνειας της συσκευής,

τ : το χρονικό βήμα που έχει επιλεχθεί,

m_c : η θερμική μάζα (J/°C),

$X(t)$: η κατάσταση λειτουργίας της συσκευής την χρονική στιγμή t ,

η : ο συντελεστής απόδοσης,

Pr : η ονομαστική ισχύς της συσκευής (W),

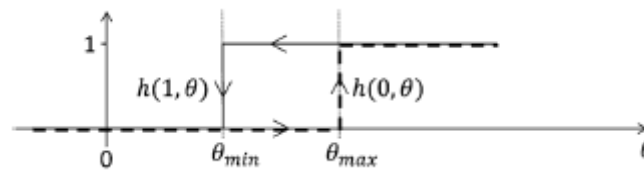
A : η θερμική αγωγιμότητα (W/°C),

$\omega(t)$: ο θόρυβος που προκύπτει από έξωθεν παρεμβολές όπως για παράδειγμα το άνοιγμα της πόρτας της συσκευής.

Ο τύπος (4.2) περιγράφει τον κύκλο λειτουργίας μιας συσκευής ψύξης.

$$\begin{aligned} h(X = 0, \theta) &= 1_{\{\theta \geq \theta_{max}\}} \\ h(X = 1, \theta) &= 1_{\{\theta \geq \theta_{min}\}} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Σύμφωνα με τον τύπο (4.2), αν η συσκευή είναι στην κατάσταση OFF την χρονική στιγμή t ($X(t) = 0$), τότε θα μεταβεί στην κατάσταση ON ($X(t+1) = 1$) για $\theta(t+1) > \theta_{max}$. Αν η συσκευή είναι στην κατάσταση ON την χρονική στιγμή t ($X(t) = 1$), τότε θα μεταβεί στην κατάσταση OFF ($X(t+1) = 0$) για $\theta(t+1) < \theta_{min}$ (6).



Σχήμα 4-1 – Κύκλος λειτουργίας συσκευής ψύξης, η κατάσταση της οποίας προκύπτει από την θερμοκρασία του θαλάμου ψύξης (6)

4.2.1 Υπολογισμός εσωτερικής θερμοκρασίας μίας συσκευής για ένα 24ωρο

Βάσει των τύπων (4.1) και (4.2) και θεωρώντας τυχαίες αρχικές τιμές των παραμέτρων του τύπου (4.1) και της εσωτερικής θερμοκρασίας για την αρχική χρονική στιγμή μπορούμε να υπολογίσουμε την εξέλιξη της εσωτερικής θερμοκρασίας για 24 ώρες.

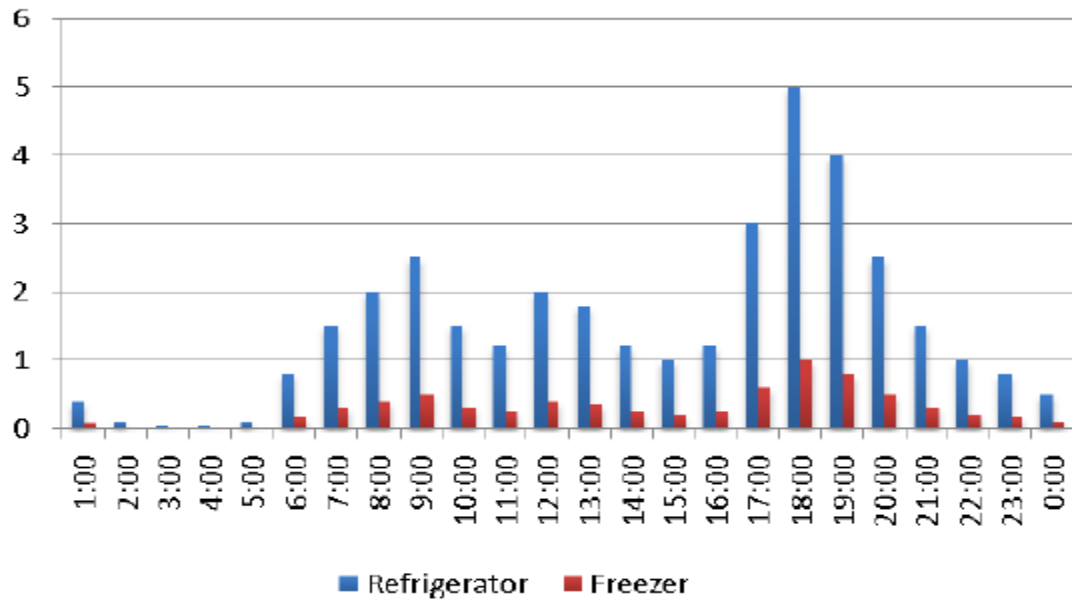
Όσον αφορά τον θόρυβο $\omega(t)$, θεωρήσαμε ότι προέρχεται από τα ανοίγματα της πόρτας της συσκευής. Όπως είναι αναμενόμενο, κάθε φορά που ανοίγει η πόρτα της συσκευής, η θερμοκρασία του θαλάμου ψύξης ανεβαίνει, λόγω των απωλειών που παρατηρούνται. Κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου η χρήση της συσκευής διαφέρει ανάλογα με τις δραστηριότητες των ενοίκων της εκάστοτε κατοικίας, αλλά και ανάλογα με το πλήθος των ατόμων που βρίσκονται στον χώρο.

Στην βιβλιογραφία εντοπίζονται προσπάθειες διαφόρων ερευνητών τόσο για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των ανοιγμάτων της πόρτας των συσκευών αυτών στην εσωτερική θερμοκρασία του θαλάμου ψύξης, όσο και για την ποσοτικοποίηση των μοτίβων χρήσης των συσκευών αυτών από τους ενοίκους.

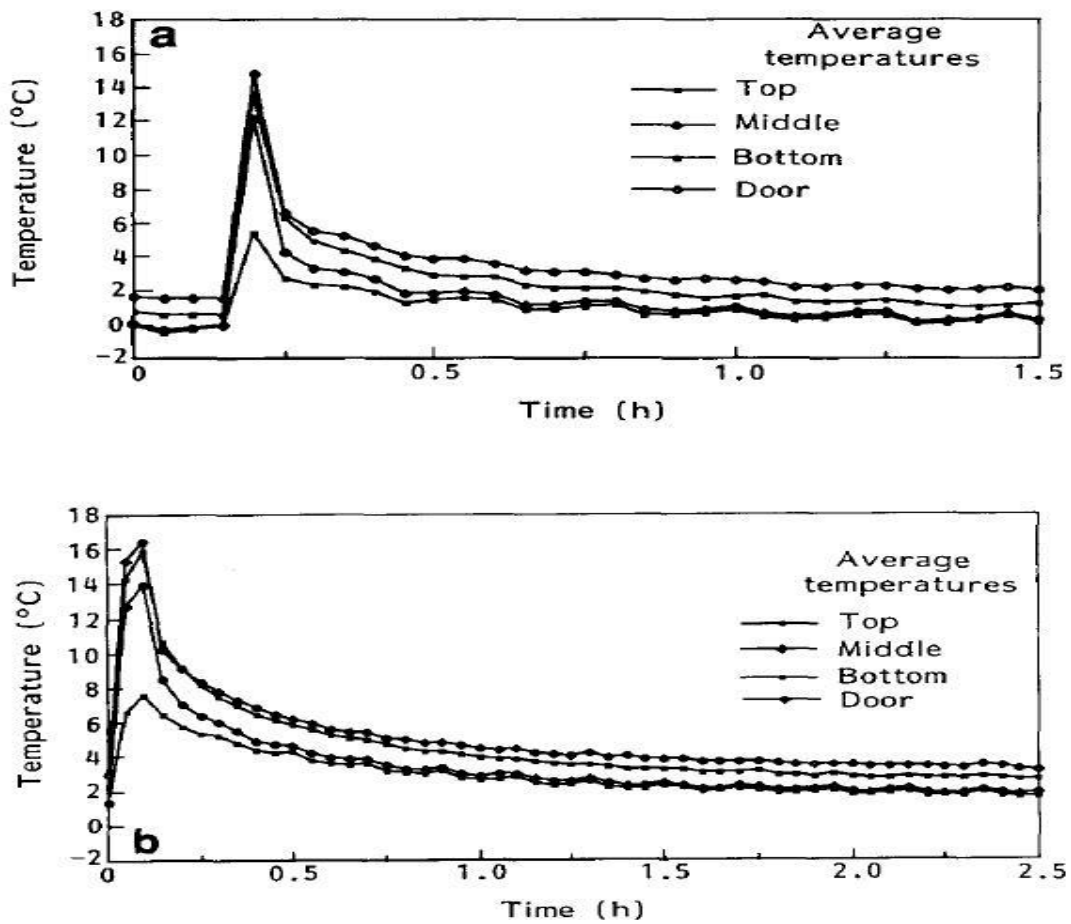
Στο (11) οι ερευνητές Keep et. al αναπτύσσουν ένα σχέδιο που επιτρέπει τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων που μπορούν να προκαλέσουν σφάλματα κατά την πρόβλεψη της ζήτησης ή της παραγωγής των Α.Π.Ε. Το σχέδιο αυτό μπορεί να υλοποιηθεί μέσω του ελέγχου σε ηλεκτρικά φορτία με τη χρήση διακόπτη (load switch). Για να υπάρξει η μικρότερη δυνατή παρέμβαση στις δραστηριότητες των καταναλωτών, προτιμώνται φορτία που απαιτούν ενέργεια σε βάθος χρόνου και που δεν είναι ευαίσθητα σε στιγμιαία κατανάλωση ενέργειας. Τέτοια φορτία είναι αυτά που ελέγχονται θερμοστατικά όπως τα ψυγεία, συσκευές κλιματισμού και θερμοσίφωνες. Στο μοντέλο που χρησιμοποιείται, μια οικιακή συσκευή ψύξης διαθέτει δύο θαλάμους (ψυγείο και κατάψυξη). Τα ανοίγματα της πόρτας θεωρούνται τυχαίο γεγονός και η πιθανότητα να ανοίξει η πόρτα σε κάθε χρονικό διάστημα, ορίζεται έτσι, ώστε ο μέσος όρος των ανοιγμάτων πόρτας ανά ώρα, να αντιστοιχεί στο Σχήμα 4-2. Αν η πόρτα ανοίξει σε έναν ή και στους δύο θαλάμους, το μοντέλο που αναπτύχθηκε, ρυθμίζει τη μέση θερμοκρασία του θαλάμου και την εσωτερική αναλογία νερού ή πάγου ως προς τον αέρα. Επιπλέον, θεωρείται ότι η περιεκτικότητα των τροφίμων σε νερό ανέρχεται στο 10% κατ' όγκο και ότι όλα τα περιεχόμενα του κάθε θαλάμου έχουν την ίδια θερμοκρασία.

Επιπλέον, οι ερευνητές στα (12) και (13) μελετούν πειραματικά την αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας του θαλάμου ψύξης για διάφορους τύπους συσκευών, όταν εφαρμόζεται διαφορετικός αριθμός και διάρκεια ανοιγμάτων. Στο (12) μελετάται η επίδραση ενός ανοίγματος της πόρτας μιας συσκευής που διαρκεί 10 s, 30 s και 1 min. Παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του χρόνου που μένει ανοιχτή η πόρτα της συσκευής, η μέγιστη τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας αυξάνεται και επανέρχεται στα επίπεδα προ του ανοίγματος με πιο αργό ρυθμό. Επίσης, έγινε σύγκριση της επίδρασης ενός ανοίγματος της πόρτας με περισσότερα ανοίγματα μικρότερης διάρκειας, αλλά ίσης συνολικής διάρκειας με το ένα άνοιγμα. Ένα άνοιγμα διάρκειας 3 ή 6 λεπτών συγκρίθηκε με 3 ή 6 ανοίγματα που διήρκεσαν 1 λεπτό. Η μέση θερμοκρασία μετά από ένα άνοιγμα 3 ή 6 λεπτών κυμάνθηκε από 5,5 - 16°C και 7,5 - 16,5°C αντίστοιχα. Για να επιστρέψει η θερμοκρασία στα πρότερα επίπεδα με απόκλιση 1°C, χρειάστηκε να παρέλθει διάστημα 1 ώρας (Σχήμα 4-3). Με πολλαπλά ανοίγματα ενός λεπτού η μέση θερμοκρασία αυξανόταν προοδευτικά, με κάθε επακόλουθο άνοιγμα, ενώ μειώθηκε το χρονικό διάστημα αποκατάστασης της θερμοκρασίας στα πρότερα επίπεδα (Σχήμα 4-4). Στο (13) αποδεικνύεται πειραματικά ότι η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ανοιγμάτων της πόρτας. Στις δοκιμές που διεξήχθησαν τα ανοίγματα είχαν διάρκεια 20 δευτερολέπτων. Ανάλογα με τον αριθμό των ανοιγμάτων της πόρτας, παρατηρήθηκε αύξηση έως και 3°C. Στο Σχήμα 4-5 παρουσιάζεται η επίδραση διαφορετικού αριθμού ανοιγμάτων της πόρτας στη θερμοκρασία του θαλάμου.

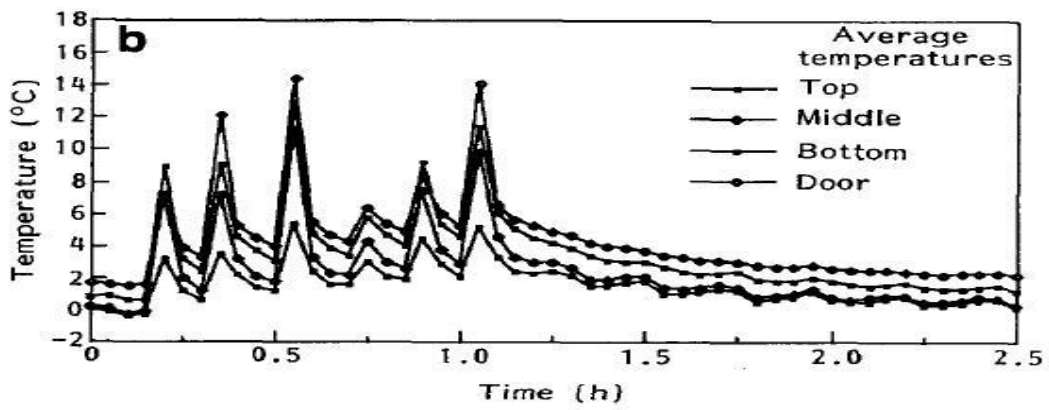
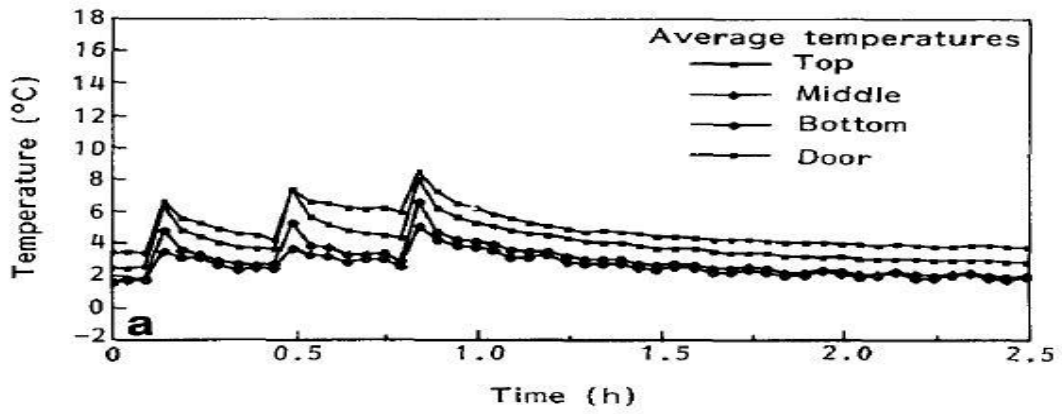
Στο (14) διερευνήθηκε η κατανάλωση ενέργειας εννέα συσκευών ψύξης για διάστημα τριών μηνών έως ένα έτος και εξήχθη το συμπέρασμα ότι ο μέσος αριθμός της πόρτας για ένα άτομο είναι 10, με μέση διάρκεια 10 δευτερολέπτων. Στο (15) υπολογίστηκε ότι μία μέση οικογένεια ανοίγει την πόρτα ενός ψυγείου 50 φορές περίπου.



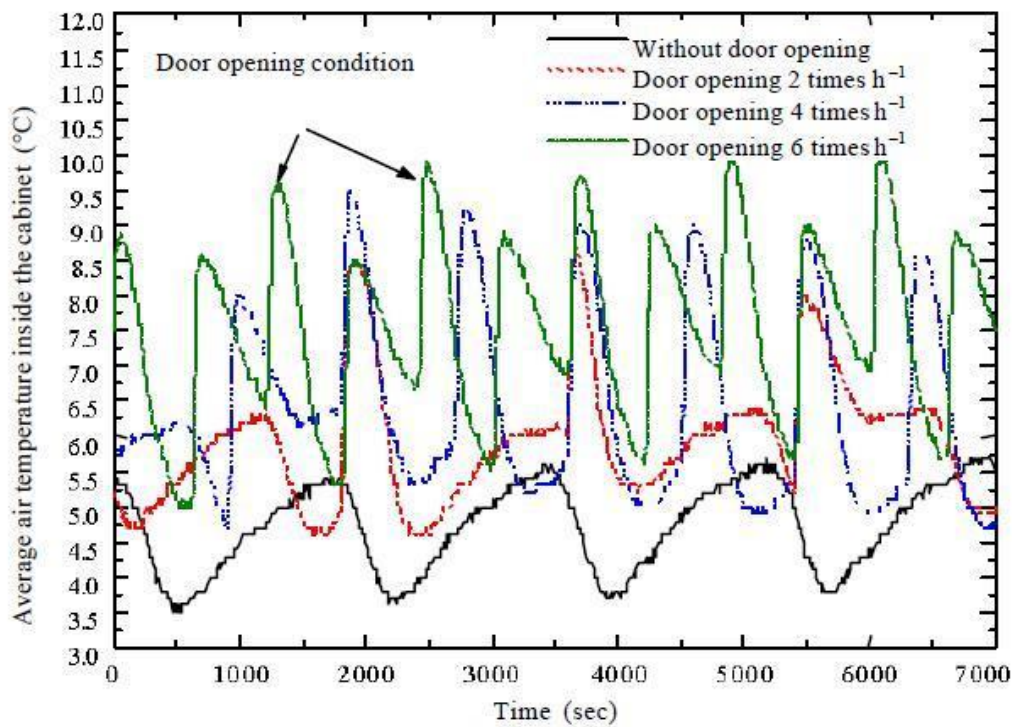
Σχήμα 4-2 – Μέσος αριθμός ανοιγμάτων πόρτας ενός ψυγείου, ανά ώρα (11)



Σχήμα 4-3 – Επίδραση ενός ανοίγματος της πόρτας διάρκειας (a) 3 λεπτών και (b) 6 λεπτών στη θερμοκρασία (12)



Σχήμα 4-4 – Επίδραση (a) 3 ανοιγμάτων διάρκειας 1 λεπτού με ενδιάμεσο διάστημα 20 λεπτών και (b) 6 ανοιγμάτων διάρκειας 1 λεπτού με ενδιάμεσο διάστημα 10 λεπτών (12)



Σχήμα 4-5 – Επίδραση διαφορετικού αριθμού ανοιγμάτων της πόρτας στη μέση θερμοκρασία του αέρα εντός του θαλάμου ψύξης (13)

4.2.2 Υπολογισμός εσωτερικής θερμοκρασίας περισσότερων συσκευών

Με αφητηρία τους τύπους (4.1) και (4.2) μπορούμε να υπολογίσουμε την φυσική εξέλιξη της εσωτερικής θερμοκρασίας για περισσότερες από μία συσκευές. Οι συσκευές αυτές, θεωρούμε ότι λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο, συνεπώς η λειτουργία τους περιγράφεται από τις ίδιες εξισώσεις αλλά διαφέρουν στα τεχνικά τους χαρακτηριστικά. Η διαφοροποίηση αυτή αναπαρίσταται με την τυχαία αρχικοποίηση, για κάθε συσκευή, των παραμέτρων που υπεισέρχονται στους τύπους.

4.3 Εφαρμογή ελέγχου στις συσκευές ψύξης

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, θα προσπαθήσουμε να διαπιστώσουμε το μέγεθος της συνεισφοράς των συσκευών ψύξης που λειτουργούν στα πλαίσια του Σ.Η.Ε Κρήτης στην τροποποίηση της αρχικής καμπύλης φορτίου του συστήματος ώστε να προκύψει η καμπύλη φορτίου συστήματος των σεναρίων που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο 3.

4.3.1 Καμπύλη ζήτησης των συσκευών

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, η αρχική καμπύλη φορτίου του συστήματος που αποτελεί βάση για τους υπολογισμούς, αντιστοιχεί στο βασικό σενάριο. Στα πλαίσια του σεναρίου αυτού δεν εφαρμόζεται έλεγχος στις συσκευές ψύξης. Επομένως, οι συσκευές ακολουθούν τον κύκλο λειτουργίας τους όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2 και η εσωτερική θερμοκρασία εξελίσσεται φυσιολογικά. Για να υπολογίσουμε την συνολική ζήτηση των συσκευών, αρκεί να αθροίσουμε για κάθε χρονική περίοδο την ονομαστική ισχύ όλων των συσκευών που βρίσκονται σε κατάσταση ON. Έστω $P_{totalNC}$, το φορτίο όλων των συσκευών ψύξης, για ένα 24ωρο, που υπολογίζεται κατ' αυτόν τον τρόπο και έστω SystemLoad το πραγματικό φορτίο του συστήματος χωρίς εφαρμογή μεθόδων διαχείρισης της ζήτησης.

Στην περίπτωση των σεναρίων στα οποία προσπαθούμε να επιτύχουμε μείωση της αιχμής του φορτίου του συστήματος, ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται μέσω της τροποποιημένης καμπύλης φορτίου του συστήματος, έστω SystemLoadDSM. Ωστόσο, η συνολική ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας δεν αλλάζει. Για να φτάσουμε τον στόχο που θέτουμε για την μείωση της αιχμής, εφαρμόζουμε άμεσο έλεγχο στις συσκευές, οπότε αυτές δεν ακολουθούν τον αναμενόμενο κύκλο λειτουργίας τους και η εσωτερική θερμοκρασία δεν εξελίσσεται φυσιολογικά. Σε αυτήν την περίπτωση, έστω P_{totalC} το φορτίο όλων των συσκευών ψύξης, ύστερα από εφαρμογή άμεσου ελέγχου, για ένα 24ωρο, που ισούται με το άθροισμα της ονομαστικής ισχύος των συσκευών που βρίσκονται σε κατάσταση ON, την κάθε χρονική περίοδο.

Ο έλεγχος που εφαρμόζεται στις συσκευές έχει ως στόχο να προσεγγίσουμε, όσο γίνεται καλύτερα, μία καμπύλη (του φορτίου των συσκευών) στόχο. Έστω P_{target} , η καμπύλη στόχος. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τον τύπο (4.3).

$$P_{target} = P_{totalNC} - dP \quad (4.3)$$

όπου,

$P_{totalNC}$: η καμπύλη φορτίου των συσκευών χωρίς την εφαρμογή ελέγχου,

dP : η διαφορά της αρχικής καμπύλης φορτίου του συστήματος και της καμπύλης φορτίου του συστήματος όταν εφαρμόζονται τεχνικές διαχείρισης της ζήτησης (DSM).

Δηλαδή, η dP προκύπτει από τον τύπο (4.4). (16)

$$dP = SystemLoad - SystemLoadDSM \quad (4.4)$$

Συμπερασματικά, στόχος μας είναι η P_{totalC} να προσεγγίσει όσο το δυνατόν περισσότερο την P_{target} , δηλαδή την καμπύλη στόχο.

4.3.2 Κατασκευή λίστας προτεραιότητας

Προφανώς, στην πράξη δεν είναι δυνατόν να ελεγχθεί η λειτουργία του συνόλου των διαθέσιμων συσκευών που συμμετέχουν στον πρόγραμμα απόκρισης ζήτησης, καθώς κάτι τέτοιο ενδεχομένως να οδηγούσε κάποιες συσκευές σε λειτουργία εκτός των αποδεκτών ορίων θερμοκρασίας, γεγονός που είναι απαγορευτικό ειδικά για τον συγκεκριμένο τύπο φορτίου (ψυγεία), καθώς συνεπάγεται μη ιδανικές συνθήκες συντήρησης των τροφίμων. Συνεπώς, ο οποιοσδήποτε έλεγχος πιθανόν εφαρμοστεί σε τέτοιου είδους οικιακά φορτία είναι απαραίτητο να σέβεται τα τεθέντα άνω και κάτω όρια της θερμοκρασίας του θαλάμου ψύξης. Για το λόγο αυτό και στα πλαίσια της προσέγγισης του προβλήματος μέσω του MATLAB, κατασκευάζουμε μια λίστα προτεραιότητας για όλες τις συσκευές.

Κατ' αρχάς, έλεγχος σε μια συσκευή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο όταν η εσωτερική θερμοκρασία της βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων, δηλαδή μόνο όταν η φυσιολογική εξέλιξη της θερμοκρασίας δεν επιβάλλει αλλαγή κατάστασης. Επιπλέον, λόγω τεχνικών περιορισμών αλλά και λόγω πιθανών απαιτήσεων των χρηστών των συσκευών, αυτές δεν είναι δυνατόν να υποστούν οποιοδήποτε αριθμό εξαναγκασμένων αλλαγών κατάστασης εντός ενός 24ωρου. Το μέγιστο πλήθος εξαναγκασμένων αλλαγών κατάστασης βρίσκεται εντός καθορισμένων ορίων, που ορίζονται εκ των προτέρων (πιθανόν κατά τη σύναψη της σύμβασης παροχής υπηρεσιών διαχείρισης φορτίου).

Άλλη μια παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη στην κατασκευή της λίστας προτεραιότητας είναι το ελάχιστο πλήθος χρονικών περιόδων χωρίς εξαναγκασμένη αλλαγή κατάστασης και αποτελεί χαρακτηριστικό του κάθε καταναλωτή. Εάν γίνει εξαναγκασμένη αλλαγή κατάστασης μιας συσκευής, η συσκευή δε μπορεί να υποστεί έλεγχο για τις επόμενες χρονικές περιόδους, μέχρι η τιμή της παραμέτρου αυτής, που μειώνεται με κάθε χρονική περίοδο που περνά, να φτάσει στο μηδέν. Η παράμετρος αυτή, επίσης, λαμβάνει τιμές εντός καθορισμένων ορίων κι η αρχική της τιμή λαμβάνεται με τυχαίο τρόπο ώστε να αναπαρασταθούν οι διαφορές στις συνήθειες κατανάλωσης των νοικοκυριών.

Επιπρόσθετα, συμπεριλαμβάνουμε στη λίστα προτεραιότητας άλλη μια παράμετρο, με το όνομα *control*, που δηλώνει αν έχει προηγηθεί έλεγχος της συσκευής στην αμέσως προηγούμενη χρονική περίοδο. Μόνο οι συσκευές που δεν έχουν υποστεί έλεγχο στην

αμέσως προηγούμενη χρονική περίοδο μπορούν να συμβάλουν στην προσέγγιση της καμπύλης στόχου.

Τέλος, οι συσκευές κατατάσσονται στη λίστα προτεραιότητας και με βάση την ονομαστική τους ισχύ. Συσκευές με μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ προτιμάται να ελεγχθούν πρώτες ώστε αρχικά να φτάσει η καμπύλη φορτίου των συσκευών κοντά στην καμπύλη στόχο και στη συνέχεια να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια μέσω των συσκευών χαμηλότερης ισχύος της λίστας προτεραιότητας. Επιπλέον, με την κατάταξη των συσκευών στη λίστα προτεραιότητας με σειρά αυξανόμενης ονομαστικής ισχύος διασφαλίζεται και ότι θα χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη του στόχου το ελάχιστο δυνατό πλήθος συσκευών.

Ανάλογα με το πρόσημο της υπολογισθείσας διαφοράς dP κατασκευάζουμε χρησιμοποιώντας το λογισμικό MATLAB την αντίστοιχη λίστα προτεραιότητας. Αν είναι $dP > 0$, αυτό σημαίνει ότι $SystemLoad > SystemLoadDSM$ άρα η λίστα προτεραιότητας περιέχει τις συσκευές που μπορούν να υποστούν εξαναγκασμένο κλείσιμο. Αν είναι $dP < 0$, αυτό σημαίνει ότι $SystemLoad < SystemLoadDSM$, άρα η λίστα προτεραιότητας περιέχει τις συσκευές που μπορούν να υποστούν εξαναγκασμένο άνοιγμα.

Συνοψίζοντας, σε κάθε χρονική περίοδο κατασκευάζουμε τέσσερις λίστες προτεραιότητας. Η πρώτη λίστα αφορά τις συσκευές χαμηλής ισχύος που είναι κλειστές ($X(t) = 0$) και άρα μπορούν να τεθούν σε λειτουργία. Η δεύτερη λίστα αφορά τις συσκευές χαμηλής ισχύος που είναι ανοικτές ($X(t) = 1$) και άρα μπορούν να τεθούν εκτός λειτουργίας. Η τρίτη αφορά τις συσκευές υψηλής ισχύος που είναι κλειστές ($X(t) = 0$) και άρα μπορούν να τεθούν σε λειτουργία. Τέλος, η τέταρτη αφορά τις συσκευές υψηλής ισχύος που είναι ανοικτές ($X(t) = 1$) και άρα μπορούν να τεθούν εκτός λειτουργίας. Η ταξινόμηση των συσκευών στην εκάστοτε λίστα προτεραιότητας, για τη δεδομένη χρονική περίοδο που εξετάζεται, γίνεται κατά προτεραιότητα με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

- 1) Με βάση το αν η συσκευή είναι επιλέξιμη για έλεγχο, δηλαδή με βάση το αν η συσκευή παραμένει στην κατάσταση λειτουργίας που βρισκόταν κατά την αμέσως προηγούμενη χρονική περίοδο.
- 2) Βάσει του αν έχει υποστεί έλεγχο στην αμέσως προηγούμενη χρονική περίοδο.
- 3) Βάσει του μέγιστου πλήθους εξαναγκασμένων αλλαγών κατάστασης που μπορεί να υποστεί κάθε συσκευή.
- 4) Βάσει του ελάχιστου πλήθους χρονικών περιόδων που πρέπει να παραμείνει η συσκευή χωρίς εξαναγκασμένη αλλαγή κατάστασης.
- 5) Βάσει της ονομαστικής ισχύος.

Για την κατασκευή των λιστών προτεραιότητας εκτελούνται υπολογισμοί με τη βοήθεια του MATLAB. Ειδικότερα, χρησιμοποιείται μία συνάρτηση, την οποία ονομάζουμε Priority. Οι υπολογισμοί που εκτελούνται με την κλήση της συνάρτησης Priority περιγράφονται παρακάτω:

Βήμα 1: Κλήση της συνάρτησης Priority που δέχεται ως είσοδο τον πίνακα TABLE. Ο πίνακας TABLE περιέχει τις πληροφορίες κάθε συσκευής και που αντιστοιχούν στα κριτήρια για την ταξινόμηση που περιγράφηκαν προηγουμένως.

Βήμα 2: Ταξινόμηση του πίνακα εισόδου βάσει του αν η εκάστοτε συσκευή είναι επιλέξιμη για έλεγχο και κατασκευή νέου πίνακα που περιέχει μόνο τις επιλέξιμες για έλεγχο συσκευές.

Βήμα 3: Ταξινόμηση των συσκευών βάσει του αν είναι κλειστές ή ανοικτές και κατασκευή δύο πινάκων με τις δύο αυτές κατηγορίες συσκευών.

Βήμα 4: Ταξινόμηση των δύο πινάκων βάσει του αν η εκάστοτε συσκευή έχει υποστεί έλεγχο στην προηγούμενη χρονική περίοδο. Προηγούνται συσκευές που δεν έχουν υποστεί έλεγχο.

Βήμα 5: Ταξινόμηση βάσει της ονομαστικής ισχύος των συσκευών. Προηγούνται συσκευές υψηλής ισχύος (ψυγείοκαταψύκτες για επαγγελματική χρήση).

Βήμα 6: Ταξινόμηση βάσει του μέγιστου αριθμού εξαναγκασμένων αλλαγών κατάστασης για συσκευές που δεν έχουν υποστεί έλεγχο και βάσει του ελάχιστου πλήθους περιόδων χωρίς εξαναγκασμένη αλλαγή για συσκευές που έχουν υποστεί. Στην πρώτη περίπτωση ο μέγιστος αριθμός αλλαγών κατάστασης μειώνεται ενώ διατρέχουμε τις συσκευές της λίστας. Στη δεύτερη περίπτωση το ελάχιστο πλήθος περιόδων χωρίς αλλαγή κατάστασης μειώνεται.

Βήμα 7: Η συνάρτηση Priority δίνει ως έξοδο τις τέσσερις λίστες προτεραιότητας που περιγράφηκαν και αφορούν συσκευές χαμηλής και υψηλής ισχύος και που μπορούν να κλείσουν ή να ανοίξουν.

4.3.3 Υπολογισμοί κατά την εφαρμογή ελέγχου στις συσκευές

Κατά τους υπολογισμούς με το MATLAB, θέσαμε ως \epsilonpsilon_1 τη μέγιστη ονομαστική ισχύ που μπορεί να έχει μία συσκευή χαμηλής ισχύος, που αποτελούν την πλειοψηφία των συσκευών, έναν συντελεστή ο οποίος βοηθά στον ορισμό της επιθυμητής ακρίβειας.

Στη σειρά εκτέλεσης των υπολογισμών προηγείται ο βρόχος με τον οποίο εφαρμόζεται έλεγχος στις συσκευές υψηλής ισχύος και έπεται ο βρόχος που αντιστοιχεί στις συσκευές χαμηλής ισχύος. Πριν, όμως, εφαρμόσουμε τον οποιοδήποτε έλεγχο, εξετάζουμε το ενδεχόμενο να μην είναι απαραίτητος ο έλεγχος όλων των διαθέσιμων συσκευών εντός των λιστών προτεραιότητας, με στόχο την αύξηση της ταχύτητας των εκτελούμενων υπολογισμών και την αποφυγή εκτέλεσης περιττών υπολογισμών. Για τον λόγο αυτό, αθροίζουμε την ονομαστική ισχύ των συσκευών χαμηλής ισχύος που περιέχει η αντίστοιχη λίστα προτεραιότητας. Αν αυτή η διαθέσιμη ισχύς είναι αρκετή ώστε να καλύψει την απόκλιση της P_{target} με την P_{totalC} τότε προχωρούμε μόνο στον έλεγχο συσκευών χαμηλής ισχύος. Αντίθετα, στην περίπτωση που την συγκεκριμένη χρονική στιγμή η απόκλιση από το στόχο (P_{target}) είναι αρκετά μεγάλη και δεν επαρκεί η εφαρμογή ελέγχου στις συσκευές χαμηλής ισχύος για την προσέγγισή του, δηλαδή η προαναφερθείσα διαθέσιμη ισχύς δεν επαρκεί, τότε εφαρμόζουμε πρώτα έλεγχο στις συσκευές υψηλής ισχύος κι ακολούθως στις συσκευές χαμηλής ισχύος.

4.3.3.1 Ιδιαιτερότητες των συσκευών υψηλής ισχύος

Τόνισαμε προηγουμένως ότι τις συσκευές υψηλής ισχύος επιδιώκουμε να τις χρησιμοποιούμε μόνο σε περιπτώσεις που η απόσταση που πρέπει να καλυφθεί για την επίτευξη του στόχου είναι ιδιαίτερα μεγάλη και, κατά συνέπεια, η συνολική ισχύς των διαθέσιμων προς έλεγχο συσκευών χαμηλής ισχύος δεν επαρκεί. Αν κριθεί απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν και οι συσκευές υψηλής ισχύος, τότε, επειδή η ισχύς τους είναι αρκετά υψηλή και ενδεχομένως να

μην επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια στην προσέγγιση του στόχου, ελέγχονται ακριβώς τόσες συσκευές υψηλής ισχύος όσες απαιτούνται ώστε:

1) σε περίπτωση ελλείμματος ενέργειας να επιτυγχάνεται demandC λίγο πιο **κάτω** από τον στόχο, και ποτέ πάνω. Την υπόλοιπη διαφορά θα την καλύψουν οι συσκευές χαμηλής ισχύος (στην περίπτωση των οποίων, σημειωτέον, δεν μας πειράζει να αποκλίνουμε από το στόχο προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση, αφού η απόκλιση θα είναι της τάξεως του $2 \cdot \epsilon$ (πολύ)).

2) σε περίπτωση περίσσειας ενέργειας να επιτυγχάνεται demandC λίγο πιο **πάνω** από τον στόχο, και ποτέ κάτω. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, την υπόλοιπη διαφορά θα την καλύψουν οι συσκευές χαμηλής ισχύος (χωρίς να μας ενδιαφέρει το πρόσημο της απόκλισης από τον στόχο).

4.3.3.2 Τρόπος εφαρμογής ελέγχου στις συσκευές

Εντός του βρόχου για τον έλεγχο των συσκευών εκτελούνται τα παρακάτω:

- Αν πληρούνται όλες οι προϋποθέσεις δηλαδή δεν έχει γίνει έλεγχος της συσκευής στην αμέσως προηγούμενη χρονική περίοδο και ο μέγιστος αριθμός εξαναγκασμένων αλλαγών κατάστασης έχει μη μηδενική θετική τιμή και ο ελάχιστος αριθμός χρονικών περιόδων χωρίς αλλαγή κατάστασης είναι μηδέν (δηλαδή έχει παρέλθει η χρονική περίοδος κατά την οποία αδυνατούμε να εφαρμόσουμε έλεγχο λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της χρήσης του κάθε καταναλωτή) τότε προχωρούμε παρακάτω.
- Αλλάζει η κατάσταση που θα είχε η συσκευή σύμφωνα με την φυσιολογική εξέλιξη της εσωτερικής της θερμοκρασίας.
- Αν η συσκευή ανοίγει, η ονομαστική της ισχύς προστίθεται στο φορτίο συσκευών $P_{totalC}(t)$, ενώ αν κλείνει η ονομαστική της ισχύς αφαιρείται από το φορτίο των συσκευών.
- Ο μέγιστος αριθμός εξαναγκασμένων αλλαγών κατάστασης της συσκευής μειώνεται κατά 1.
- Η παράμετρος $control(t,i)$ παίρνει την τιμή 1 και δηλώνει ότι την χρονική στιγμή t έγινε έλεγχος στη συσκευή i .
- Ο ελάχιστος αριθμός χρονικών περιόδων χωρίς αλλαγή κατάστασης επανέρχεται στην αρχική του τιμή. Αν λάβει αρνητική τιμή τότε επανέρχεται στο μηδέν.
- Αν δεν ικανοποιούνται όλες οι προϋποθέσεις για την εφαρμογή ελέγχου στη συσκευή, ο ελάχιστος αριθμός περιόδων χωρίς εξαναγκασμένη αλλαγή κατάστασης μειώνεται κατά 1. Αν αυτός ο αριθμός λάβει αρνητική τιμή τότε επανέρχεται στο μηδέν.
- Εξετάζουμε την επόμενη συσκευή της λίστας προτεραιότητας.

Όταν εκτελεστεί ο βρόχος για τον έλεγχο των συσκευών της λίστας προτεραιότητας υπολογίζουμε για κάθε t την απόκλιση της καμπύλης φορτίου των συσκευών από την καμπύλη στόχο και τις σχεδιάζουμε σε κοινό διάγραμμα. Έτσι, μπορούμε να δούμε αν ο καθορισμένος στόχος της μείωσης του φορτίου του συστήματος επιτεύχθηκε με τον έλεγχο που εφαρμόζουμε στα θερμοστατικά φορτία.

Οι υπολογισμοί που εκτελούνται με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB απαριθμούνται παρακάτω:

Βήμα 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων των υπό μελέτη συσκευών. Οι παράμετροι αυτές υπεισέρχονται στους υπολογισμούς της εξέλιξης της εσωτερικής θερμοκρασίας του θαλάμου ψύξης και της κατάστασης της συσκευής (σχέσεις (4.1) και (4.2)) είναι:

- 1) Ο συντελεστής αδράνειας ϵ .
- 2) Η θερμική αγωγιμότητα A .
- 3) Η ονομαστική ισχύς P_r .
- 4) Η θερμοκρασία περιβάλλοντος θ_0 .
- 5) Η ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία, Θ_{\min} και Θ_{\max} .
- 6) Η εσωτερική θερμοκρασία κατά την αρχική χρονική περίοδο $\theta(0)$.
- 7) Η κατάσταση λειτουργίας της συσκευής $X(0)$.
- 8) Η τιμή της μεταβλητής control κατά την αρχική χρονική περίοδο.
- 9) Το ποσοστό επί των ανοιγμάτων πόρτας με το οποίο πολλαπλασιάζεται ο μέσος όρος ανοιγμάτων της πόρτας της συσκευής (Παρ. 4.2.1) και αναπαριστά τις διαφορές που χαρακτηρίζουν τη χρήση κάθε συσκευής (π.χ. χρήση από διαφορετικό αριθμό ατόμων, χρήση για οικιακές ή επαγγελματικές δραστηριότητες) .

Βήμα 2: Υπολογισμός, για όλο το 24ωρο της ισχύος $P_{totalNC}$, δηλαδή της συνολικής ισχύος που καταναλώνουν οι συσκευές ψύξης, χωρίς να εφαρμόζεται έλεγχος επί των συσκευών.

Βήμα 3: Υπολογισμός της P_{target} βάσει του τύπου (4.3).

Βήμα 4: Για κάθε χρονική στιγμή εκτέλεσε τα βήματα 5 έως 15.

Βήμα 5: Αρχικοποίηση με μηδενικά του πίνακα TABLE που χρησιμεύει στον καθορισμό της λίστας προτεραιότητας για την συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Βήμα 6: $i = 1$. Για την συσκευή i εκτέλεσε τα βήματα 7 έως 9.

Βήμα 7: Υπολογισμός για την δεδομένη χρονική περίοδο t της εσωτερικής θερμοκρασίας με βάση τον τύπο (4.1), της κατάστασης λειτουργίας με βάση τον τύπο (4.2) και της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της συσκευής ($X(t) \cdot P_r$).

Βήμα 8: Ανάθεση τιμών στον πίνακα TABLE (σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας, το αν είναι ελέγξιμη και αν έχει ελεγχθεί πρόσφατα, τον ελάχιστο αριθμό περιόδων χωρίς εξαναγκασμένη αλλαγή κατάστασης, το μέγιστο πλήθος εξαναγκασμένων αλλαγών κατάστασης και την ονομαστική ισχύ της συσκευής).

Βήμα 9: $i = i + 1$, Εξετάστηκαν όλες οι συσκευές; Αν όχι, πήγαινε στο βήμα 7, αλλιώς στο βήμα 10.

Βήμα 10: Εάν υπάρχει έλλειμμα ενέργειας, κατασκεύασε τη λίστα προτεραιότητας για συσκευές που μπορούν να ανοίξουν την συγκεκριμένη χρονική περίοδο. ΑΛΛΙΩΣ κατασκεύασε τη λίστα προτεραιότητας για συσκευές που μπορούν να κλείσουν την συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Βήμα 11: Υπολογισμός διαθέσιμης ισχύος των συσκευών χαμηλής ισχύος.

Βήμα 12: EAN επαρκεί η διαθέσιμη ισχύς των συσκευών χαμηλής ισχύος για την προσέγγιση του στόχου, πήγαινε στο βήμα 14, αλλιώς στο βήμα 13.

Βήμα 13: Έλεγχος κατάστασης λειτουργίας των συσκευών υψηλής ισχύος.

Βήμα 14: Έλεγχος κατάστασης λειτουργίας των συσκευών χαμηλής ισχύος.

Βήμα 15: $t = t + 1$. Εξετάστηκαν όλες οι χρονικές περίοδοι; Αν όχι, πήγαινε στο βήμα 5, αλλιώς πήγαινε στο βήμα 16.

Βήμα 16: Υπολογισμός για κάθε t της απόκλισης της καμπύλης φορτίου των συσκευών από την καμπύλη στόχο.

Βήμα 17: Σχεδίαση σε κοινό γράφημα των καμπυλών $P_{totalNC}$, P_{totalC} και P_{target} .

Βήμα 18: ΤΕΛΟΣ

Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται για τον έλεγχο της κατάστασης λειτουργίας των διαθέσιμων προς έλεγχο συσκευών που εκτελείται στα βήματα 13 και 14 των παραπάνω υπολογισμών. Η διαδικασία αυτή είναι ίδια είτε πρόκειται για συσκευές χαμηλής ή υψηλής ισχύος.

Έλεγχος κατάστασης λειτουργίας συσκευών

Βήμα I: Αρχικοποίηση ($u=1$).

Βήμα II: Για όσο η απόκλιση από τον στόχο είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή ακρίβεια (βλ. παράγραφο 4.3.3.3) εκτέλεσε τα βήματα III έως IV.

Βήμα III: EAN δεν έχει προηγηθεί έλεγχος και $[\text{μέγιστο πλήθος αλλαγών κατάστασης}] > 0$ και $[\text{ελάχιστο πλήθος χρον. περιόδων χωρίς αλλαγή κατάστασης}] = 0$ TOTΕ εκτέλεσε τα βήματα III.1 έως III.4 ΑΛΛΙΩΣ εκτέλεσε το βήμα III.5

Βήμα III.1: Αλλαγή κατάστασης της συσκευής.

Βήμα III.2: Υπολογισμός ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της συσκευής ($X(t) \cdot Pr$).

Βήμα III.3: Μείωση κατά 1 του μέγιστου αριθμού εξαναγκασμένων αλλαγών κατάστασης.

Βήμα III.4: Η μεταβλητή control λαμβάνει την τιμή 1 για την συσκευή u και την χρονική στιγμή t .

ΑΛΛΙΩΣ

Βήμα III.5: Ο ελάχιστος αριθμός περιόδων χωρίς αλλαγή μειώνεται κατά 1.

Βήμα IV: $u = u+1$. Εξετάστηκαν όλες οι συσκευές της λίστας προτεραιότητας; Αν όχι, πήγαινε στο βήμα III, αλλιώς πήγαινε στο βήμα V.

Βήμα V: ΤΕΛΟΣ

4.3.3.3 Κριτήρια τερματισμού της αναζήτησης στη λίστα προτεραιότητας

Όσον αφορά στην ακρίβεια των υπολογισμών (Βήμα II αλγορίθμου ελέγχου κατάστασης λειτουργίας συσκευών) για να προχωρήσουμε, σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο t , σε έλεγχο των συσκευών μεγάλης ισχύος, πρέπει:

$P_{target}(t) - P_{totalC}(t) > \epsilon_{2}$ (σε περίπτωση ελλείμματος ενέργειας)

ή

$P_{target}(t) - P_{totalC}(t) < \epsilon_{2}$ (σε περίπτωση περίσσειας ενέργειας)

Για τις συσκευές υψηλής ισχύος θέσαμε ως ανεκτή απόκλιση \epsilonpsilon_2 τη μέγιστη τιμή της ονομαστικής ισχύος που θεωρήσαμε ότι μπορεί να διαθέτει μια τέτοια συσκευή.

Για να προχωρήσουμε σε έλεγχο συσκευών χαμηλής ισχύος, πρέπει:

$$|P_{target}(t) - P_{totalC}(t)| > 2 * \epsilonpsilon_1$$

Επιπλέον, το πρόγραμμα δε προχωρά στην εκτέλεση των εντολών που αφορούν τον έλεγχο των συσκευών αν φτάσει στο σημείο να έχει διατρέξει ήδη όλες τις συσκευές της λίστας προτεραιότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΘΕΡΜΟΣΤΑΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4 σχετικά με τον άμεσο έλεγχο θερμοστατικών φορτίων, ώστε να επιτευχθεί μία νέα καμπύλη ζήτησης των συσκευών αυτών. Μελετώνται τέσσερα σενάρια μείωσης της αιχμής του συστήματος. Στα σενάρια αυτά, προβλέπεται μείωση της αιχμής κατά 2%, 4%, 6% και 8%.

5.2 Δεδομένα εισόδου

Για να υπολογίσουμε την εξέλιξη της θερμοκρασίας και τη συνολική ισχύ των συσκευών για όλο το 24ωρο, χρησιμοποιούμε έναν βρόχο που επαναλαμβάνει τους υπολογισμούς για κάθε πεντάλεπτο μίας ημέρας, δηλαδή για $t = 1$ έως $t = 288$, μέσω του MATLAB. Ο χωρισμός της ημέρας σε διαστήματα των 5 λεπτών συμβάλλει στην ταχύτητα εκτέλεσης των υπολογισμών.

Η πλειοψηφία των συσκευών (οικιακοί ψυγείοκαταψύκτες) που θεωρήσαμε, διαθέτει ονομαστική ισχύ της τάξεως των 150 – 200 W. Εξαιτίας, όμως, της υψηλής τιμής του dP_{target} , από προκαταρκτική εκτέλεση της μεθοδολογίας διαπιστώθηκε ότι για τις χρονικές περιόδους από $t = 212$ έως $t = 219$ (ώρες αιχμής) η προσέγγιση της καμπύλης-στόχου με την εφαρμογή ελέγχου μόνο σε οικιακές συσκευές είναι αδύνατον να επιτευχθεί. Για τον λόγο αυτόν (προκειμένου να επιτευχθεί κατά το δυνατόν μικρότερη απόκλιση μεταξύ των μεγθών P_{target} και P_{totalC}), θεωρούμε έναν αριθμό συσκευών που διαθέτουν υψηλή ονομαστική ισχύ, της τάξεως των 1500 – 2000 W κι έναν αριθμό συσκευών που διαθέτουν ονομαστική ισχύ της τάξεως των 850 – 1150 W. Οι συσκευές αυτές αποτελούν ψυγείοκαταψύκτες που προορίζονται για επαγγελματική χρήση.

Σύμφωνα με στοιχεία της ελληνικής στατιστικής αρχής (16), ο αριθμός των νοικοκυριών στην Κρήτη ανέρχεται στις 200.299. Υποθέτοντας ότι κάθε νοικοκυριό κατέχει τουλάχιστον έναν ψυγείοκαταψύκτη, προκύπτει το πλήθος των συσκευών αυτών. Από αυτούς θεωρήσαμε ότι μόνο το 95,8% (191.892) συμμετέχει σε πρόγραμμα διαχείρισης ζήτησης.

Επιπλέον, θεωρήσαμε 2.703 συσκευές ενδιάμεσης ισχύος και 5.405 συσκευές υψηλής ισχύος, οι οποίες βρίσκονται εγκατεστημένες σε επαγγελματικούς χώρους (σούπερ μάρκετ, εστιατόρια, ξενοδοχεία, βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων, κ.α.).¹

¹ Τα μεγέθη αυτά δεν έχουν προκύψει από κάποια διαδικασία απογραφής, αλλά αποτελούν απλές παραδοχές. Θα μπορούσε, όμως, να θεωρηθεί ότι αντανακλούν έστω και μερικώς την πραγματικότητα, καθώς:

- 1) Σύμφωνα με στοιχεία της ICAP (17), στην Κρήτη κατά το έτος 2006 υπήρχαν 191 καταστήματα σούπερ μάρκετ.
- 2) Σύμφωνα με στοιχεία του Συνδέσμου Ελληνικών Τουριστικών Επιχειρήσεων (18), στην Κρήτη κατά το έτος 2012 υπήρχαν 1.529 ξενοδοχειακές επιχειρήσεις.

5.2.1 Φυσιολογική εξέλιξη της θερμοκρασίας και υπολογισμός συνολικής ισχύος χωρίς έλεγχο θερμοστατικών φορτίων

Οι τιμές με τις οποίες αρχικοποιούνται οι παράμετροι που υπεισέρχονται στον τύπο (4.1) για τον υπολογισμό της εσωτερικής θερμοκρασίας μιας συσκευής ανήκουν σε ένα ορισμένο εύρος τιμών, το οποίο παρατίθεται στον Πίνακα 5-1.

Το γεγονός ότι οι συσκευές υψηλότερης ισχύος έχουν μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα και θερμική μάζα λαμβάνεται υπόψη κατά την εκτέλεση των υπολογισμών με τον πολλαπλασιασμό των παραμέτρων A και m_c με κατάλληλο πολλαπλασιαστή:

- i. Για συσκευές χαμηλής ισχύος (150 – 200W με μέσο όρο 175W) ο πολλαπλασιαστής λαμβάνει τιμή 1.
- ii. Για συσκευές μέσης ισχύος (850 – 1150W με μέσο όρο 1425W) ο πολλαπλασιαστής λαμβάνει τιμή 1425/175.
- iii. Για συσκευές μέσης ισχύος (850 – 1150W με μέσο όρο 1750W) ο πολλαπλασιαστής λαμβάνει τιμή 1750/175.

Προκειμένου να εξαχθεί μια εξομαλυμένη καμπύλη με τις ενδιαμέσες τιμές για τα ανοίγματα της πόρτας της συσκευής που προκύπτουν από το Σχήμα 4-2, χρησιμοποιούμε γραμμική παρεμβολή. Τα δεδομένα που έχουν υπολογιστεί ανά ώρα, θα μετατρέψουμε σε δεδομένα ανά πεντάλεπτο. Θεωρούμε ότι κάθε άνοιγμα προκαλεί αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά 0,5 °C. Αυτή η τιμή επιλέχθηκε ύστερα από τη μελέτη των (12) και (13).

Πίνακας 5-1 – Εύρος τιμών για την αρχικοποίηση παραμέτρων

Αρχική τιμή εσωτερικής θερμοκρασίας, $\theta(0)$ (°C)	~U(3, 5)
Θερμοκρασία περιβάλλοντος, θ_0 (°C)	~U(15, 17)
Χρονική σταθερά, T_c	~U(1,326, 2,778)
Θερμοχωρητικότητα, A (W/°C)	10,563
Συντελεστής απόδοσης, η	1,5
Ονομαστική ισχύς συσκευής, P_r (W)	~U(150, 200) & ~U(850, 1150) & ~U(1500, 2000)
Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία, Θ_{min} (°C)	~U(2,7, 3,3)
Ελάχιστη επιτρεπτή θερμοκρασία, Θ_{max} (°C)	~U(7,2, 8,8)
Αρχική κατάσταση λειτουργίας, $X(0)$	0 ή 1
Ποσοστό επί των ανοιγμάτων πόρτας	~U(80%, 120%)

3) Είναι θεμιτό να υποθέσουμε ότι κάθε μία από αυτές τις επιχειρήσεις κατέχει παραπάνω από μία ηλεκτρικές συσκευές του είδους που εξετάζουμε.

5.2.2 Εξέλιξη θερμοκρασίας και υπολογισμός ισχύος με εφαρμογή ελέγχου των θερμοστατικών φορτίων

Προκειμένου να αποτυπωθούν όσο το δυνατόν καλύτερα οι προτιμήσεις διαφόρων τύπων καταναλωτών, η παράμετρος του μέγιστου πλήθους εξαναγκασμένων αλλαγών κατάστασης αρχικοποιείται σε μια τυχαία τιμή πριν την έναρξη των υπολογισμών και μπορεί να παίρνει τιμές από 60 έως 90.

Η παράμετρος του ελάχιστου πλήθους χρονικών περιόδων χωρίς εξαναγκασμένη αλλαγή κατάστασης αρχικοποιείται σε μια τυχαία τιμή πριν την έναρξη των υπολογισμών και μπορεί να παίρνει τιμές από 0 έως 3.

Η παράμετρος control, που δηλώνει αν έχει προηγηθεί έλεγχος της συσκευής στην αμέσως προηγούμενη χρονική περίοδο, λαμβάνει την τιμή 0 ή 1 και αρχικοποιείται με τυχαίο τρόπο.

Οι τιμές του SystemLoad (Παρ. 4.3) ανάγονται στην χρονική κλίμακα των 5 λεπτών, όπως και τα υπόλοιπα δεδομένα που εκφράζονται συναρτήσει του χρόνου, με γραμμική παρεμβολή.

Στην Παρ. 4.3 ορίσαμε ως $\epsilonpsilon1$ τη μέγιστη ονομαστική ισχύ που μπορεί να έχει μία συσκευή χαμηλής ισχύος, που αποτελούν την πλειοψηφία των συσκευών. Στην Παρ. 4.3.3.2 ορίσαμε ως ανεκτή απόκλιση $\epsilonpsilon2$ τη μέγιστη τιμή της ονομαστικής ισχύος που θεωρήσαμε ότι μπορεί να διαθέτει μια συσκευή υψηλής ισχύος. Συνεπώς, ισχύει ότι:

$$\epsilonpsilon1 = 200 W \quad (5.1)$$

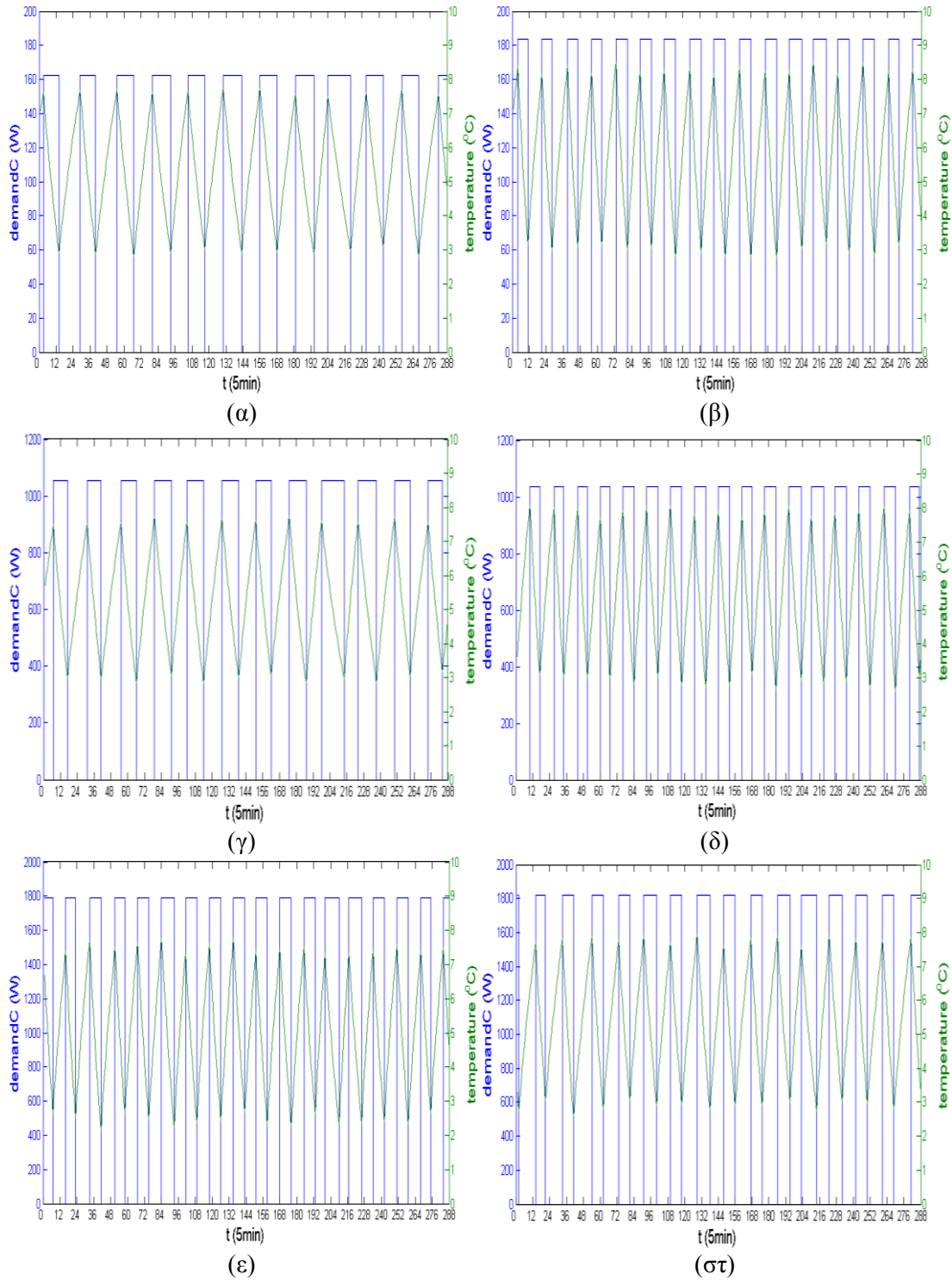
$$\epsilonpsilon2 = 2000 W$$

5.3 Αποτελέσματα

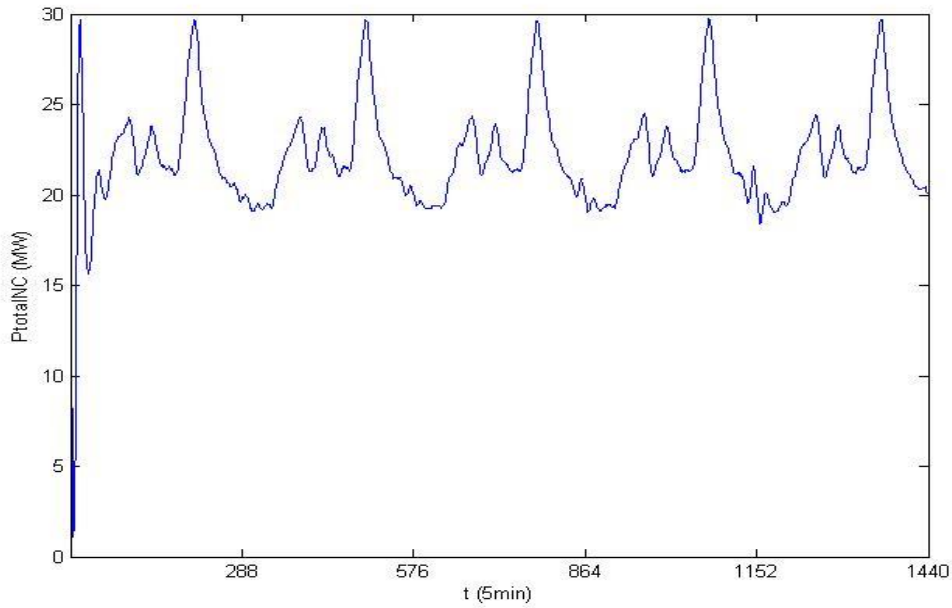
5.3.1 Φυσιολογική εξέλιξη θερμοκρασίας και κατάστασης θερμοστατικών φορτίων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού της φυσιολογικής εξέλιξης της εσωτερικής θερμοκρασίας και της ζήτησης των συσκευών.

Στο Σχήμα 5-1 απεικονίζονται από κοινού η εξέλιξη της εσωτερικής θερμοκρασίας και της ζήτησης κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, για έξι συσκευές με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Σύμφωνα και με τις αρχές λειτουργίας μιας συσκευής ψύξης, όταν η συσκευή καταναλώνει ισχύ, η θερμοκρασία του θαλάμου ψύξης μειώνεται.

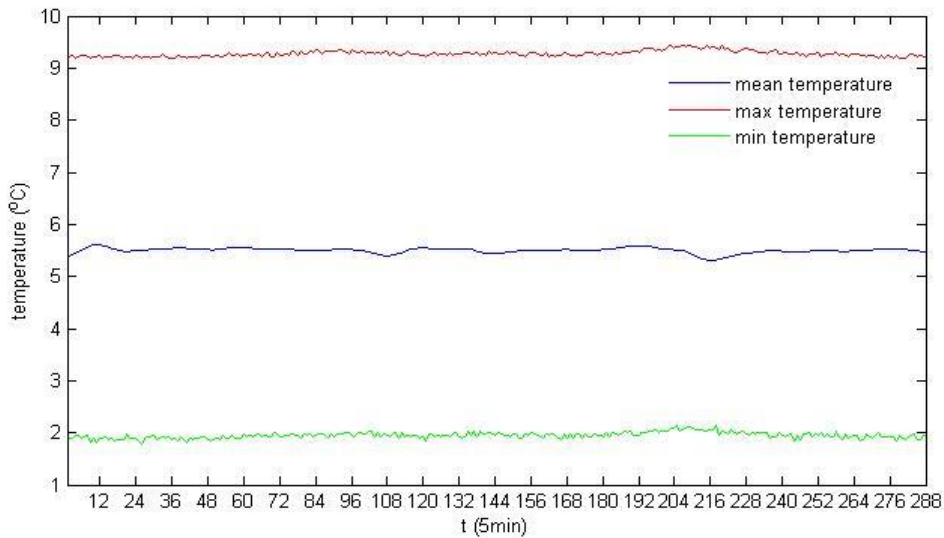


Σχήμα 5-1 – Φυσιολογική εξέλιξη της εσωτερικής θερμοκρασίας και της ζήτησης για διάφορους τύπους συσκευών χωρίς εφαρμογή εξαναγκασμένης αλλαγής κατάστασης: (α) $Pr = 162W$, $X(1) = 1$, $T_c = 2,504h$, $A = 10,563W/^{\circ}C$, $\theta_{min} = 3,1^{\circ}C$, $\theta_{max} = 7,5^{\circ}C$ (β) $Pr = 184W$, $X(1) = 0$, $T_c = 1,702h$, $A = 10,563W/^{\circ}C$, $\theta_{min} = 3,2^{\circ}C$, $\theta_{max} = 8,2^{\circ}C$ (γ) $Pr = 1053W$, $X(1) = 0$, $T_c = 2,762h$, $A = 60,36W/^{\circ}C$, $\theta_{min} = 3,1^{\circ}C$, $\theta_{max} = 7,4^{\circ}C$ (δ) $Pr = 1037W$, $X(1) = 1$, $T_c = 1,736h$, $A = 60,36W/^{\circ}C$, $\theta_{min} = 3,1^{\circ}C$, $\theta_{max} = 7,7^{\circ}C$ (ε) $Pr = 1790W$, $X(1) = 1$, $T_c = 1,694h$, $A = 105,63W/^{\circ}C$, $\theta_{min} = 2,7^{\circ}C$, $\theta_{max} = 7,3^{\circ}C$ (στ) $Pr = 1821W$, $X(1) = 0$, $T_c = 2,003h$, $A = 105,63W/^{\circ}C$, $\theta_{min} = 3,1^{\circ}C$, $\theta_{max} = 7,6^{\circ}C$.



Σχήμα 5-2 – Χρονολογική καμπύλη ζήτησης όλων των συσκευών.

Στο Σχήμα 5-2 η χρονολογική καμπύλη ζήτησης κατασκευάστηκε μετά από υπολογισμό της ζήτησης για πέντε συνεχόμενες ημέρες ώστε να προσομοιωθεί η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Παρατηρούμε ότι τις ώρες που σημειώνεται αυξημένος αριθμός διαταραχών εξαιτίας των ανοιγμάτων της πόρτας της συσκευής αυξάνεται και η συνολική ζήτηση.

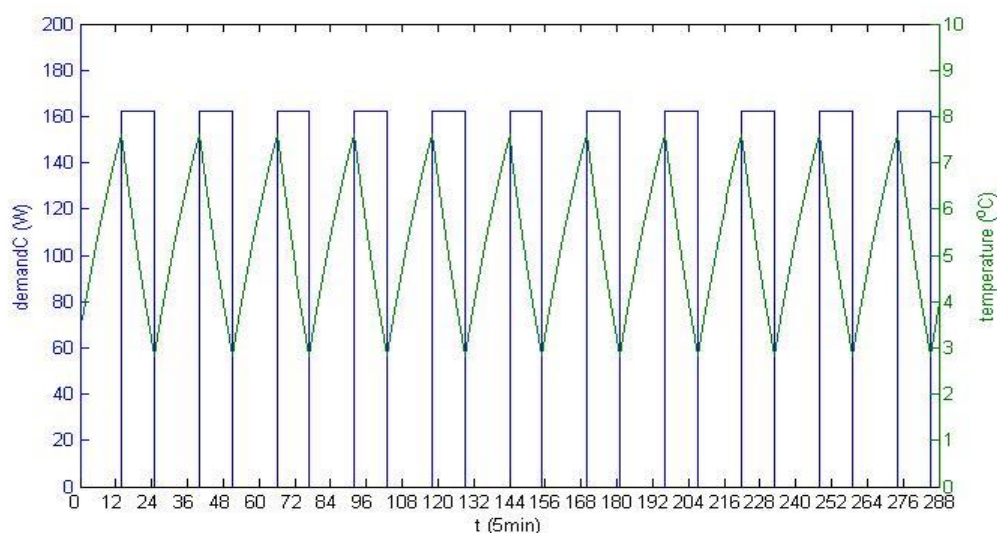


Σχήμα 5-3 – Χρονολογική καμπύλη του μέσου όρου θερμοκρασίας όλων των συσκευών.

Στο Σχήμα 5-3 παρατηρούμε ότι η μέση θερμοκρασία κυμαίνεται από 5 έως 6°C. Στις ώρες αιχμής, κατά τις οποίες παρατηρείται και μεγάλος αριθμός ανοιγμάτων της πόρτας, παρατηρείται μικρή αύξηση της ελάχιστης και της μέγιστης θερμοκρασίας.

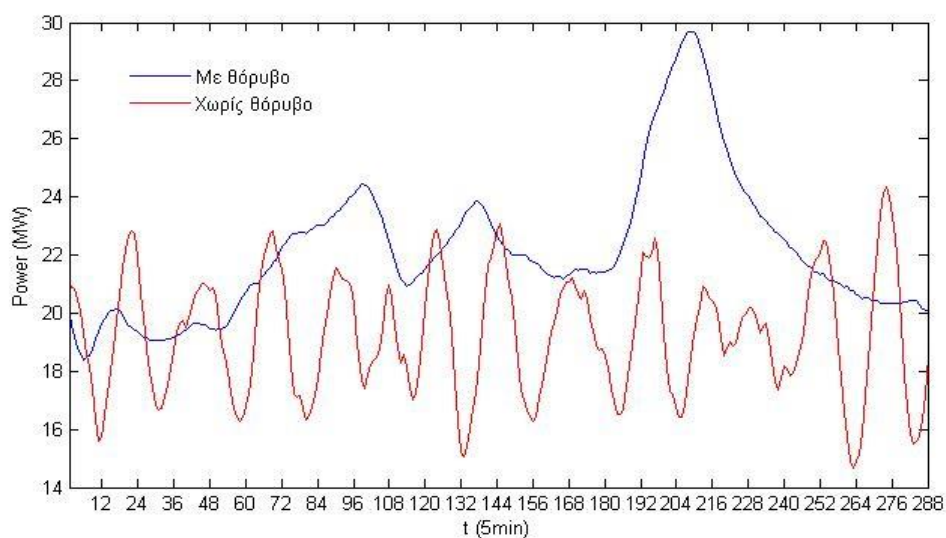
Παρακάτω, παρουσιάζονται διαγράμματα που αφορούν τον υπολογισμό της φυσιολογικής εξέλιξης της θερμοκρασίας και της συνολικής ζήτησης, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο θόρυβος που αντιστοιχεί στα ανοίγματα της πόρτας της συσκευής.

Στο Σχήμα 5-4 παρουσιάζεται από κοινού η εξέλιξη της εσωτερικής θερμοκρασίας και της ζήτησης της συσκευής χαμηλής ισχύος του Σχήματος 5-1(α).



Σχήμα 5-4 – Φυσιολογική εξέλιξη της εσωτερικής θερμοκρασίας και της ζήτησης για συσκευή χαμηλής ισχύος του Σχήματος 5-1(α) χωρίς εφαρμογή εξαναγκασμένης αλλαγής κατάστασης και χωρίς θόρυβο: $P_r = 162\text{W}$, $X(1) = 1$, $T_c = 2,504\text{h}$, $A = 10,563\text{W}/^\circ\text{C}$, $\theta_{\min} = 3,1^\circ\text{C}$, $\theta_{\max} = 7,5^\circ\text{C}$.

Στο Σχήμα 5-5 απεικονίζονται από κοινού η συνολική ζήτηση όλων των συσκευών λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη θορύβου και χωρίς την ύπαρξη θορύβου. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της συνολικής ζήτησης είναι μικρότερη στη δεύτερη περίπτωση, με τη διαφορά να προσεγγίζει τα 6 MW. Επιπλέον, λόγω της απουσίας διαταραχών δεν παρουσιάζεται απότομη αύξηση κατά τις απογευματινές ώρες, όπως στην περίπτωση ύπαρξης θορύβου.

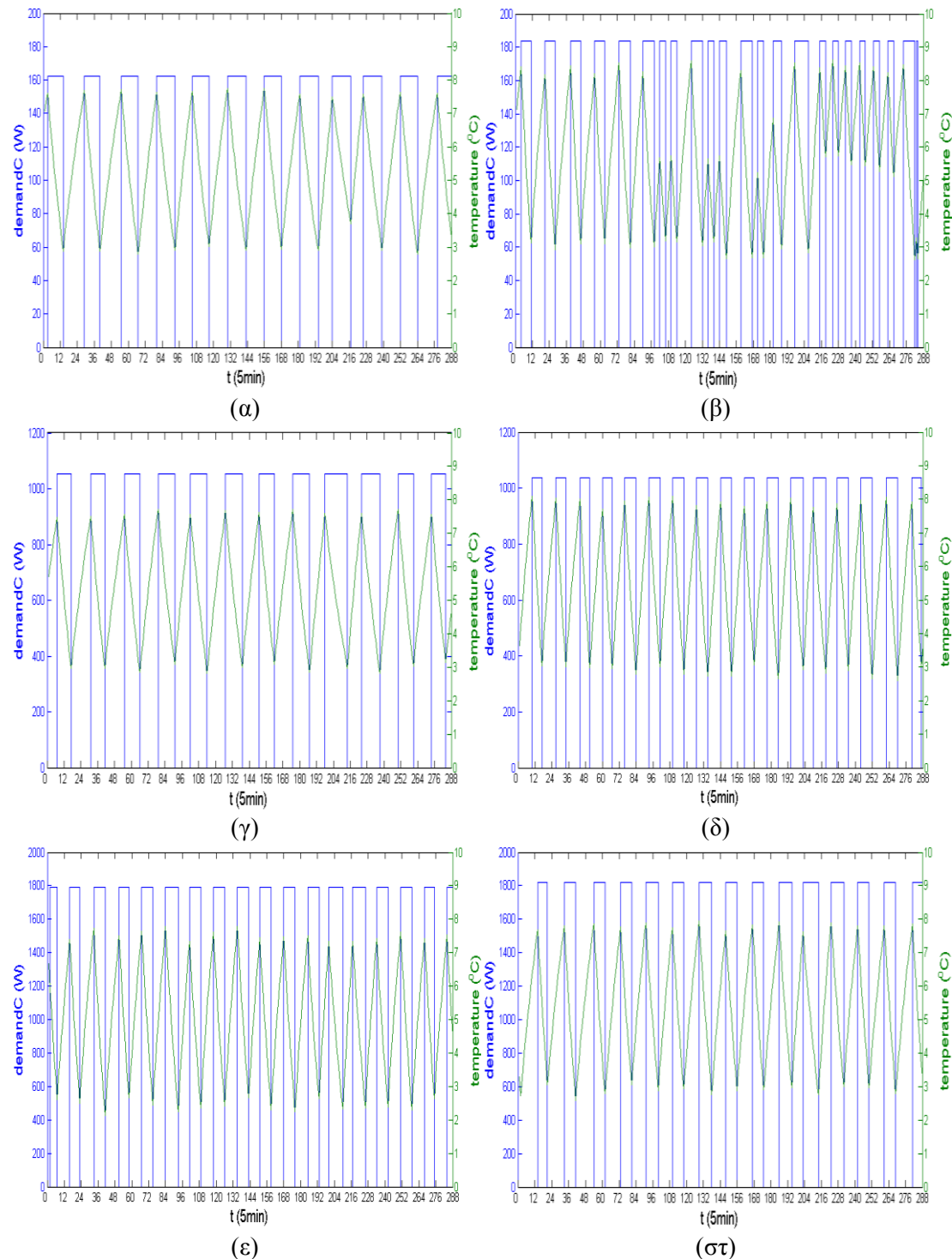


Σχήμα 5-5 – Συνολική ζήτηση των συσκευών κατά τη διάρκεια μιας ημέρας με και χωρίς θόρυβο.

5.3.2 Εφαρμογή ελέγχου κατάστασης θερμοστατικών φορτίων

Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή ελέγχου της κατάστασης των συσκευών ψύξης, για τα επιλεγμένα σενάρια μείωσης της αιχμής. Ο έλεγχος εφαρμόζεται μέσω του αλγορίθμου που παρουσιάστηκε στο Κεφ. 4.

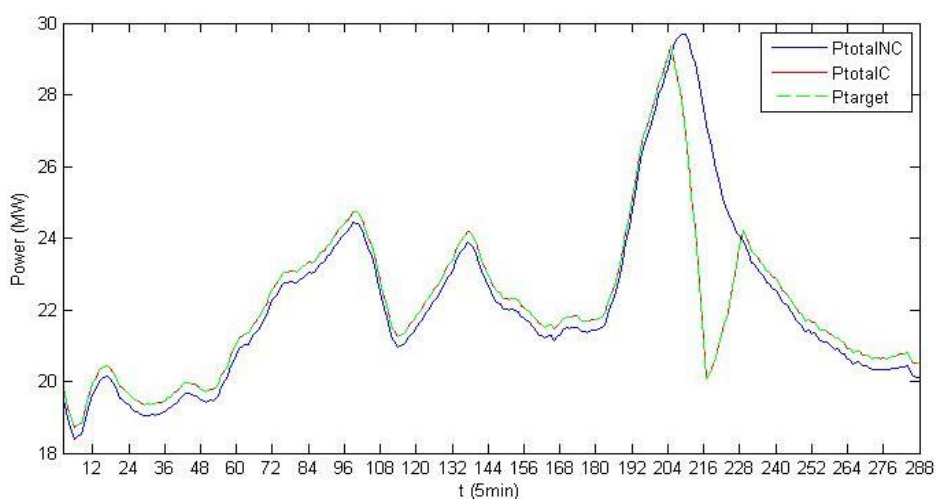
Σενάριο MA - 2%



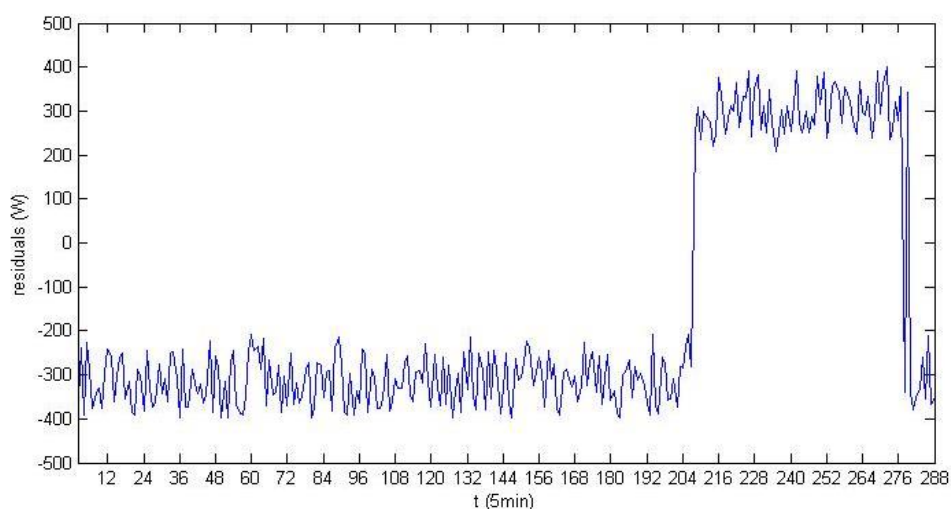
Σχήμα 5-6 – Εξέλιξη της εσωτερικής θερμοκρασίας και της ζήτησης για τους τύπους των συσκευών με εφαρμογή εξαναγκασμένης αλλαγής κατάστασης: (α) control(1) = 0, maxp = 69, minp = 1 (β) control(1) = 1, maxp = 82, minp = 3 (γ) control(1) = 1, maxp = 70, minp = 1 (δ) control(1) = 0, maxp = 84, minp = 0 (ε) control(1) = 1, maxp = 81, minp = 3 (στ) control(1) = 0, maxp = 62, minp = 2.

Στο Σχήμα 5-6 απεικονίζονται από κοινού η εξέλιξη της εσωτερικής θερμοκρασίας και της ζήτησης κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, για τις 6 συσκευές με διαφορετικά χαρακτηριστικά, για το σενάριο μείωσης αιχμής κατά 2%. Στο Σχήμα 5-6(β) παρατηρείται ότι κατά τις ώρες αιχμής η συσκευή υφίσταται αλληπάλληλες αλλαγές της κατάστασης λειτουργίας της και ότι η εσωτερική θερμοκρασία κυμαίνεται σε επίπεδα άνω των 5°C, στο διάστημα αυτό, αλλά εντός των ορίων μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας που αντιστοιχούν στη συσκευή.

Στο Σχήμα 5-7 απεικονίζονται μαζί η καμπύλη συνολικής ζήτησης των συσκευών χωρίς εφαρμογή ελέγχου ($P_{totalNC}$) και η καμπύλη συνολικής ζήτησης μετά την εφαρμογή ελέγχου (P_{totalC}) με στόχο την μείωση της αιχμής του συστήματος κατά 2%. Επίσης απεικονίζεται και η καμπύλη στόχος που έχει υπολογισθεί (P_{target}). Διαπιστώνουμε ότι για το συγκεκριμένο σενάριο ο στόχος επιτυγχάνεται, καθώς στο Σχήμα 5-8 παρατηρούμε ότι η απόκλιση από το στόχο κυμαίνεται εντός των επιθυμητών ορίων. Η επιθυμητή απόκλιση καθορίστηκε στο Κεφ. 4 και την Παρ. 5.2.2 και η τιμή της είναι $2 \cdot \epsilon_{1} = 400 \text{ W}$.

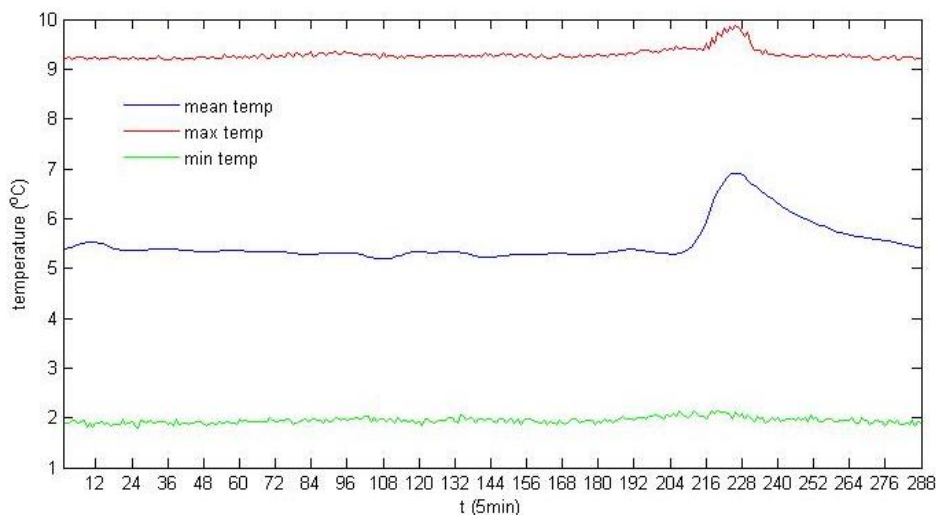


Σχήμα 5-7 – Σύγκριση της καμπύλης ισχύος του βασικού σεναρίου με το σενάριο μείωσης αιχμής 2%.



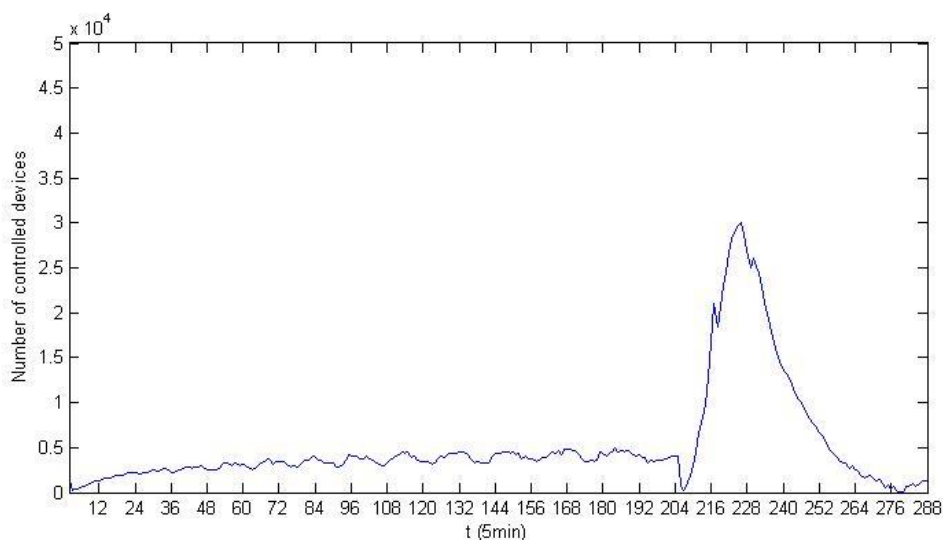
Σχήμα 5-8 – Απόκλιση της καμπύλης συνολικής ζήτησης των συσκευών από τον στόχο για το σενάριο μείωσης αιχμής 2%.

Στο Σχήμα 5-9 φαίνεται ότι ο μέσος όρος θερμοκρασίας, όπως και η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία αυξάνονται στις ώρες αιχμής. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στο εξαναγκασμένο κλείσιμο συσκευών που προκαλείται ώστε να μειωθεί η αιχμή του συστήματος και στον αυξημένο αριθμό διαταραχών της λειτουργίας εξαιτίας των ανοιγμάτων της πόρτας της συσκευής. Ο μέσος όρος της θερμοκρασίας, κατά τις ώρες αιχμής, προσεγγίζει τους 7°C.



Σχήμα 5-9 – Χρονολογική καμπύλη του μέσου όρου της θερμοκρασίας όλων των συσκευών για το σενάριο μείωσης αιχμής 2%.

Στο Σχήμα 5-10 αποτυπώνεται ο αριθμός των συσκευών που υφίσταται εξαναγκασμένη αλλαγή κατάστασης σε κάθε χρονική περίοδο. Είναι προφανές ότι εφόσον προσπαθούμε να επιτύχουμε μείωση της αιχμής μέσω του ελέγχου στις συσκευές, ο αριθμός αυτός είναι κατά πολύ αυξημένος κατά τη διάρκεια της αιχμής. Επίσης, παρά το γεγονός ότι από την χρονική στιγμή 230 περίπου και μετά δεν απαιτείται πλέον μείωση του φορτίου των συσκευών, καθώς η αιχμή του συστήματος έχει παρέλθει, εντούτοις απαιτείται η εφαρμογή ελέγχου ενός αρκετά μεγάλου πλήθους συσκευών (αν και βαίνει μειούμενο). Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο αν αναλογιστεί κανείς τον τρόπο λειτουργίας των συσκευών αυτής της κατηγορίας: καθώς κατά τις χρονικές στιγμές 201-216 απαιτείται μείωση του συνολικού τους φορτίου, ένα μεγάλο πλήθος από τις συσκευές θα υποστεί εξαναγκασμένη αλλαγή κατάστασης ώστε να μην καταναλώνουν ενέργεια ($X(t) = 0$), έως ότου οι ανάγκες τήρησης των ορίων της θερμοκρασίας του θαλάμου επιβάλλουν την επάνοδο της θερμοκρασίας στα επιτρεπτά επίπεδα μέσω της φυσιολογικής εξέλιξης της αλλαγής κατάστασης. Ως εκ τούτου, οι συσκευές που ελέγχθηκαν κατά τις ώρες αιχμής, θα πρέπει να τεθούν σε λειτουργία. Προκειμένου αυτή η επαναφορά του φορτίου να μην δημιουργήσει νέα αιχμή στη συνολική καμπύλη ζήτησης των συσκευών, άλλες συσκευές που είναι διαθέσιμες θα ελεγχθούν κατάλληλα.



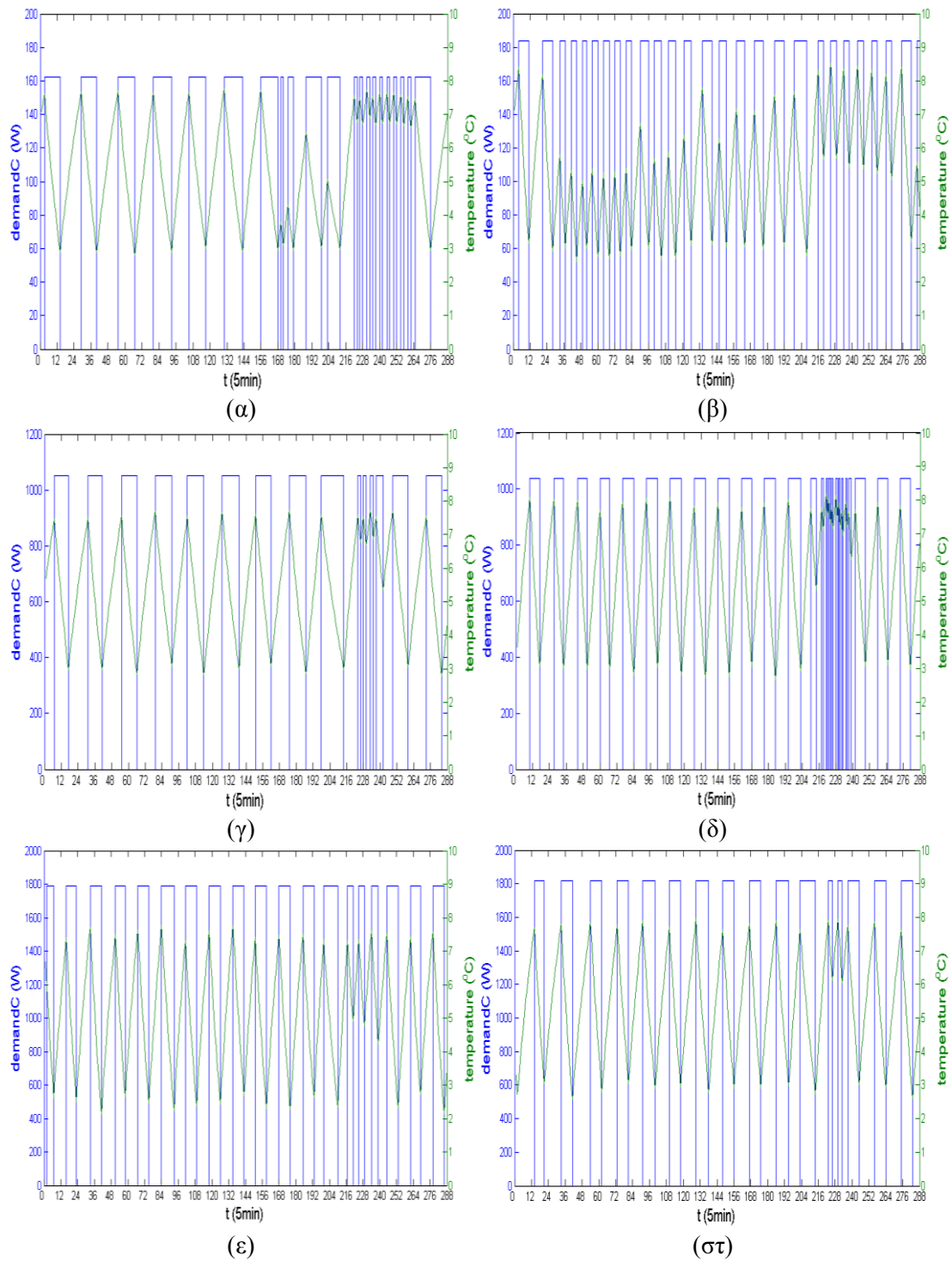
Σχήμα 5-10 – Χρονολογική καμπύλη του αριθμού των συσκευών που υφίστανται έλεγχο για το σενάριο μείωσης αιχμής 2%.

Σενάριο MA – 4%

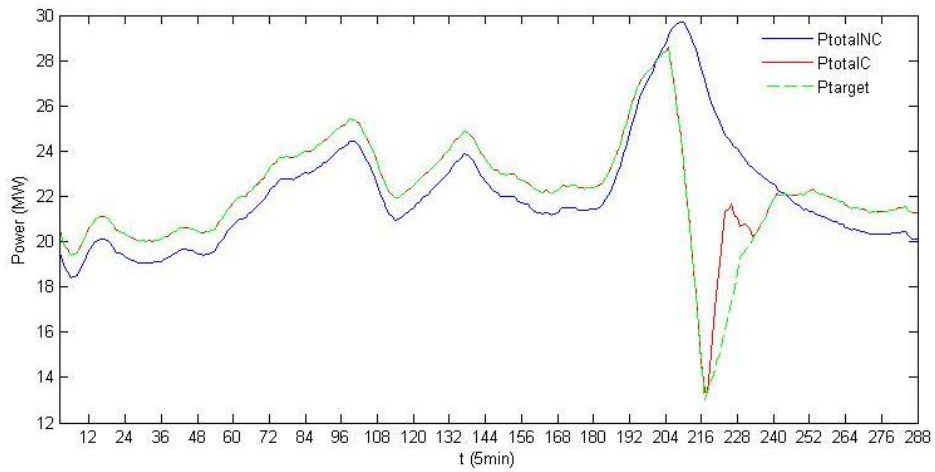
Στο Σχήμα 5-11 απεικονίζονται από κοινού η εξέλιξη θερμοκρασίας και της ζήτησης των συσκευών του Σχήματος 5-1 για το σενάριο μείωσης αιχμής 4%. Είναι φανερές οι αλλαγές κατάστασης που υφίστανται και οι συσκευές μέσης και υψηλής ισχύος προκειμένου να επιτευχθεί η προσέγγιση της καμπύλης στόχου. Επίσης, είναι αξιοσημείωτη η διαφορά στην εξέλιξη της θερμοκρασίας, σε σχέση με το σενάριο μείωσης 2%, της συσκευής του Σχήματος 5-11(α). Η εσωτερική της θερμοκρασία κυμαίνεται κατά την αιχμή γύρω από τους 7°C και παράλληλα υφίσταται πολλαπλές αλλαγές κατάστασης. Πολλαπλές αλλαγές κατάστασης παρατηρούνται και στο Σχήμα 5-11(δ) κατά τη διάρκεια της αιχμής.

Στο Σχήμα 5-12 γίνεται σύγκριση της καμπύλης συνολικής ζήτησης των συσκευών και της αντίστοιχης καμπύλης με την εφαρμογή ελέγχου για το σενάριο μείωσης αιχμής κατά 4%. Από τη μορφή της καμπύλης P_{totalC} συμπεραίνουμε ότι ο στόχος επιτυγχάνεται μέχρι την 6^η απογευματινή ώρα. Κατά την ώρα αυτή παρατηρούνται οι περισσότερες διαταραχές της λειτουργίας λόγω του μεγάλου αριθμού ανοιγμάτων της πόρτας. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με την προσπάθεια να επιτευχθεί μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης της αιχμής, οδηγούν στη απόκλιση από τον στόχο σε αυτό το χρονικό διάστημα. Μετά την παρέλευση της αιχμής, η απόκλιση από την καμπύλη στόχο, κυμαίνεται ξανά στα επιθυμητά επίπεδα.

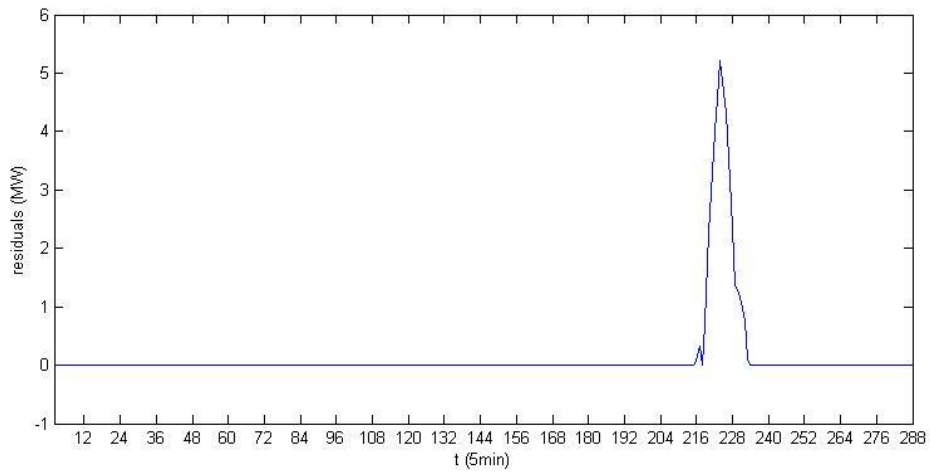
Στο Σχήμα 5-13 βλέπουμε τη μέγιστη τιμή της απόκλισης της καμπύλης συνολικής ζήτησης από τον στόχο. Η τιμή αυτή προσεγγίζει τα 5,5 MW. Στο Σχήμα 5-14 παρουσιάζονται οι μικρότερες τιμές της απόκλισης από την καμπύλη στόχο. Διαπιστώνουμε ότι κυμαίνονται από 200 έως 400 W, δηλαδή η απόκλιση λαμβάνει τιμές που προσεγγίζουν την ονομαστική ισχύ μιας συσκευής χαμηλής ισχύος. Συνεπώς, η απόκλιση αυτή είναι αποδεκτή.



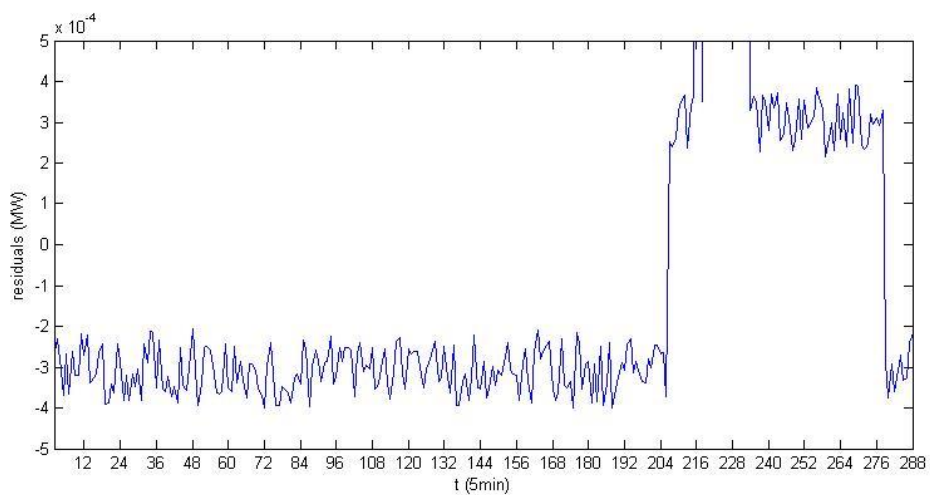
Σχήμα 5-11 – Εξέλιξη της εσωτερικής θερμοκρασίας και της ζήτησης για τους τύπους των συσκευών με εφαρμογή εξαναγκασμένης αλλαγής κατάστασης: (α) control(1) = 0, maxp = 69, minp = 1 (β) control(1) = 1, maxp = 82, minp = 3 (γ) control(1) = 1, maxp = 70, minp = 1 (δ) control(1) = 0, maxp = 84, minp = 0 (ε) control(1) = 1, maxp = 81, minp = 3 (στ) control(1) = 0, maxp = 62, minp = 2.



Σχήμα 5-12 – Σύγκριση της καμπύλης ισχύος του βασικού σεναρίου με το σενάριο μείωσης αιχμής 4%.

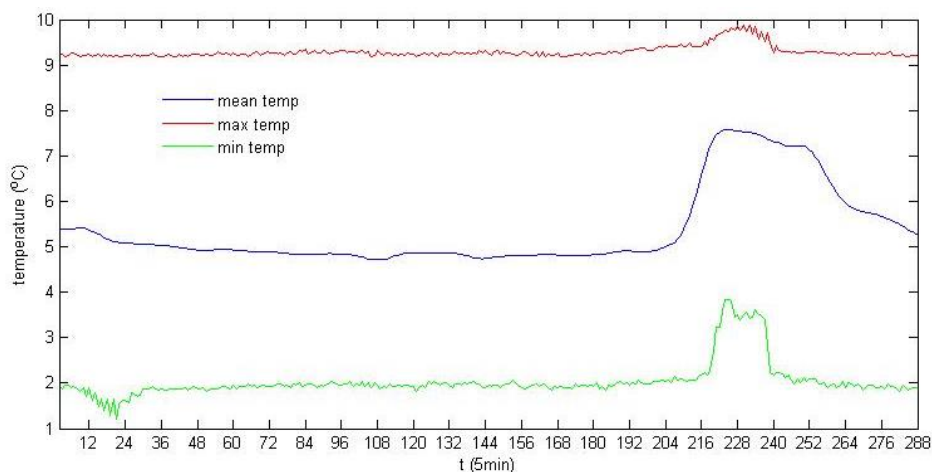


Σχήμα 5-13 – Απεικόνιση της μέγιστης τιμής της απόκλισης της καμπύλης συνολικής ζήτησης των συσκευών από τον στόχο για το σενάριο μείωσης αιχμής 4%.



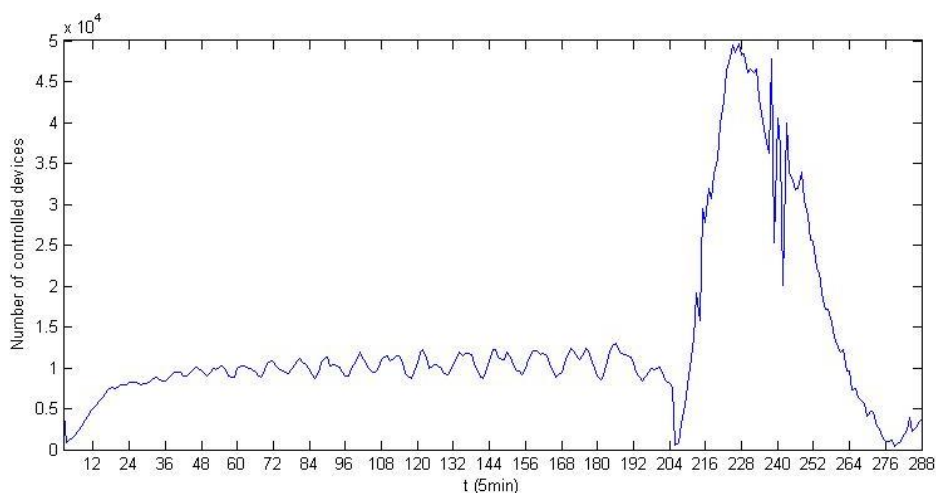
Σχήμα 5-14 – Απεικόνιση των μικρότερων τιμών της απόκλισης της καμπύλης συνολικής ζήτησης των συσκευών από τον στόχο για το σενάριο μείωσης αιχμής 4%.

Στο Σχήμα 5-15, παρατηρούμε ακόμα μεγαλύτερη αύξηση του μέσου όρου της θερμοκρασίας των συσκευών κατά τη διάρκεια της αιχμής σε σχέση με το σενάριο MA – 2%, αλλά και αύξηση της ελάχιστης θερμοκρασίας, αφού ελέγχεται μεγαλύτερος αριθμός συσκευών ώστε να καλυφθεί ο στόχος (κλείνουν ώστε να μειωθεί η συνολική ζήτηση). Ο μέσος όρος της θερμοκρασίας παρατηρείται ότι ξεπερνά και τους 7°C.



Σχήμα 5-15 – Χρονολογική καμπύλη του μέσου όρου της θερμοκρασίας όλων των συσκευών για το σενάριο μείωσης αιχμής 4%.

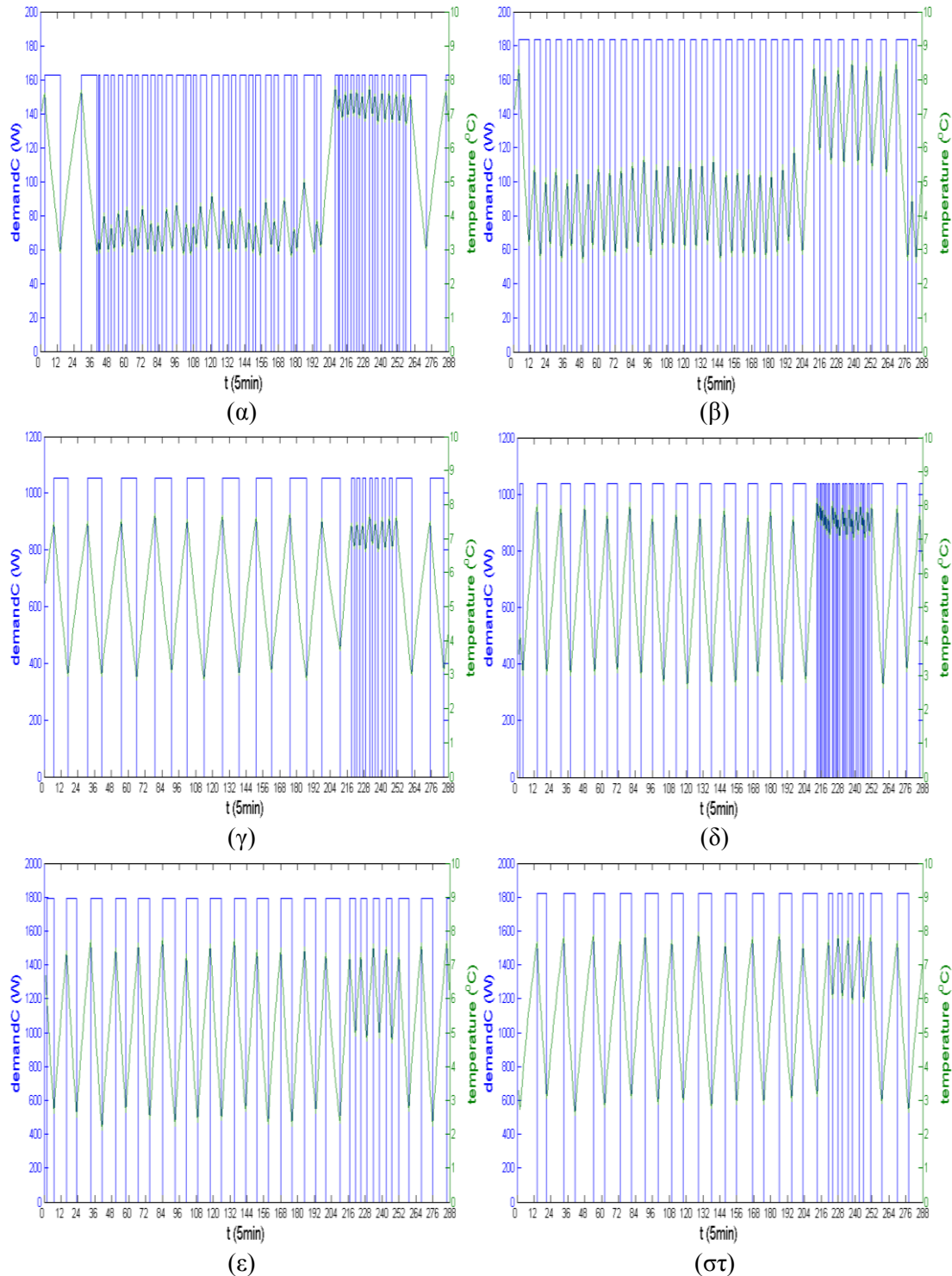
Στο Σχήμα 5-16 είναι εμφανής η αύξηση του αριθμού των συσκευών που υφίστανται έλεγχο σε κάθε χρονική περίοδο και προσεγγίζει τις 50.000 συσκευές κατά τις ώρες που απαιτείται μεγάλη μείωση στη συνολική ζήτηση. Δηλαδή, σχεδόν το ¼ των συσκευών υπόκειται σε εξαναγκασμένη αλλαγή κατάστασης χωρίς όμως αυτό να είναι αρκετό, όπως φαίνεται και από την μεγάλη απόκλιση από τον στόχο που σημειώνεται κατά τις χρονικές στιγμές 220-235 (Σχήμα 5-12 και Σχήμα 5-13). Οι υπόλοιπες συσκευές είναι αδύνατον να υποστούν εξαναγκασμένη αλλαγή κατάστασης, ώστε να συνεισφέρουν στην προσπάθεια επίτευξης του στόχου, καθώς δεν τους το επιτρέπουν οι τεθέντες περιορισμοί (άνω και κάτω όρια θερμοκρασίας, μέγιστο πλήθος αλλαγών κατάστασης, ελάχιστο πλήθος χρονικών περιόδων χωρίς αλλαγή κατάστασης).



Σχήμα 5-16 – Χρονολογική καμπύλη του αριθμού των συσκευών που υφίστανται έλεγχο για το σενάριο μείωσης αιχμής 4%.

Σενάριο MA – 6%

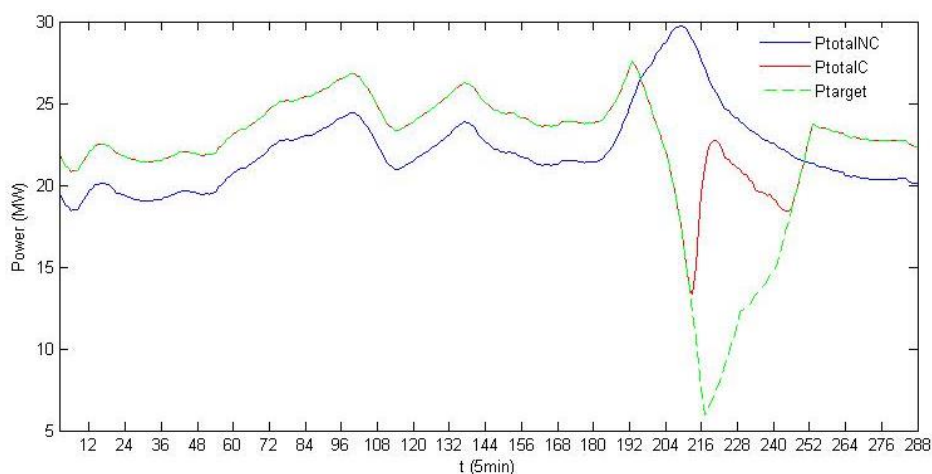
Στο Σχήμα 5-17 απεικονίζονται από κοινού η εξέλιξη θερμοκρασίας και της ζήτησης των συσκευών του Σχήματος 5-1 για το σενάριο μείωσης αιχμής κατά 6%. Παρατηρούμε ότι αυξάνεται ο αριθμός των αλλαγών κατάστασης που υφίστανται οι συσκευές μέσης και υψηλής ισχύος, προκειμένου να επιτευχθεί η προσέγγιση της καμπύλης στόχου.



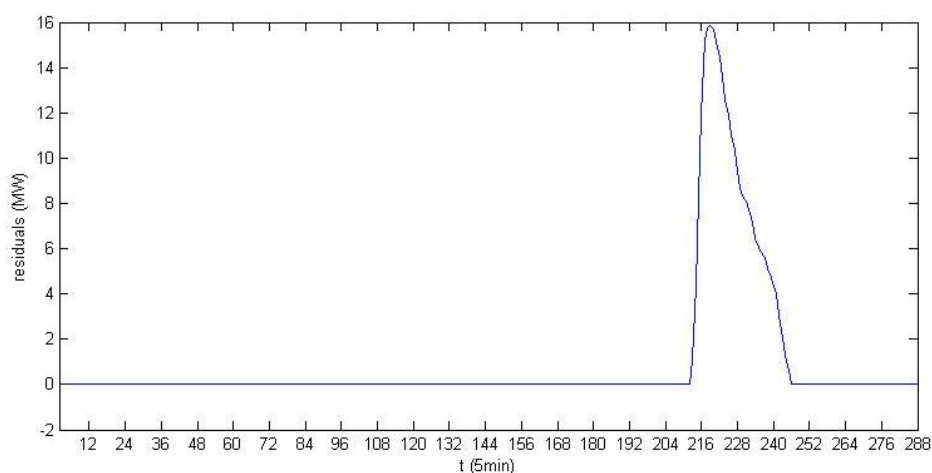
Σχήμα 5-17 – Εξέλιξη της εσωτερικής θερμοκρασίας και της ζήτησης για τους τύπους των συσκευών με εφαρμογή εξαναγκασμένης αλλαγής κατάστασης: (α) control(1) = 0, maxp = 69, minp = 1 (β) control(1) = 1, maxp = 82, minp = 3 (γ) control(1) = 1, maxp = 70, minp = 1 (δ) control(1) = 0, maxp = 84, minp = 0 (ε) control(1) = 1, maxp = 81, minp = 3 (στ) control(1) = 0, maxp = 62, minp = 2.

Στο Σχήμα 5-18 γίνεται σύγκριση της καμπύλης συνολικής ζήτησης των συσκευών και της αντίστοιχης καμπύλης με την εφαρμογή ελέγχου για το σενάριο μείωσης αιχμής 6%. Από τη μορφή της καμπύλης P_{totalC} συμπεραίνουμε ότι ο στόχος επιτυγχάνεται μέχρι την 6^η απογευματινή ώρα. Κατά την ώρα αυτή παρατηρούνται οι περισσότερες διαταραχές της λειτουργίας λόγω του μεγάλου αριθμού ανοιγμάτων της πόρτας. Ωστόσο υπάρχει απαίτηση να επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης της αιχμής. Γι' αυτό παρατηρείται μεγάλη απόκλιση από τον στόχο σε αυτό το χρονικό διάστημα. Μετά την παρέλευση της αιχμής, η απόκλιση από την καμπύλη στόχο, κυμαίνεται ξανά στα επιθυμητά επίπεδα.

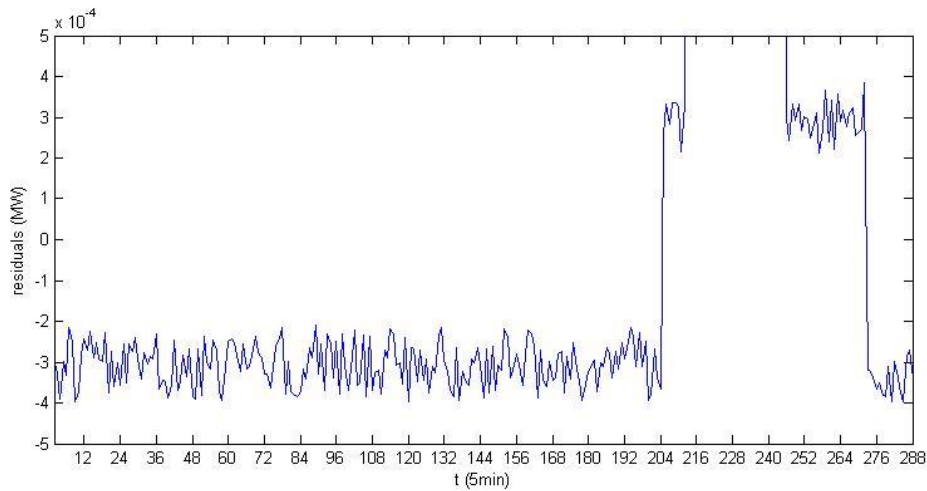
Στο Σχήμα 5-19 βλέπουμε τη μέγιστη τιμή της απόκλισης της καμπύλης συνολικής ζήτησης από τον στόχο. Η τιμή αυτή προσεγγίζει τα 16 MW. Στο Σχήμα 5-20 παρουσιάζονται οι μικρότερες τιμές της απόκλισης από την καμπύλη στόχο. Διαπιστώνουμε ότι κυμαίνονται από 200 έως 400 W, δηλαδή η απόκλιση λαμβάνει τιμές που προσεγγίζουν την ονομαστική ισχύ μιας συσκευής χαμηλής ισχύος. Συνεπώς, η απόκλιση αυτή είναι αποδεκτή.



Σχήμα 5-18 – Σύγκριση της καμπύλης ισχύος του βασικού σεναρίου με το σενάριο μείωσης αιχμής 6%.

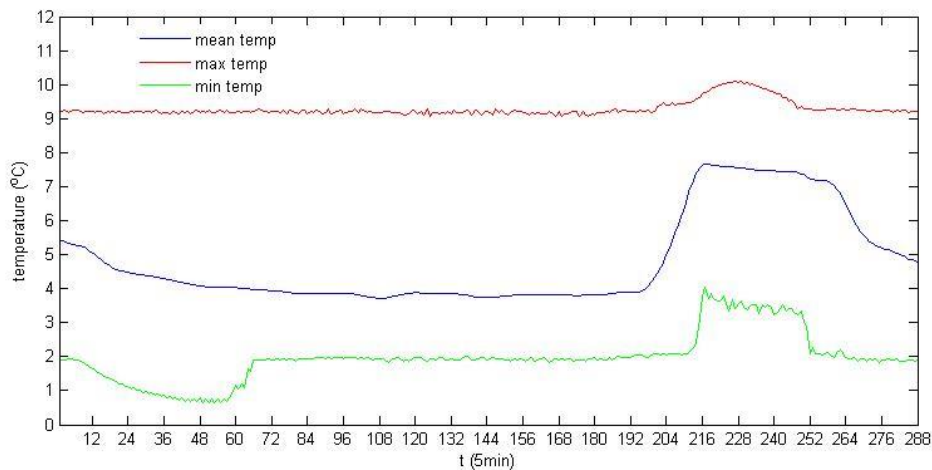


Σχήμα 5-19 – Απεικόνιση της μέγιστης τιμής της απόκλισης της καμπύλης συνολικής ζήτησης των συσκευών από τον στόχο για το σενάριο μείωσης αιχμής 6%.



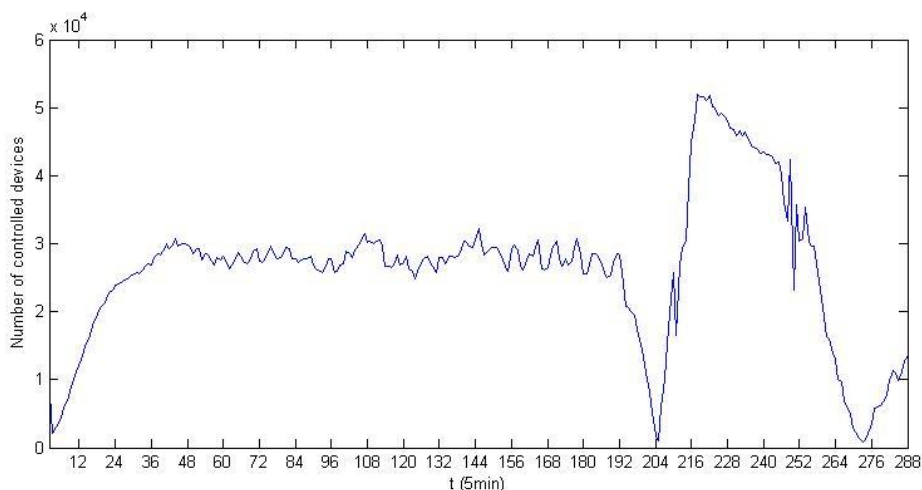
Σχήμα 5-20 – Απεικόνιση των μικρότερων τιμών της απόκλισης της καμπύλης συνολικής ζήτησης των συσκευών από τον στόχο για το σενάριο μείωσης αιχμής 6%.

Στο Σχήμα 5-21, παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος της θερμοκρασίας των συσκευών καθυστερεί περισσότερο, μετά την αιχμή, να επανέλθει στα πρότερα επίπεδα, σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια. Επίσης, παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση της ελάχιστης και της μέγιστης θερμοκρασίας, αφού ελέγχεται μεγαλύτερος αριθμός συσκευών ώστε να καλυφθεί ο στόχος (κλείνουν ώστε να μειωθεί η συνολική ζήτηση). Ο μέσος όρος της θερμοκρασίας παρατηρείται ότι ξεπερνά και τους 7°C κατά την αιχμή, ενώ λαμβάνει αρκετές τιμές κάτω των 5°C τις ώρες εκτός αιχμής. Η ελάχιστη θερμοκρασία εμφανίζει μείωση τις πέντε πρώτες ώρες της ημέρας, αφού για να μετατοπιστεί το φορτίο εκτός αιχμής, ελέγχονται συσκευές (ανοίγουν) έτσι ώστε να αυξηθεί η συνολική ζήτηση εκτός αιχμής.



Σχήμα 5-21 – Χρονολογική καμπύλη του μέσου όρου της θερμοκρασίας όλων των συσκευών για το σενάριο μείωσης αιχμής 6%.

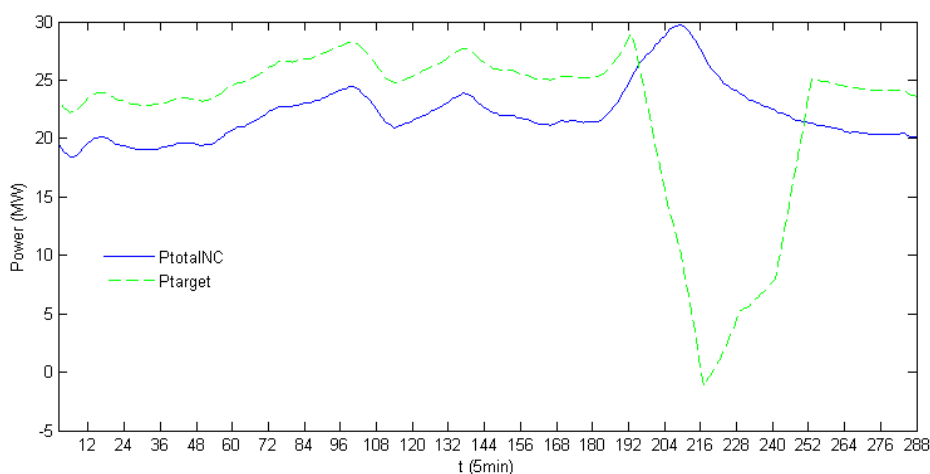
Στο Σχήμα 5-22 παρατηρείται ότι ο αριθμός των συσκευών που υφίστανται έλεγχο σε κάθε χρονική περίοδο ξεπερνά τις 50.000 κατά τις ώρες αιχμής. Για τις ώρες εκτός αιχμής, το πλήθος των συσκευών που ελέγχονται έχει αυξηθεί σε σύγκριση με τα προηγούμενα σενάρια. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η απαιτούμενη αύξηση του φορτίου κατά τις ώρες εκτός αιχμής είναι υψηλότερη και, συνεπώς, ο έλεγχος θα εφαρμοστεί σε περισσότερες συσκευές.



Σχήμα 5-22 – Χρονολογική καμπύλη του αριθμού των συσκευών που υφίστανται έλεγχο για το σενάριο μείωσης αιχμής 6%.

Σενάριο MA – 8%

Υπολογίζοντας την καμπύλη στόχο P_{target} , όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 4.3.1, για το σενάριο μείωσης αιχμής κατά 8%, διαπιστώνουμε ότι, κατά τις ώρες αιχμής του φορτίου του συστήματος, αυτή λαμβάνει και αρνητικές τιμές (Σχήμα 5-23). Συνεπώς, δε προχωρούμε στην υλοποίηση αυτού του σεναρίου, διότι οι αρνητικές τιμές μεταφράζονται σε παραγωγή ενέργειας, κατάσταση που είναι αδύνατον να επιτευχθεί από συσκευές που καταναλώνουν ενέργεια.



Σχήμα 5-23 – Σύγκριση της καμπύλης ισχύος του βασικού σεναρίου με τον στόχο μείωσης αιχμής 8%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Σύνοψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η συμβολή των μεθόδων διαχείρισης της ζήτησης στη μείωση του κόστους λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάστηκαν διαφορετικές μέθοδοι διαχείρισης της ζήτησης κι έγινε αναφορά στα οφέλη που μπορούν να προκύψουν για τους χρήστες αλλά και τους διαχειριστές ενός δικτύου. Ενδεικτικά, έγινε μια ανασκόπηση ορισμένων πιλοτικών προγραμμάτων που έχουν εφαρμοστεί σε χώρες του εξωτερικού και των ευρημάτων τους.

Στο Κεφάλαιο 2, μελετήθηκε το πρόβλημα της μείωσης της αιχμής του φορτίου σε ένα Σ.Η.Ε. Με την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης τετραγωνικού προγραμματισμού στο λογισμικό MATLAB, εξήχθη μια τροποποιημένη καμπύλη φορτίου του συστήματος με μειωμένη αιχμή φορτίου, που αναπαριστά την εφαρμογή μεθόδων διαχείρισης ζήτησης. Η μεθοδολογία για την εξαγωγή της τροποποιημένης καμπύλης φορτίου εφαρμόστηκε για τα δεδομένα του έτους 2013 του Σ.Η.Ε. Κρήτης. Με τη μεθοδολογία αυτή, έγινε υπολογισμός των δεδομένων φορτίου για όλες τις ώρες του έτους για διάφορα σενάρια μείωσης της αιχμής.

Στο Κεφάλαιο 3, υπολογίσαμε, για τα διάφορα σενάρια μείωσης της αιχμής φορτίου, τη συμβολή των τεχνικών διαχείρισης στη μείωση του κόστους λειτουργίας ενός Σ.Η.Ε. όπου και πάλι οι υπολογισμοί βασίστηκαν στα δεδομένα του Σ.Η.Ε. Κρήτης. Επίσης, παρουσιάστηκε μέθοδος υπολογισμού του συνολικού κόστους των συμβατικών μονάδων παραγωγής.

Στο Κεφάλαιο 4, μελετήθηκε η συμβολή της εφαρμογής ελέγχου σε θερμοστατικά φορτία (συσκευές ψύξης) στην τροποποίηση της καμπύλης φορτίου του συστήματος. Παρουσιάστηκε η μοντελοποίηση τέτοιου είδους φορτίων και η διαδικασία υπολογισμού της εσωτερικής θερμοκρασίας του θαλάμου ψύξης. Επιπρόσθετα, περιγράφηκε η διαδικασία της εφαρμογής ελέγχου ώστε να προσεγγισθεί κατά το βέλτιστο δυνατό η καμπύλη στόχος για κάθε σενάριο μείωσης της αιχμής.

Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής ελέγχου στις συσκευές ψύξης και κατά πόσο προσεγγίστηκε ο στόχος για κάθε σενάριο μείωσης της αιχμής φορτίου. Η διαδικασία της εφαρμογής ελέγχου σε πλήθος συσκευών κατάλληλο ώστε να προσομοιώνει τις συσκευές που λειτουργούν στο Σ.Η.Ε της Κρήτης, υλοποιήθηκε μέσω του λογισμικού MATLAB.

6.2 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2, διαπιστώνεται ότι με την κατάλληλη τροποποίηση της καμπύλης φορτίου ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυνατόν να μειωθεί η ετήσια αιχμή φορτίου του συστήματος με παράλληλη βελτίωση του συντελεστή φορτίου. Κάτι τέτοιο οδηγεί σε χαμηλότερο κόστος συστήματος, όπως είδαμε

στο Κεφάλαιο 3. Η μείωση του κόστους του συστήματος προέρχεται από τη μείωση του κόστους λειτουργίας των συμβατικών μονάδων παραγωγής, όπως φαίνεται καθαρά από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται για τα επιλεγμένα σενάρια μείωσης της αιχμής κατά 2%, 4%, 6% και 8%. Η εξοικονόμηση χρηματικών πόρων αυξάνεται για τα σενάρια μεγαλύτερης ποσοστιαίας μείωσης της αιχμής, με την μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος να αγγίζει το 0,7%. Στη μείωση του κόστους λειτουργίας των μονάδων παραγωγής συντελούν η μείωση του κόστους αγοράς καυσίμου και η μείωση του κόστους αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO₂. Αποδείχθηκε ότι με βάση τα αποτελέσματα του υπολογισμού της τροποποιημένης καμπύλης φορτίου, η ένταξη των μονάδων παραγωγής διαφοροποιείται. Συνέπεια αυτής της διαφοροποίησης είναι οι ακριβότερες μονάδες να λειτουργούν λιγότερες ώρες κατά τη διάρκεια του έτους. Άρα, καταναλώνουν μικρότερες ποσότητες καυσίμου και παράλληλα εκπέμπουν λιγότερο CO₂.

Πως θα μπορούσε, όμως, να επιτευχθεί η επιθυμητή μεταβολή στο φορτίο του συστήματος; Και ποιου είδους φορτία θα μπορούσαν να παρέχουν τέτοια υπηρεσία; Στα ερωτήματα αυτά επιχειρεί να απαντήσει η μοντελοποίηση που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4 με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Για την επίτευξη της επιθυμητής μεταβολής επιλέχθηκε η μέθοδος της εφαρμογής ελέγχου σε θερμοστατικά φορτία, εστιάζοντας στις συσκευές ψύξης (που προορίζονται για οικιακή κι επαγγελματική χρήση). Η δυνατότητα για μετατόπιση του φορτίου που παρέχουν τέτοιου είδους συσκευές οφείλεται στο σύστημα με το οποίο επιτρέπουν, εμμέσως, την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας αφού αυτή μετατραπεί πρώτα σε θερμική ενέργεια. Από την εκτέλεση του κώδικα που αναπτύχθηκε με το λογισμικό MATLAB, για τον τρόπο εφαρμογής του ελέγχου, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για καθένα από τα επιλεγμένα σενάρια μείωσης της αιχμής. Αποδεικνύεται ότι για μικρό ποσοστό μείωσης της αιχμής, όπως το επιλεγμένο σενάριο MA – 2%, ο έλεγχος των συσκευών ψύξης είναι απολύτως επαρκής για την επίτευξη του καθορισμένου στόχου. Προχωρώντας στα επόμενα σενάρια μείωσης αιχμής κατά 4% και 6%, παρατηρούμε προοδευτικά μεγαλύτερη απόκλιση από τον καθορισμένο στόχο. Δηλαδή, δεν επαρκεί η συνεισφορά των συσκευών ψύξης στις χρονικές περιόδους που διαρκεί η αιχμή του φορτίου. Συμπερασματικά, για την υλοποίηση σεναρίων μείωσης της αιχμής κατά ένα ποσοστό μεγαλύτερο του 2%, θα πρέπει να εξετασθεί η συνεισφορά και άλλου είδους φορτίων, τα οποία πρέπει να ελεγχθούν παράλληλα με τις συσκευές ψύξης.

Ανακεφαλαιώνοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι χάρη στα χαρακτηριστικά των συσκευών ψύξης (αφθονία οικιακών συσκευών και δυνατότητα μετατόπισης του φορτίου μέσω της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας) κρίνεται επωφελής ο έλεγχος της λειτουργίας τους, εντός ενός πλαισίου διαχείρισης της ζήτησης, που δεν παραβιάζει τους τεθέντες από τους χρήστες περιορισμούς λειτουργίας και δεν επιδεινώνει το επίπεδο άνεσης (comfort level) των χρηστών. Παρόλα αυτά θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και να μελετηθεί η συμβολή και άλλων φορτίων όπως λέβητες, θερμοσυσσωρευτές, καταψύκτες, συστήματα κλιματισμού και θερμοσίφωνες. Συσκευές όπως οι θερμοσίφωνες δε παρουσιάζουν συγχρονισμό στην κατανάλωσή, ενώ η ζήτησή τους είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή ενός ψυγείου. Παράλληλα, τα συστήματα κλιματισμού, ειδικά κατά τους θερινούς μήνες, αποτελούν σημαντικό μέρος του συνολικού φορτίου, ενώ, παράλληλα, παρέχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας. Συνεπώς, η συμβολή του ελέγχου τέτοιων συσκευών χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Μάλιστα, η μοντελοποίηση τους διαφέρει ελάχιστα από τη μοντελοποίηση των συσκευών ψύξης. Έτσι, μπορεί να επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερη μείωση αιχμής ή και ακόμη καλύτερη ακρίβεια στην επίτευξη της καμπύλης στόχου. Ένα άλλο

σημείο που χρήζει διερεύνησης είναι το πρόβλημα που προκύπτει από τη δυσκολία που παρουσιάζει η μέτρηση της συνολικής ζήτησης των ελεγχόμενων συσκευών στα πλαίσια της λειτουργίας ενός Σ.Η.Ε., ξεχωριστά από τη ζήτηση των υπόλοιπων συσκευών. Επιπλέον, πρέπει να μελετηθεί ο πιο αποτελεσματικός και οικονομικός τρόπος ώστε να γίνει αυτή η μέτρηση, που ιδεατά πρέπει να γίνεται σε πραγματικό χρόνο.

Βιβλιογραφία

1. **M.H. Albadi, E.F. El-Saadany.** A summary of demand response in electricity markets. *Electric Power Systems Research*. November 2008, Τόμ. 78, 11, σσ. 1989-1996. doi:10.1016/j.epsr.2008.04.002.
2. **U.S. Department of Energy.** Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them. [Ηλεκτρονικό] 2006. http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/DOE_Benefits_of_Demand_Response_in_Electricity_Markets_and_Recommendations_for_Achieving_Them_Report_to_Congress.pdf. A Report to the United States Congress Pursuant to Section 1252 of the Energy Policy Act of 2005.
3. **Charles River Associates.** *Primer on Demand-Side Management With an Emphasis on Price-Responsive Programs*. Oakland, California : Charles River Associates, 2005. Prepared for The World Bank. CRA No. D06090.
4. **Brattle.** *Quantifying Demand Response Benefits In PJM*. Cambridge : The Brattle Group, 2007. Prepared for PJM Interconnection, LLC and the Mid-Atlantic Distributed Resources Initiative (MADRI).
5. **Frontier Economics and Sustainability First.** *Demand Side Response in the domestic sector- a literature review of major trials*. London : Department of Energy and Climate Change, 2012. URN: 12D/257.
6. **Konstantina Christakou, Dan-Christian Tomozei, Jean-Yves Le Boudec, Mario Paolone.** GECON: Primary Voltage Control for Active Distribution Networks via Real-Time Demand-Response. *IEEE Transactions on Smart Grid*, March 2014, Τόμ. 5, 2, σσ. 622-631. doi: 10.1109/TSG.2013.2275004.
7. **P. Constantopoulos, F.C. Schweppe, R.C. Larson.** ESTIA: A Real-Time Consumer Control Scheme for Space Conditioning Usage under Spot Electricity Pricing. *Comput. Oper. Res.* 1991, Τόμ. 18, 8, σσ. 751-765.
8. **Michael Stadler, Wolfram Krause, Michael Sonnenschein, Ute Vogel.** Modelling and evaluation of control schemes for enhancing load shift of electricity demand for cooling devices. *Environmental Modelling & Software*. Elsevier, February 2009, Τόμ. 24, 2, σσ. 285-295. doi:10.1016/j.envsoft.2008.07.003.
9. **Χατζοπλάκη, Ελεάνα.** *Ανάπτυξη αλγορίθμου και διεπαφής για τον υπολογισμό του ετήσιου ενεργειακού ισοζυγίου του απομωνομένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας Κρήτης*. 2014.
10. **IntercontinentalExchange.** ICE FUTURES EUROPE. [Ηλεκτρονικό] www.theice.com.
11. **Taylor M. Keep, Froylan E. Sifuentes, David M. Auslander, and Duncan S. Callaway.** Using load switches to control aggregated electricity demand for load following and regulation. *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 24-29 July 2011, σσ. 1-7. doi: 10.1109/PES.2011.6039039.

12. **Stephen J. James, Judith Evans.** The temperature performance of domestic refrigerators. *International Journal of Refrigeration*. 1992, Τόμ. 15, 5, σσ. 313-319. doi:10.1016/0140-7007(92)90047-X.
13. **Imran Hossen Khan, Hasan M.M. Afroz.** An Experimental Investigation of Door Opening Effect on Household Refrigerator; the Perspective in Bangladesh. *Asian Journal of Applied Sciences*. 2014, Τόμ. 7, 2, σσ. 79-87. doi: 10.3923/ajaps.2014.79.87.
14. **Gage, C. L.** Field usage and its impact on energy consumption of refrigerator/freezers. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.* 1995, Τόμ. 101, 2.
15. **Meier, A.** Refrigerator energy use in the laboratory and in the field. *Energy and Buildings*. August 1995, Τόμ. 22, 3, σσ. 233-243. doi:10.1016/0378-7788(95)00925-N.
16. **Ελληνική Στατιστική Αρχή.** *Στατιστική Επετηρίδα της Ελλάδος 2009 & 2010*. Πειραιάς : s.n., 2011. ISSN 0081 – 5071.
17. **ICAP A.E.** Σούπερ μάρκετ, Κλαδική μελέτη. [Ηλεκτρονικό] Σεπτέμβριος 2008. <http://library.aua.gr/icap/Super%20market%202008.pdf>.
18. **ΣΕΤΕ.** Ξενοδοχειακό δυναμικό κατά κατηγορία και περιφέρεια. [Ηλεκτρονικό] http://sete.gr/_fileuploads/entries/Statistics/Greece/Hotel%20Capacity/catID84/GR/130117_Ksenodoxeikiako%20dinamiko%20kata%20katigoria%20kai%20perifereia_2012.pdf.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο σημείο αυτό παρατίθεται ο κώδικας του MATLAB που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας.

8.1 Φυσιολογική εξέλιξη θερμοκρασίας σε μία ημέρα

Αρχικά παρατίθενται κάποιες σημαντικές μεταβλητές για την εκτέλεση του κώδικα που υπολογίζει τη φυσιολογική εξέλιξη της θερμοκρασίας.

number: ο συνολικός αριθμός των συσκευών που θεωρούμε ότι υπάρχουν στο σύστημα.

temp: πίνακας [number×288] όπου καταχωρείται η θερμοκρασία κάθε συσκευής σε κάθε χρονική περίοδο.

X: πίνακας [number×288] όπου καταχωρείται η κατάσταση λειτουργίας κάθε συσκευής, σε κάθε χρονική περίοδο.

Παρακάτω, παρατίθεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε μέσω του λογισμικού MATLAB:

```
temp = zeros(number,288);    % θερμοκρασία θ(t)
temp(:,1) = temp00;

A = 10.563;
n = 1.5;

X = zeros(number,288);
X(:,1) = X0;

% Υπολογισμός ζήτησης κατά την πρώτη χρον. περίοδο
for w = 1:number
    if X(w,1) == 1
        demandNC(w,1) = Pr(w);
    end
end
for t = 2:288

    for i = 1:number
        if (Pr(i)<=200)
            multiplier = 1;
        else if (Pr(i)<=1150)
            multiplier = 1000/175;
        else multiplier = 1750/175;
        end
    end
    % Υπολογισμός φυσιολογικής εξέλιξης της εσωτερικής
    θερμοκρασίας
    temp(i,t) = e(i)*temp(i,t-1) + (1-e(i))*(temp0(i) - n*X(i,t-
1)*Pr(i)/(multiplier*A)) + op_coeff(i)*openings(t-1)*0.5;
    if temp(i,t) > temp_max(i)
        X(i,t) = 1;
    else if temp(i,t) < temp_min(i)
```

```

        X(i,t) = 0;
    else
        X(i,t) = X(i,t-1);
    end
end
if X(i,t) == 1
    demandNC(i,t) = Pr(i);
end
end
end
end

PtotalNC = sum(demandNC);

```

8.2 Εξαναγκασμένη αλλαγή κατάστασης συσκευών

Αρχικά παρατίθενται κάποιες σημαντικές μεταβλητές για την εκτέλεση του κώδικα που υπολογίζει την εξέλιξη της θερμοκρασίας μετά από πραγματοποίηση εξαναγκασμένης αλλαγής κατάστασης σε συσκευές ώστε να επιτευχθεί ο στόχος μείωσης της αιχμής.

number: ο συνολικός αριθμός των συσκευών που θεωρούμε ότι υπάρχουν στο σύστημα.

temp: πίνακας [*number*×288] όπου καταχωρείται η θερμοκρασία κάθε συσκευής σε κάθε χρονική περίοδο.

X: πίνακας [*number*×288] όπου καταχωρείται η κατάσταση λειτουργίας κάθε συσκευής, σε κάθε χρονική περίοδο.

control: πίνακας [*number*×288] όπου καταχωρείται η πληροφορία για το αν μία συσκευή έχει υποστεί έλεγχο την αμέσως προηγούμενη χρονική περίοδο.

maxr: πίνακας [*number*×1] όπου καταχωρείται η παράμετρος του μέγιστου πλήθους εξαναγκασμένων αλλαγών κατάστασης που μπορεί να υποστεί η κάθε συσκευή.

minr: πίνακας [*number*×1] όπου καταχωρείται η παράμετρος του ελάχιστου πλήθους περιόδων που πρέπει να περάσουν, προτού υποστεί ξανά εξαναγκασμένη αλλαγή κατάστασης η συσκευή.

controllable_ap: πίνακας [*number*×1] όπου καταχωρείται η πληροφορία για το αν μία συσκευή είναι διαθέσιμη προς έλεγχο, δηλαδή αν βρίσκεται στην ίδια κατάσταση λειτουργίας με την αμέσως προηγούμενη χρονική περίοδο.

epsilon: συντελεστής ακρίβειας.

Παρακάτω, παρατίθεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε μέσω του λογισμικού MATLAB:

```

temp = zeros(number,288);    % θερμοκρασία θ(t)
temp(:,1) = temp00;

A = 10.563;
n = 1.5;
epsilon = 200;

```

```

X = zeros(number,288);
X(:,1) = X0;

control = zeros(number,288);
control(:,1) = control0(:,1);

% μεγ. πλήθος εξαναγκασμένων αλλαγών κατάστασης
maxp = maxp0;

% ελάχ. πλήθος χρον. περιόδων χωρίς αλλαγή κατάστασης
minp = minp0;

% ζήτηση μετά την εφαρμογή ελέγχου
demandC = zeros(number,288);

for t = 2:288
    t
    TABLE = zeros(number,7);
    controllable_ap = zeros(number, 1);

    for i = 1:number
        if (Pr(i)<=200)
            multiplier = 1;
        else if (Pr(i)<=1150)
            multiplier = 1000/175;
        else multiplier = 1750/175;
        end
        end
        % Υπολογισμός φυσιολογικής εξέλιξης της εσωτερικής
        θερμοκρασίας
        temp(i,t) = e(i)*temp(i,t-1) + (1-e(i))*(temp0(i) - n*X(i,t-
        1)*Pr(i)/(multiplier*A)) + op_coeff(i)*openings(t-1)*0.5;

        if temp(i,t) > temp_max(i)
            X(i,t) = 1;
        else if temp(i,t) < temp_min(i)
            X(i,t) = 0;
        else
            X(i,t) = X(i,t-1);
        end
        end

        if X(i,t) == X(i,t-1)
            controllable_ap(i) = 1;
        end
        % Υπολογισμός της demandC(i,t)
        if X(i,t) == 1
            demandC(i,t) = Pr(i);
        end
        end

        TABLE(i,:) = [X(i,t) controllable_ap(i) control(i,t-1) i
        maxp(i) minp(i) Pr(i)];

    end

    % Κατασκευή λίστας προτεραιότητας των συσκευών προς έλεγχο
    % Αν είμαστε κάτω από το στόχο, ανοίγουμε συσκευές άρα έχουμε
    PL01
    % Αν είμαστε πάνω, κλείνουμε, άρα έχουμε PL10

```

```

[A1,B1,C1,D1] = newprio(TABLE); % κλήση της συνάρτησης που
κατασκευάζει τις λίστες προτεραιότητας

if (sum(demandC(:,t))-Ptarget(t)) < 0
    PL1 = C1; % λίστα προτεραιότητας 0->1
else PL1 = D1; % λίστα προτεραιότητας 1->0
end

if (sum(demandC(:,t))-Ptarget(t)) < 0 && (exist('A1', 'var') ~=
0)
    PL2 = A1; % λίστα προτεραιότητας συσκευών υψηλής ισχύος 0-
>1
else if (sum(demandC(:,t))-Ptarget(t)) > 0 && (exist('B1', 'var')
~= 0)
    PL2 = B1; % λίστα προτεραιότητας συσκευών υψηλής
ισχύος 1->0
end
end

available_power = 0; % διαθέσιμη ισχύς από μικρές συσκευές για
την επίτευξη του στόχου
q = 1; % μετρητής
while (q <= length(PL1(:,1))) % για τα στοιχεία της λίστας
προτεραιότητας χαμηλής ισχύος
    if (PL1(q,3) ~= 1) && (PL1(q,5) > 0) && (PL1(q,6) == 0) % αν
μπορεί να εφαρμοστεί έλεγχος
        available_power = available_power + PL1(q,7); %
πρόσθεσε την ισχύ της συσκευής στη διαθέσιμη ισχύ
    end
    q = q + 1; % μετάβαση στην επόμενη συσκευή
end

if (abs(sum(demandC(:,t)) - Ptarget(t)) > available_power) % αν
αρχικά η απόκλιση δε μπορεί να καλυφθεί από τη διαθέσιμη ισχύ των
συσκευών χαμηλής ισχύος
    % Εφαρμογή ελέγχου με εξαναγκασμένο άνοιγμα/κλείσιμο συσκευής
    % Έλεγχος συσκευών μεγάλης ισχύος σε περίπτωση ελλείμματος
ενέργειας

    u = 1;
    while (Ptarget(t) - sum(demandC(:,t)) > 10*epsilon) &&
(exist('PL2', 'var') ~= 0) && (u <= length(PL2(:,1)))
        if (PL2(u,3) ~= 1) && (PL2(u,5) > 0) && (PL2(u,6) == 0)
% Αν δεν έχει προηγηθεί έλεγχος και maxp>0 και minp=0
            X(PL2(u,4),t) = 1 - X(PL2(u,4),t); % Αλλαγή
κατάστασης της συσκευής
            if X(PL2(u,4),t) == 1 % Αν η συσκευή άνοιξε...
                demandC(PL2(u,4),t) = PL2(u,7); %... πρόσθεσε
στη ζήτηση την κατανάλωση της συσκευής
            else demandC(PL2(u,4),t) = 0; % Αλλιώς, αφαίρεσε από
τη ζήτηση
            end
            maxp(PL2(u,4)) = maxp(PL2(u,4)) - 1; % Ο μεγ.
αριθμός αλλαγών κατάστασης μειώνεται
            if maxp(PL2(u,4)) < 0
                maxp(PL2(u,4)) = 0;
            end
            control(PL2(u,4),t) = 1; % Την τρέχουσα χρον.
στιγμή εφαρμόστηκε έλεγχος

```

```

        minpr(PL2(u,4)) = k(PL2(u,4)); % 0 ελαχ. αριθμός
περ. χωρίς αλλαγή επανέρχεται στην αρχική τιμή
        else minpr(PL2(u,4)) = minpr(PL2(u,4)) - 1; % Αλλιώς, ο
ελαχ. αριθμός περ. χωρίς αλλαγή μειώνεται κατά 1
        if minpr(PL2(u,4)) < 0 % Αν ο ελαχ. αριθμός
περ. χωρίς αλλαγή γίνεται αρνητικός,
            minpr(PL2(u,4)) = 0; % τον επαναφέρουμε στο 0
        end
    end
    u = u + 1; % Πάμε στην επόμενη συσκευή της PL

end

% Έλεγχος συσκευών μεγάλης ισχύος σε περίπτωση περίσσειας
ενέργειας
u = 1;
while (sum(demandC(:,t)) - Ptarget(t) > 10*epsilon) &&
(exist('PL2','var') ~= 0) && (u <= length(PL2(:,1)))
    if (PL2(u,3) ~= 1) && (PL2(u,5) > 0) && (PL2(u,6) == 0)
% Αν δεν έχει προηγηθεί έλεγχος και maxpr>0 και minpr=0
        X(PL2(u,4),t) = 1 - X(PL2(u,4),t); % Αλλαγή
κατάστασης της συσκευής
        if X(PL2(u,4),t) == 1 % Αν η συσκευή άνοιξε...
            demandC(PL2(u,4),t) = PL2(u,7); %... πρόσθεσε
στη ζήτηση την κατανάλωση της συσκευής
        else demandC(PL2(u,4),t) = 0; % Αλλιώς, αφαίρεσε από
τη ζήτηση

        end
        maxpr(PL2(u,4)) = maxpr(PL2(u,4)) - 1; % 0 μεγ.
αριθμός αλλαγών κατάστασης μειώνεται
        if maxpr(PL2(u,4)) < 0
            maxpr(PL2(u,4)) = 0;
        end
        control(PL2(u,4),t) = 1; % Την τρέχουσα χρον.
στιγμή εφαρμόστηκε έλεγχος
        minpr(PL2(u,4)) = k(PL2(u,4)); % 0 ελαχ. αριθμός
περ. χωρίς αλλαγή επανέρχεται στην αρχική τιμή
        else minpr(PL2(u,4)) = minpr(PL2(u,4)) - 1; % Αλλιώς, ο
ελαχ. αριθμός περ. χωρίς αλλαγή μειώνεται κατά 1
        if minpr(PL2(u,4)) < 0 % Αν ο ελαχ. αριθμός
περ. χωρίς αλλαγή γίνεται αρνητικός,
            minpr(PL2(u,4)) = 0; % τον επαναφέρουμε στο 0
        end
    end
    u = u + 1; % Πάμε στην επόμενη συσκευή της PL

end

end

% , Έλεγχος συσκευών χαμηλής ισχύος
j = 1;
while (abs(sum(demandC(:,t)) - Ptarget(t)) > 2*epsilon) && (j <=
length(PL1(:,1)))
    if (PL1(j,3) ~= 1) && (PL1(j,5) > 0) && (PL1(j,6) == 0) %
Αν δεν έχει προηγηθεί έλεγχος και maxpr>0 και minpr=0
        X(PL1(j,4),t) = 1 - X(PL1(j,4),t); % Αλλαγή κατάστασης
της συσκευής
        if X(PL1(j,4),t) == 1 % Αν η συσκευή άνοιξε...

```

```

        demandC(PL1(j,4),t) = PL1(j,7); %... πρόσθεσε στη
ζήτηση την κατανάλωση της συσκευής
        else demandC(PL1(j,4),t) = 0; %Αλλιώς, αφαίρεσε από τη
ζήτηση
    end
    maxp(PL1(j,4)) = maxp(PL1(j,4)) - 1; %Ο μεγ. αριθμός
αλλαγών κατάσταση μειώνεται
    if maxp(PL1(j,4)) < 0
        maxp(PL1(j,4)) = 0;
    end
    control(PL1(j,4),t) = 1; %Την τρέχουσα χρον. στιγμή
εφαρμόστηκε έλεγχος
    minp(PL1(j,4)) = k(PL1(j,4)); %Ο ελαχ. αριθμός περ.
χωρίς αλλαγή επανέρχεται στην αρχική τιμή
    else minp(PL1(j,4)) = minp(PL1(j,4)) - 1; %Αλλιώς, ο ελαχ.
αριθμός περ. χωρίς αλλαγή μειώνεται κατά 1
    if minp(PL1(j,4)) < 0 %Αν ο ελαχ. αριθμός περ.
χωρίς αλλαγή γίνει αρνητικός,
        minp(PL1(j,4)) = 0; %τον επαναφέρουμε στο 0
    end
end
j = j + 1; %Πάμε στην επόμενη συσκευή της PL
end

end

PtotalC = sum(demandC);
residuals = PtotalC - Ptarget;

plot((PtotalNC)*10^-6)
hold
plot((PtotalC)*10^-6, 'r')
plot((Ptarget)*10^-6, '--g')

```

8.3 Λίστα προτεραιότητας

Στο σημείο αυτό, παρατίθεται ο κώδικας της συνάρτησης που καθορίζει τις λίστες προτεραιότητας για την εφαρμογή ελέγχου στις συσκευές (Παρ. 4.3.2).

```

function [p_sorted01 p_sorted10 sorted01 sorted10] = newprio(state)
% Κατασκευή λίστας προτεραιότητας
% Συνάρτηση που κατασκευάζει τις λίστες προτεραιότητας για τον
έλεγχο των
% συσκευών

% 1ο sorting: είναι controllable; προηγούνται οι controllable
sorted1 = sortrows(state, -2); % κατάταξε βάσει του
controllable_ap
[dim1,dim2] = size(sorted1);
a = find(sorted1(:,2), 1, 'last'); % πού είναι ο τελευταίος άσος
sorted11 = sorted1(1:a, 1:dim2); % ο sorted11 περιέχει όλες τις
συσκευές με controllable_ap(i)=1

% 2ο sorting: είναι ON ή OFF;
sorted2 = sortrows(sorted11, 1); % κατάταξε βάσει του X(t)

```

```

[dim3,dim4] = size(sorted2);
b = find(~sorted2(:,1), 1, 'last'); % βρες το τελευταίο μηδενικό
sorted21 = sorted2(1:b, 1:dim4); % συσκευές 0->1
sorted22 = sorted2((b+1):dim3, 1:dim4); % συσκευές 1->0

% 3o sorting: είναι control(i,t-1)=0 ή 1;
sorted31 = sortrows(sorted21, [3 -7]);
sorted32 = sortrows(sorted22, [3 -7]);
[dim5,dim6] = size(sorted31);
[dim7,dim8] = size(sorted32);
c = find(~sorted31(:,3), 1, 'last');
d = find(~sorted32(:,3), 1, 'last');
sorted33 = sorted31(1:c, 1:dim6); %OFF με control = 0
sorted34 = sorted31((c+1):dim5, 1:dim6); %OFF με control = 1

sorted35 = sorted32(1:d, 1:dim8); %ON με control = 0
sorted36 = sorted32((d+1):dim7, 1:dim8); %ON με control = 1

% 4o sorting: έχει Pr > 200 W;
e = find(sorted33(:,7) > 200, 1, 'last'); % βρες την τελευταία
συσκευή μεγάλης ισχύος
[dim9,dim10] = size(sorted33);
sorted41 = sorted33(1:e, 1:dim10); % off, ctrl=0, Pr > 200W
sorted42 = sorted33((e+1):dim9, 1:dim10); %off, ctrl=0, Pr <= 200W

f = find(sorted34(:,7) > 200, 1, 'last'); % βρες την τελευταία
συσκευή μεγάλης ισχύος
[dim11,dim12] = size(sorted34);
sorted43 = sorted34(1:f, 1:dim12); %off, ctrl=1, Pr > 200W
sorted44 = sorted34((f+1):dim11, 1:dim12); %off, ctrl=1, Pr<=200W

g = find(sorted35(:,7) > 200, 1, 'last'); % βρες την τελευταία
συσκευή μεγάλης ισχύος
[dim13,dim14] = size(sorted35);
sorted45 = sorted35(1:g, 1:dim14); %on, ctrl=0, Pr>200W
sorted46 = sorted35((g+1):dim13, 1:dim14); %on, ctrl=0, Pr<=200W

h = find(sorted36(:,7) > 200, 1, 'last'); % βρες την τελευταία
συσκευή μεγάλης ισχύος
[dim15,dim16] = size(sorted36);
sorted47 = sorted36(1:h, 1:dim16);
sorted48 = sorted36((h+1):dim15, 1:dim16);

%5o sorting: ως προς maxp και minp
sorted51 = sortrows(sorted41, -5); % ταξινομήσε ως προς το maxp
μειούμενο
sorted52 = sortrows(sorted43, 6); % ταξινομήσε ως προς το minp
αυξανόμενο

sorted53 = sortrows(sorted42, -5);
sorted54 = sortrows(sorted44, 6);

sorted55 = sortrows(sorted45, -5);
sorted56 = sortrows(sorted47, 6);

sorted57 = sortrows(sorted46, -5);
sorted58 = sortrows(sorted48, 6);

%output

```

```

p_sorted01 = vertcat(sorted51, sorted52);
p_sorted10 = vertcat(sorted55, sorted56);

sorted01 = vertcat(sorted53, sorted54);
sorted10 = vertcat(sorted57, sorted58);

end

```

8.4 Υπολογισμός τροποποιημένης καμπύλης συστήματος

Παρακάτω, παρατίθεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε στο MATLAB για την επίλυση του προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού, από την οποία προκύπτει η τροποποιημένη καμπύλη φορτίου του συστήματος (Παρ. 2.3.3).

```

% Μείωση της αιχμής κατά 2% για όλο το έτος %
H = 2*eye(24);
lb = zeros(24,1);
Aeq = ones(1,24);

peak_reduction = 0.02*ones(365,1);
P = zeros(8760,1);
for i = 1:24:8760
    for j = i:(i+23)
        P(j) = load(j); % load: πίνακας με τις τιμές της καμπύλης
ζήτησης
        f(j) = P(j)*(-2);
        beq = sum(P(i:(i+23)));
    end
    k = (round(i/24))+1;
    ub = (1-peak_reduction(k))*max(P(i:(i+23)))*ones(24,1);
    [x,fval,exitflag,output] =
quadprog(H,f(i:(i+23)), [], [], Aeq, beq, lb, ub);
    Y(i:(i+23)) = x; % τοποθέτηση των λύσεων x, σε πίνακα
    X = Y';
end

plot(P)
hold
plot(X, 'r')

```