

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 1643

**Ανάπτυξη αλγορίθμου ελέγχου λειτουργίας
ηλεκτρικού θερμοσίφωνα
σε περιβάλλον δυναμικής τιμολόγησης
ηλεκτρικής ενέργειας**

Ζέρβας Γεώργιος

A.M. : 6707

Εισηγητές :

Καψάλης Βασίλειος

ΠΑΤΡΑ 2018

©2018 – All rights reserved

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου, ο οποίος θα βελτιστοποιεί τη λειτουργία του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα, με σκοπό τη μείωση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας για τον τελικό καταναλωτή και την ταυτόχρονη διατήρηση του επιθυμητού επιπέδου άνεσης, σε περιβάλλον δυναμικής τιμολόγησης.

Ο αλγόριθμος θα λαμβάνει πληροφορίες σχετικά με το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε χρονική στιγμή και βάση των επιθυμιών του χρήστη θα ρυθμίζει τη λειτουργία του θερμοσίφωνα, ώστε να πετυχαίνει τη μέγιστη εξοικονόμηση χρημάτων, χωρίς αισθητή επίπτωση στην ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας (θερμοκρασία θερμού νερού).

Η λειτουργία του θερμοσίφωνα θα πραγματοποιείται στα χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της ημέρας, τα οποία θα ελαχιστοποιούν το ενεργειακό κόστος, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους, όπως τη μόνωσή του, τη χωρητικότητά του, την ισχύς λειτουργίας του, την εξωτερική θερμοκρασία, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε χρονική στιγμή και τέλος την προβλεπόμενη κατανάλωση νερού, καθώς και την επιθυμητή θερμοκρασία ζεστού νερού.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Περιεχόμενα.....	4
Εισαγωγή.....	6
Κεφάλαιο 1 ^ο : Γενικά για τον θερμοσίφωνα.....	7
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	6
1.2 Μέρη θερμοσίφωνα.....	9
1.3 Αποδοτικότητα θερμοσίφωνα.....	11
1.4 Αρχή λειτουργίας θερμοσίφωνα και λειτουργίας των εξαρτημάτων του.....	12
1.5 Γιατί έγινε η επιλογή θερμοσίφωνα.....	14
Κεφάλαιο 2 ^ο : R.T.P και τρόποι ελέγχου φορτίου.....	16
2.1 Προβλήματα στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λόγω μεγάλης ζήτησης.....	16
2.2 Δυναμική τιμολόγηση.....	17
2.3 Έξυπνοι μετρητές.....	19
2.4 Τρόποι ελέγχου φορτίου.....	21
i) Διαχείριση φορτίου.....	21
ii) Arduino.....	24
iii) Raspberry Pi.....	26
Κεφάλαιο 3 ^ο : Επιλογή γλώσσας προγραμματισμού.....	27
Κεφάλαιο 4 ^ο : Μαθηματικές σχέσεις.....	29
4.1 Υπολογισμός ωριαίας κατανάλωσης νερού.....	29
4.2 Υπολογισμός παραμέτρων.....	35
4.2.1 Υπολογισμός παραμέτρου E	35
4.2.2 Υπολογισμός παραμέτρου α_{wh}	35
4.2.3 Υπολογισμός παραμέτρου Y_{wh}	36
4.2.4 Υπολογισμός παραμέτρου β_{wh}	38
4.2.5 Υπολογισμός παραμέτρων νερού.....	39

4.2.6 Υπολογισμός παραμέτρου M_{HW}	40
4.4.6 Υπολογισμός παραμέτρου T_{bath}	40
4.4.7 Υπολογισμός παραμέτρου $T_{w,t+1}$	41
4.4.8 Υπολογισμός παραμέτρου T_{target}	41
Κεφάλαιο 5 ^ο : Διάγραμμα ροής βέλτιστης λύσης.....	43
5.1 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου.....	44
Κεφάλαιο 6 ^ο : Συγκρίσεις και συμπεράσματα.....	47
Παράρτημα.....	67
Βιβλιογραφία.....	71

Εισαγωγή

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται και αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα σε κατοικία, σε περιβάλλον δυναμικής τιμολόγησης. Συγκεκριμένα, ο ηλεκτρικός θερμοσίφοντας, αποτελεί ένα φορτίο διακοπτόμενο. Ο παραπάνω όρος σημαίνει ότι υπάρχει η δυνατότητα διακοπής του ηλεκτρικού φορτίου (θερμοσίφωνα) και επανεκκίνησης από το ίδιο σημείο όταν εμείς επιθυμούμε.

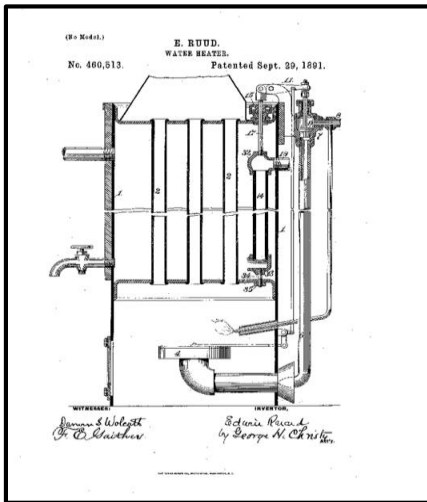
Σκοπός του αλγορίθμου, είναι να εξετάζει την κατανάλωση νερού καθώς επίσης και το κόστος της kWh λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία αυτά αλλά και τα επίπεδα άνεσης, τα οποία έχει θέσει ο χρήστης και σε κάθε περίπτωση να υπολογίζει την απαιτούμενη θερμοκρασία του νερού του θερμοσίφωνα. Δεδομένα, όπως η κατανάλωση νερού και η πολυζωνική χρέωση της ηλεκτρικής ενέργειας, θα υπολογιστούν από κατάλληλους μαθηματικούς τύπους ή θα αντλούνται αυτόματα από τους αντίστοιχους ιστότοπους. Τα αποτελέσματα μας, θα εμφανίζονται μέσω γραφημάτων στον φυλλομετρητή excel. Το πρόγραμμα, με το οποίο θα μελετηθεί το ηλεκτρικό φορτίο του θερμοσίφωνα και μας θα επιστρέφει τα επιθυμητά αποτελέσματα υλοποιήθηκε με την γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic for Applications.

Κεφάλαιο 1 : Γενικά για τον θερμοσίφωνα

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια ιστορική αναδρομή του θερμοσίφωνα, όπως ποιοι ήταν οι πρωτεργάτες της σημερινής ηλεκτρικής συσκευής, τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένας θερμοσίφωνα, από τι εξαρτάται η αποδοτικότητα του καθώς και η αρχές λειτουργίας ενός θερμοσίφωνα. Τέλος, θα αναφερθούμε στο λόγο που επιλέχθηκε να γίνει η ανάπτυξη αλγορίθμου πάνω στον θερμοσίφωνα.

1.1 Ιστορική αναδρομή

Μέχρι τα μέσα του 18ού αιώνα η φωτιά αποτελούσε τον μοναδικό τρόπο θέρμανσης του νερού. Το νερό ζεσταινότανε στη φωτιά και μέσω δοχείων μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για λουτρό ή όποια άλλη χρήση. Ωστόσο, ο τρόπος αυτός ήταν μη



αποδοτικός κι έτσι με την πρόοδο του πολιτισμού και της τεχνολογίας ο άνθρωπος αναζήτησε πιο αποδοτικούς τρόπους για την όλο και μεγαλύτερη ζήτησή του σε θερμό νερό. Αν και δεν είναι γνωστό το όνομα του εφευρέτη, περίπου το 1850, υπήρξε η ιδέα της θέρμανσης του νερού μέσω καυστήρα αερίου, το οποίο είχε τοποθετήσει κάτω από την μανιέρα.

Το 1868 ο Άγγλος Benjamin Waddy Maughan κατασκεύασε ένα σύστημα, με το οποίο το κρύο νερό

Εικόνα 1: Η ηλεκτρική θερμάστρα του E. Ruud

έρεε μέσα από σωλήνες, το οποίο θερμαίνονταν από έναν καυστήρα. Το θερμό νερό που είχε παραχθεί κατέληγε σε νεροχύτη ή μανιέρα. Ονόμασε την συσκευή αυτή “Geyser”, ωστόσο αμέλησε να εγκαταστήσει μια συσκευή καπνοδόχου, ώστε τα αέρια του καυστήρα να εκλύονται με ασφάλεια. Έτσι, η συσκευή θεωρήθηκε επικίνδυνη για οικιακή χρήση.

Το 1889 ο Νορβηγός μηχανολόγος μηχανικός Edwin Ruud, δουλεύοντας πάνω στη συσκευή του Maughan κατασκεύασε την πρώτη ηλεκτρική θερμάστρα αυτόματης αποθήκευσης νερού. Ουσιαστικά, ο Ruud πρόσθεσε χαρακτηριστικά



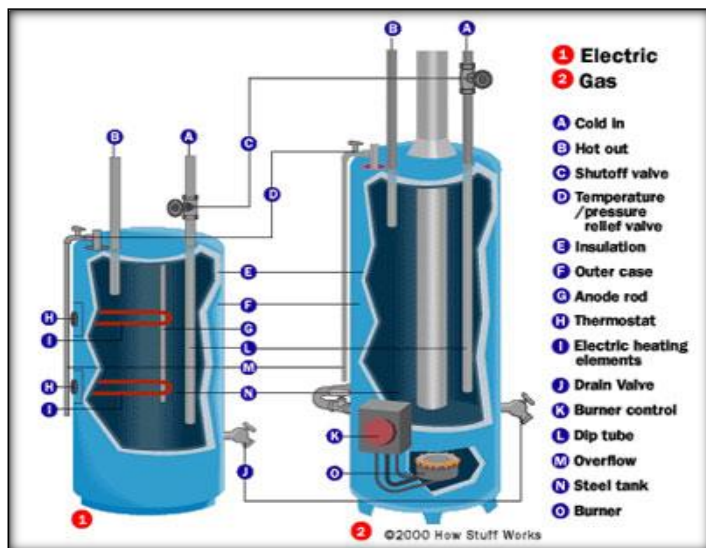
Εικόνα 2: Ο θερμοσίφωνας του Ewart & Son

ασφαλείας στην αρχική συσκευή του Maughan. Επτά χρόνια αργότερα πρόσθεσε ένα άλλο χαρακτηριστικό, ένα πηνίο για να ζεσταίνεται το νερό, το οποίο αντικατέστησε το δοχείο αποθήκευσης στην πρώτη του εφεύρεση.

Περίπου το 1895 στην Αγγλία οι Ewart & Son κυκλοφόρησαν έναν θερμοσίφωνα με καύση αερίου, τον οποίο τον ονόμασαν Royal Geyser. Ο τρόπος λειτουργίας του ήταν ότι το θερμό νερό αναμειγνύεται με το κρύο για να δημιουργηθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα ζεστού νερού. Μετά το 1900 και με την πρόοδο της τεχνολογίας οι θερμοσίφωνες έγιναν κύριο χαρακτηριστικό των οικιών με την αποδοτικότητά τους να αυξάνεται σημαντικά με την προσθήκη νέων χαρακτηριστικών, όπως την χρήση μόνωσης.

1.2 Μέρη ενός θερμοσίφωνα

Σε γενικές γραμμές υπάρχουν δύο τρόποι, με τον οποίο γίνεται η θέρμανση του νερού σε έναν θερμοσίφωνα, με την χρήση ηλεκτρικής ενέργειας και με την



Εικόνα 3: Μέρη ενός θερμοσίφωνα

χρήση φυσικού αερίου. Δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές εκτός από ότι ο ηλεκτρικός θερμοσίφωνα έχει στοιχεία θέρμανσης (αντιστάσεις) του νερού ενώ ο θερμοσίφωνα με χρήση αερίου περιέχει καυστήρα. Οι θερμοσίφωνα αποτελούνται από τα εξής μέρη τα οποία φαίνονται στην **εικόνα 3** :

- A)** Το ψυχρό νερό παρέχεται στη δεξαμενή μέσω γραμμής παροχής κρύου νερού και ελέγχεται από βαλβίδα διακοπής.
- B)** Είναι το τελικό αποτέλεσμα του θερμαντήρα ζεστού νερού και η γραμμή ζεστού νερού είναι αυτή, η οποία προμηθεύει όλους τους νεροχύτες, μπανιέρες και συσκευές, οι οποίες χρειάζονται ζεστό νερό.
- C)** Βαλβίδα διακοπής παροχής κρύου νερού. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε που βρίσκεται η βαλβίδα διακοπής, ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί συντήρηση στη δεξαμενή.
- D)** Ένα χαρακτηριστικό ασφαλείας του θερμαντήρα θερμού νερού περιλαμβάνει την βαλβίδα εκτόνωσης πίεσης και τον σωλήνα εκκένωσης. Ο σκοπός αυτής της βαλβίδας είναι να «ανακουφίζει» από την υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας ή της πίεσης μέσα στη δεξαμενή σε περίπτωση που πλησιάσει τα όρια της ασφαλούς περιοχής σχεδιασμού της δεξαμενής. Η βαλβίδα αυτή βρίσκεται στην κορυφή της δεξαμενής.
- E)** Αποτελεί την μόνωση του θερμοσίφωνα, η οποία χρησιμοποιείται για την όσο μικρότερη δυνατή απώλεια της θερμότητας από το θερμό νερό.

F) Αποτελεί το περίβλημα της δεξαμενής. Μια καλή λύση για την βελτίωση της μόνωσης είναι να τοποθετηθεί ένα περίβλημα από υαλοβάμβακα στο εξωτερικό μέρος του θερμαντήρα θερμού νερού.

G) Αποτελεί την ράβδο ανόδου, η οποία είναι βιδωμένη και στερεωμένη στην κορυφή της δεξαμενής και εκτείνεται βαθιά μέσα στη δεξαμενή. Σκοπός της ράβδου είναι να απορροφάει τη διάβρωση στον εαυτό της αντί της δεξαμενής μετάλλου. Ορισμένα μοντέλα δεν διαθέτουν ξεχωριστή άνοδο αλλά συνδυάζουν τη λειτουργία της ανόδου με την έξοδο του ζεστού νερού.

H) Πρόκειται για συσκευή ελέγχου θερμόμετρου και θερμοκρασίας. Ορισμένοι ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες διαθέτουν ξεχωριστό θερμοστάτη για κάθε στοιχείο, καθώς πολλά μοντέλα περιλαμβάνουν δυο θερμαντικά στοιχεία (αντιστάσεις).

I) Οι ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες διαθέτουν θερμαντικά στοιχεία (αντιστάσεις) μέσα στη δεξαμενή για τη θέρμανση του νερού. Οι θερμοσίφωνες αερίου χρησιμοποιούν αντί αυτού έναν καυστήρα και ένα σύστημα καμινάδας.

J) Στην δεξαμενή ζεστού νερού μπορεί να δημιουργηθούν ιζήματα στον πυθμένα της δεξαμενής, εάν αφηθεί χωρίς συντήρηση. Χρησιμοποιώντας τη βαλβίδα αποστράγγισης δεξαμενών τα ιζήματα δεν μπορούν να συσσωρευτούν στον πυθμένα της δεξαμενής. Αυτό βοηθά στην παράταση της ζωής της δεξαμενής και στη βελτίωση της ποιότητας του νερού.

L) Ο σωλήνας εμβάπτισης είναι η παροχή ψυχρού νερού, η οποία εισέρχεται στη δεξαμενή για να θερμανθεί.

M) Αποτελεί τον σωλήνα υπερχείλησεις της δεξαμενής.

N) Αποτελεί την δεξαμενή αποθήκευσης του νερού. Είναι κατασκευασμένο από χάλυβα και περικλείει μια δεξαμενή αποθήκευσης νερού δοκιμασμένη υπό πίεση.

Στην *εικόνα 3* τα στοιχεία **K** και **O** αποτελούν χαρακτηριστικά των θερμαντήρων ζεστού νερού με χρήση αερίου.

K) Το φυσικό αέριο ή το προπάνιο τροφοδοτούνται από ένα σωλήνα που έχει τη δική του βαλβίδα διακοπής αερίου. Η γραμμή αγωγού αερίου σε μια μονάδα ελέγχου καυστήρα αερίου που χρησιμεύει ως ένα είδος θερμοστάτη για το θερμοσίφωνα.

Ο) Περιλαμβάνει τον αρχικό σπινθηρισμό για την ενεργοποίηση του καυστήρα και τον καυστήρα αερίου. Η ρύθμιση του σπινθηρισμού και του καυστήρα είναι το κλειδί για την σωστή και ενεργειακά αποδοτική λειτουργία του θερμοσίφωνα.

1.3 Αποδοτικότητα του θερμοσίφωνα

Ένας ηλεκτρικός θερμοσίφοντας λειτουργεί χρησιμοποιώντας είτε ένα είτε δυο βυθιζόμενα στοιχεία θέρμανσης, τα οποία ελέγχονται είτε από θερμοστάτες είτε από μια μονάδα ελέγχου μικροεπεξεργαστή, το οποίο θερμαίνει το νερό της δεξαμενής στην επιθυμητή θερμοκρασία. Υπάρχουν πολλές επιλογές που καθορίζουν την απόδοση ενός θερμοσίφωνα, όπως είναι τα Watt / Volt του θερμαντικού στοιχείου και



Εικόνα 4: Θερμαντικά στοιχεία θερμοσίφωνα

το υλικό που είναι κατασκευασμένα τα θερμαντικά στοιχεία. Τα στοιχεία (αντιστάσεις) αποτελούνται από ένα εσωτερικό σύρμα που περιβάλλεται από υλικό πλήρωσεως, το οποίο περικλείεται σε ένα περίβλημα από επιμεταλλωμένο χαλκό ή ανοξείδωτο χάλυβα. Ο θερμοστάτης επιτρέπει την ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του εσωτερικού καλωδίου και από την αντίσταση του σύρματος δημιουργείται θερμότητα (φαινόμενο Joule), η οποία μεταφέρεται μέσω του υλικού πλήρωσεως στο εξωτερικό περίβλημα και στη συνέχεια απορροφάται από το νερό. Τα στοιχεία μπορεί να είναι διαθέσιμα σε διάφορες ισχύς και υλικά, για να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις θέρμανσης. Πολύ σημαντικό ρολό στην απόδοση ενός θερμοσίφωνα αποτελεί ο ρυθμός ανάκτησης, δηλαδή η ταχύτητα με την οποία ο θερμοσίφοντας θερμαίνει το νερό σε μια δεδομένη χρονική περίοδο. Όπως αναφέρθηκε ο θερμοσίφοντας έχει την ικανότητα της αποθήκευσης νερού, με την χωρητικότητα του να επηρεάζει τη διαθεσιμότητα ζεστού νερού. Η επιλογή ενός θερμαντήρα νερού που έχει την κατάλληλη χωρητικότητα και ρυθμό ανάκτησης εξαρτάται από το πόσο νερό το σπίτι απαιτεί, καθώς και πώς η μονάδα θερμαίνει το νερό. Συνήθως, οι θερμαντήρες με χαμηλή ταχύτητα ανάκτησης έχουν μεγάλη

χωρητικότητα δεξαμενής, καθώς από τη μεριά χρειάζεται περισσότερος χρόνος για τη θέρμανση του νερού, από την άλλη όμως υπάρχουν περισσότερα λίτρα ζεστού νερού για χρήση. Η αποδοτικότητα του θερμοσίφωνα εξαρτάται, επίσης και από την ποσότητα του μονωτικού υλικού, η οποία περιβάλλει τον θερμοσίφωνα.

1.4 Αρχή λειτουργίας θερμοσίφωνα και λειτουργία των εξαρτημάτων του

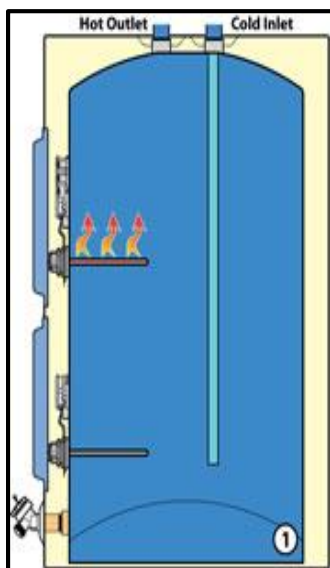
Το θερμό νερό στον θερμοσίφωνα θερμαίνεται βάση της παρακάτω αρχής. Το νερό τείνει να σχηματίζει στρώματα με διαφορετικές θερμοκρασίες μέσα στη δεξαμενή. Όταν συμβαίνουν σύντομες χρήσεις του θερμού νερού, ο θερμοσίφωνα μπορεί να ανάψει και να σβήσει κάνοντας το νερό στην κορυφή της δεξαμενής να συνεχίζει να θερμαίνεται κάθε φορά, που γίνεται χρήση ζεστού νερού. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται «στοίβαξη». Κατά τη διαδικασία αυτή το θερμό νερό, όπως και ο θερμός αέρας, όταν θερμανθούν «ανεβαίνουν προς τα πάνω», αφού το θερμό νερό έχει μικρότερη πυκνότητα από το κρύο. Κατά τη θέρμανση του νερού ο όγκος του διαστέλλεται, αυξάνοντας με αυτόν τρόπο την πίεση στη δεξαμενή. Τότε η βαλβίδα εκτόνωσης ανοίγει για να «ανακουφίσει» την πίεση της δεξαμενής, αν η πίεση είναι υπερβολικά υψηλή ή η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή. Αν για κάποιο λόγο η βαλβίδα εκτόνωσης δεν ανοίξει, ο θερμοσίφωνα μπορεί να εκραγεί. Ένας τρόπος για να αποφύγουμε το πρόβλημα αυτό είναι να τοποθετήσουμε μια δεξαμενή διαστολής στη μέση μεριά του θερμοσίφωνα. Η δεξαμενή αυτή είναι υπό πίεση και περιέχει στο εσωτερικό της μια ελαστική κύστη ή ένα διάφραγμα στη μέση. Καθώς το νερό διαστέλλεται, κινείται μέσα στη δεξαμενή διαστολής και δεν δημιουργεί επικίνδυνα επίπεδα πίεσης.

Βάση της προηγούμενης αρχής, ότι το θερμό νερό βρίσκεται στη κορυφή της δεξαμενής, κάθε φορά που γίνεται χρήση του ζεστού νερού, το κρύο νερό εισέρχεται στη δεξαμενή μέσω του σωλήνα εμβάπτιση, προκειμένου να θερμανθεί. Χωρίς το σωλήνα εμβάπτισης να διατρέχει όλο το μήκος του θερμοσίφωνα, το κρύο νερό που

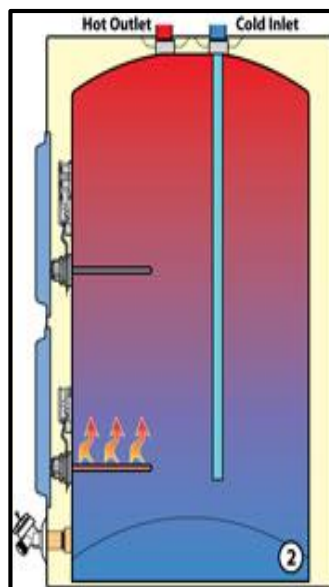
εισέρχεται στον θερμοσίφωνα θα ταξίδευε «μικρή απόσταση» και θα εξερχότανε από την έξοδο του θερμού νερού, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του νερού να είναι πολύ χαμηλότερη από την κανονική.

Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα ενός οικιακού συστήματος θέρμανσης, αποτελούμενο από έναν τερματικό διακόπτη χειροκίνητης επαναφοράς, έναν ανώτερο θερμοστάτη, έναν κατώτερο θερμοστάτη και δύο στοιχεία θέρμανσης. Αρχικά, όταν ενεργοποιείται η τροφοδοσία στη μονάδα, ενεργοποιείται το ανώτερο θερμαντικό στοιχείο και αρχίζει η θέρμανση στο άνω τρίτο του νερού της δεξαμενής (*Εικόνα 5*).

Όταν το άνω τρίτο του νερού θερμανθεί στην επιθυμητή θερμοκρασία του θερμοστάτη, ο πάνω θερμοστάτης απενεργοποιείται και ενεργοποιείται ο κάτω θερμοστάτης. Ο κάτω θερμοστάτης συνεχίζει να θερμαίνει το νερό μέχρις ότου η θερμοκρασία το κάτω τμήμα της δεξαμενής θερμανθεί στην επιθυμητή θερμοκρασία του κάτω θερμοστάτη (*Εικόνα 6*).



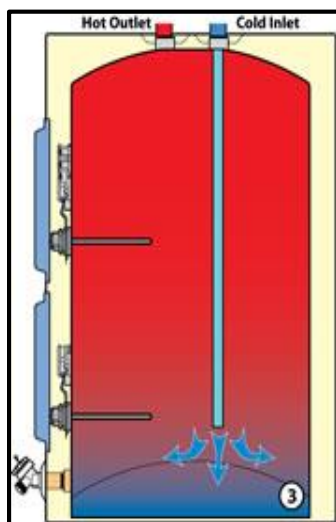
Εικόνα 5



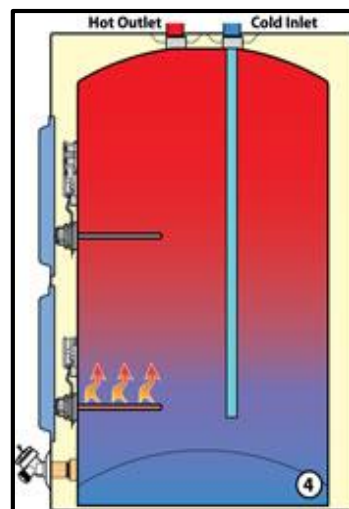
Εικόνα 6

Καθώς το θερμό νερό αντλείται από την κορυφή της δεξαμενής, ο σωλήνας εμβάπτισης παρέχει κρύο νερό στον πυθμένα της δεξαμενής (*Εικόνα 7*). Τελικά, το κρύο νερό αναμιγνύεται με το θερμό, μειώνοντας τη θερμοκρασία του θερμοστάτη και ενεργοποιώντας το κάτω στοιχείο. Αν αρκετό νερό τραβηχτεί την δεξαμενή και ψυχθεί το πάνω μέρος, ο θερμοστάτης θα ενεργοποιήσει πρώτα το άνω στοιχείο. Όταν το ανώτερο τρίτο της δεξαμενής θερμανθεί στην επιθυμητή θερμοκρασία του

θερμοστάτη, η παροχή ενέργειας θα αλλάξει πάλι στο κάτω θερμαντικό στοιχείο (Εικόνα 8).



Εικόνα 7



Εικόνα 8

Οι θερμαντήρες νερού με μονό στοιχείο έχουν ένα στοιχείο τοποθετημένο στο κάτω μέρος της δεξαμενής που ελέγχεται από έναν μόνο θερμοστάτη.

1.5 Γιατί έγινε η επιλογή του ηλεκτρικού θερμοσίφωνα

Η επιλογή ενός θερμοσίφωνα, γίνεται αρχικά με βάση την χωρητικότητα του σε λίτρα. Σύμφωνα με στοιχεία της Υπηρεσίας Βιώσιμης Ενέργειας (Sustainable Energy Authority) της πολιτείας Βικτώριας της Αυστραλίας ο παρακάτω πίνακας μας δίνει πόσα λίτρα χρειάζεται μια οικία ανάλογα με πόσα άτομα διαμένουν.

Αριθμός Ατόμων	Χωρητικότητα (Λίτρα)
1 έως 3	160 Λίτρα
2 έως 4	250 Λίτρα
3 έως 6	315 Λίτρα
5 έως 8	400 Λίτρα

Πίνακας 1: Συσχέτιση αριθμού ατόμων και χωρητικότητας σε λίτρα

Στην Ελλάδα, σύμφωνα με στοιχεία της ΕΛ.ΣΤΑΤ. σε μια οικογένεια αντιστοιχούν 2 παιδιά, συνεπώς σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα χρειαζόμαστε για τις ανάγκες μιας οικογένειας, συνήθως των τεσσάρων ατόμων, έναν θερμοσίφωνα με χωρητικότητα 250 λίτρα, χωρίς ωστόσο αυτό να αποτελεί κανόνα καθώς οι ανάγκες κάθε οικογένειας είναι διαφορετικές και επίσης διαφορετικές ανάγκες παρουσιάζει μια οικογένεια με την πάροδο του χρόνου, λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός ότι η ανάγκη για ζεστό νερό δεν είναι η ίδια για ένα βρέφος και έναν ενήλικα.

Επίσης, ο θερμοσίφοντας αποτελεί μια από τις πιο ενεργοβόρες ηλεκτρικές συσκευές σε μια οικία και μια από τις συσκευές, η οποία χρησιμοποιείτε σε καθημερινή βάση. Σύμφωνα με στοιχεία της Δ.Ε.Η ένας θερμοσίφοντας με λειτουργία στους 50°C, χωρητικότητας 80L και ισχύς θερμαντικού στοιχείου 4000W, έχει κατανάλωση 2,6 kWh με κόστος 0,33€. Άρα γίνεται κατανοητό ότι ένας θερμοσίφοντας με μεγαλύτερη χωρητικότητα ή μεγαλύτερη λειτουργία, π.χ. 60°C θα αυξήσει σημαντικά το κόστος και την κατανάλωση.

Στην χώρα μας, ένα ποσοστό του 49,5% (σύμφωνα με στοιχεία της ΕΛ.ΣΤΑΤ.) των νοικοκυριών, χρησιμοποιεί ως κύρια πηγή για την θέρμανση του νερού τον ηλεκτρισμό και ένα ποσοστό του 32,7% την ηλιακή ενέργεια. Θα πρέπει, όμως να αναλογιστούμε το γεγονός ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του ελληνικού πληθυσμού διαμένει σε μεγάλα αστικά κέντρα, όπου η χρήση της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση του νερού δεν είναι εφικτή, με την χρήση της να περιορίζεται σε μικρά αστικά κέντρα και χωριά.

Λαμβάνοντας, λοιπόν υπόψιν τα παραπάνω στοιχεία, δηλαδή τις ανάγκες μιας οικογένειας, την ηλεκτρική κατανάλωση του θερμοσίφωνα, την χρήση του ηλεκτρισμού για την θέρμανση του νερού και το γεγονός ότι το κόστος της kWh, στο μέλλον δεν θα αποτελείτε από μια σταθερή τιμή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας αλλά από διάφορες «ζώνες» με διαφορετικό κόστος, προκύπτει η ανάγκη για την δημιουργία ενός αλγορίθμου, ο οποίος θα είναι σε θέση να ελέγχει τον θερμοσίφωνα, έτσι ώστε να έχουμε την καλύτερη απόδοση, δηλαδή θερμό νερό καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Κεφάλαιο 2^ο- RTP και τρόποι ελέγχου φορτίου

Στο κεφάλαιο αυτό, θα ασχοληθούμε με το σύστημα δυναμικής τιμολόγησης (RTP) καθώς και τους λόγους, οι οποίοι οδήγησαν στη δημιουργία του μοντέλου αυτού. Ακόμη, θα μελετήσουμε του τρόπους με τους οποίους μπορούμε να ελέγχουμε φορτία, καθώς επίσης τι είδους μετρητές χρειαζόμαστε για τον έλεγχο των φορτίων.

2.1 Προβλήματα στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λόγω μέγιστης ζήτησης

Όπως έχει αναφερθεί ο θερμοσίφωνας αποτελεί έναν από τα μεγαλύτερα ηλεκτρικά φορτία σε μια οικία. Γίνεται προφανές ότι μεγάλα φορτία, όπως του θερμοσίφωνα έχουν επιπτώσεις και στο σύστημα της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς υπάρχει περιορισμός στο ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μπορεί να σταλεί σε μια γραμμή μεταφοράς. Η προέλευση του περιορισμού εξαρτάται από το μήκος της γραμμής μεταφοράς. Για μια γραμμή μικρού μήκους, η θέρμανση του αγωγού εξαιτίας των απωλειών της γραμμής θέτουν ένα θερμικό όριο. Αν ένα μεγάλο ποσό ρεύματος ζητηθεί, τότε οι αγωγοί μπορεί να λυγίσουν σε κοντινή απόσταση από το έδαφος ή οι αγωγοί και ο εξοπλισμός να πάθουν ζημιά λόγω της υπερθέρμανσης. Για μεσαίες γραμμές μεταφοράς, το όριο τίθεται με βάση την πτώση τάσης της γραμμής, ενώ για μεγάλες γραμμές μεταφοράς το σύστημα σταθερότητας θέτει το όριο της ενέργειας που μπορεί να μεταφερθεί. Συνεπώς, σε ένα δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει περιορισμός για το ποσό της ενέργειας που μπορεί να μεταφερθεί.

Αν ο περιορισμός αυτός συνδυαστεί και με τις μέγιστες ώρες ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας, τότε δημιουργείτε πρόβλημα όχι μόνο στο δίκτυο μεταφοράς αλλά και στον καταναλωτή (αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας) . Οι μέγιστες ώρες ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας συμβαίνουν συνήθως κάθε πρωί ή αργά το απόγευμα και εξαρτάται από την γεωγραφική περιοχή. Σε εύκρατες περιοχές η

μέγιστη ζήτηση συμβαίνει όταν οικιακές συσκευές μεγάλης κατανάλωσης λειτουργούν το βράδυ μετά τις ώρες εργασίας. Σε ένα ζεστό κλίμα η μέγιστη ζήτηση εμφανίζεται αργά το απόγευμα, ενώ σε ένα κρύο κλίμα εμφανίζεται το πρωί όταν η οικιακή θέρμανση και η βιομηχανία ξεκινάνε ταυτόχρονα.

Προκειμένου λοιπόν, το δίκτυο να ανταπεξέλθει στις μέγιστες ώρες κατανάλωσης, υπάρχουν διάφοροι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι λειτουργούν στις ώρες μέγιστης κατανάλωσης. Ωστόσο, επειδή αυτοί σταθμοί λειτουργούν μόνο συγκεκριμένες ώρες μέσα στην ημέρα, θέτουν μια υψηλότερη τιμή στο κόστος της kWh απ' ότι το κανονικό κόστος της.

Συνεπώς, για να αποφύγουμε την δημιουργία προβλημάτων στο δίκτυο μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και την επιπρόσθετη οικονομική επιβάρυνση των καταναλωτών δημιουργήθηκε το περιβάλλον δυναμικής τιμολόγησης.

2.2 Δυναμική τιμολόγηση

Η δυναμική τιμολόγηση, η οποία επίσης αναφέρεται ως τιμολόγηση των τιμών, τιμολόγηση της ζήτησης ή τιμολόγηση βάση χρόνου, είναι μια στρατηγική τιμολόγησης, στην οποία οι επιχειρήσεις θέτουν ευέλικτες τιμές για προϊόντα ή υπηρεσίες βάση των σημερινών απαιτήσεων της αγοράς. Οι επιχειρήσεις έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν τιμές βάση αλγορίθμων που λαμβάνουν υπόψη την τιμολόγηση ανταγωνιστών, την προσφορά και τη ζήτηση και άλλους εξωτερικούς παράγοντες στην αγορά. Η δυναμική τιμολόγηση είναι μια κοινή πρακτική σε αρκετές βιομηχανίες όπως η φιλοξενία, τα ταξίδια, η ψυχαγωγία, το λιανικό εμπόριο, η ηλεκτρική ενέργεια και οι δημόσιες συγκοινωνίες. Κάθε κλάδος υιοθετεί μια ελαφρώς διαφορετική προσέγγιση όσον αφορά την αναπροσαρμογή βάσει των αναγκών της και της ζήτησης για το προϊόν.

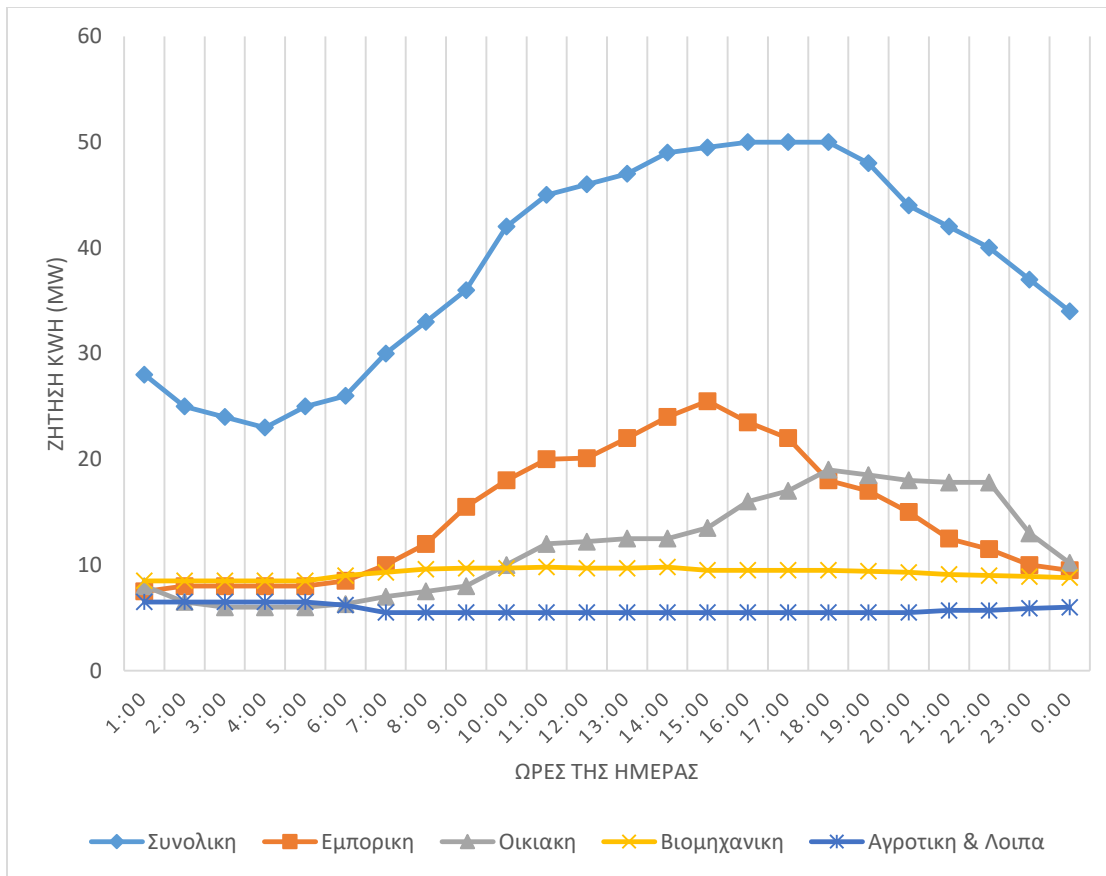
Όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το κόστος παραγωγής της είναι διαφορετικό σε κάθε μονάδα παραγωγής ενέργειας, άρα και το κόστος για την παραγωγή της κιλοβατώρας (kWh) δεν παραμένει σταθερό αλλά αλλάζει συνεχώς,

καθώς εξαρτάται από τις μονάδες παραγωγής ενέργειας που είναι σε λειτουργία, πόσο αποδοτικές είναι αυτές οι μονάδες, πόση είναι η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας σε εκείνο το χρονικό διάστημα και από το αν είναι σε λειτουργία κάποια Α.Π.Ε. (ηλιακό ή αιολικό πάρκο).

Σε μια οικία λοιπόν, η οποία λειτουργεί ως καταναλωτής, θα ήταν χρήσιμο να γνωρίζει το ποσό της ενέργειας που συναλλάχθηκε και πότε έγινε η συναλλαγή. Κάτι τέτοιο όμως, είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί με τους αναλογικούς μετρητές ενέργειας, αφού δεν μπορούν να εντοπίσουν το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας (kWh), το οποίο συναλλάχθηκε και πότε, ώστε να γίνει η κοστολόγηση της kWh, έτσι η τιμή της kWh κοστολογείται με βάση τον μέσο όρο. Άρα, ο κάθε καταναλωτής πληρώνει τη μέση τιμή της ενέργειας ανεξάρτητα από το πότε η ενεργεία καταναλώνεται.

Ωστόσο, σε περιβάλλον δυναμικής τιμολόγησης, αν ένα νοικοκυριό προβεί σε έναν σύντομο προγραμματισμό της ενεργειακής κατανάλωσης θα είναι σε θέση να επωφεληθεί από χαμηλότερο κόστος της τιμής της kWh. Για να επωφεληθούμε, όμως από ένα περιβάλλον δυναμικής τιμολόγησης θα πρέπει : α) να γνωρίζουμε πως και πότε οι τιμές αλλάζουν β) την ευελιξία να αγοράζουμε όταν οι τιμές είναι χαμηλές γ) έναν τρόπο να γνωρίζουμε την τιμή της kWh και να ελέγχουμε τις συσκευές με το μεγαλύτερο ηλεκτρικό φορτίο και δ) έναν μετρητή που θα καταγράφει το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία καταναλώθηκε και πότε πραγματοποιήθηκε αυτή η κατανάλωση.

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται ένα τυπικό καλοκαιρινό ηλεκτρικό φορτίο για μια κοινότητα. Με λίγες εξαιρέσεις, όταν η ζήτηση φτάσει στις μέγιστες τιμές τότε και η τιμή της kWh φτάνει και αυτή στο μέγιστο. Συνεπώς, αν μεταφέρουμε την ηλεκτρική κατανάλωση εκτός της μέγιστης τιμής της kWh, το περιβάλλον δυναμικής τιμολόγησης θα μας εξοικονομήσει χρήματα αγοράζοντας ενέργεια σε πιο φθηνές ώρες. Στο γράφημα η μεγαλύτερη ζήτηση παρουσιάζεται στις ώρες 1 μμ. μέχρι 6 μμ., άρα τότε θα παρουσιάζει και το μεγαλύτερο κόστος στις τιμές της kWh.



Γράφημα 1: Διάγραμμα κατανομής των φορτίων μέσα στη μέρα

2.3 Έξυπνοι μετρητές

Όπως έχει γίνει αναφορά, για να επωφεληθούμε από το περιβάλλον δυναμικής τιμολόγησης χρειαζόμαστε την εγκατάστασή έξυπνων μετρητών. Ο έξυπνος μετρητής είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που καταγράφει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε χρονικά διαστήματα μιας ώρας ή λιγότερο και ανακοινώνει τις πληροφορίες τουλάχιστον καθημερινά στην υπηρεσία που παρακολουθεί την τιμολόγηση. Οι έξυπνοι μετρητές επιτρέπουν αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ του μετρητή και του κεντρικού συστήματος. Σε αντίθεση με τις οθόνες οικιακής ενέργειας, οι έξυπνοι μετρητές μπορούν να συλλέξουν δεδομένα για απομακρυσμένες αναφορές. Μια τέτοια προηγμένη υποδομή μέτρησης (AMI) διαφέρει από την

παραδοσιακή αυτόματη ανάγνωση μετρητών (AMR) στο ότι επιτρέπει αμφίδρομες επικοινωνίες με το μετρητή. Οι επικοινωνίες από το μετρητή προς το δίκτυο μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσω σταθερών ενσύρματων συνδέσεων (όπως επικοινωνίες ηλεκτρικής γραμμής) ή μέσω ασύρματης σύνδεσης. Κατά τη χρήση ασύρματου δικτύου, μπορεί κανείς να επιλέξει κυτταρικές επικοινωνίες (που μπορεί να είναι ακριβές), Wi-Fi (άμεσα διαθέσιμα), ασύρματα δίκτυα ad hoc μέσω Wi-Fi, ασύρματα δίκτυα mesh, χαμηλής ισχύος ασύρματα δίκτυα μεγάλης εμβέλειας (LORA) ασύρματα δίκτυα χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, Wi-SUN (Smart Utility Networks) κ.λπ.

Από την έναρξη της απελευθέρωσης του ηλεκτρικού ρεύματος και της καθοδηγούμενης από την αγορά τιμολόγησης σε όλο τον κόσμο, οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας (στη χώρα μας Δ.Ε.Δ.Η.Ε.) αναζητούσαν ένα μέσο που να ταιριάζει με την κατανάλωση με τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι παραδοσιακοί ηλεκτρικοί μετρητές μετρούν μόνο τη συνολική κατανάλωση και επομένως δεν παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το πότε καταναλώνεται η ενέργεια σε κάθε μετρητή. Οι έξυπνοι μετρητές παρέχουν έναν τρόπο μέτρησης αυτών των πληροφοριών για συγκεκριμένες τοποθεσίες, επιτρέποντας στις εταιρείες κοινής ωφέλειας να εισάγουν διαφορετικές τιμές κατανάλωσης βάση της ημέρας και της εποχής.

Οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας προτείνουν ότι από την άποψη των καταναλωτών, η έξυπνη μέτρηση προσφέρει δυνητικά οφέλη στους ιδιοκτήτες κατοικιών. Αυτά περιλαμβάνουν: α) τέλος στους εκτιμώμενους λογαριασμούς, οι οποίοι αποτελούν σημαντική πηγή καταγγελιών για πολλούς πελάτες και β) ένα εργαλείο που βοηθά τους καταναλωτές να διαχειρίζονται καλύτερα την αγορά ενέργειας - αναφέροντας ότι οι έξυπνοι μετρητές με οθόνη έξω από τα σπίτια τους θα μπορούσαν να παρέχουν ενημερωμένες πληροφορίες, ώστε να βοηθήσουν τους πολίτες να διαχειριστούν τη χρήση ενέργειας και να μειώσουν τους λογαριασμούς τους για ενέργεια.

Η τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως κορυφώνεται σε ορισμένες προβλέψιμες ώρες της ημέρας και της εποχής. Ειδικότερα, αν η παραγωγή είναι περιορισμένη, οι τιμές μπορεί να αυξηθούν εάν η ηλεκτρική ενέργεια από άλλες

χώρες ή η πιο δαπανηρή παραγωγή φέρεται σε απευθείας σύνδεση. Οι υποστηρικτές θεωρούν ότι η χρέωση των πελατών σε υψηλότερο επιτόκιο για τους χρόνους αιχμής θα ενθαρρύνει τους καταναλωτές να προσαρμόσουν τις καταναλωτικές τους συνήθειες, ώστε να ανταποκρίνονται περισσότερο στις τιμές της αγοράς. Οι ρυθμιστικοί οργανισμοί και οι φορείς σχεδιασμού αγοράς ελπίζουν ότι αυτά τα «σήματα τιμών» θα καθυστερούσαν την κατασκευή πρόσθετης παραγωγής ή τουλάχιστον την αγορά ενέργειας από πηγές υψηλότερης τιμής, ελέγχοντας με τον τρόπο αυτό τη σταθερή και ταχεία αύξηση των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας.

2.4 Τρόποι ελέγχου φορτίων

Σε προηγούμενη παράγραφο, έγινε αναφορά ότι για να εκμεταλλευτούμε το περιβάλλον δυναμικής τιμολόγησης θα πρέπει να γίνει έλεγχος των συσκευών με το μεγαλύτερο ηλεκτρικό φορτίο, όπως π.χ. ο θερμοσίφωνας. Ο πιο συνήθεις τρόποι ελέγχου αποτελούν η διαχείριση φορτίου και οι μικροελεγκτές, όπως το Raspberry Pi και το Arduino.

i) Διαχείριση Φορτίου

Η διαχείριση φορτίου, γνωστή και ως διαχείριση της πλευράς ζήτησης (DSM), είναι η διαδικασία εξισορρόπησης της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο με το ηλεκτρικό φορτίο, ρυθμίζοντας ή ελέγχοντας το φορτίο και όχι την έξοδο του σταθμού παραγωγής ενέργειας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την άμεση παρέμβαση βοηθητικού προγράμματος σε πραγματικό χρόνο, με τη χρήση ρελέ ευαίσθητων σε συχνότητα, οι οποίοι ενεργοποιούν τους διακόπτες κυκλώματος (έλεγχος κυματοδηγού), με χρονικά ρολόγια ή με τη χρήση ειδικών τιμολογίων επηρεάζοντας τη συμπεριφορά των καταναλωτών. Η διαχείριση φορτίου επιτρέπει στις επιχειρήσεις κοινής ωφελείας να μειώσουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια των μέγιστων ωρών χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που μπορεί με τη σειρά του να μειώσει το κόστος εξαλείφοντας την ανάγκη για εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, σε μερικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής

ενέργειας υπάρχει η πιθανότητα, να χρειαστεί ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα ώστε να μπορέσει να συνδεθεί στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που καθιστά τη διαχείριση φορτίου ακόμη πιο κρίσιμη σε περίπτωση που ένα εργοστάσιο βγει απροσδόκητα εκτός ηλεκτρικού δικτύου. Η διαχείριση φορτίου μπορεί επίσης να συμβάλει στη μείωση των επιβλαβών εκπομπών, καθώς οι εγκαταστάσεις ηλεκτρικής παραγωγής ή οι εφεδρικές γεννήτριες είναι συχνά λιγότερο αποδοτικές από τις εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής βασικού φορτίου.

Δεδομένου ότι η ηλεκτρική ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας που δεν μπορεί να αποθηκευτεί αποτελεσματικά, πρέπει να παράγεται, να διανέμεται και να καταναλώνεται αμέσως. Όταν το φορτίο σε ένα σύστημα προσεγγίζει τη μέγιστη παραγωγική ικανότητα, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύου πρέπει είτε να βρουν πρόσθετες παροχές ενέργειας είτε να βρουν τρόπους για να περιορίσουν το φορτίο και επομένως τη διαχείριση φορτίου. Αν δεν είναι επιτυχές, το σύστημα θα γίνει ασταθές και πιθανώς να υπάρξουν διακοπές ρεύματος.

Ο μακροπρόθεσμος σχεδιασμός διαχείρισης φορτίου μπορεί να ξεκινήσει με την κατασκευή εξελιγμένων μοντέλων που περιγράφουν τις φυσικές ιδιότητες του δικτύου διανομής (δηλαδή τοπολογία, χωρητικότητα και άλλα χαρακτηριστικά των γραμμών), καθώς και τη συμπεριφορά του φορτίου. Η ανάλυση μπορεί να περιλαμβάνει σενάρια που λαμβάνουν υπόψη τις προβλέψεις καιρού, τον προβλεπόμενο αντίκτυπο των προτεινόμενων εντολών φόρτωσης φορτίου, τον εκτιμώμενο χρόνο επισκευής για εξοπλισμό εκτός γραμμής και άλλους παράγοντες.

Η αξιοποίηση της διαχείρισης φορτίου μπορεί να βοηθήσει ένα εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής να επιτύχει υψηλότερο συντελεστή χωρητικότητας, μέτρο της μέσης χρησιμοποίησης της παραγωγικής ικανότητας. Ο συντελεστής χωρητικότητας είναι ένα μέτρο της παραγωγής ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής σε σύγκριση με τη μέγιστη παραγωγή που θα μπορούσε να παράγει. Ο συντελεστής παραγωγικής ικανότητας ορίζεται συχνά ως ο λόγος του μέσου φορτίου προς τη χωρητικότητα ή του λόγου του μέσου φορτίου προς το φορτίο αιχμής σε μια χρονική περίοδο. Ένας υψηλότερος συντελεστής φορτίου είναι πλεονεκτικός, επειδή μια μονάδα παραγωγής ενέργειας μπορεί να είναι λιγότερο αποδοτική σε χαμηλό συντελεστή φορτίου. Επίσης, ένας υψηλός συντελεστής φορτίου σημαίνει ότι το σταθερό κόστος

κατανέμεται σε περισσότερες kWh της παραγωγής (με αποτέλεσμα χαμηλότερη τιμή ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας) και μεγαλύτερη συνολική απόδοση. Εάν ο συντελεστής φορτίου επηρεάζεται από τη μη διαθεσιμότητα καυσίμου, από διακοπή συντήρησης, απρογραμματίστη βλάβη ή μειωμένη ζήτηση (καθώς το πρότυπο κατανάλωσης διακυμαίνεται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας), η παραγωγή πρέπει να προσαρμόζεται, δεδομένου ότι η αποθήκευση ενέργειας στο δίκτυο είναι συχνά απαγορευτικά δαπανηρή.

Όταν λαμβάνεται η απόφαση να περιοριστεί το φορτίο, αυτό γίνεται με βάση την αξιοπιστία του συστήματος. Βοηθητικά προγράμματα, τα οποία κατά μία έννοια "κατέχουν τον διακόπτη" και απορρίπτουν τα φορτία μόνο όταν απειλείται η σταθερότητα ή η αξιοπιστία του ηλεκτρικού συστήματος διανομής. Η χρησιμότητα (που ασχολείται με την παραγωγή, τη μεταφορά και την παράδοση ηλεκτρικής ενέργειας) δεν θα διαταράξει την επιχειρηματική τους διαδικασία χωρίς εύλογη αιτία. Η διαχείριση φορτίων, όταν γίνεται σωστά, είναι μη επεμβατική και δεν επιφέρει καμιά δυσκολία στον καταναλωτή.

Ένας τρόπος ελέγχου του φορτίου είναι η απόκριση ζήτησης, να παρέχει έναν διακόπτη "On - Off" στα χέρια του καταναλωτή, χρησιμοποιώντας συσκευές όπως ένας διακόπτης ελέγχου φορτίου ελεγχόμενος από το έξυπνο δίκτυο. Ενώ πολλοί οικιακοί καταναλωτές πληρώνουν ένα καθ' αποκοπή ποσό για την ηλεκτρική ενέργεια καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, το κόστος της υπηρεσίας ποικίλει διαρκώς, ανάλογα με τη ζήτηση, το δίκτυο διανομής και τη σύνθεση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της εταιρείας. Σε μια ελεύθερη αγορά, η χονδρική τιμή της ενέργειας ποικίλλει ευρέως καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης, όπως αυτά που ενεργοποιούνται από τα έξυπνα δίκτυα, επιχειρούν να ενθαρρύνουν τον καταναλωτή να περιορίσει τη χρήση με βάση το σχετικό κόστος. Καθώς αυξάνεται το κόστος κατά τη διάρκεια της ημέρας (το σύστημα φτάνει στην μέγιστη δυναμικότητα του και χρησιμοποιούνται πιο ακριβές τιμές κόστους ηλεκτρικής ενέργειας), σε μια ελεύθερη οικονομία της αγοράς θα επιτρέψει η άνοδος της τιμής. Μια αντίστοιχη πτώση της ζήτησης για το εμπόρευμα πρέπει να αντιμετωπίσει πτώση της τιμής. Ενώ αυτό το μοντέλο λειτουργεί για προβλέψιμες ελλείψεις της ηλεκτρικής ενέργειας, πολλές κρίσεις αναπτύσσονται μέσα σε λίγα

δευτερόλεπτα λόγω απρόβλεπτων βλαβών του εξοπλισμού. Πρέπει να επιλυθούν στο ίδιο χρονοδιάγραμμα για να αποφευχθεί μια διακοπή ρεύματος. Πολλές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας που ενδιαφέρονται για την ανταπόκριση στη ζήτηση έχουν επίσης εκφράσει ενδιαφέρον για τη δυνατότητα ελέγχου φορτίου, ώστε να είναι σε θέση να λειτουργήσουν τον "διακόπτη On-Off" πριν από την ενημέρωση των τιμών για τους καταναλωτές.

Εκτός από το να θέτει στον καταναλωτή την λειτουργία του φορτίου ή όχι υπάρχει και ο έλεγχος μέσω υπέρθεσης σημάτων πάνω στη βασική συχνότητα (ripple control). Είναι η πιο κοινή μορφή ελέγχου φορτίου και χρησιμοποιείται σε πολλές χώρες σε όλο τον κόσμο, συμπεριλαμβανομένης της Αυστραλίας, της Νέας Ζηλανδίας, του Ηνωμένου Βασιλείου, της Γερμανίας, των Κάτω Χωρών και της Νότιας Αφρικής. Ο έλεγχος ανίχνευσης περιλαμβάνει την υπέρθεση ενός σήματος υψηλότερης συχνότητας (συνήθως μεταξύ 100 και 1600 Hz) στο πρότυπο 50-60 Hz του κύριου σήματος ισχύος. Όταν οι συσκευές του δέκτη που είναι προσαρτημένες σε μη βασικά οικιστικά ή βιομηχανικά φορτία λαμβάνουν αυτό το σήμα, κλείνουν το φορτίο μέχρι να απενεργοποιηθεί το σήμα ή να ληφθεί ένα άλλο σήμα συχνότητας. Η εφαρμογή της τεχνολογίας ελέγχου φορτίου συνεχίζει να αυξάνεται σήμερα με την πώληση τόσο συστημάτων ραδιοσυχνοτήτων όσο και συστημάτων επικοινωνίας ισχύος.

ii) **Arduino**

Το Arduino είναι ένας υπολογιστής ανοιχτού κώδικα υλικού και λογισμικού, σχεδιασμού και χρήσης, το οποίο σχεδιάζει και κατασκευάζει μικροελεγκτές, μονής



Λογότυπο Arduino

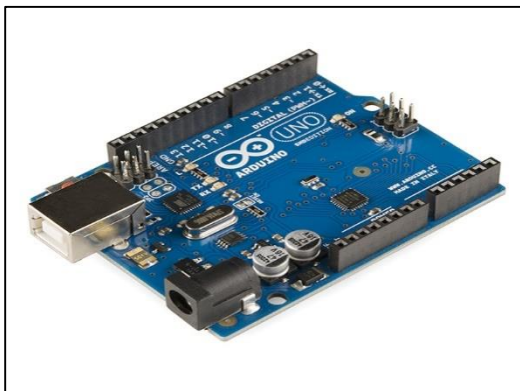
πλακέτας και εργαλεία μικροελεγκτών για την κατασκευή ψηφιακών συσκευών και διαδραστικών συσκευών, οι οποίες μπορούν να «αισθανθούν» και να ελέγχουν άλλες συσκευές στον φυσικό κόσμο. Τα προϊόντα της επιχείρησης διανέμονται ως ανοιχτού λογισμικού και λειτουργικού, τα οποία διαθέτουν την

άδεια τους υπό τη Γενική Άδεια Δημόσιας Χρήσης, επιτρέποντας στους κατασκευαστές των πλακετών Arduino και του λογισμικού του να χρησιμοποιούνται από τον καθένα.

Οι πλακέτες Arduino χρησιμοποιούν μια ποικιλία από μικροεπεξεργαστές και ελεγκτές. Οι πλακέτες είναι εξοπλισμένες με μια σειρά ακιδών (pins) από ψηφιακές και αναλογικές εισόδους και εξόδους (I/O), οι οποίες μπορούν να επικοινωνήσουν με διάφορες άλλες πλακέτες (shields) και άλλα κυκλώματα. Οι πλακέτες διαθέτουν σειριακή διεπαφική επικοινωνία, όπως USB σε μερικά μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται για το άνοιγμα προγραμμάτων από τους προσωπικούς υπολογιστές. Οι μικροελεγκτές τυπικά χρησιμοποιούν μια «διάλεκτο» από τις γλώσσες προγραμματισμού C και C++. Επιπλέον, για να διαθέσουν τον παραδοσιακό μεταγλωττιστή, η Arduino παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) βασισμένο στη γλώσσα προγραμματισμού Processing.

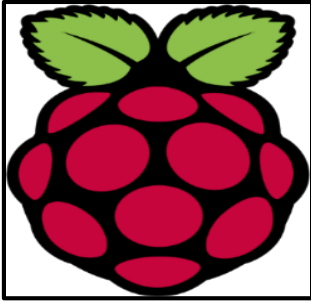
Η επιχείρηση της Arduino ξεκίνησε το 2003 ως ένα πρόγραμμα για σπουδαστές στο Ινστιτούτο σχεδιασμού στην Ιβρέα της Ιταλίας, έχοντας ως στόχο να παρέχουν μια συσκευή χαμηλού κόστους και εύκολου τρόπου χρήσης, η οποία θα απευθύνεται τόσο σε αρχάριους όσο και επαγγελματίες, που θα αντιδρά με το περιβάλλον χρησιμοποιώντας αισθητήρες και ενεργοποιητές.

Κάποια παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών που απευθύνονται σε αρχάριους αποτελούν τα ρομπότ, οι θερμοστάτες και οι ανιχνευτές κίνησης.



Εικόνα 9 : Η Πλακέτα Arduino UnoSMDR3

iii) Raspberry Pi



Λογότυπο Raspberry Pi

Στην ίδια λογική με την πλακέτα του Arduino, δηλαδή στην χρήση ελεγκτών και μικροεπεξεργαστών για ανάλυση, επεξεργασία και επιστροφή αποτελεσμάτων, αποτελεί η πλακέτα Raspberry Pi. Το Raspberry Pi αποτελεί, έναν πλήρη υπολογιστής στο μέγεθος μιας πιστωτικής κάρτας. Η ανάπτυξη του Raspberry Pi ξεκίνησε στην Αγγλία από τη « Raspberry Pi Foundation » με σκοπό την προώθηση της εκμάθησης της επιστήμης των υπολογιστών στα σχολεία.

Κεφάλαιο 3^ο – Γλώσσες προγραμματισμού

Η χρήση των πλακετών Arduino και Raspberry Pi γίνεται με την βοήθεια κατάλληλων γλωσσών προγραμματισμού. Γλώσσα προγραμματισμού, λέγεται μια τεχνητή γλώσσα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο μιας μηχανής, συνήθως ενός υπολογιστή. Οι γλώσσες προγραμματισμού ορίζονται από ένα σύνολο συντακτικών και εννοιολογικών κανόνων, που ορίζουν τη δομή και το νόημα, αντίστοιχα, των προτάσεων της γλώσσας. Χρησιμοποιούνται για να διευκολύνουν την οργάνωση και διαχείριση πληροφοριών, αλλά και για την ακριβή διατύπωση αλγορίθμων.

3.1 Επιλογή γλώσσας προγραμματισμού

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, η γλώσσα προγραμματισμού που θα χρησιμοποιηθεί είναι η Visual Basics for Applications (VBA). Η VBA είναι μία γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου, την οποία ανέπτυξε η Microsoft με σκοπό τη δημιουργία εφαρμογών για Windows. Η Visual Basics for Applications (VBA) είναι μια υλοποίηση της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic 6 της Microsoft, η οποία είχε διακοπεί το 2008, και το σχετικό ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE). Παρόλο που η Visual Basic δεν υποστηρίζεται πλέον ή ενημερώνεται από τη Microsoft, η ίδια η VBA αναβαθμίστηκε το 2010 με την εισαγωγή της Visual Basic for Applications 7 στις εφαρμογές του Microsoft Office. Η VBA επιτρέπει την δημιουργία λειτουργιών που ορίζονται από το χρήστη (UDF), την αυτοματοποίηση διαδικασιών και την πρόσβαση σε API των Windows και άλλες λειτουργίες χαμηλού επιπέδου μέσω βιβλιοθηκών δυναμικών συνδέσεων (DLLs) και επιπλέον αντικατοπτρίζει και επεκτείνει τις δυνατότητες των γλωσσών προγραμματισμού μακροεντολών που αφορούν συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως το Word Basic του Word. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο πολλών πτυχών της εφαρμογής κεντρικού υπολογιστή, συμπεριλαμβανομένου του χειρισμού λειτουργιών διεπαφής χρήστη, όπως μενού και γραμμών εργαλείων, και εργασίας με προσαρμοσμένες φόρμες χρηστών ή πλαίσια διαλόγου. Όπως υποδηλώνει το όνομά της, η VBA σχετίζεται στενά με τη Visual Basic και χρησιμοποιεί τη Visual Basic Runtime Library. Ωστόσο, ο κώδικας κανονικά μπορεί να εκτελεστεί μόνο σε μια εφαρμογή κεντρικού υπολογιστή και όχι ως αυτόνομο πρόγραμμα. Εντούτοις, μπορεί να ελέγχει μια εφαρμογή από την άλλη με χρήση του αυτοματισμού OLE. Για παράδειγμα, μπορεί να δημιουργήσει αυτόματα μια αναφορά του Microsoft Word από τα δεδομένα του Microsoft Excel, τα οποία το Excel συγκεντρώνει αυτόματα από τους ερωτηθέντες αισθητήρες. Η VBA μπορεί να χρησιμοποιήσει, αλλά όχι να δημιουργήσει, τα ActiveX / COM DLLs και οι νεότερες εκδόσεις προσθέτουν υποστήριξη για ενότητες κλάσης. Είναι ενσωματωμένη στις περισσότερες εφαρμογές του Microsoft Office, όπως το Office για Mac OS X (εκτός από την έκδοση 2008) και

άλλες εφαρμογές της Microsoft, όπως το Microsoft MapPoint και το Microsoft Visio. Υλοποιείται επίσης, τουλάχιστον εν μέρει, σε εφαρμογές που εκδίδονται από άλλες εταιρείες εκτός της Microsoft, όπως το ArcGIS, το AutoCAD, το CorelDraw, το LibreOffice, το Reflection, το SolidWorks και το WordPerfect.

Παρακάτω δίνονται οι λόγοι, για τους οποίους επιλέξαμε την Visual Basics for Applications.

1. Βρόγχοι και επαναληπτικές διαδικασίες.
2. Έλεγχος (φιλτράρισμα) δεδομένων εισόδου μέσω φορμών και στοιχείων ελέγχου.
3. Συγγραφή ή διασύνδεση με το excel πραγματικού κώδικα αντί διασυσχέτισης κελιών.
4. Εποπτικότερη ροή προγράμματος.
5. Αυτόματη και ελεγχόμενη έξοδος δεδομένων σε αρχεία.
6. Αναδόμηση δεδομένων εντός του excel.
7. Μεταφορά δεδομένων και συνεργασία με όλες τις άλλες εφαρμογές του Office. Ελεγχόμενη ροή κειμένου και δεδομένων στο word.
8. Συγγραφή ειδικών συναρτήσεων, οι οποίες δεν υπάρχουν στο excel.
9. Εύκολες αλλαγές σε διαγράμματα με την χρήση στοιχείων ελέγχου και όχι μενού επιλογών.

Κεφάλαιο 4^ο- Μαθηματικές σχέσεις

Ο θερμοσίφοντας αποτελεί μια περιπλοκή ηλεκτρική οικιακή συσκευή, καθώς αφορά τόσο την θέρμανση του νερού όσο και την αποθήκευση του. Η ημερήσια ενέργεια, την οποία απαιτεί ο θερμοσίφοντας, ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας του νερού, ο τρόπος υπολογισμού της ωριαίας κατανάλωσης νερού καθώς και άλλοι σημαντικοί παράμετροι του θερμοσίφωνα αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο.

4.1 Υπολογισμός της ωριαίας κατανάλωσης νερού

Είναι εξαιρετικά δύσκολο να μετρηθεί ή να προβλεφθεί η ωριαία κατανάλωση νερού σε μια οικία. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούμε το μοντέλο, το οποίο προτάθηκε από το Ινστιτούτο Έρευνας Ηλεκτρικής Ενέργειας (E.P.R.I), το οποίο ο στόχος του έργου ήταν να βοηθήσει τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να προβλέψουν την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας προβλέποντας κατανάλωση ζεστού νερού οικιακής χρήσης και συνεπώς η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από θερμοσίφωνες. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό η ωριαία κατανάλωση νερού μπορεί να υπολογιστεί ως εξής :

$$H.W.U(t) = [a_0 + a_1(per) + a_2(age1) + a_3(age2) + a_4(age4) + a_5(therm) + a_6(tanksz) + a_7(wtmp) + a_8(atmp) + a_9(athome) + a_{10}(spring) + a_{12}(summer) + a_{12}(fall) + a_{13}(winter) - no_{cw} - no_{dw}](1 - 0.621senior)(1 + 0.3625no_{pay}), \text{ όπου}$$

- H.W.U (t): Η ωριαία κατανάλωση του νερού σε λίτρα.
- Per: Τα άτομα που διαμένουν στο σπίτι.
- Age1: Τα παιδιά από 0 έως 5 χρονών.
- Age2: Τα παιδιά από 6 έως 13 χρονών.

- Age3: Τα παιδιά από 14 χρονών και πάνω.
- Therm: Ο θερμοστάτης του θερμοσίφωνα σε °C.
- Tanksz: Το μέγεθος του θερμοσίφωνα σε λίτρα.
- Wtmp: Η εσωτερική θερμοκρασία του νερού του θερμοσίφωνα σε °C.
- Atmp: Η εξωτερική θερμοκρασία σε °C.
- Athome: Μια ψευδομεταβλητή, η οποία δείχνει την παρουσία ενηλίκων κατά την διάρκεια της μέρας.
- Spring: Μια ψευδομεταβλητή, η οποία δηλώνει την άνοιξη (τοποθετούμε 1 αν η εποχή είναι στην άνοιξη και 0 αν δεν είναι).
- Summer: Μια ψευδομεταβλητή, η οποία δηλώνει το καλοκαίρι (τοποθετούμε 1 αν η εποχή είναι στο καλοκαίρι και 0 αν δεν είναι).
- Fall: Μια ψευδομεταβλητή, η οποία δηλώνει το φθινόπωρο (τοποθετούμε 1 αν η εποχή είναι στο φθινόπωρο και 0 αν δεν είναι).
- Winter: Μια ψευδομεταβλητή, η οποία δηλώνει τον χειμώνα (τοποθετούμε 1 αν η εποχή είναι στο χειμώνα και 0 αν δεν είναι).
- no_{DW} : Μια ψευδομεταβλητή, η οποία δείχνει την εξοικονόμηση του ζεστού νερού, όταν δεν υπάρχει πλυντήριο πιάτων.

$$no_{DW} = \begin{cases} 0.655_{per} + 9.035\sqrt{per} \\ 0, Σε όποια άλλη περίπτωση \end{cases}$$

no_{CW} : Μια ψευδομεταβλητή, η οποία δείχνει την εξοικονόμηση του ζεστού νερού, όταν δεν υπάρχει πλυντήριο ρούχων.

$$\begin{cases} 2,2121_{per} + 9.035\sqrt{per}, για την μη χρησιμοποίηση (ώρες 7 – 9 π. μ καθημερινές.) \\ 1,4750_{per} + 6.023\sqrt{per}, για την μη χρησιμοποίηση (ώρες 8 – 11 μ. μ σαββατοκύριακα.) \\ 0, Σε όποια άλλη περίπτωση. \end{cases}$$

$$Senior = \begin{cases} 1, Σε περίπτωση που υπάρχει ένας ενήλικας στην οικία. \\ 0, Σε όποια άλλη περίπτωση. \end{cases}$$

$$no_{pay} = \begin{cases} 1, Σε περίπτωση που η οικία δεν πληρώνει για ζεστό νερό. \\ 0, Σε όποια άλλη περίπτωση. \end{cases}$$

Οι μεταβλητές α_1 έως α_{13} δίνονται στους πίνακες 1 και 2.

Στην παραπάνω εξίσωση, αν το ζεστό νερό, το οποίο εξοικονομείτε από την απουσία των πλυντηρίων ρούχων και πιάτων, είναι περισσότερο από την κατανάλωση κάποιων ωρών κατά την διάρκεια της καλοκαιρινής διάρκειας, τότε η κατανάλωση του ζεστού νερού κατά την διάρκεια εκείνων των ωρών γίνεται αρνητική, κάτι το οποίο δεν είναι δυνατό. Γι' αυτόν τον λόγο οι ψευδομεταβλητές no_{DW} και no_{CW} για την εξοικονόμηση ζεστού νερού, όταν το πλυντήριο πιάτων και ρούχων δεν είναι διαθέσιμα, τροποποιούνται έτσι ώστε να είναι γραμμικές, εξαρτώμενες από την θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος, κάνοντας την υπόθεση ότι η εξοικονόμηση είναι στο 100% όταν η εξωτερική θερμοκρασία αέρα είναι -40°C και στο 0% όταν η θερμοκρασία είναι $+40^{\circ}\text{C}$. Για τον ίδιο ακριβώς λόγο, το ζεστό νερό, το οποίο εξοικονομείτε από την απουσία του πλυντηρίου ρούχων, έχει επίσης διανεμηθεί σε ένα μεγαλύτερο εύρος χρόνου, το οποίο είναι 5 έως 9 π.μ. αντί για 7 έως 9 π.μ.. Οι νέες συναρτήσεις για no_{DW} και no_{CW} είναι :

$$no_{DW} = \begin{cases} (0.5 - 0.0125atmp)(0.655 + 1.2635\sqrt{per}), & \text{αν δεν υπάρχει πλυντήριο πιάτων μεταξύ 5 - 9 π.μ.} \\ 0, & \text{Σε όποια άλλη περίπτωση.} \end{cases}$$

$$no_{CW} = \begin{cases} (0.5 - 0.25atmp)(1.106per + 4.5175\sqrt{per}), & \text{χωρίς πλυντήριο ρούχων (5 - 9 π.μ.) καθημερινές} \\ (0.5 - 0.25atmp)(1.475 + 6.023\sqrt{per}), & \text{χωρίς πλυντήριο ρούχων (8 - 11 μ.μ.) σαββατοκύριακα} \\ 0, & \text{Σε όποια άλλη περίπτωση.} \end{cases}$$

Στο παρακάτω γράφημα δίνεται ένα παράδειγμα ωριαίας κατανάλωσης ζεστού νερού, χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση. Στο παράδειγμα μας, για μια καθημερινή μέρα έχουμε μια απλή οικογένεια, η οποία αποτελείται από δύο ενήλικες και δύο παιδιά ηλικίας 10 και 15 ετών, με έναν ενήλικα να μένει στο σπίτι κατά την διάρκεια του χειμώνα. Η θερμοκρασία χώρου είναι στους 20°C και η θερμοκρασία εισερχόμενου νερού στους 10°C με τον θερμοσίφωνα να έχει χωρητικότητα 190 λίτρα. Ο θερμοστάτης είναι ρυθμισμένος στους 65°C και δεν υπάρχει η παρουσία πλυντηρίου για οικιακά σκεύη και ρούχα. Συνεπώς η παραπάνω σχέση τροποποιείτε ως εξής :

$$H.W.U_{(t)} = a_0 + a_1(per) + a_3(age_2) + a_4(age_4) + a_5(therm) + a_6(tanksz) \\ + a_7(wtmp) + a_8(atmp) + a_9(athome) + a_{13}(winter)$$

Λαμβάνοντας, υπόψιν τις τιμές του πίνακα 2 για την χρονική διάρκεια 11μ.μ έως 6π.μ έχουμε: $\alpha_0 = 0\alpha_1 = 0,6163\alpha_3 = 0\alpha_4 = 0\alpha_5 = 0\alpha_6 = -0,0017\alpha_7 = 0\alpha_8 = 0\alpha_9 = 0\alpha_{13} = 0,5523$

Άρα, η ωριαία κατανάλωση για χρονικό διάστημα αυτό είναι $H.W.U_{(t)} = 2,7 l$.

Για την χρονική διάρκεια 6π.μ έως 8π.μ έχουμε: $\alpha_0 = 2,0956\alpha_1 = 0\alpha_3 = 3,483\alpha_4 = 7,9861\alpha_5 = 0\alpha_6 = 0,0269\alpha_7 = -0,5425\alpha_8 = 0,6603\alpha_9 = -3,6609\alpha_{13} = 0$

Άρα, η ωριαία κατανάλωση για χρονικό διάστημα αυτό είναι $H.W.U_{(t)} = 22,79 l$.

Για την χρονική διάρκεια 8π.μ έως 11π.μ έχουμε: $\alpha_0 = 0\alpha_1 = 0\alpha_3 = 1,5331\alpha_4 = 2,4972\alpha_5 = 0\alpha_6 = 0\alpha_7 = 0\alpha_8 = 0\alpha_9 = 9,0418\alpha_{13} = 2,1403$

Άρα, η ωριαία κατανάλωση για χρονικό διάστημα αυτό είναι $H.W.U_{(t)} = 15,21 l$

Για την χρονική διάρκεια 11π.μ έως 1μ.μ έχουμε: $\alpha_0 = -0,3876\alpha_1 = 0\alpha_3 = 1,0849\alpha_4 = 2,0956\alpha_5 = -0,0218\alpha_6 = 0\alpha_7 = 0\alpha_8 = 0\alpha_9 = 6,1984\alpha_{13} = 1,5187$.

Άρα, η ωριαία κατανάλωση για χρονικό διάστημα αυτό είναι $H.W.U_{(t)} = 9,09 l$.

Για χρονική διάρκειά 1μ.μ έως 5μ.μ έχουμε: $\alpha_0 = -0,2907\alpha_1 = 0\alpha_3 = 1,2\alpha_4 = 2,3072\alpha_5 = -0,0906\alpha_6 = 0,0083\alpha_7 = 0\alpha_8 = 0,0743\alpha_9 = 4,0228\alpha_{13} = 2,5854$.

Άρα, η ωριαία κατανάλωση για χρονικό διάστημα αυτό είναι $H.W.U_{(t)} = 6,25 l$.

Για την χρονική διάρκεια 5μ.μ έως 7μ.μ έχουμε: $\alpha_0 = 0,7753\alpha_1 = 0\alpha_3 = 2,0415\alpha_4 = 3,6018\alpha_5 = 0\alpha_6 = 0\alpha_7 = -0,3134\alpha_8 = 0,357\alpha_9 = 5,3492\alpha_{13} = 3,656$.

Άρα, η ωριαία κατανάλωση για χρονικό διάστημα αυτό είναι $H.W.U_{(t)} = 19,41 l$.

Για την χρονική διάρκεια 7μ.μ έως 9μ.μ έχουμε: $\alpha_0 = 4,4577\alpha_1 = 0\alpha_3 = 4,4092\alpha_4 = 3,3455\alpha_5 = -0,1015\alpha_6 = 0,0187\alpha_7 = 0\alpha_8 = 0,3523\alpha_9 = 0\alpha_{13} = 0$.

Άρα, η ωριαία κατανάλωση για χρονικό διάστημα αυτό είναι $H.W.U_{(t)} = 16,22 l$.

Για την χρονική διάρκεια 9μ.μ έως 11μ.μ έχουμε: $\alpha_0 = 4,2881\alpha_1 = 0\alpha_3 = 3,4394\alpha_4 = 2,5135\alpha_5 = -0,0436\alpha_6 = 0\alpha_7 = 0\alpha_8 = 0,2848\alpha_9 = 0\alpha_{13} = 0$.

Άρα, η ωριαία κατανάλωση για χρονικό διάστημα αυτό είναι $H.W.U_{(t)} = 10,68 \text{ l}$.



Γράφημα 2: Ενδεικτική κατανάλωση νερού

- Καθημερινές

Hour	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}	α_{13}
11-6	0	0.616	0		0	0	-0.017	0	0	0	0	0	0	0.552
6-8	2.095	0	0	3.483	7.986	0	0.026	-0.542	0.66	-3.66	0	-13.601	0	0
8-11	0	0	1.085	1.533	2.497	0	0	0	0	9.041	0	0	-1.635	2.14
11-1	-0.387	0	0.966	1.084	2.095	-0.02	0	0	0	6.198	0	0	-1.683	1.518
1-5	-0.290	0	1.97	1.2	2.307	-0.09	0.0083	0	0.074	4.022	0	0	0	2.584
5-7	0.775	0	1.567	2.041	3.601	0	0	-0.313	0.357	5.349	0	-3.685	0	3.656
7-9	4.457	0	2.746	4.409	3.345	0.01	0.0187	0	0.352	0	0	-8.052	-3.25	0
9-11	4.288	0	1.443	3.439	2.513	-0.043	0	0	0.284	-2.416	0	-3.377	-3.551	0

Πίνακας 2: Τροποποιημένες σταθερές του μοντέλου EPRI ωριαίας κατανάλωσης νερού για καθημερινές

Hour	no_{DW}	no_{CW}	senior	No pay
11-6	0	0	0.379	1.362
6-8	0	0	0.379	1.362
8-11	0	17.945	0.379	1.362
11-1	0	0	0.379	1.362
1-5	0	0	0.379	1.362
5-7	5.147	0	0.379	1.362
7-9	5.147	0	0.379	1.362
9-11	0	0	0.379	1.362

Πίνακας 2: Τροποποιημένες σταθερές του μοντέλου EPRI ωριαίας κατανάλωσης νερού για καθημερινές

- **Σαββατοκύριακα**

•	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}	α_{13}
11-6	0	0.303	0	0	0	0	-0.001	0	0	0	0.334	0.634	0	0.642
6-8	3.803	0	0	1.151	1.338	0	0.0269	0	-0.214	0	0	-5.939	-2.48	0
8-11	0	0	1.304	2.779	5.68	0	0	0	0	0	4.759	0	0	5.116
11-1	2.593	0	0.9	2.007	5.418	-0.183	0	0	-0.329	0	0	-4.784	0	5.603
1-5	1.817	0	1.73	1.72	3.804	-0.144	0.008	0	-0.246	0	0	-3.56	0	4.45
5-7	3.316	0	2.159	2.969	3.86	-0.18	0	0	-0.358	0	0	-5.616	0	6.202
7-9	3.5	0	1.203	4.957	2.314	0	0.0187	0	-0.196	0	3.127	-3.696	0	0
9-11	0	0	1.895	3.086	2.569	0	0	0	0	0	0	0	-1.433	0

Πίνακας 3: Τροποποιημένες σταθερές του μοντέλου EPRI ωριαίας κατανάλωσης νερού για Σαββατοκύριακα

Hour	no_{DW}	no_{CW}	senior	No pay
11-6	0	0	0.379	1.365
6-8	0	0	0.379	1.365
8-11	0	17.945	0.379	1.365
11-1	0	0	0.379	1.365
1-5	0	0	0.379	1.365
5-7	5.147	0	0.379	1.365
7-9	5.147	0	0.379	1.365
9-11	0	0	0.379	1.365

Πίνακας 3: Τροποποιημένες σταθερές του μοντέλου EPRI ωριαίας κατανάλωσης νερού για Σαββατοκύριακα

4.2 Υπολογισμός παραμέτρων

Η λειτουργία του θερμοσίφωνα διέπτε από μια σειρά παραμέτρων, οι οποίοι είναι απαραίτητη για σωστή λειτουργία του.

4.2.1 Υπολογισμός παραμέτρου E

Η παράμετρος E, αντιπροσωπεύει την συνολική ενέργεια σε Joule, η οποία απαιτείτε για την επιθυμητή λειτουργία του θερμοσίφωνα. Η παράμετρος E είναι μια συνάρτηση της συνολικής μάζας νερού, της ειδικής θερμότητας του νερού και την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιθυμητής θερμοκρασίας νερού και της θερμοκρασίας του εισερχομένου νερού. Σύμφωνα με τα παραπάνω έχουμε ότι :

$$E = m * C_p * (T_{bath} - T_{inlet}), \text{ όπου} \quad (4.2.1)$$

- a. E είναι η καθημερινή ενέργεια που απαιτείτε για την λειτουργία του θερμοσίφωνα σε Joule.
- b. m είναι η μάζα της δεξαμενής σε Kg.
- c. T_{bath} είναι η επιθυμητή θερμοκρασία ζεστού νερού.
- d. T_{inlet} είναι η θερμοκρασία του εισερχόμενου νερού.

4.2.2 Υπολογισμός παραμέτρου a_{wh}

Αρχικά, η παράμετρος a_{wh} αντιπροσωπεύει τον ρυθμό, με τον οποίο αυξάνεται η θερμοκρασία όταν το θερμαντικό στοιχείο τίθεται σε κατάσταση λειτουργίας, για ένα χρονικό διάστημα των 15 λεπτών. Μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την θερμοδυναμική εξίσωση όπως φαίνεται παρακάτω :

$$H_i = m * C_p * a_{wh} \text{ όπου} \quad (4.2.2)$$

- a. H_i είναι το ποσό της θερμότητας σε Joule, το οποίο δέχεται το νερό, όταν ο θερμοσίφωνα είναι σε κατάσταση λειτουργίας κατά την διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος.
- b. a_{wh} είναι το ποσό της θερμοκρασιακής αύξησης του νερού, σε °C, κατά την διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος.
- c. C_p είναι η ειδική θερμότητα του νερού, η οποία είναι ίση με 4185 J/kg.°C
- d. Και m είναι η μάζα του νερού σε μέσα στον θερμοσίφωνα σε kg.

Το ποσό της θερμότητας, το οποίο δέχεται το νερό, όταν το θερμαντικό στοιχείο είναι σε κατάσταση λειτουργία για Δ_t χρονικό διάστημα, μπορεί επίσης να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση :

$$H_i = P * \Delta_t \text{ όπου} \quad (4.2.3)$$

- a. P είναι η ισχύς του θερμαντικού στοιχείου, η οποία μετριέται σε Watt.
- b. Δ_t είναι ο χρόνος λειτουργίας σε second.

Από τις σχέσεις 4.2.2 και 4.2.3 προκύπτει ότι $a_{wh} = \frac{P * \Delta_t}{m * C_p}$. Για παράδειγμα, αν το θερμαντικό στοιχείο έχει ισχύ 3800 W, η χωρητικότητα του θερμοσίφωνα είναι 184 λίτρα και ο χρόνος λειτουργίας είναι 15 λεπτά, δηλαδή 900 second, τότε $a_{wh} = \frac{3800 * 900}{184 * 4185} = 4.44 \text{ } ^\circ\text{C}$.

4.2.3 Υπολογισμός παραμέτρου Y_{wh}

Η παράμετρος Y_{WH} , αντιπροσωπεύει την πτώση θερμοκρασίας (σε °C) από τα τοιχώματα του θερμοσίφωνα κατά την διάρκεια Δ_t σε seconds. Η απώλεια της θερμότητας (σε Joule) από την δεξαμενή νερού είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας του ζεστού νερού, της θερμοκρασίας του εξωτερικού χώρου και της μόνωσης της δεξαμενής, και δίνεται από :

$$H_r = m * C_p * Y_{wh}. \quad (4.2.4)$$

Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν μια συγκεκριμένη παράμετρο, η οποία καλείται η παραμένουσα απώλεια θερμότητας της δεξαμενής. Αυτή η παράμετρος, η οποία συμβολίζεται με H_r^* , αντιπροσωπεύει το ποσό της θερμότητας, το οποίο

διαχέεται προς το εξωτερικό περιβάλλον σε Joule ανά δευτερόλεπτο. Συνεπώς, η απώλειες θερμότητας σε Joule μετά από χρόνο Δ_t σε δευτερόλεπτα, μπορεί να υπολογιστεί ως :

$$H_r = H_r^* * \Delta_t \quad (4.2.5)$$

Από τις σχέσεις 4.24 και 4.2.5, προκύπτει ότι $Y_{wh} = \frac{H_r^* * \Delta_t}{m * C_p}$ (4.2.6)

Η τιμή H_r^* στη σχέση 4.2.6 υποθέτει ότι η θερμοκρασία του νερού ορίζεται στους 60° C και η θερμοκρασία μέσα στην οικία είναι στους 20° C. Αν η παραπάνω προϋπόθεση δεν ισχύει τότε η συνάρτηση τροποποιείτε ως εξής :

$$Y_{wh} = \frac{H_r^* * \Delta_t * (\theta_{WH}^{set} - \theta_{amb})}{40 * m * C_p} \quad (4.2.7)$$

Μια άλλη μεταβλητή, η οποία χρησιμοποιείτε συνήθως από τους κατασκευαστές καλείτε η τιμή R του θερμοσίφωνα, η οποία αντιπροσωπεύει τη θερμική αντίσταση της θωράκισης του θερμοσίφωνα σε $ft^2 \cdot hr \cdot F^\circ / Btu$. Σε αυτή την περίπτωση, η Βρετανική Θερμική Μέτρησης (British Thermal Unit ή B.T.U), για να χρησιμοποιήσει το ποσό απώλειας της θερμότητας θα πρέπει να υπολογιστεί αρχικά σε Btu/hr και έπειτα να μετατραπεί στο διεθνές σύστημα μονάδων (S.I) σε J/sec.

$$H_r^* = \frac{(\theta_{WH}^{set} - \theta_{amb}) * A}{3.142 * R}, \text{ όπου} \quad (4.2.8)$$

- a. H_r^* είναι η απώλεια της θερμότητας σε Watt ή Joule/sec.
- b. R είναι η τιμή R του θερμοσίφωνα (συνήθως ένας αριθμός μεταξύ 16 και 24).
- c. A είναι επιφάνεια θέρμανσης του θερμοσίφωνα σε sq.-ft.
- d. θ_{wh}^{set} είναι το όριο θέρμανσης του νερού σε °C.
- e. θ_{amb} είναι θερμοκρασία περιβάλλοντος που περιβάλλει τον θερμοσίφωνα σε °C.

Για παράδειγμα, αν οι παραμένουσες απώλειες είναι 71W για έναν θερμοσίφωνα των 184 λίτρων, τότε σύμφωνα με την σχέση 4.2.7 η πτώση θερμοκρασίας είναι $Y_{WH} = \frac{71 * 900}{184 * 4185} = 0.083^\circ C$ για ένα διάστημα των 15 λεπτών.

Ωστόσο, για έναν θερμοσίφωνα χωρητικότητας 208 λίτρων, ο οποίος έχει επιφάνεια $33.2 ft^2$, η θερμοκρασία του θερμοσίφωνα έχει τεθεί στους 60° C, με εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος 20° C, R = 20 και για χρόνο $\Delta_t = 15$ λεπτά, δηλαδή 900 δευτερόλεπτα, τότε σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις έχουμε :

$$H_r^* = \frac{(140 - 68) * 33.2}{3.142 * 20} = 38 \text{ W}$$

$$Y_{wh} = \frac{38 * 15 * 60}{208 * 4185} = 0.04^\circ\text{C}$$

Να σημειωθεί ότι, για λόγους ευκολίας στην παρούσα πτυχιακή εργασία θεωρούμε ότι η παράμετρος H_r^* είναι ίση με $1.5 \text{ W}/^\circ\text{C}$.

4.4.4 Υπολογισμός παραμέτρου β_{wh}

Η παράμετρος β_{wh} αντιπροσωπεύει την πτώση θερμοκρασίας λόγω κατανάλωσης θερμού νερού. Αν ένα λίτρο ζεστού νερού καταναλώνεται κατά τη διάρκεια μίας ώρας, τότε θα καταναλώνονται 0.25 λίτρα θερμού νερού κατά τη διάρκεια χρονικού διαστήματος 15 λεπτών (υπό την προϋπόθεση ότι ο ρυθμός κατανάλωσης ζεστού νερού θα είναι ομοιόμορφος σε κάθε ώρα). Ωστόσο, ο ρυθμός κατανάλωσης νερού δεν είναι ομοιόμορφος κάθε ώρα, συνεπώς χρησιμοποιείτε η μάζα του ζεστού νερού, η οποία εξέρχεται από τον θερμοσίφωνα. Όταν καταναλώνεται θερμό νερό, η ίδια ποσότητα ψυχρού νερού εισέρχεται στη δεξαμενή νερού και αναμειγνύεται με το υπόλοιπο. Η θερμοκρασία του νέου νερού να είναι μικρότερη από την αρχική θερμοκρασία ζεστού νερού κατά ποσότητα β_{wh} , η οποία είναι ίση με:

$$\beta_{wh} = (\theta_{wh}^{set} - \theta_{wh}^{new}) = \frac{M_{HW} * (\theta_{wh}^{set} - \theta_{wh}^{inlet})}{m}, \text{ όπου} \quad (4.2.9)$$

- m είναι η μάζα της δεξαμενής σε Kg.
- M_{HW} είναι η μάζα του ζεστού νερού που εξέρχεται από τη δεξαμενή.
- θ_{wh}^{set} είναι το σημείο θέρμανσης του νερού.
- θ_{wh}^{inlet} είναι η θερμοκρασία του εισερχόμενου νερού.

4.2.5 Υπολογισμός παραμέτρων νερού

Σημαντικοί παράμετροι στην λειτουργία του θερμοσίφωνα, αποτελούν ο υπολογισμός τόσο του ζεστού νερού όσο και κρύου. Αρχικά, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η δεξαμενή του νερού πρέπει έχει πάντα σταθερή μάζα νερού, το οποίο σημαίνει ότι όσο ζεστό νερό καταναλώνεται κάθε στιγμή στην οικία, η δεξαμενή το αναπληρώνει «βάζοντας» κρύο νερό από το δίκτυο παροχής του νερού, το οποίο έχει θερμοκρασία περιβάλλοντος εξαρτώμενη από την τρέχουσα εποχή του χρόνου. Σύμφωνα με τα παραπάνω έχουμε :

$$M_{Hot\ Water} = M_{inlet} , \text{ όπου} \quad (4.2.10)$$

- a. $M_{Hot\ Water}$ είναι η μάζα του ζεστού που εξέρχεται από τη δεξαμενή.
- b. M_{inlet} είναι η μάζα του εισερχομένου νερού από το δίκτυο παροχής.

Η μάζα του ζεστού νερού που χρησιμοποιείτε στο λουτρό, δηλαδή το M_{Bath} , είναι συνάρτηση της κατανάλωσης του ζεστού νερού $M_{Hot\ Water}$ και του M'_{inlet}

$$M_{Bath} = M_{Hot\ Water} + M'_{inlet} , \text{ όπου} \quad (4.2.11)$$

- a. M_{Bath} είναι η μάζα του ζεστού νερού η οποία χρησιμοποιείτε στο λουτρό.
- b. $M_{Hot\ Water}$ είναι η μάζα του ζεστού που εξέρχεται από τη δεξαμενή.
- c. M'_{inlet} είναι η μάζα του κρύου νερού την οποία χρησιμοποιεί ο καταναλωτής για την μίξη του ζεστού και του κρύου νερού ώστε να έχουμε την επιθυμητή θερμοκρασία μπάνιου.

Σύμφωνα με τη σχέση **4.2.10** προκύπτει ότι :

$$M'_{inlet} = M_{Bath} - M_{Hot\ Water} \quad (4.2.12)$$

4.2.6 Υπολογισμός παραμέτρου M_{HW}

Η παράμετρος M_{HW} είναι μια συνάρτηση, η οποία αντιπροσωπεύει την συνολική μάζα ζεστού νερού που απαιτείτε από την οικία σε ένα χρονικό διάστημα. Είναι μια συνάρτηση, η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία του μπάνιου T_{Bath} , από την μάζα νερού του μπάνιου M_{Bath} , την εισερχόμενη θερμοκρασία του νερού T_{inlet} και την θερμοκρασία νερού του θερμοσίφωνα T_w . Αρχικά, λαμβάνοντας υπόψιν της συναρτήσεις 4.2.12 και 4.2.11 έχουμε

$$T_{Bath} = \frac{M_{HW} * T_w + (M_{Bath} - M_{HW}) * T_{inlet}}{M_{Bath}} = \frac{M_{HW} * (T_w - T_{inlet}) + M_{Bath} * T_{inlet}}{M_{Bath}}, \text{ συνεπώς}$$

καταλήγουμε

$$M_{HW} = \frac{T_{Bath} * M_{Bath} - M_{Bath} * T_{inlet}}{T_w - T_{inlet}}, \text{ όπου} \quad (4.2.13)$$

- T_{Bath} είναι η θερμοκρασία σε °C που έχει ο θερμοσίφοντας για τις ανάγκες της οικίας.
- M_{Bath} είναι η μάζα του νερού που χρησιμοποιείτε από τον καταναλωτή.
- T_{inlet} είναι η θερμοκρασία του εισερχόμενου νερού σε °C.
- T_w είναι η επιθυμητή θερμοκρασία του νερού σε °C.

4.2.7 Υπολογισμός της παραμέτρου T_{bath}

Η παράμετρος T_{Bath} αντιπροσωπεύει την θερμοκρασία σε °C, την οποία θα έχει ο θερμοσίφοντας για τις ανάγκες της οικίας. Η παράμετρος T_{Bath} είναι μια συνάρτηση του γινομένου της μάζας του ζεστού νερού M_{HW} και της τρέχουσας θερμοκρασίας του θερμοσίφωνα T_w , του γινομένου της μάζας του κρύου νερού που χρησιμοποιεί ο καταναλωτής M'_{inlet} και της εισερχόμενης θερμοκρασίας T_{inlet} . Τέλος λαμβάνεται υπόψιν και η μάζα του νερού που χρησιμοποιείτε από τον καταναλωτή.

$$T_{Bath} = \frac{M_{HW} * T_w + M'_{inlet} * T_{inlet}}{M_{Bath}}, \text{ όπου} \quad (4.2.14)$$

- a. T_{Bath} είναι η θερμοκρασία σε °C που έχει ο θερμοσίφωνας για τις ανάγκες της οικίας.
- b. M_{HW} είναι η μάζα του ζεστού νερού που εξέρχεται από την δεξαμενή.
- c. T_w είναι η επιθυμητή θερμοκρασία του νερού σε °C.
- d. M'_{inlet} είναι η μάζα του κρύου νερού που χρησιμοποιεί ο καταναλωτής.
- e. T_{inlet} είναι η θερμοκρασία του εισερχόμενου νερού σε °C.
- f. M_{Bath} είναι η μάζα του νερού που χρησιμοποιείτε από τον καταναλωτή.

4.2.8 Υπολογισμός παραμέτρου $T_{w,t+1}$

Η παράμετρος $T_{w,t+1}$ αντιπροσωπεύει την θερμοκρασία σε °C, την οποία θα έχει ο θερμοσίφωνας στο επόμενο χρονικό διάστημα. Η παράμετρος $T_{w,t+1}$ είναι μια συνάρτηση της διαφοράς μεταξύ της συνολικής μάζας νερού της δεξαμενής M_{total} και της μάζας του εισερχόμενου νερού, του ορίου της θερμοκρασίας του θερμοσίφωνα $T_{w,t}$, του εισερχόμενου νερού από το δίκτυο M_{inlet} της θερμοκρασίας του εισερχόμενου νερού T_{inlet} . Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω έχουμε ότι :

$$T_{w,t+1} = \frac{(M_{total} - M_{inlet}) * T_{w,t} + (M_{inlet} * T_{inlet})}{M_{total}} \quad (4.2.15)$$

- a. $T_{w,t+1}$ είναι η θερμοκρασία σε °C που θα έχει ο θερμοσίφωνας στο επόμενο χρονικό διάστημα.
- b. M_{total} είναι η συνολική μάζα του νερού σε kg.
- c. M_{inlet} είναι η μάζα του εισερχόμενου νερού στον θερμοσίφωνα σε kg.
- d. $T_{w,t}$ είναι το όριο της θερμοκρασίας του θερμοσίφωνα σε °C.
- e. T_{inlet} είναι η θερμοκρασία του εισερχόμενου νερού σε °C.

4.2.9 Υπολογισμός παραμέτρου T_{target}

Η παράμετρος T_{target} είναι μια συνάρτηση, η οποία αντιπροσωπεύει τον έλεγχο της θερμοκρασίας λαμβάνοντας υπόψιν το τρέχον κόστος της KWh, το μέγιστο και ελάχιστο κόστος της καθώς επίσης την μέγιστη και ελάχιστη

θερμοκρασία που επιθυμούμε να έχει ο θερμοσίφωνα. Σύμφωνα με τα παραπάνω έχουμε ότι :

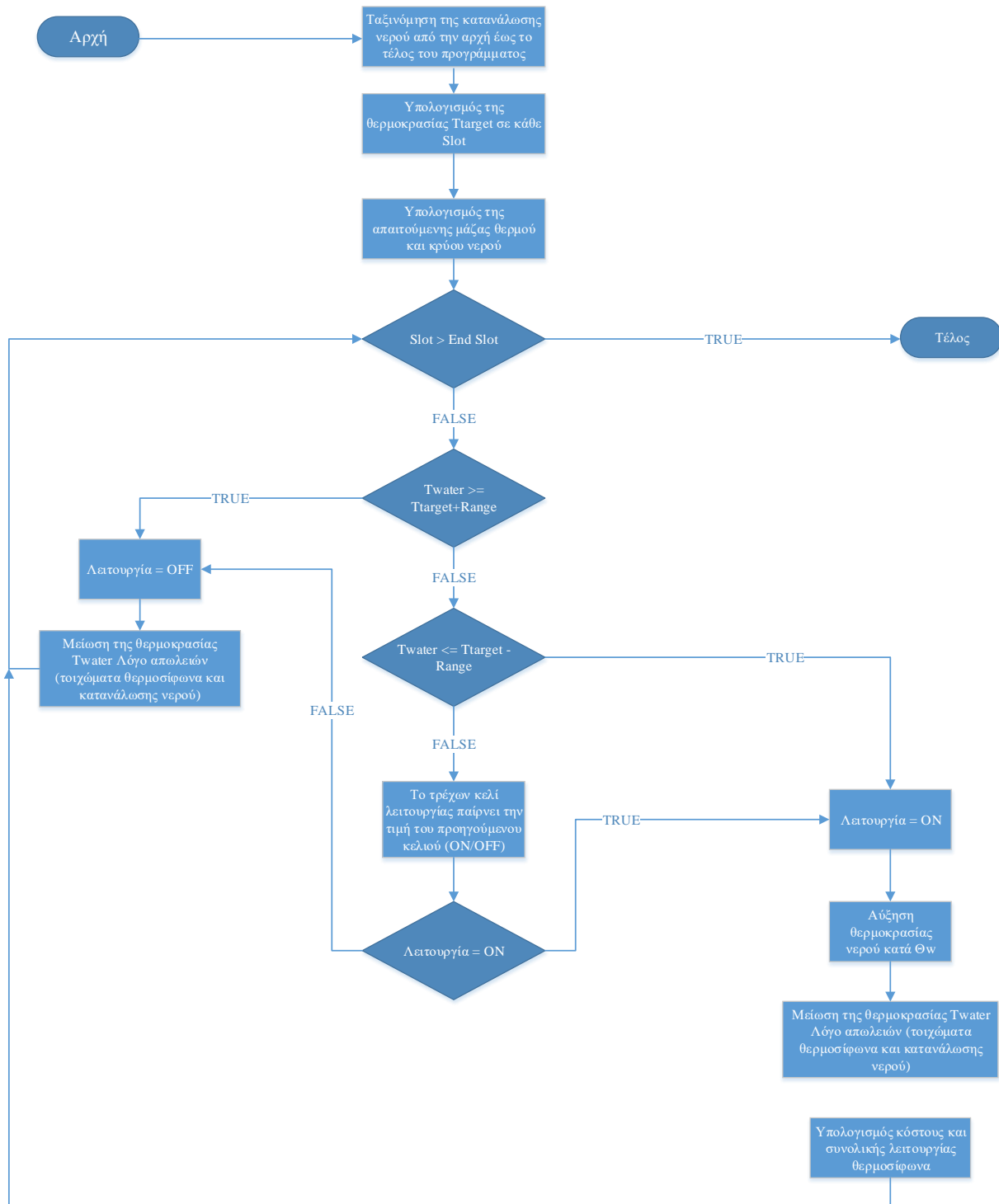
$$T_{target} = T_{max} - \left(\frac{C - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \right) * (T_{max} - T_{min}) \quad (4.2.16)$$

- a. T_{target} είναι η επιθυμητή θερμοκρασία ανάλογα με το κόστος της KWh.
- b. T_{max} είναι η μέγιστη θερμοκρασία, στην οποία ρυθμίζουμε τον θερμοσίφωνα.
- c. T_{min} είναι η ελάχιστη θερμοκρασία, στην οποία ρυθμίζουμε τον θερμοσίφωνα.
- d. C είναι το τρέχον κόστος της KWh.
- e. C_{min} είναι το ελάχιστο κόστος της KWh.
- f. C_{max} είναι το μέγιστο κόστος της KWh.

Κεφάλαιο 5^ο–Διάγραμμα ροής βέλτιστης λύσης

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με το διάγραμμα ροής, το οποίο απεικονίζει με τη σειρά τις διεργασίες, τις οποίες εκτελεί ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό της βέλτιστης λύσης.

5.1 Διάγραμμα Ροής



Αρχικά, ο αλγόριθμος ταξινομεί τις καταναλώσεις του νερού. Για την ακρίβεια όταν η κατανάλωση νερού έχει εύρος τιμών από 0 έως 7.5 λίτρα / 15 λεπτά, την θεωρούμε ως χαμηλή, αν έχει τιμές κατανάλωσης από 7.5 έως 15 λίτρα / 15 λεπτά, θεωρείτε ως μεσαία, αν έχει τιμές κατανάλωσης από 15 έως 20 λίτρα / 15 λεπτά, θεωρείτε ως υψηλή ενώ από 20 λίτρα / 15 λεπτά και πάνω θεωρείτε ως πολύ υψηλή.

Στη συνέχεια υπολογίζει μέσω της μαθηματικής σχέσης $T_{target} = T_{max} - \left(\frac{C - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \right) * (T_{max} - T_{min})$, την θερμοκρασία που χρειάζεται σε κάθε slot, η παραπάνω μαθηματική σχέση λαμβάνει υπόψη το ελάχιστο και μέγιστο κόστος της kWh σε κάθε slot λειτουργίας καθώς επίσης και το τρέχον κόστος στο slot. Έπειτα, ο αλγόριθμος υπολογίζει την ποσότητα του ζεστού νερού, το οποίο χρειάζεται το τρέχον slot λειτουργίας και επιπλέον την απαιτούμενη μάζα κρύου νερού στο slot αυτό.

Ξεκινώντας, ο αλγόριθμος συγκρίνει την πραγματική θερμοκρασία του νερού (T_{water}) με αυτήν του $T_{target} + Range$ (όπου το Range είναι το εύρος τιμής του θερμοσίφωνα και στο δικό μας πρόγραμμα έχει τιμή ± 2). Σε περίπτωση που η θερμοκρασία του νερού είναι μεγαλύτερη, ο θερμοσίφοντας τίθεται σε κατάσταση μη λειτουργίας (OFF) και η θερμοκρασία του νερού T_{water} μειώνεται λόγω των απωλειών, τις οποίες ο θερμοσίφοντας από τα τοιχώματα του καθώς επίσης και από τις απώλειες λόγω της κατανάλωσης θερμού νερού στο τρέχον slot.

Σε περίπτωση που η παραπάνω σύγκριση δεν ισχύει, ο αλγόριθμος συγκρίνει αν η πραγματική θερμοκρασία του νερού (T_{water}) είναι μικρότερη από αυτήν του $T_{target} - Range$. Αν η συνθήκη είναι αληθής τότε η θερμοσίφοντας τίθεται σε κατάσταση λειτουργίας και η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται κατά a_{wh} . Στη συνέχεια, η θερμοκρασία μειώνεται και πάλι λόγω απωλειών από τα τοιχώματα του θερμοσίφωνα και από τις απώλειες κατανάλωσης νερού και ο αλγόριθμος υπολογίζει το κόστος λειτουργίας στο slot αυτό καθώς επίσης και συνολικό χρόνο λειτουργίας.

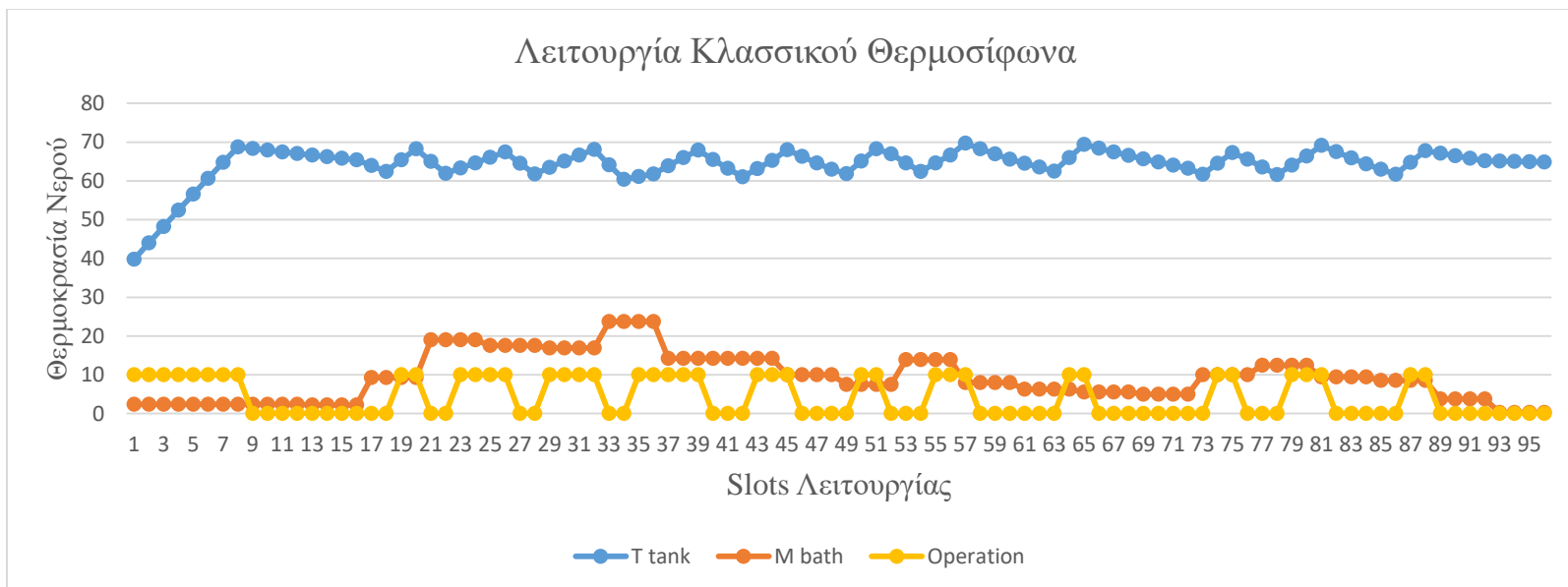
Σε ενδεχόμενο, όπου δεν ισχύει καμία από τις παραπάνω περιπτώσεις ο θερμοσίφωνας παραμένει στην κατάσταση, την οποία ήταν προηγουμένως. Δηλαδή, σε περίπτωση που ο θερμοσίφωνας ήταν σε κατάσταση λειτουργίας, θα παραμείνει σε κατάσταση λειτουργίας έως ότου η θερμοκρασία του νερού T_{water} να γίνει μεγαλύτερη από αυτή του $T_{target} + Range$ και να μπει σε κατάσταση μη λειτουργίας. Το ίδιο θα συμβεί και σε περίπτωση, κατά την οποία ο θερμοσίφωνας ήταν σε κατάσταση μη λειτουργίας και θα παραμείνει σε αυτή έως ότου η θερμοκρασία T_{water} γίνει μικρότερη από αυτή του $T_{target} - Range$.

Κεφάλαιο 6^ο : Συγκρίσεις και συμπεράσματα

Μετά την δημιουργία του αλγορίθμου, σχεδιάσαμε επιπλέον άλλους δυο αλγορίθμους, οι οποίοι ο ένας εξομοιώνει την λειτουργία ενός κλασσικού οικιακού θερμοσίφωνα και ο άλλος ένα βελτιωμένο μοντέλο του κλασσικού θερμοσίφωνα. Ο τρόπος λειτουργίας των αλγορίθμων αυτών έχει ως εξής : ο κλασσικός θερμοσίφοντας λειτουργεί μέσα στα όρια, τα οποία τίθενται από το $T_{water} + Range$ και $T_{water} - Range$, χωρίς ωστόσο να λαμβάνονται υπόψιν ούτε το κόστος της kWh ούτε και η κατανάλωση του νερού. Όταν ξεπεράσει το όριο $T_{water} + Range$ ο θερμοσίφοντας εισέρχεται σε κατάσταση μη λειτουργίας, ενώ όταν πέσει κάτω από το όριο $T_{water} - Range$ ο θερμοσίφοντας μπαίνει σε κατάσταση λειτουργίας. Ο δεύτερος αλγόριθμος, ο οποίος αποτελεί ένα βελτιωμένο μοντέλο του κλασσικού θερμοσίφωνα, χρησιμοποιεί την σχέση $T_{target} = T_{max} - \left(\frac{C - C_{min}}{C_{max} - C_{min}}\right) * (T_{max} - T_{min})$ προκειμένου να ρυθμίσει την θερμοκρασία του θερμοσίφωνα, λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τη τιμή της kWh αλλά όχι την κατανάλωση του νερού. Τέλος, το τρίτο μοντέλο ελέγχου του θερμοσίφωνα λαμβάνει υπόψιν τόσο την παραπάνω σχέση του προηγούμενου μοντέλου όσο και την κατανάλωση νερού.

Ο σκοπός της δημιουργίας τριών μοντέλων για την λειτουργία του θερμοσίφωνα γίνεται προκειμένου να μπορέσουμε να προχωρήσουμε σε συγκρίσεις ανάμεσα σε αυτά τα μοντέλα, ώστε να δούμε κατά πόσον ο αλγόριθμος που δημιουργήσαμε είναι αποτελεσματικός.

Για να πραγματοποιηθεί αυτή η σύγκριση, έπρεπε και στα τρία μοντέλα να ορίσουμε ίδιες παραμέτρους, με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων τους, ώστε να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε το κέρδος, το οποίο αποφέρει ο θερμοσίφοντας σε κάθε περίπτωση λειτουργίας. Στους παρακάτω πίνακες, περιέχονται οι παράμετροι των αλγορίθμων καθώς και τα αποτελέσματα των τριών παραπάνω μοντέλων, καθώς επίσης και τα διαγράμματα λειτουργίας του κάθε μοντέλου θερμοσίφωνα.

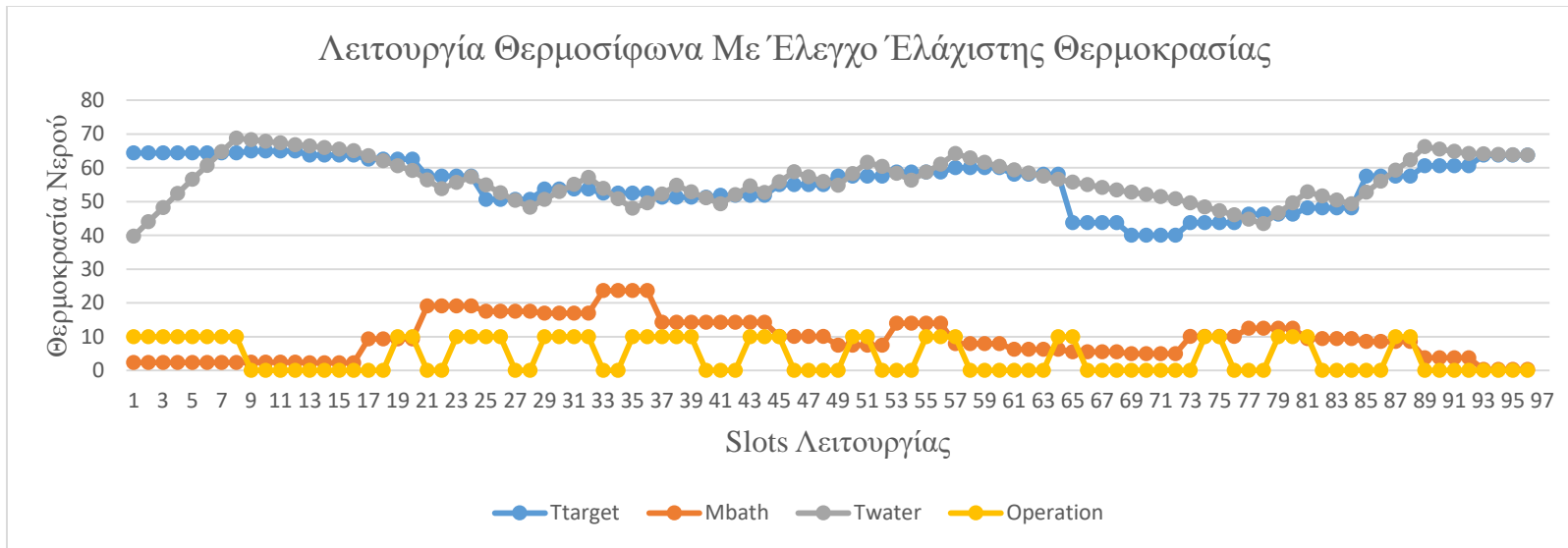


Διάγραμμα 1: Λειτουργία του κλασικού θερμοσίφωνα. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η θερμοκρασία του νερού, με πορτοκαλί χρώμα η απαιτούμενη μάζα ζεστού νερού και με κίτρινο χρώμα χρονική διάρκεια λειτουργίας του θερμοσίφωνα.

Στο παραπάνω διάγραμμα δίνεται η λειτουργία του θερμοσίφωνα για μάζα νερού 190 λίτρα, ισχύς 4000 W, θερμοκρασία εισερχόμενου νερού 10° C, θερμοκρασία περιβάλλοντος 20° C, αρχική θερμοκρασία νερού 40° C, όριο θερμοκρασίας νερού 65° C, θερμοκρασία νερού μπάνιου 40° C και μόνωση θερμοσίφωνα 1,5 W/°C.

Ο θερμοσίφωνας λειτουργεί με εύρος ζώνης θερμοκρασίας τους $65 \pm 2^\circ \text{C}$. Αρχικά, τίθεται σε συνεχή λειτουργία έως ότου η θερμοκρασία νερού φτάσει το ανώτατο όριο του εύρους ζώνης, δηλαδή τους 67° C. Στη συνέχεια, ο θερμοσίφωνας απενεργοποιείται μέχρι η θερμοκρασία νερού να πέσει κάτω από το κατώτατο όριο του εύρους ζώνης, δηλαδή τους 63° C. Παρατηρούμε ότι, κατά τα διαστήματα, όπου η ζήτηση σε θερμό νερό είναι υψηλή ο θερμοσίφωνας

παραμένει σε συνεχή λειτουργία καθώς επίσης και ότι η θερμοκρασία που προσφέρεται στο νερό είναι σχεδόν ίση με αυτή που χάνεται λόγω απωλειών της ζήτησης θερμού νερού, το γεγονός αυτό συμβαίνει στα slots 34 έως και 36. Ωστόσο, δε παρατηρείται πρόβλημα στην λειτουργία του θερμοσίφωνα, καθώς η θερμοκρασία του νερού εκείνα τα χρονικά διαστήματα είναι αρκετά υψηλότερη από την θερμοκρασία νερού μπάνιου (40° C).

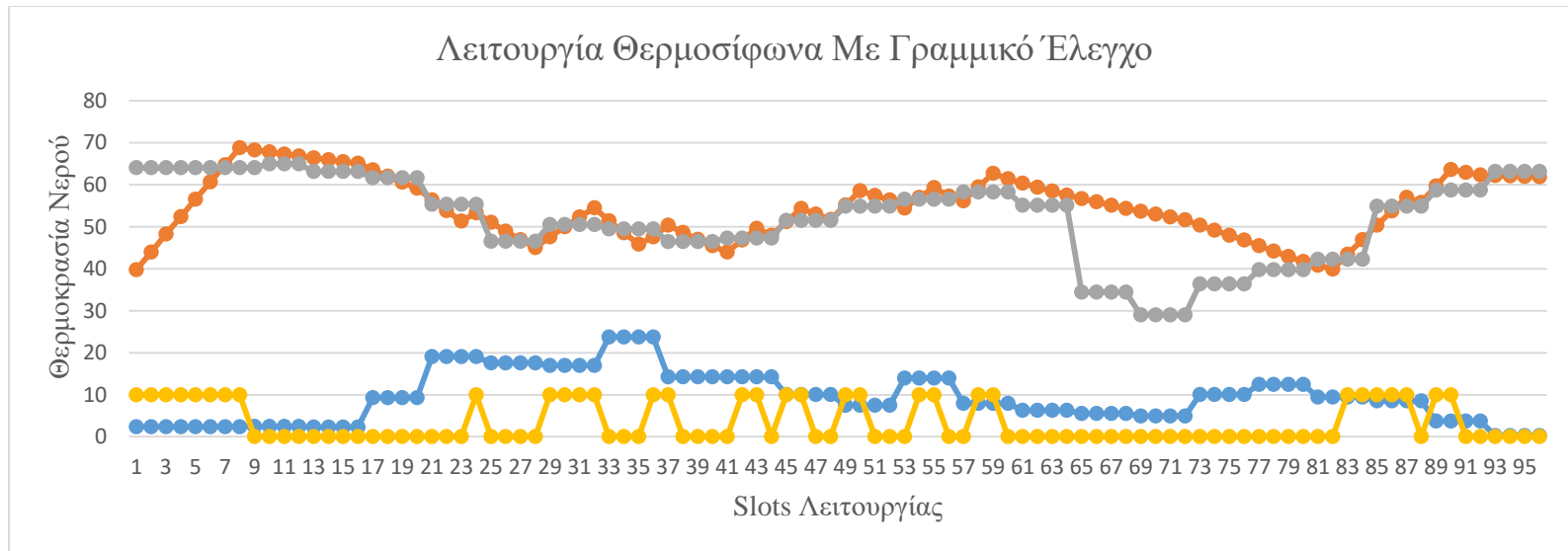


Διάγραμμα 2: Λειτουργία του θερμοσίφωνα με έλεγχο της ελάχιστης θερμοκρασίας. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η υπολογιζόμενη θερμοκρασία του νερού βάση της σχέσης $T_{target} = T_{max} - \frac{c - c_{min}}{c_{max} - c_{min}} * (T_{max} - T_{min})$, με γκρι χρώμα η πραγματική θερμοκρασία του θερμοσίφωνα, με πορτοκαλί χρώμα η απαιτούμενη μάζα ζεστού νερού και με κίτρινο χρώμα χρονική διάρκεια λειτουργίας του θερμοσίφωνα.

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η λειτουργία του θερμοσίφωνα με έλεγχο της ελάχιστης θερμοκρασίας του θερμοσίφωνα. Προκειμένου να ελέγξουμε την ελάχιστη θερμοκρασία χρησιμοποιούμε την μαθηματική σχέση $T_{target} = T_{max} - \frac{c - c_{min}}{c_{max} - c_{min}} * (T_{max} - T_{min})$. Σύμφωνα με την σχέση αυτή, η θερμοκρασία του θερμοσίφωνα ρυθμίζεται σε κάθε slot λειτουργίας ανάλογα με την μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία που έχουμε θέσει, καθώς επίσης από το μέγιστο, το ελάχιστο και το τρέχον κόστος της τιμής της kWh. Συνεπώς, όταν η τρέχουσα τιμή της kWh είναι ίση με την ελάχιστη τιμή

της kWh τότε η μαθηματική σχέση μας γυρίζει ως αποτέλεσμα την μέγιστη θερμοκρασία. Όταν η τιμή της kWh είναι στη μέγιστη τιμή της, τότε η μαθηματική σχέση μας γυρίζει ως αποτέλεσμα την ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση η θερμοκρασία ρυθμίζεται ανάλογα με τις τιμές κόστους της kWh.

Στο παραπάνω διάγραμμα ο θερμοσίφωνας λειτουργεί με μάζα νερού 190 λίτρα, ισχύς 4000 W, θερμοκρασία εισερχόμενου νερού 10° C, θερμοκρασία περιβάλλοντος 20° C, αρχική θερμοκρασία δεξαμενής 40° C, όριο θερμοκρασίας της δεξαμενής 65° C, θερμοκρασία μπάνιου 40° C και ελάχιστη θερμοκρασία (T_{min} για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος) ίση με αυτή της θερμοκρασίας μπάνιου (40° C). Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, παρατηρούμε ότι όταν η θερμοκρασία T_{target} είναι στις μέγιστες τιμές της, το κόστος της kWh είναι στις ελάχιστες τιμές του, ενώ όταν η θερμοκρασία T_{target} είναι στις ελάχιστες τιμές της, το κόστος της kWh είναι στις μέγιστες τιμές του. Παρατηρώντας, το γράφημα του T_{water} βλέπουμε ότι στο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα συμπίπτει με την καμπύλη του T_{target} , ωστόσο όταν η τιμή της kWh είναι σε υψηλά επίπεδα και η τιμή του T_{target} ελαχιστοποιείται, η καμπύλη του T_{water} καθυστερεί μέχρι να συμπέσει ξανά την καμπύλη T_{target} . Το φαινόμενο αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η καμπύλη T_{water} εκφράζει την πραγματική θερμοκρασία του νερού, η οποία δεν μπορεί να ακολουθήσει τόσο απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές όσο το T_{target} , το οποίο είναι θερμοκρασία υπολογιζόμενη από μαθηματική σχέση. Ο θερμοσίφωνας, λαμβάνοντας υπόψιν ότι η πραγματική θερμοκρασία του νερού είναι μεγαλύτερη από αυτή που έχει υπολογιστεί μέσω της μαθηματικής σχέσης παραμένει εκτός λειτουργίας προσφέροντας με αυτό τον τρόπο εξοικονόμηση κόστους σε ώρες όπου το κόστος της kWh είναι υψηλό χωρίς να θέτει σε κίνδυνο την άνεση, την οποία χρειαζόμαστε για την χρήση μπάνιου.



Διάγραμμα 3: Λειτουργία του θερμοσίφωνα με γραμμικό έλεγχο. Με γκρι χρώμα απεικονίζεται η υπολογιζόμενη θερμοκρασία του νερού βάση της σχέσης $T_{target} = T_{max} - \frac{c - c_{min}}{c_{max} - c_{min}} * (T_{max} - T_{min})$, με πορτοκαλί χρώμα η πραγματική θερμοκρασία του θερμοσίφωνα, με μπλε χρώμα η απαιτούμενη μάζα ζεστού νερού και με κίτρινο χρώμα χρονική διάρκεια λειτουργίας του θερμοσίφωνα.

Στο παραπάνω διάγραμμα περιγράφεται η λειτουργία του θερμοσίφωνα με γραμμικό έλεγχο. Ουσιαστικά, βελτιώνει το μοντέλο λειτουργίας του θερμοσίφωνα με έλεγχο της ελάχιστης θερμοκρασίας, κατά το οποίο η ελάχιστη θερμοκρασία του νερού ρυθμιζότανε να είναι ίση με τη θερμοκρασία μπάνιου, έχοντας ως αποτέλεσμα την θέρμανση του νερού σε θερμοκρασία πάνω από αυτή της θερμοκρασίας του μπάνιου έχοντας ως αποτέλεσμα το κόστος λειτουργίας να αυξάνεται.

Στη λειτουργία θερμοσίφωνα με γραμμικό έλεγχο μειώνουμε την ελάχιστη θερμοκρασία του νερού σε επίπεδα μικρότερα από τη θερμοκρασία μπάνιου, προσέχοντας, ωστόσο να μην δημιουργήσουμε πρόβλημα έλλειψης ζεστού νερού.

Επιπλέον, για την καλύτερη λειτουργία του θερμοσίφωνα, έχουμε ταξινομήσει τις καταναλώσεις του νερού σε τέσσερις ζώνες, όπως χαμηλή, μεσαία, υψηλή και πολύ υψηλή κατανάλωση, όπου στην κάθε μια αντιστοιχεί και μια διαφορετική θερμοκρασία ανάλογα με την ποσότητα της κατανάλωσης.

Για την κατάλληλη επιλογή των θερμοκρασιών σε κάθε ζώνη κατανάλωσης νερού δοκιμάστηκαν αρκετές τιμές θερμοκρασίας καταλήγοντας ότι οι θερμοκρασίες με το βέλτιστο αποτέλεσμα είναι για χαμηλή κατανάλωση νερού οι 29° C, για μεσαία κατανάλωση 31.31° C, για υψηλή κατανάλωση 32.85° C και για πολύ υψηλή κατανάλωση 34° C. Οι παραπάνω τιμές αφορούν θερμοσίφωνα χωρητικότητας 190 λίτρων, ισχύς 4000 W, θερμοκρασία εισερχόμενου νερού 10° C, θερμοκρασία περιβάλλοντος 20° C, αρχική θερμοκρασία δεξαμενής 40° C, όριο θερμοκρασίας της δεξαμενής 65° C. Οι θερμοκρασίες επιλέχθηκαν χρησιμοποιώντας την επίλυση της εξίσωσης της ευθείας, όπου στον άξονα X έχουμε την κατανάλωση νερού και στον άξονα Y τις τιμές της θερμοκρασίας. Επιλέγοντας, ένα ζευγάρι θερμοκρασιακών τιμών για την ελάχιστη και μέγιστη κατανάλωση, στην περίπτωση μας 29° C για την χαμηλή κατανάλωση και 34° C για την πολύ υψηλή κατανάλωση, είμαστε σε θέση να επιλύσουμε την εξίσωση της ευθείας $y = ax + \beta$ και για τις υπόλοιπες θερμοκρασίες, οι οποίες αφορούν την μεσαία και υψηλή κατανάλωση.

Μάζα (Liters)	Εύρος Ζώνης	Θερμοκρασία Μπάνιου (°C)	Κόστος Κλασσικού Θερμοσίφωνα (€)	Συνολική Λειτουργία (Slots)	Κόστος Με Έλεγχο Ελάχιστης Θερμοκρασίας (€)	Συνολική Λειτουργία (Slots)	Διαφορά Κόστους (%)	Διαφορά Slots Λειτουργίας
100	2	38	1.263	37	0.975	31	28.8	6
150	2		1.224	37	0.963	32	26.1	5
190	2		1.26	38	0.951	32	30.9	6
100	2	39	1.288	38	1.016	32	27.2	6
150	2		1.254	38	1.013	33	24.1	5
190	2		1.304	40	0.984	33	32	7
100	2	40	1.353	39	1.065	34	28.8	5
150	2		1.284	39	1.008	33	27.6	6
190	2		1.318	40	1.048	34	27	6
100	2	41	1.379	40	1.094	35	28.5	5
150	2		1.357	41	1.060	34	29.7	7
190	2		1.399	42	1.076	35	32.3	8

Πίνακας 1: Για θερμοσίφωνα με αρχική θερμοκρασία ίση με την θερμοκρασία μπάνιου, θερμοκρασία χώρου 20° C, θερμοκρασία εισερχόμενου νερού 10° C, όριο θερμοσίφωνα 6 °C, ισχύς 4000 Watt και μόνωση θερμοσίφωνα 1.5 W/°C για διάφορες μάζες νερού

Στον πίνακα 1 θέτουμε σε λειτουργία τον θερμοσίφωνα χρησιμοποιώντας διαφορετικές μάζες νερού, όπως τα 100 , τα 150 και τα 190 λίτρα. Για τις τρεις αυτές μάζες του νερού χρησιμοποιούμε διαφορετικές θερμοκρασίες μπάνιου (38° C, 39° C, 40° C και 41° C). Η σύγκριση πραγματοποιείται μεταξύ του κλασσικού μοντέλου του θερμοσίφωνα και του μοντέλου λειτουργίας του θερμοσίφωνα με έλεγχο ελάχιστης θερμοκρασίας. Παρατηρούμε ότι, χρησιμοποιώντας το μοντέλο εξομοίωσης με έλεγχο ελάχιστης θερμοκρασίας το κόστος λειτουργίας του, παρουσιάζει σε όλες τις περιπτώσεις μείωση στο

χρόνο λειτουργίας, άρα και μικρότερο κόστος. Πιο συγκεκριμένα το κόστος παρουσιάζει μια μείωση κατά μέσο όρο της τάξης του 28.58% ενώ η συνολική λειτουργία του θερμοσίφωνα μειώνεται κατά μέσο όρο 6 slots.

Η διαφορά στο κόστος λειτουργίας μεταξύ αυτών των δύο εξομοιώσεων έγκειται στο γεγονός ότι, με το μοντέλο λειτουργίας του θερμοσίφωνα με έλεγχο ελάχιστης θερμοκρασίας, ρυθμίζουμε με το τρόπο διαφορετικό την λειτουργία του θερμοσίφωνα σε σχέση με αυτή του κλασσικού θερμοσίφωνα.

Μάζα (Liters)	Εύρος Ζώνης	Θερμοκρασία Μπάνιου (°C)	Κόστος Κλασσικού Θερμοσίφωνα (€)	Συνολική Λειτουργία (Slots)	Κόστος Θερμοσίφωνα Με Γραμμικό Έλεγχο (€)	Συνολική Λειτουργία (Slots)	Διαφορά Κόστους (%)	Διαφορά Slots Λειτουργίας
100	2	38	1.263	37	0.930	29	33.3	8
150	2		1.224	37	0.910	30	31.4	7
190	2		1.26	38	0.910	30	35	8
100	2	39	1.288	38	0.970	30	31.8	8
150	2		1.254	38	0.970	31	28.4	7
190	2		1.304	40	0.940	31	36.4	9
100	2	40	1.353	39	1.060	32	39.3	7
150	2		1.284	39	1.000	32	28.4	7
190	2		1.318	40	1.000	32	31.8	8
100	2	41	1.379	40	1.080	33	29.9	7
150	2		1.357	41	1.040	33	31.7	8
190	2		1.399	42	1.040	34	35.9	8

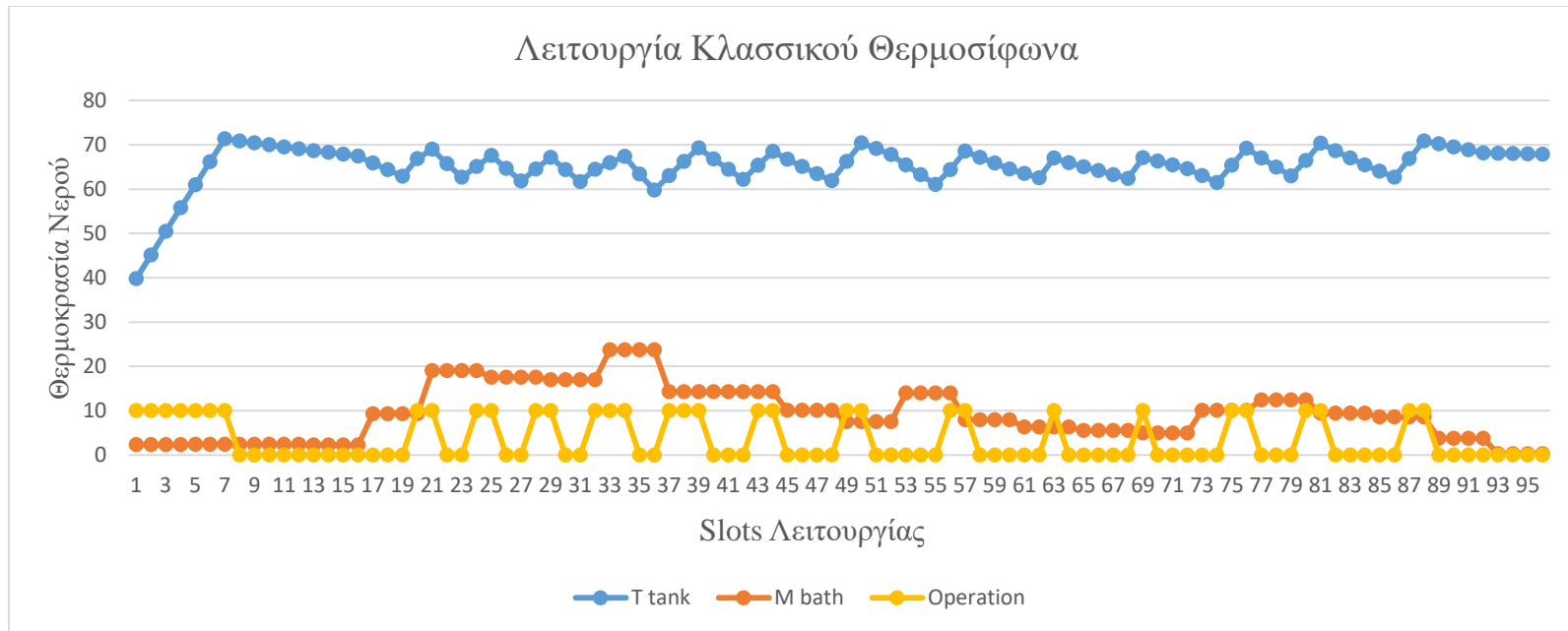
Πίνακας 2: Για θερμοσίφωνα με αρχική θερμοκρασία 35° C, θερμοκρασία χώρου 20° C, θερμοκρασία εισερχόμενου νερού 10° C, όριο θερμοσίφωνα 65° C, ισχύς 4000 Watt και μόνωση θερμοσίφωνα 1.5 W/°C για διάφορες μάζες νερού

Η σύγκριση πραγματοποιείται μεταξύ του κλασσικού μοντέλου του θερμοσίφωνα και του μοντέλου λειτουργίας του θερμοσίφωνα με γραμμικό έλεγχο. Παρατηρούμε ότι, χρησιμοποιώντας το μοντέλο με γραμμικό έλεγχο το κόστος λειτουργίας, παρουσιάζει σε όλες τις περιπτώσεις μείωση άρα και μικρότερο κόστος. Πιο συγκεκριμένα το κόστος παρουσιάζει μείωση κατά μέσο όρο της τάξης του 32.77% ενώ η συνολική λειτουργία του θερμοσίφωνα μειώνεται κατά μέσο όρο 7.66 slots.

Μάζα (Liters)	Εύρος Ζώνης	Θερμοκρασία Μπανιου (°C)	Κόστος Με Έλεγχο Ελάχιστης Θερμοκρασίας (€)	Συνολική Λειτουργία (Slots)	Κόστος Θερμοσίφωνα Με Γραμμικό Έλεγχο (€)	Συνολική Λειτουργία (Slots)	Διαφορά Κόστους (%)	Διαφορά Slots Λειτουργίας
100	2	38	0.975	31	0.930	29	4.5	2
150	2		0.963	32	0.910	30	5.3	2
190	2		0.951	32	0.910	30	4.1	2
100	2	39	1.016	32	0.970	30	4,6	2
150	2		1.013	33	0.970	31	4.3	2
190	2		0.984	33	0.940	31	4.4	2
100	2	40	1.065	34	1.060	32	0.5	2
150	2		1.008	33	1.000	32	0.8	1
190	2		1.048	34	1.000	32	4.8	2
100	2	41	1.094	35	1.080	33	1.4	2
150	2		1.060	34	1.040	33	2	1
190	2		1.076	35	1.040	34	3.6	1

Πίνακας 3: Για θερμοσίφωνα με αρχική θερμοκρασία 40° C, θερμοκρασία χώρου 20° C, θερμοκρασία εισερχόμενου νερού 10° C, όριο θερμοσίφωνα 65° C, ισχύς 4000 Watt και μόνωση θερμοσίφωνα 1.5 W/°C για διάφορες μάζες νερού.

Στον πίνακα 3 η σύγκριση πραγματοποιείται μεταξύ του μοντέλου λειτουργίας με έλεγχο της ελάχιστης θερμοκρασίας και με γραμμικό έλεγχο. Παρατηρούμε ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει βελτίωση στο κόστος λειτουργίας κατά μέσο όρο 3.24 % και στην συνολική λειτουργία κατά μέσο όρο 1.8 slots λειτουργίας.

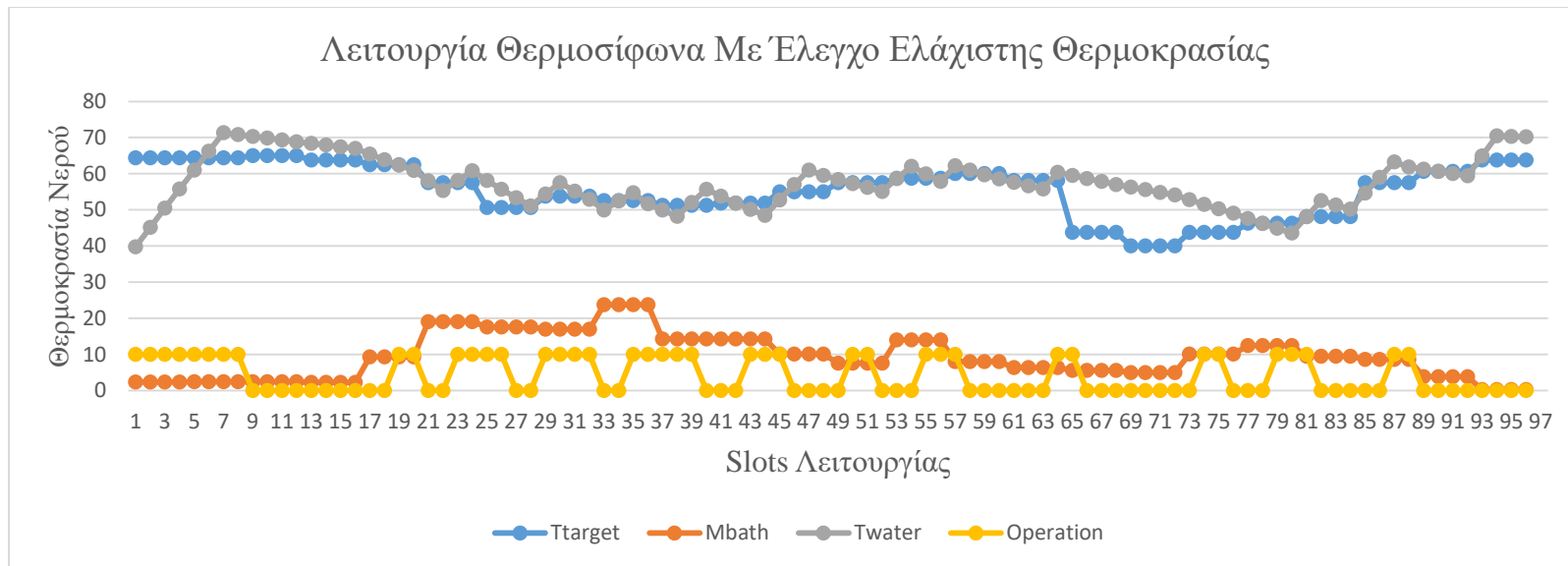


Διάγραμμα 4: Λειτουργία του κλασσικού θερμοσίφωνα. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η θερμοκρασία του νερού, με πορτοκαλί χρώμα η απαιτούμενη μάζα ζεστού νερού και με κίτρινο χρώμα χρονική διάρκεια λειτουργίας του θερμοσίφωνα.

Στο παραπάνω διάγραμμα δίνεται η λειτουργία του κλασσικού θερμοσίφωνα για μάζα νερού 190 λίτρα, ισχύς 5000 W, θερμοκρασία εισερχόμενου νερού 10° C, θερμοκρασία περιβάλλοντος 20° C, αρχική θερμοκρασία νερού 40° C, όριο θερμοκρασίας νερού 65° C, θερμοκρασία νερού μπάνιου 40° C και μόνωση θερμοσίφωνα 1,5 W/°C.

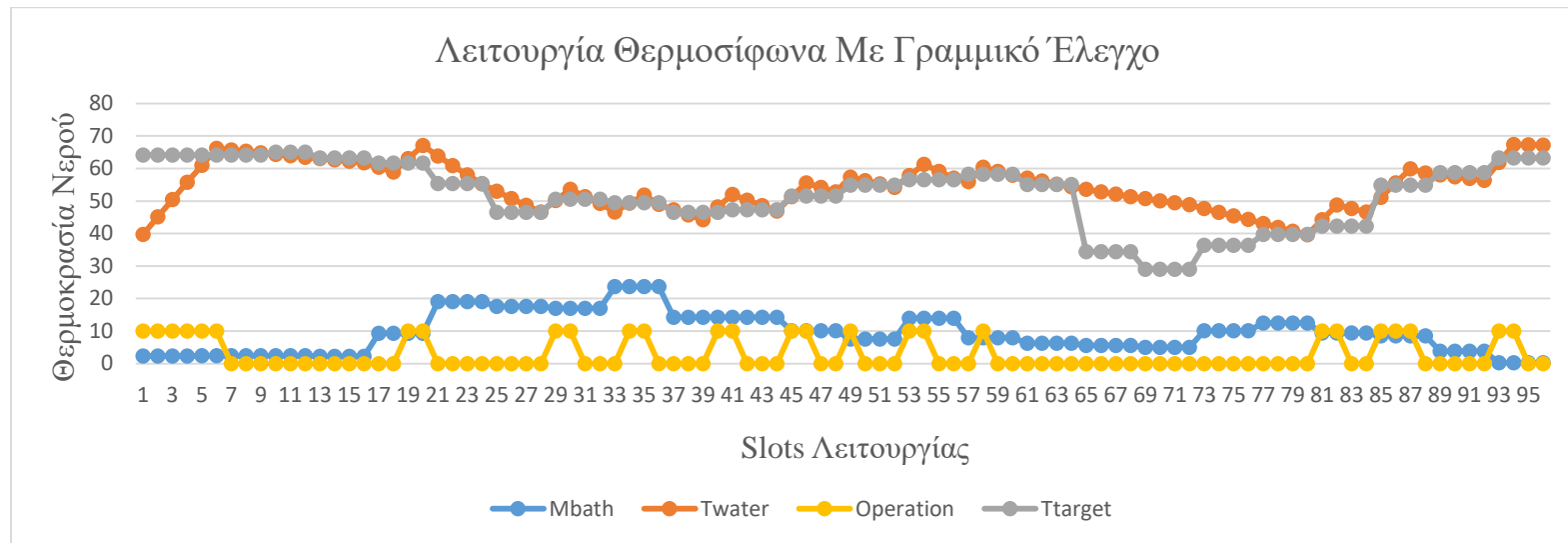
Ο θερμοσίφωνας λειτουργεί με εύρος ζώνης θερμοκρασίας τους $65 \pm 2^\circ \text{C}$. Συγκρίνοντας, το διάγραμμα 1 (ισχύς θερμοσίφωνα 4000W) παρατηρούμε ότι με ισχύς θερμοσίφωνα 5000W, το νερό θερμαίνεται πιο γρήγορα, γεγονός που

δικαιολογείτε από την μαθηματική σχέση $a_{wh} = \frac{P \cdot \Delta t}{m \cdot c_p}$, όπου όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς (P) τόσο μεγαλύτερη είναι η προσφερόμενη θερμοκρασία. Επίσης, σε ώρες κατά τις οποίες η ζήτηση του νερού είναι πολύ μεγάλη (slots 33 έως και 36) η θερμοκρασία του ζεστού νερού παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά, αφού η προσφερόμενη θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες θερμοκρασίας λόγω κατανάλωσης.



Διάγραμμα 6: Λειτουργία του θερμοσίφωνα με έλεγχο της ελάχιστης θερμοκρασίας. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η υπολογιζόμενη θερμοκρασία της δεξαμενής βάση της σχέσης $T_{target} = T_{max} - \frac{c - c_{min}}{c_{max} - c_{min}} * (T_{max} - T_{min})$, με γκρι χρώμα η πραγματική θερμοκρασία του θερμοσίφωνα, με πορτοκαλί χρώμα η απαιτούμενη μάζα ζεστού νερού και με κίτρινο χρώμα χρονική διάρκεια λειτουργίας του θερμοσίφωνα

Όπως και προηγουμένως, έτσι και σε αυτή την περίπτωση (διάγραμμα 6), ο θερμοσίφοντας με ισχύς 5000W και έλεγχο ελάχιστης θερμοκρασίας παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά σε σύγκριση με θερμοσίφωνα ισχύος 4000W (διάγραμμα 2), όσο αφορά τον χρόνο θέρμανσης του νερού της δεξαμενής καθώς και στις ελάχιστες τιμές θερμού νερού σε ώρες, όπου η ζήτηση σε θερμό νερό είναι αρκετά αυξημένη.



Διάγραμμα 7: Λειτουργία του θερμοσίφωνα με έλεγχο της ελάχιστης θερμοκρασίας. Με γκρι χρώμα απεικονίζεται η υπολογιζόμενη θερμοκρασία της δεξαμενής βάσει της σχέσης $T_{target} = T_{max} - \frac{c - c_{min}}{c_{max} - c_{min}} * (T_{max} - T_{min})$, με πορτοκαλί χρώμα η πραγματική θερμοκρασία του θερμοσίφωνα, με μπλε χρώμα η απαιτούμενη μάζα ζεστού νερού και με κίτρινο χρώμα χρονική διάρκεια λειτουργίας του θερμοσίφωνα.

Το παραπάνω διάγραμμα περιγράφει την λειτουργία του θερμοσίφωνα με γραμμικό έλεγχο θερμοκρασίας. Ο θερμοσίφοντας λειτουργεί με ισχύς 5000 W, έχει χωρητικότητα 190 λίτρα, θερμοκρασία εισερχόμενου νερού 10° C, θερμοκρασία περιβάλλοντος 20° C, αρχική θερμοκρασία νερού 40° C, όριο θερμοκρασίας νερού 65° C, και μόνωση θερμοσίφωνα 1,5 W/°C. Όπως έχει αναφερθεί για την λειτουργία του, η κατανάλωση έχει ταξινομηθεί σε χαμηλή, μεσαία, υψηλή και πολύ υψηλή με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες να είναι 29, 31.31 , 32.85 και 34° C. Παρατηρούμε ότι, ρίχνοντας ακόμα περισσότερο την ελάχιστη θερμοκρασία και χρησιμοποιώντας για κάθε κατανάλωση διαφορετική θερμοκρασία η λειτουργία του θερμοσίφωνα δεν επηρεάζεται έχοντας σε όλες τις περιπτώσεις θερμό νερό.

Ισχύς (kW)	Εύρος Ζώνης	Θερμοκρασία Μπανιου (°C)	Κόστος Κλασσικού Θερμοσίφωνα (€)	Συνολική Λειτουργία (Slots)	Κόστος Με Έλεγχο Ελάχιστης Θερμοκρασίας (€)	Συνολική Λειτουργία (Slots)	Διαφορά Κόστους (%)	Διαφορά Slots Λειτουργίας
4	2	38	1.26	38	0.951	32	30.9	6
4.5	2		1.159	35	0.879	30	28	5
5	2		1.025	32	0.797	27	22.8	5
4	2	39	1.304	40	0.984	33	32	7
4.5	2		1.166	35	0.905	31	26.1	4
5	2		1.055	32	0.823	28	23.2	4
4	2	40	1.318	40	1.048	34	27	6
4.5	2		1.2	36	0.928	31	27.2	5
5	2		1.101	33	0.854	29	24.7	4
4	2	41	1.399	42	1.076	35	32.3	7
4.5	2		1.218	37	0.977	32	24.1	5
5	2		1.125	34	0.874	29	25.1	5

Πίνακας 4: Για θερμοσίφωνα με αρχική θερμοκρασία ίση με την θερμοκρασία μπάνιου, θερμοκρασία χώρου 20° C, θερμοκρασία εισερχόμενου νερού 10° C, όριο θερμοσίφωνα 65° C, μάζα νερού 190 λίτρα και μόνωση θερμοσίφωνα 1.5 W/°C για διάφορες ισχύς θερμοσίφωνα.

Στον πίνακα 4 πραγματοποιείται η σύγκριση μεταξύ της λειτουργίας του κλασσικού θερμοσίφωνα και του θερμοσίφωνα με έλεγχο της ελάχιστης θερμοκρασίας. Η σύγκριση γίνεται πραγματοποιώντας διαφορετικές ισχύς του θερμαντικού στοιχείου, όπως 4kW, 4.5 kW και 5 kW. Παρατηρούμε ότι, χρησιμοποιώντας το μοντέλο ελέγχου της ελάχιστης θερμοκρασίας πετυχαίνουμε μείωση του κόστους κατά μέσο όρο 26.95 % σε σχέση με την λειτουργία του κλασσικού θερμοσίφωνα. Επιπλέον, ο θερμοσίφοντας με έλεγχο της ελάχιστης θερμοκρασίας λειτουργεί κατά μέσο όρο 5.25 slots λιγότερα σε σύγκριση με την λειτουργία του κλασσικού θερμοσίφωνα.

Ισχύς (kW)	Εύρος Ζώνης	Θερμοκρασία Μπάνιου (°C)	Κόστος Κλασσικού Θερμοσίφωνα (€)	Συνολική Λειτουργία (Slots)	Κόστος Θερμοσίφωνα Με Γραμμικό Έλεγχο (€)	Συνολική Λειτουργία (Slots)	Διαφορά Κόστους (%)	Διαφορά Slots Λειτουργίας
4	2	38	1.26	38	0.910	30	35	8
4.5	2		1.159	35	0.800	27	35.9	8
5	2		1.025	32	0.770	26	25.5	6
4	2	39	1.304	40	0.940	31	36.4	9
4.5	2		1.166	35	0.880	29	28.6	6
5	2		1.055	32	0.800	26	25.5	6
4	2	40	1.318	40	1.000	32	31.8	8
4.5	2		1.2	36	0.910	30	29	6
5	2		1.101	33	0.780	27	29.1	6
4	2	41	1.399	42	1.040	34	35.9	8
4.5	2		1.218	37	0.910	30	30.8	7
5	2		1.125	34	0.840	27	28.5	7

Πίνακας 5: Για θερμοσίφωνα με αρχική θερμοκρασία 40° C, θερμοκρασία χώρου 20° C, θερμοκρασία εισερχόμενου νερού 10° C, όριο θερμοσίφωνα 65° C, μάζα νερού 190 λίτρα και μόνωση θερμοσίφωνα 1.5 W/°C για διάφορες ισχύς θερμοσίφωνα.

Στον πίνακα 5 γίνεται σύγκριση μεταξύ του κλασσικού θερμοσίφωνα και του μοντέλου με γραμμικό έλεγχο της θερμοκρασίας. Παρατηρούμε ότι, σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει βελτίωση όσο αφορά το κόστος λειτουργίας και μικρότερος χρόνος λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα το συνολικό κόστος μειώνεται κατά μέσο όρο 31 % ενώ ο μέσος όρος λειτουργίας μειώνεται κατά 7.08 slots.

Ισχύς (kW)	Εύρος Ζώνης	Θερμοκρασία Μπανιου (°C)	Κόστος Με Έλεγχο Ελάχιστης Θερμοκρασίας (€)	Συνολική Λειτουργία (Slots)	Κόστος Θερμοσίφωνα Με Γραμμικό Έλεγχο (€)	Συνολική Λειτουργία (Slots)	Διαφορά Κόστους (%)	Διαφορά Slots Λειτουργίας
4	2	38	0.951	32	0.910	30	4.1	2
4.5	2		0.879	30	0.800	27	7.9	3
5	2		0.797	27	0.770	26	2.9	1
4	2	39	0.984	33	0.940	31	4.4	2
4.5	2		0.905	31	0.880	29	2.5	2
5	2		0.823	28	0.800	26	2.3	2
4	2	40	1.048	34	1.000	32	4.8	2
4.5	2		0.928	31	0.910	30	1.8	1
5	2		0.854	29	0.810	27	4.4	2
4	2	41	1.076	35	1.040	34	3.6	1
4.5	2		0.977	32	0.910	30	6.7	2
5	2		0.874	29	0.840	27	3.4	2

Πίνακας 6: Για θερμοσίφωνα με αρχική θερμοκρασία 40° C, θερμοκρασία χώρου 20° C, θερμοκρασία εισερχόμενου νερού 10° C, όριο θερμοσίφωνα 65° C, μάζα νερού 190 λίτρα και μόνωση θερμοσίφωνα 1.5 W/°C για διάφορες ισχύς θερμοσίφωνα.

Στον παραπάνω πίνακα η σύγκριση των δεδομένων πραγματοποιείται μεταξύ του μοντέλου με έλεγχο της ελάχιστης θερμοκρασίας και του γραμμικού ελέγχου. Παρατηρούμε ότι, ο θερμοσίφοντας παρουσιάζει βελτίωση στο κόστος κατά μέσο όρο 4.06 % και ο μέσος όρος λειτουργίας του μειώνεται κατά 1.83 slots.

Μάζα (m)	Θερμοκρασία Μπάνιου (°C)	Εύρος Θερμοκρασίας (°C)	Ελάχιστη Θερμοκρασία (°C)
100	38	30-35	37.6
150	38	30-35	37.6
190	38	26-32	37.8
100	39	31-36	38.5
150	39	31-36	38.5
190	39	28-33	38.7
100	40	34-38	39.5
150	40	33-36	39.7
190	40	29-34	39.7
100	41	36-42	40.2
150	41	34-39	40.6
190	41	29-34	40.2

Πίνακας 6: Συγκεντρωτικός πίνακας θερμοκρασιών για το μοντέλο θερμοσίφωνα με γραμμικό έλεγχο.

Ισχύς (kW)	Θερμοκρασία Μπάνιου (°C)	Εύρος Θερμοκρασίας (°C)	Ελάχιστη Θερμοκρασία (°C)
4	38	30-35	37.9
4.5	38	30-35	37.8
5	38	26-32	37.9
4	39	31-36	38.7
4.5	39	31-36	38.7
5	39	28-33	38.6
4	40	34-38	39.7
4.5	40	33-36	39.7
5	40	29-34	39.5
4	41	36-42	40.2
4.5	41	34-39	40
5	41	39-34	40

Πίνακας 7: Συγκεντρωτικός πίνακας θερμοκρασιών για το μοντέλο θερμοσίφωνα με γραμμικό έλεγχο.

Στους παραπάνω πίνακες έχουμε συγκεντρώσει το εύρος θερμοκρασιακών τιμών και την ελάχιστη θερμοκρασία νερού, η οποία παρουσιάζεται σε κάθε περίπτωση, στον πίνακα 6 κρατώντας σταθερή την ισχύ (4000 W) και αλλάζοντας την μάζα του νερού για διάφορες θερμοκρασίες μπάνιου και στον πίνακα 7 διατηρώντας σταθερή την μάζα του νερού (190 λίτρα) με το αντίστοιχο εύρος τιμών. Επιπλέον, έχουμε αφήσει μια μικρή ανοχή στην ελάχιστη θερμοκρασία (T_{min}), χωρίς ωστόσο να παρουσιάζεται πρόβλημα στη λειτουργία του θερμοσίφωνα, καθώς οι ελάχιστες θερμοκρασιακές τιμές σύμφωνα με τα παραπάνω ζευγάρια τιμών παρουσιάζονται σε ώρες που η κατανάλωση νερού είναι χαμηλή.

Μελετώντας τους παραπάνω πίνακες και διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι, με την δημιουργία των αλγορίθμων ένας ηλεκτρικός θερμοσίφοντας μπορεί να παρουσιάσει μεγάλη μείωση στο συνολικό του κόστος και στον χρόνο λειτουργίας του. Πιο συγκεκριμένα θερμοσίφωνες, οποίοι έχουν μεγάλη χωρητικότητα σε λίτρα νερού και μεγάλη ισχύς μπορούν να προσφέρουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα, ωστόσο θα πρέπει η επιλογή ενός ηλεκτρικού θερμοσίφωνα να γίνεται με γνώμονα τις ανάγκες μιας οικογένειας καθώς επίσης και τον περιορισμό της ισχύος. Παρατηρώντας, τα αποτελέσματα του αλγορίθμου είμαστε σε θέση να διακρίνουμε ότι τα αποτελέσματα του αλγορίθμου είναι θετικά, συνεπώς μια επένδυση του στην Ελλάδα θα ήταν μια σωστή επιλογή, όταν το μοντέλο δυναμικής τιμολόγησης εφαρμοστεί στη χώρα μας.

Παράρτημα

Function efarmogithermosifona ()

Dim Δt As Double, m As Double, Cp As Double, P As Double, Θwh As Double,
Min As Double, Max As Double, Max_Cons As Double, Min_Temp As Double

Dim Δθ As Double, Tinlet As Double, Tamb As Double, Tinitial As Double,
Twater As Double, WaterHeater_Insulation As Double, ε As Double, â As Double

Dim Rng As Integer, P1 As Integer, i As Integer

Dim Operation As Byte

Dim Index As Range, Index2 As Range

Tbath = Cells(7, 2)

Δθ = Cells(16, 2)

Δt = Cells(1, 2)

m = Cells(2, 2)

Cp = Cells(3, 2)

P = Cells(4, 2)

Tinlet = Cells(9, 2)

Tamb = Cells(10, 2)

Tinitial = Cells(11, 2)

Twater = Cells(12, 2)

P1 = Cells(14, 2)

WaterHeater_Insulation = Cells(15, 2)

Θwh = Cells(2, 6)

Rng = Cells(13, 2)

Cells(2, 6).Value = (P * Δt) / (m * Cp) Cells(3, 6).Value = m * Cp * Δθ '

Set Index = Sheet6.Range("I15:DB15")

Min = Application.WorksheetFunction.Min(Index)

Max = Application.WorksheetFunction.Max(Index)

Cost = Max - Min

Set Index2 = Sheet6.Range("I11:CZ11")

```

Max_Cons = Application.WorksheetFunction.Max(Index2)
Cells(23, 2).Value = Max_Cons
Cells(25, 2).Value = ((Cells(28, 2) - Cells(27, 2)) / (Cells(23, 2) - Cells(17, 2)))
Cells(26, 2).Value = Cells(27, 2) - (Cells(25, 2) * Cells(17, 2))
Cells (18, 2).Value = Cells (25, 2) * Cells (17, 2) + Cells (26, 2)
Tmin1 = Cells (18, 2)
Cells (20, 2).Value = Cells (25, 2) * Cells (19, 2) + Cells (26, 2)
Tmin2 = Cells (20, 2)
Cells (22, 2).Value = Cells (25, 2) * Cells (21, 2) + Cells (26, 2)
Tmin3 = Cells (22, 2)
Cells(24, 2).Value = Cells(25, 2) * Cells(23, 2) + Cells(26, 2)
Tmin4 = Cells(24, 2)
For i = 9 To 104
    If Cells(11, i) < Cells(17, 2) Then
        Cells(16, i).Value = "LowCons"
        Cells(16, i).Interior.Color = RGB(0, 255, 0)
        Cells(9, i).Value = Twater - ((Cells(15, i) - Min) / Cost) * (Twater - Tmin1)
    ElseIf Cells(11, i) < Cells(19, 2) Then
        Cells(16, i).Value = "MidCons"
        Cells(16, i).Interior.Color = RGB(255, 102, 0)
        Cells(9, i).Value = Twater - ((Cells(15, i) - Min) / Cost) * (Twater - Tmin2)
    ElseIf Cells(11, i) < Cells(21, 2) Then
        Cells(16, i).Value = "HighCons"
        Cells(16, i).Interior.Color = RGB(255, 0, 0)
        Cells(9, i).Value = Twater - ((Cells(15, i) - Min) / Cost) * (Twater - Tmin3)
    Else
        Cells(16, i) = "Ex.Cons"
        Cells(16, i).Interior.Color = RGB(128, 0, 0)
        Cells(9, i).Value = Twater - ((Cells(15, i) - Min) / Cost) * (Twater - Tmin4)
    End If
Next i

```

```

End If
Cells(12, i).Value = (Cells(11, i) * (Tbath - Tinlet)) / (Twater - Tinlet)
Cells(13, i).Value = Cells(12, i)
Cells(14, i).Value = Cells(11, i) - Cells(12, i)
Next i
If Cells(11, 2) < Cells(12, 2) + Rng Then
Cells(2, 9).Value = 1
Cells(3, 9).Value = Cells(2, 6)
Cells(4, 9).Value = Cells(11, 2)
Cells(5, 9).Value = (Cells(4, 9) - Tamb) * WaterHeater_Insulation
Cells(6, 9).Value = Cells(5, 9) * Δt * ((Cells(4, 9) - Tamb)) / ((Cells(4, 9) - Tamb)
* (m * Cp))
Cells(7, 9).Value = (Cells(12, 9) * (Cells(4, 9) - Tinlet)) / m
Cells(8, 9).Value = Cells(4, 9) - Cells(6, 9) - Cells(7, 9)
Cells(1, 6).Value = Cells(15, 9)
Cells(4, 6).Value = 1
ElseIfCells(11, 2) > Cells(12, 2) - RngThen
Cells(2, 9).Value = 0
Cells(3, 9).Value = 0
Cells(4, 9).Value = Cells(11, 2)
Cells(5, 9).Value = (Cells(4, 9) - Tamb) * WaterHeater_Insulation
Cells (6, 9).Value = Cells (5, 9) * Δt * ((Cells (4, 9) - Tamb)) / ((Cells (4, 9) -
Tamb) * (m * Cp))
Cells(7, 9).Value = (Cells(12, 9) * (Cells(4, 9) - Tinlet)) / m
Cells(8, 9).Value = Cells(4, 9) - Cells(6, 9) - Cells(7, 9)
End If
For i = 10 To 104
If Cells(8, i - 1) >= Cells(9, i) + Rng Then
Cells(2, i).Value = 0

```

```

Cells(3, i).Value = 0
Cells(4, i).Value = Cells(8, i - 1)
Cells(5, i).Value = (Cells(4, i) - Tamb) * WaterHeater_Insulation      Cells(6,
i).Value = Cells(5, i) * Δt * ((Cells(4, i) - Tamb)) / ((Cells(4, i) - Tamb) * (m *
Cp))
Cells(7, i).Value = (Cells(12, i) * (Cells(4, i) - Tinlet)) / m
Cells(8, i).Value = Cells(4, i) - Cells(6, i) - Cells(7, i)
    ElseIf Cells(8, i - 1) <= Cells(9, i) - Rng Then
Cells(2, i).Value = 1
Cells(3, i).Value = Θwh
Cells(4, i).Value = Cells(8, i - 1) + Cells(3, i)
Cells(5, i).Value = (Cells(4, i) - Tamb) * WaterHeater_Insulation
Cells(6, i).Value = Cells(5, i) * Δt * ((Cells(4, i) - Tamb)) / ((Cells(4, i) - Tamb) *
(m * Cp))
Cells(7, i).Value = (Cells(12, i) * (Cells(4, i) - Tinlet)) / m
Cells(8, i).Value = Cells(4, i) - Cells(6, i) - Cells(7, i)
Cells(1, 6).Value = Cells(1, 6) + Cells(15, i)
Cells(4, 6).Value = Cells(4, 6) + 1    Else
Cells(2, i) = Cells(2, i - 1)
    If Cells(2, i) = 1 Then
Cells(2, i).Value = 1
Cells(3, i).Value = Θwh
Cells(4, i).Value = Cells(8, i - 1) + Cells(3, i)
Cells(5, i).Value = (Cells(4, i) - Tamb) * WaterHeater_Insulation      Cells(6,
i).Value = Cells(5, i) * Δt * ((Cells(4, i) - Tamb)) / ((Cells(4, i) - Tamb) * (m *
Cp))
Cells(7, i).Value = (Cells(12, i) * (Cells(4, i) - Tinlet)) / m '
Cells(8, i).Value = Cells(4, i) - Cells(6, i) - Cells(7, i)
Cells(1, 6).Value = Cells(1, 6) + Cells(15, i)

```

```

Cells(4, 6).Value = Cells(4, 6) + 1
    ElseIf Cells(2, i) = 0 Then
Cells(2, i).Value = 0
Cells(3, i).Value = 0
Cells(4, i).Value = Cells(8, i - 1)
Cells(5, i).Value = (Cells(4, i) - Tamb) * WaterHeater_Insulation
Cells(6, i).Value = Cells(5, i) * Δt * ((Cells(4, i) - Tamb)) / ((Cells(4, i) - Tamb) *
(m * Cp))
Cells(7, i).Value = (Cells(12, i) * (Cells(4, i) - Tinlet)) / m
Cells(8, i).Value = Cells(4, i) - Cells(6, i) - Cells(7, i)
    End If
    End If
Next i
End Function

```

Βιβλιογραφία

Ιστορική αναδρομή:

<https://www.thoughtco.com/history-of-water-heater-4077858>

<https://www.google.com/patents/US460513>

<http://plano.hotwaterheatermedic.com/a-concise-history-of-water-heaters/>

Μέρη θερμοσίφωνα :

<https://el.wikipedia.org/wiki/HTML://www.thespruce.com/anatomy-of-a-gas-water-heater-1824894>

Αρχή λειτουργίας θερμοσίφωνα και λειτουργίας των εξαρτημάτων του :

<http://www.whirlpoolwaterheaters.com/learn-more/electric-water-heaters/how-electric-water-heaters-work/standard-electric-operation/>

Γιατί έγινε η επιλογή θερμοσίφωνα :

<https://web.archive.org/web/20120417073108/http://www.sustainability.vic.gov.au/resources/documents/Choosingahotwatersystem.pdf>

<http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=JmX4VnJ1zYA%3D&tabid=759&language=el-GR>

Προβλήματα στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λόγω μεγάλης ζήτησης:

https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_power_transmission

https://en.wikipedia.org/wiki/Peaking_power_plant

Δυναμική τιμολόγηση:

https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_pricing

<http://extension.psu.edu/natural-resources/energy/misc-files/real-time-pricing-fact-sheet>

Έξυπνοι μετρητές:

https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_meter

Διαχείριση φορτίου:

https://en.wikipedia.org/wiki/Load_management

Arduino:

<https://el.Wikipedia.org/wiki/Arduino>

Επιλογή της γλώσσας προγραμματισμού:

https://en.wikipedia.org/wiki/Visual_Basic_for_Applications

Μαθηματικές σχέσεις:

<https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/5224>

