



Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής

**Ανάπτυξη και αξιολόγηση συστήματος ελέγχου της συχνότητας
ηλεκτρικού δικτύου μέσω της ενεργειακής απόδοσης γειτονιάς
κτιρίων**

Διπλωματική Εργασία

Ράπτης Εμμανουήλ

Επιβλέπων:

Καθηγητής, Ηλίας Κοσματοπούλος

Ξάνθη 2018

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Ανάπτυξη και αξιολόγηση συστήματος προσαρμοστικών βέλτιστων ελεγκτών τύπου XCAO2 για βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης γειτονιάς κτιρίων» διεκπεραιώθηκε στα πλαίσια περάτωσης των προπτυχιακών μου σπουδών. Πριν την παρουσίαση της, νιώθω την υποχρέωση να εκφράσω της ευχαριστίες μου σε ορισμένους ανθρώπους.

Πρώτο από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Ηλία Κοσματόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου αυτό το θέμα καθώς και την πολύτιμη καθοδήγηση του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Χρήστο Κόρκα για τις σημαντικές συμβουλές και υποδείξεις του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Στην συνέχεια, ευχαριστώ τους εξωτερικούς συνεργάτες ,καθηγητή Simone Baldi και μεταπτυχιακό φοιτητή Marco Romagnuolo για την συνεργασία και την βοήθεια τους.

Τέλος, τις θερμές μου ευχαριστίες ωφείλω στην οικογένεια μου που δεν έπαψε να είναι στο πλευρό μου σε όλη την ακαδημαϊκή μου πορεία και χάρη στην δική τους ηθική και οικονομική στήριξη έχω φτάσει μέχρι εδώ.

Εμμανουήλ Ράπτης

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια προσπάθεια για την καλύτερη κατανόηση και την ανάπτυξη μεθόδων ελέγχου σε γειτονίες κτιρίων, τα λεγόμενα “Smart-Grid” , με σκοπό την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε συνδυασμό με τα υψηλά επίπεδα ικανοποίησης των χρηστών.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται η παρουσίαση του προβλήματος καθώς και των παραμέτρων που το διέπουν. Πιο συγκεκριμένα, το 1^ο κεφάλαιο αφιερώνεται στις στρατηγικές ελέγχου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο των συσκευών κλιματισμού στις οποίες παρουσιάζονται και οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας και μάζας που διέπουν ένα πλήρες σύστημα HVAC. Επιπλέον, γίνεται και η παρουσίαση των κτιρίων που θα ενσωματωθούν στους κόμβους φορτίων του δικτύου, στο εσωτερικό των οποίων λειτουργούν τα συστήματα κλιματισμού.

Στο 2^ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο, οι επαγωγικοί παράμετροι που το χαρακτηρίζουν, η δομή του έξυπνου δικτύου και ο αλγόριθμός που υλοποιεί το «Smart-Grid»- το οποίο ενσωματώνει τα κτίρια στους κόμβους φορτίων.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα μετά την ενσωμάτωση των κτιρίων στους κόμβους του δικτύου και στην συνέχεια προτείνονται μέθοδοι βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας μια συνάρτηση κόστους έτσι ώστε η συχνότητα του δικτύου να συγχρονιστεί σε μια επιθυμητή, αυτή των 60 Hz.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη	5
Εισαγωγή : Περιγραφή Προβλήματος	9
Κεφάλαιο 1ο:Περιγραφή μοντέλου	11
1.1 Περιγραφή του HVAC.....	11
1.2 Εξισώσεις μοντελοποίησης των επιμερους εξαρτημάτων ενός HVAC συστήματος.....	13
1.2.1. Σώμα Καλοριφέρ.....	13
1.2.2. Λέβητας Συμπύκνωσης	15
1.2.3. Αντλία Θερμότητας.....	16
1.2.4. Μονάδα Ψύξης	17
1.2.5. Σωλήνες και Αγωγοί.....	18
1.2.6. Πηνία Θέρμανσης και Ψύξης.....	20
1.2.7. Βαλβίδα και Διαχωριστής	22
1.2.8. Συλλέκτης	23
1.2.9. Αντλία.....	24
1.2.10. Ζώνη Ανάμειξης	25
1.2.11. Ανεμιστήρας.....	26
1.2.12. Αποσβεστήρας	27
1.2.13. Ζώνη λειτουργίας.....	29
1.3. Υπολογισμός Ισχύος	33
1.4 Περιγραφή των κτιρίων	36
1.5. Έλεγχος κτιρίων.....	37
1.5.1. Μοντέλο Θερμικής Ικανοποίησης	38
Κεφάλαιο 2ο: «Έξυπνο» Δίκτυο	40
2.1. Σταθερότητα συγχρονισμού.....	40
2.2. Η δομή του δικτύου	42
2.3. Μηχανική ερμηνεία του μοντέλου.....	45
2.4. Ηλεκτρική ερμηνεία του μοντέλου	48
2.6. Η τοπολογία του δικτύου	52

2.7. Αλγόριθμος	53
Κεφάλαιο 3°:Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	56
3.1. Μια πρώτη προσέγγιση.....	58
3.2. Μια δεύτερη προσέγγιση.....	64
3.3. Εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης.....	84
3.3.1. Συνάρτηση Κόστους.....	85
3.4. Μια τρίτη προσέγγιση.....	86
Επίλογος και μελλοντική εργασία	99
Βιβλιογραφία	100

Εισαγωγή : Περιγραφή Προβλήματος

Ο όγκος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των κτιρίων κυριαρχεί στην συνολική κατανάλωση ενέργειας. Ο δημιουργικός σχεδιασμός των μεθόδων ενσωμάτωσης των κτιρίων σε δίκτυα **Buildings-to-Grid** (BtG) αποτελεί βασικό στοιχείο των έξυπνων πόλεων. Οι έξυπνες πόλεις αποτελούνται από βιώσιμες και ανθεκτικές υποδομές, όπου τα κτίρια αποτελούν σημαντικό συστατικό στοιχείο. Η κατανάλωση ενέργειας κτιρίου συμβάλλει σε περισσότερο από το 70% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, επηρεάζοντας βαθιά τη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, οι πόλεις που είναι εξοπλισμένες με βελτιστοποιημένα σχέδια κτιρίων, έχουν τη δυνατότητα να περιορίσουν την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας διατηρώντας παράλληλα σταθερές λειτουργίες του ηλεκτρικού πλέγματος. Καθώς τα κτίρια συνδέονται φυσικά με το ηλεκτρικό δίκτυο, είναι φυσικό να κατανοήσουμε τη σύζευξη τους και να αναπτύξουμε ένα πλαίσιο για την ενσωμάτωση των κτιρίων σε δίκτυο (BtG).

Η συμπεριφορά των κτιρίων αποτελεί κρίσιμη συνιστώσα της επιτυχημένης ενσωμάτωσης των κτιρίων στα δίκτυα, καθώς τα κτίρια γίνονται πιο εξελιγμένα και οι άνθρωποι δαπανούν περισσότερο χρόνο στις πόλεις και τα γραφεία τους. Πιο συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται στα κτίρια αφορά την λειτουργία των συσκευών κλιματισμού που σκοπό έχουν την δημιουργία άνετων συνθηκών στο εσωτερικό των κτιρίων. Ειδικότερα, εφαρμόζοντας αποδοτικές στρατηγικές ελέγχου, που έχουν γνώση των αλλαγών του καιρού, των συνηθειών των χρηστών (κατοίκων) καθώς και των δυναμικών του κτιρίου, υπόσχονται μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου.

Διάφορες μελέτες ασχολούνται με ένα εύρος υπολογιστικών και πειραματικών πτυχών της ενσωμάτωσης του BtG. Δυστυχώς, καμία από τις πρόσφατες μελέτες δεν παράγει μια συνταγή βασισμένη στην πληρότητα, ώστε οι φορείς εκμετάλλευσης των κτιρίων και των δικτύων να μπορούν ταυτόχρονα να βελτιστοποιήσουν την απόδοσή τους, συνδέοντας ρητά τα δίκτυα ηλεκτρικού ρεύματος, τις λειτουργίες ελέγχου κτιρίων και τις επιχειρησιακές αποφάσεις.

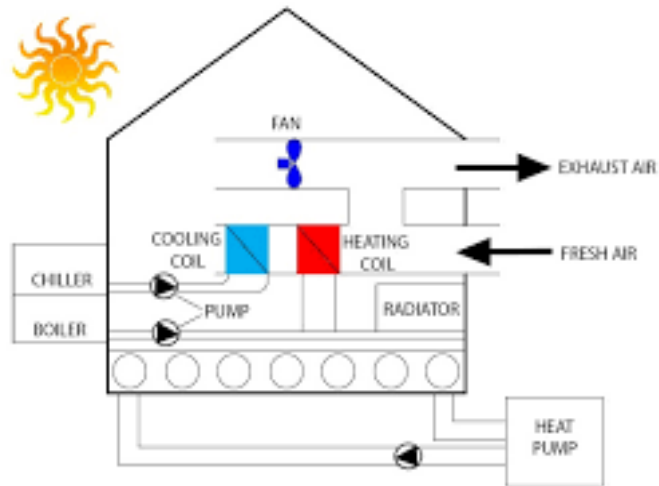
Για αυτόν τον λόγο, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην δημιουργία ελεγχόμενων κτιρίων όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας στα οποία και λειτουργούν συστήματα κλιματισμού και την ενσωμάτωση τους στα δίκτυα. Συγκεκριμένα, εστιάζεται η ρύθμιση συχνότητας και η εξοικονόμηση ενέργειας του συνολικού “έξυπνου” δικτύου ως κύριους στόχους υψηλού επιπέδου.

Κεφάλαιο 1ο:Περιγραφή μοντέλου

1.1 Περιγραφή του HVAC

Τα συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC) χρησιμοποιούνται ευρέως σε οικιστικά και εμπορικά κτίρια και είναι υπεύθυνα για ένα μεγάλο μέρος της κατανάλωσης ενέργειας παγκοσμίως. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις της διοίκησης πληροφοριών του U.S. και της Ευρωπαϊκής Επιτροπής το 2014, περισσότερο από το 40% της συνολικής ενέργειας καταναλώθηκε σε οικιστικά και εμπορικά κτίρια, τα μισά από τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη λειτουργία HVAC. Είναι ευρέως αποδεκτό ότι για να καταστεί δυνατή η ενεργειακή απόδοση στον εξοπλισμό HVAC είναι ζωτικής σημασίας να αναπτυχθούν ακριβή μοντέλα για τη δοκιμή στρατηγικών ελέγχου HVAC και τη σχετική ενεργειακή τους κατανάλωση.

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα HVAC που είναι εγκατεστημένο σε ένα κτίριο αποτελείται από λέβητες, θερμαντικά σώματα, μονάδες αερισμού (με ρόλους θέρμανσης και ψύξης), αντλίες θερμότητας, ψύκτες, ανεμιστήρες, αντλίες, σωλήνες, αγωγούς και θερμικές ζώνες. Η εικόνα1 μας δείχνει μια πιθανή ενσωμάτωση όλων των στοιχείων σε ένα κτίριο. όπου η θερμική ζώνη θερμαίνεται με θέρμανση δαπέδου συνδεδεμένη με αντλία θερμότητας, έναν λέβητα που συνδέεται με το ψυγείο και με μια μονάδα διαχείρισης αέρα. Η μονάδα διαχείρισης αέρα χρησιμοποιεί ένα πηνίο θέρμανσης (συνδεδεμένο στο λέβητα) και ένα ψυκτικό πηνίο (συνδεδεμένο σε ένα ψύκτη) για να ζεστάνετε ή να ψύχετε τον αέρα. Οι αντλίες και οι ανεμιστήρες χρησιμοποιούνται για να θέσουν νερό και αέρα σε κίνηση.



Εικόνα 1. Επισκόπηση των κύριων στοιχείων ενός HVAC συστήματος.

1.2 Εξισώσεις μοντελοποίησης των επιμερούς εξαρτημάτων ενός HVAC συστήματος

Στην παρούσα εργασία, για την μοντελοποίηση ενός συστήματος HVAC, την προσομοίωση των κτιρίων σε πραγματικές συνθήκες και ώρες λειτουργίας και την ενσωμάτωση τους στο “έξυπνο” δίκτυο έχει χρησιμοποιηθεί το περιβάλλον του Simulink και του MATLAB.

1.2.1. Σώμα Καλοριφέρ

Μια παραδοχή απλοποίησης γίνεται στο μοντέλο του καλοριφέρ, υποθέτοντας την ίδια θερμοκρασία για την επιφάνεια του καλοριφέρ με τη θερμοκρασία του νερού μέσα στο καλοριφέρ. Με αυτή την παραδοχή, η θερμότητα από το καλοριφέρ μεταφέρεται στο περιβάλλον μόνο μέσω της μεταφοράς. (Ο εσωτερικός αέρας στη ζώνη λειτουργεί ως περιβάλλον για το καλοριφέρ). Η εξέλιξη της θερμοκρασίας του καλοριφέρ T_{rad} σε [° C] έχει ως εξής:

$$\frac{\partial T_{rad}}{\partial t} = \frac{w_{rad_{sw}}}{\rho_w A_{rad}} \frac{\partial T_{rad}}{\partial l} - \frac{K_{rad}}{C_w \rho_w V_{rad}} (T_{rad} - T_z) \quad (1)$$

όπου ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την εναλλαγή θερμότητας μέσα στο καλοριφέρ και ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την εναλλαγή θερμότητας με τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα T_z σε [° C] της ζώνης. Στο (1) C_w είναι η θερμική χωρητικότητα του νερού σε [kJ / kg ° C], $w_{rad_{sw}}$ είναι ο ρυθμός ροής μάζας του νερού παροχής στο καλοριφέρ σε [kg / s], K_{rad} είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σε [kW / ° C], ρ_w είναι η πυκνότητα νερού σε [kg / m³],

A_{rad} είναι η επιφάνεια του καλοριφέρ σε $[m^2]$ και V_{rad} είναι ο όγκος του καλοριφέρ σε $[m^3]$.

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας K_{rad} περιγράφεται ως:

$$K_{rad} = h_{rad} A_{rad} \quad (2)$$

όπου το h_{rad} είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταφοράς του θερμαντήρα σε $[kW / m^2 \cdot ^\circ C]$. Η μεταφερόμενη ισχύς Q_{rad} σε $[kW]$ από το καλοριφέρ στη ζώνη δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q_{rad} = K_{rad} (T_{rad} - T_z) \quad (3)$$

1.2.2. Λέβητας Συμπύκνωσης

Στις περισσότερες χώρες, απαιτείται σήμερα από τους κανονισμούς κατασκευής να εγκατασταθούν οι καινούργιοι λέβητες που λειτουργούν με φυσικό αέριο με εποχική απόδοση 85% ή περισσότερο. Δεδομένου ότι η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων ενός συμβατικού λέβητα με καύση αερίου είναι συνήθως υψηλή και χάνονται μεγάλες ποσότητες θερμικής ενέργειας στο περιβάλλον, οι λέβητες συμπύκνωσης αποσκοπούν στην ανάκτηση τόσο της λογικής θερμότητας όσο και της λανθάνουσας θερμότητας με την προσθήκη ενός συμπυκνωμένου εναλλάκτη θερμότητας. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας του νερού στο εσωτερικό του λέβητα T_b σε $[^{\circ}\text{C}]$ έχει ως εξής:

$$\frac{\partial T_b}{\partial t} = \frac{w_{b_{sw}}}{\rho_w A_b} \frac{\partial T_b}{\partial l} + \frac{Q_b(T_b, P_{in}^b)}{C_w \rho_w V_b} \quad (4)$$

όπου ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή θερμότητας μέσα στο λέβητα. Το Q_b είναι η ισχύς που παρέχεται από τον λέβητα σε $[\text{kW}]$, $w_{b_{sw}}$ είναι η παροχή μάζας του νερού τροφοδοσίας στον λέβητα σε $[\text{kg} / \text{s}]$, A_b είναι η επιφάνεια του λέβητα σε $[\text{m}^2]$ και V_b είναι ο όγκος του λέβητα σε $[\text{m}^3]$. Όπως παρουσιάζεται λεπτομερώς στην ενότητα 3, η ισχύς που παρέχεται από τον λέβητα Q_b διαμορφώνεται ως πολυωνυμική λειτουργία του νερού επιστροφής $T_{b_{rw}}$, σε $[^{\circ}\text{C}]$ και του παρεχόμενου καυσίμου P_{in}^b σε $[\text{kW}]$ (π.χ. φυσικό αέριο).

1.2.3. Αντλία Θερμότητας

Η αντλία θερμότητας θεωρείται ότι συνδέεται με την ενδοδαπέδια θέρμανση. Παίρνει το νερό επιστροφής από το κύκλωμα θέρμανσης δαπέδου και τροφοδοτεί το νερό σε υψηλότερη θερμοκρασία. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας του νερού μέσα στην αντλία θερμότητας T_{hp} σε $^{\circ}\text{C}$ έχει ως εξής:

$$\frac{\partial T_{hp}}{\partial t} = \frac{w_{hp_{sw}}}{\rho_w A_{hp}} \frac{\partial T_{hp}}{\partial l} + \frac{Q_{hp}(T_{hp_{rw}}, T_{amb}, f_{hp})}{C_w \rho_w V_{hp}} \quad (5)$$

όπου ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή θερμότητας μέσα στην αντλία θερμότητας. Στο (5) Q_{hp} είναι η ισχύς που παρέχεται από την αντλία θερμότητας σε $[\text{kW}]$, $w_{hp_{sw}}$ είναι η παροχή μάζας παροχής νερού στην αντλία θερμότητας σε $[\text{kg} / \text{s}]$, A_{hp} είναι η επιφάνεια της αντλίας θερμότητας σε $[\text{m}^2]$ και V_{hp} είναι ο όγκος της αντλίας θερμότητας σε $[\text{m}^3]$. Όπως φαίνεται λεπτομερώς στην ενότητα 1.3, η ισχύς που παρέχεται από την αντλία θερμότητας Q_{hp} διαμορφώνεται ως πολυωνυμική λειτουργία του νερού επιστροφής $T_{hp_{rw}}$ σε $^{\circ}\text{C}$, θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} σε $^{\circ}\text{C}$ και συχνότητα συμπίεσής f_{hp} σε $[\text{Hz}]$.

1.2.4. Μονάδα Ψύξης

Το ψυκτικό συγκρότημα μπορεί να θεωρηθεί ως το αντίστοιχο μιας αντλίας θερμότητας. Χρησιμοποιεί ενέργεια για να ψύχει το νερό επιστροφής και το προμηθεύει σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Το ψυκτικό συγκρότημα συνδέεται στο ψυκτικό πηνίο της μονάδας αερισμού (Air Handling Unit-AHU). Η εξέλιξη της θερμοκρασίας του νερού μέσα στο ψυκτικό συγκρότημα T_c σε $[^{\circ}\text{C}]$ έχει ως εξής:

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{w_{c_{sw}}}{\rho_w A_c} \frac{\partial T_c}{\partial l} - \frac{Q_c(T_{c_{rw}}, T_{amb}, f_c)}{C_w \rho_w V_c} \quad (6)$$

όπου ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή θερμότητας μέσα στο ψυκτικό συγκρότημα. Στο (6) Q_c είναι η ισχύς που παρέχεται από τον ψυκτήρα σε $[\text{kW}]$, $w_{c_{sw}}$ είναι η παροχή μάζας παροχής νερού στον ψυκτήρα σε $[\text{kg} / \text{s}]$, A_c είναι η επιφάνεια του ψυκτικού συγκροτήματος σε $[\text{m}^2]$ και V_c είναι ο όγκος του ψυκτικού συγκροτήματος σε $[\text{m}^3]$. Ομοίως με την αντλία θερμότητας, όπως παρουσιάζεται λεπτομερώς στην Ενότητα 3, η ισχύς που παρέχεται από το ψυκτικό συγκρότημα Q_c διαμορφώνεται ως πολυωνυμική λειτουργία του νερού επιστροφής $T_{c_{rw}}$ σε $[^{\circ}\text{C}]$, θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} σε $[^{\circ}\text{C}]$ και συχνότητα συμπίεστη f_c στο $[\text{Hz}]$.

1.2.5. Σωλήνες και Αγωγοί

Οι σωλήνες (ή οι αγωγοί) μεταφέρουν νερό (αντίστοιχα αέρα) σε διάφορα εξαρτήματα του συστήματος HVAC. Θεωρείται ότι η θερμοκρασία επιφάνειας του αγωγού είναι ίδια με τη θερμοκρασία νερού (αέρα) μέσα στον αγωγό (σωλήνα). Στο υπό εξέταση σύστημα όλοι οι σωλήνες (αγωγοί) βρίσκονται μέσα στο περίβλημα του κτιρίου. Ως αποτέλεσμα, η θερμοκρασία περιβάλλοντος για τους σωλήνες (αγωγούς) είναι το περίβλημα του κτιρίου. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας σωλήνα T_p σε $[^{\circ}\text{C}]$ έχει ως εξής:

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{w_w}{\rho_w A_p} \frac{\partial T_p}{\partial l} - \frac{K_r}{C_w \rho_w V_p} (T_p - T_{wall}) \quad (7)$$

όπου ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή θερμότητας εντός του σωλήνα και ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή θερμότητας με τη θερμοκρασία τοιχώματος T_{wall} σε $[^{\circ}\text{C}]$. Στο (7) w_w είναι ο ρυθμός ροής μάζας νερού στον σωλήνα σε $[\text{kg} / \text{s}]$, K_r είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σε $[\text{kW} / ^{\circ}\text{C}]$, A_p είναι η επιφάνεια του σωλήνα σε $[\text{m}^2]$ και V_p είναι ο όγκος του σωλήνα σε $[\text{m}^3]$. Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας K_r μπορεί να περιγραφεί ως:

$$K_r = h_r \pi D_p L_p \quad (8)$$

όπου το h_r είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταφοράς του σωλήνα σε $[\text{kW} / \text{m}^2 ^{\circ}\text{C}]$, D_p είναι η διάμετρος του σωλήνα σε $[\text{m}]$ και L_p είναι το μήκος του σωλήνα σε $[\text{m}]$. Παρόμοιες εξισώσεις μπορούν να εξαχθούν για τους αγωγούς, φροντίζοντας να αντικατασταθεί η

θερμοκρασία του σωλήνα T_p με τη θερμοκρασία του αγωγού T_d , ο όγκος του σωλήνα V_p με τον όγκο του αγωγού V_d κ.λπ.

1.2.6. Πηνία Θέρμανσης και Ψύξης

Οι σπείρες θέρμανσης και ψύξης είναι υπο-συνιστώσες της μονάδας αερισμού. Για παράδειγμα, στο πηνίο θέρμανσης, ο αέρας από τη ζώνη ανάμιξης αλληλεπιδρά με το ζεστό νερό. Το αποτέλεσμα αυτής της αλληλεπίδρασης μπορεί να διαμορφωθεί με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\partial T_{hc_a}}{\partial t} = \frac{w_{hc_a}}{\rho_a A_d} \frac{\partial T_{hc_a}}{\partial l} - \frac{K_{rd}}{C_a \rho_a V_d} (T_{hc_a} - T_{hc_w}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_{hc_w}}{\partial t} = \frac{w_{hc_w}}{\rho_w A_p} \frac{\partial T_{hc_w}}{\partial l} - \frac{K_r}{C_w \rho_w V_p} (T_{hc_w} - T_{hc_a}) \quad (10)$$

Στην (9) η εξέλιξη της θερμοκρασίας του αέρα στον αγωγό σε θερμαντικό πηνίο T_{hc_a} σε [° C] ως αποτέλεσμα της ανταλλαγής θερμότητας μέσα στον αγωγό που υπάρχει στο πηνίο θέρμανσης περιγράφεται από τον πρώτο όρο και η ανταλλαγή θερμότητας με τη θερμοκρασία νερού T_{hc_w} [° C] περιγράφεται από τον δεύτερο όρο. Στο (9) W_{hc_a} είναι ο ρυθμός ροής μάζας αέρα στον αγωγό σε θερμαντικό πηνίο σε [kg / s]. Στην (10) εξέλιξη της θερμοκρασίας του νερού στον σωλήνα σε θερμαντικό πηνίο T_{hc_w} σε [° C] ως αποτέλεσμα της ανταλλαγής θερμότητας εντός του σωλήνα περιγράφεται από τον πρώτο όρο και η ανταλλαγή θερμότητας με τη θερμοκρασία του αέρα T_{hc_a} σε [° C] περιγράφεται από τον δεύτερο όρο. Στο (10) W_{hc_w} είναι ο ρυθμός ροής μάζας νερού στο σωλήνα στο θερμαντικό πηνίο σε [kg / s]. Παρόμοιες εξισώσεις μπορούν να εξαχθούν για το ψυκτικό πηνίο, προσέχοντας να αντικατασταθεί η θερμοκρασία του αέρα στον αγωγό στον

θερμαντικό πηνίο T_{hc_a} με τη θερμοκρασία του αέρα στον αγωγό στο ψυκτικό πηνίο T_{cc_a} η ροή μάζας του νερού στο σωλήνα στην θερμαντικό πηνίο με το ρυθμό ροής μάζας W_{cc_w} νερού στο σωλήνα στο ψυκτικό πηνίο, κλπ.

1.2.7. Βαλβίδα και Διαχωριστής

Το νερό τροφοδοσίας χωρίζεται σε δύο (ή περισσότερες) ροές στον διαχωριστή. Ας υποθέσουμε ότι μια ροή πηγαίνει στο θερμαντικό πηνίο στο AHU και το άλλο στο ψυγείο (αν και μπορούν να μοντελοποιηθούν διαφορετικές συνδέσεις). Η βαλβίδα υπαγορεύει το ρυθμό ροής μάζας νερού σε κάθε μία από τις ροές. Το άνοιγμα βαλβίδας $C(t)$ δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση (11):

$$C(t) = \frac{C(t)}{\sqrt{(C^2(t)(1 - N_v) + N_v)}} \quad (11)$$

Στην (11) $c(t)$ είναι το σήμα ελέγχου και το N_v είναι η αρχή της βαλβίδας. Συνήθως $c(t) \in [0, 1]$. Ο ρυθμός ροής μάζας του νερού που ρέει μέσα στο θερμαντικό πηνίο στην AHU δίνεται από:

$$W_{hc_w} = CW_{b_{sw}}$$

Η παροχή μάζας νερού που ρέει μέσα στο ψυγείο δίδεται από:

$$W_{rad_{sw}} = W_{b_{sw}} - W_{hc_w}$$

1.2.8. Συλλέκτης

Ο συλλέκτης είναι αντίστοιχος του διαχωριστή. Ο συλλέκτης συσσωρεύει ροές νερού από το ψυγείο και το AHU. Λόγω της συγχώνευσης αυτών των δύο ροών, η προκύπτουσα ροή μάζας αλλάζει ως εξής:

$$W_{b_{sw}} = W_{hc_w} + W_{rad_{sw}}$$

Η θερμοκρασία του μίγματος T_{mix} σε [° C] δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$T_{mix} = \frac{W_{hc_w} T_{hc_{rw}} + W_{rad_{sw}} T_{rad_{rw}}}{W_{b_{sw}}} \quad (12)$$

όπου $T_{hc_{rw}}$ είναι η θερμοκρασία του νερού επιστροφής από το θερμαντικό πηνίο σε [° C] και η

$T_{rad_{rw}}$ είναι η θερμοκρασία του νερού επιστροφής από το καλοριφέρ σε [° C].

1.2.9. Αντλία

Οι αντλίες ελέγχουν τον ρυθμό ροής του νερού μέσω του συστήματος HVAC όπως περιγράφεται από:

$$W_{b_{sw}} = v_w A \rho_w$$

όπου v_w είναι η ταχύτητα ροής του νερού σε [m / s]. Η θερμοκρασία του νερού που διέρχεται από την αντλία αυξάνεται λόγω των ανεπαρκειών του κινητήρα της αντλίας αν ο κινητήρας είναι εγκατεστημένος στο ρεύμα νερού [8]. Η αύξηση της θερμοκρασίας δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$T_{po_{rw}} = T_{pi_{rw}} + \frac{W_p f}{W_{b_{sw}} C_w} \quad (13)$$

όπου $T_{po_{rw}}$ είναι η θερμοκρασία νερού επιστροφής στην έξοδο της αντλίας σε [° C], $T_{pi_{rw}}$ είναι η θερμοκρασία νερού επιστροφής στην είσοδο της αντλίας σε [° C], W_p είναι η ισχύς που καταναλώνεται από την αντλία σε [kW] και f είναι ένα κλάσμα της ισχύς της αντλίας που μετατρέπεται σε υγρή θερμική ενέργεια.

1.2.10. Ζώνη Ανάμειξης

Η ζώνη ανάμειξης είναι μια υπο-συνιστώσα του AHU. Ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ του φρέσκου αέρα και του αέρα επιστροφής μέσω του αποσβεστήρα επανακυκλοφορίας, υπάρχει μια μεταβολή στην παροχή μάζας και τη θερμοκρασία του μίγματος. Η δυναμική της αλληλεπίδρασης είναι παρόμοια με αυτή ενός συλλέκτη και δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$w_{mix_{sa}} = W_{f_a} + W_{r_a} \quad (14)$$

$$T_{mix_{sa}} = \frac{W_{f_a} T_{f_a} + W_{r_a} T_{r_a}}{w_{mix_{sa}}} \quad (15)$$

Στο (14) $w_{mix_{sa}}$ είναι ο ρυθμός ροής μάζας του μείγματος σε [kg / s], W_{f_a} είναι η παροχή μάζας καθαρού αέρα σε [kg / s] και W_{r_a} είναι ο ρυθμός ροής μάζας του αέρα επιστροφής σε [kg / s]. Το $T_{mix_{sa}}$ είναι η θερμοκρασία του μείγματος σε [° C], T_{f_a} είναι η θερμοκρασία του φρέσκου αέρα που εισέρχεται στη ζώνη ανάμειξης σε [° C] και T_{r_a} είναι η θερμοκρασία του αέρα επιστροφής μέσω του αποσβεστήρα επανακυκλοφορίας που εισέρχεται στη ζώνη ανάμειξης [° C].

1.2.11. Ανεμιστήρας

Ανάλογα με την αντλία, ο ανεμιστήρας καθορίζει τον ρυθμό ροής του αέρα μέσω του AHU όπως περιγράφεται από:

$$w_{mix_{sa}} = \rho_a v_a A_d$$

όπου v_a είναι η ταχύτητα ροής αέρα σε [m / s]. Η θερμοκρασία του αέρα που διέρχεται από τον ανεμιστήρα αυξάνεται λόγω των ανεπαρειών του κινητήρα ανεμιστήρα, εάν ο κινητήρας εγκαθίσταται στη ροή του αέρα. Η αύξηση της θερμοκρασίας δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$T_{fo_{sa}} = T_{fi_{sa}} + \frac{W_f f_a}{w_{mix_{sa}} C_w} \quad (16)$$

όπου $T_{fo_{sa}}$ είναι η θερμοκρασία του αέρα τροφοδοσίας στην έξοδο ανεμιστήρα σε [° C], $T_{fi_{sa}}$ είναι η θερμοκρασία του αέρα τροφοδοσίας στην είσοδο του ανεμιστήρα σε [° C], W_f είναι η ισχύς που καταναλώνει ο ανεμιστήρας σε [kW] και το f_a είναι ένα κλάσμα της ισχύος του ανεμιστήρα που μετατρέπεται σε υγρή θερμική ενέργεια.

1.2.12. Αποσβεστήρας

Σε αυτό το μοντέλο εξετάζεται ένας αποσβεστήρας ανακυκλοφορίας αέρα. Ο αποσβεστήρας επανακυκλοφορίας ελέγχει το ποσοστό μίγματος της επιστροφής και του φρέσκου αέρα. Ο ρυθμός ροής μάζας του αέρα w_{ra} σε [kg / s] που εξέρχεται από τον αποσβεστήρα επανακυκλοφορίας δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις :

$$a_r = (1 - pd)(a_0 - 90) + 90 \quad (17)$$

$$G_{dr} = e \frac{b(a_0 - a_r)}{2} \quad (18)$$

$$N_{dr} = \frac{\Delta P_{dr}}{(P_{se} + P_{sf} + \Delta P_{dr})} \quad (19)$$

$$G'_{dr} = G_{dr} [G_{dr}^2 (1 - N_{dr}) + N_{dr}] \quad (20)$$

$$w_{ra} = G'_{dr} w_{o_{ra}} \quad (21)$$

Στο (17) a_r αντιπροσωπεύει τη θέση του πτερυγίου ανακυκλοφορίας, το a_0 είναι μια τιμή μεταξύ 0° και 10° και το pd είναι σήμα ελέγχου στον αποσβεστήρα ($0 \leq pd \leq 1$). Στο (18) το G_{dr} είναι εγγενές χαρακτηριστικό του αποσβεστήρα και το b είναι μια εμπειρική σταθερά που εξαρτάται από το προφίλ της λεπίδας του αποσβεστήρα, τον αριθμό των λεπίδων και τη δράση της λεπίδας. Συνήθως $0,075 < b < 0,11$. Στον (19) N_{dr} αντιπροσωπεύει την αρχή της απόσβεσης, ΔP_{dr}

αντιπροσωπεύει πτώση πίεσης κατά μήκος του αποσβεστήρα σε [Pa], P_{se} αντιπροσωπεύει στατική πίεση κατά την εκκένωση σε [Pa] και P_{sf} αντιπροσωπεύει στατική πίεση στην είσοδο [Pa]. Το G'_{dr} στην (20) είναι ένα εγκατεστημένο χαρακτηριστικό που καθορίζει την ποσότητα του αέρα επιστροφής που διέρχεται μέσω του αποσβεστήρα επανακυκλοφορίας. Συνήθως η G'_{dr} είναι μια τιμή μεταξύ 0 και 1. Στο (21) w_{ora} είναι ο ρυθμός ροής μάζας του αέρα που εισέρχεται στον αποσβεστήρα σε [kg / s].

1.2.13. Ζώνη λειτουργίας

Σε αυτό το μοντέλο της ζώνης θεωρείται ότι όλα τα τοιχώματα, η οροφή και οι υαλοπίνακες έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά που ομαδοποιούνται ως παράμετροι περιβάλλουσας [12]. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας τοιχώματος T_{wall} σε $^{\circ}\text{C}$ έχει ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{wall}}{dt} = & \frac{U_{wo} A_{wall} (T_{o_a} - T_{wall})}{C_{wall}} + \frac{U_{wi} A_{wall} (T_z - T_{wall})}{C_{wall}} \\ & + \frac{U_{wo} A_{wall} (T_{z_{neigh}} - T_{wall})}{C_{wall}} + \frac{(1-p)Q_s}{C_{wall}} \end{aligned} \quad (22)$$

όπου ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την εναλλαγή θερμότητας με θερμοκρασία εξωτερικού αέρα T_{o_a} σε $^{\circ}\text{C}$, ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την εναλλαγή θερμότητας με τη ζώνη θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα T_z σε $^{\circ}\text{C}$ και ο τρίτος όρος αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή θερμότητας με τη γειτονική ζώνη θερμοκρασία εσωτερικού αέρα $T_{z_{neigh}}$ σε $^{\circ}\text{C}$. Παρατηρήστε ότι η αλληλεπίδραση με πολλαπλές ζώνες μπορεί να συμπεριληφθεί στο (22) επιλέγοντας κατάλληλα το A_{wall} επιφάνειας μέσω του οποίου αλληλεπιδρούν οι διαφορετικές ζώνες. Στο (22) U_{wo} και U_{wi} είναι οι θερμικές διαπερατότητες των εξωτερικών και εσωτερικών στρωμάτων του τοιχώματος αντίστοιχα σε $[\text{kW} / \text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}]$, C_{wall} είναι η θερμική χωρητικότητα του τοίχου σε $[\text{kJ} / \text{kg } ^{\circ}\text{C}]$, A_{wall} είναι η επιφάνεια του τοιχώματος σε $[\text{m}^2]$, το p είναι ένα κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω υαλοπινάκων και το Q_s είναι η ηλιακή ακτινοβολία σε $[\text{kW}]$. Δύο ξεχωριστά στρώματα θερμοκρασίας για το πάτωμα θεωρούνται ότι καθιστούν το μοντέλο επεκτάσιμο στην

περίπτωση όπου η θέρμανση δαπέδου είναι διαθέσιμη ως άλλη πηγή θερμότητας. Η εξέλιξη του πρώτου στρώματος της θερμοκρασίας δαπέδου T_{f_1} σε $^{\circ}\text{C}$ έχει ως εξής:

$$\frac{dT_{f_1}}{dt} = \frac{h_{ri} A_f (T_z - T_{f_1}) - U_{f_1} A_f (T_{f_2} - T_{f_1}) + p Q_s}{C_{f_1}} \quad (23)$$

όπου ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την εναλλαγή θερμότητας με τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα της ζώνης και ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την εναλλαγή θερμότητας με τη θερμοκρασία δαπέδου του δεύτερου στρώματος T_{f_2} σε $^{\circ}\text{C}$. Στο (23) h_{ri} είναι ο συντελεστής μεταγωγής της μεταφοράς θερμότητας του αέρα εσωτερικού χώρου σε $[\text{kW} / \text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}]$, U_{f_1} είναι η θερμική διαπερατότητα του πρώτου στρώματος δαπέδου σε $[\text{kW} / \text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}]$, C_{f_1} είναι η θερμική χωρητικότητα του πρώτου στρώματος του δαπέδου σε $[\text{kJ} / \text{kg } ^{\circ}\text{C}]$ και A_f είναι η επιφάνεια του δαπέδου σε $[\text{m}^2]$. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας του δεύτερου στρώματος δαπέδου T_{f_2} σε $^{\circ}\text{C}$ έχει ως εξής:

$$\frac{dT_{f_2}}{dt} = \frac{U_{f_1} A_f (T_{f_1} - T_{f_2}) + U_{f_2} A_f (T_g - T_{f_2}) + Q_f}{C_{f_2}} \quad (24)$$

όπου ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή θερμότητας με την πρώτη στρώση του δαπέδου και ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την εναλλαγή θερμότητας με τη θερμοκρασία εδάφους T_g σε $^{\circ}\text{C}$. Στο (24) U_{f_2} είναι η θερμική διαπερατότητα του δεύτερου στρώματος δαπέδου σε $[\text{kW} / \text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}]$ C_{f_2} είναι η θερμική χωρητικότητα του δεύτερου στρώματος του

δαπέδου σε [kJ / kg ° C] και Q_f είναι η θερμότητα που παρέχεται από το θέρμανση δαπέδου σε [kW]. Παρατηρήστε ότι το δεύτερο στρώμα του δαπέδου μπορεί να είναι η οροφή ενός κάτω ορόφου: σε τέτοια περίπτωση η (24) μπορεί να τροποποιηθεί ως εξής:

$$\frac{dT_{f_2}}{dt} = \frac{U_{f_1} A_f (T_{f_1} - T_{f_2}) + U_{f_2} A_f (T_{z_{LOW}} - T_{f_2}) + Q_f}{C_{f_2}} \quad (25)$$

όπου $T_{z_{LOW}}$ σε [° C] είναι η θερμοκρασία της ζώνης στον κάτω όροφο. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να συμπεριληφθούν πολυώροφα κτίρια. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα της ζώνης έχει ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{dT_z}{dt} = & \frac{U_{wi} A_{wall}}{C_r} (T_{wall} - T_z) + \frac{h_{ri} A_f}{C_r} (T_{f_1} - T_z) + \frac{U_{f_2} A_f}{C_r} (T_{f_{2UP}} - T_z) \\ & + \frac{C_a^w \text{mix}_{sa}}{C_r} (T_{ahu_{sa}} - T_z) + \frac{Q_{rad}}{C_r} + \frac{Q_e}{C_r} \end{aligned} \quad (26)$$

όπου ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή θερμότητας με τη θερμοκρασία τοίχου, ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή θερμότητας με την πρώτη θερμοκρασία δαπέδου στρώσης και ο τρίτος όρος αντιπροσωπεύει την εναλλαγή θερμότητας με την οροφή ($T_{f_{2UP}}$ είναι η θερμοκρασία του δεύτερου στρώματος του επάνω ορόφου) . Ο τέταρτος όρος αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή θερμότητας με την θερμοκρασία αέρα $T_{ahu_{sa}}$ σε [° C] που

εισέρχεται στη ζώνη από το AHU. Στο (26) Q_e είναι τα εσωτερικά κέρδη θερμότητας σε [kW].

Στην πραγματικότητα, η θερμοκρασία της ζώνης εξαρτάται επίσης από την πληρότητα, τα εσωτερικά κέρδη και το πρόγραμμά τους, τα οποία λαμβάνονται υπόψη από την Q_e .

1.3. Υπολογισμός Ισχύος

Είναι συνηθισμένη πρακτική η μοντελοποίηση της ισχύος που καταναλώνεται από τον εξοπλισμό HVAC μέσω πολυωνικών λειτουργιών. Για την περίπτωση του λέβητα συμπίκνωσης που έχουμε:

$$Q_b = \eta_b (P_{in}^b, T_{b_{rw}}) P_{in}^b \quad (27)$$

$$H_v \nu_g$$

όπου $P_{in}^b = H_v \nu_g$ είναι η ισχύς εισόδου του λέβητα (ν_g είναι η ογκομετρική ροή αερίου και H_v είναι η τιμή θέρμανσης αερίου για τον όγκο), και η_b είναι η καμπύλη αποδοτικότητας του λέβητα, που περιγράφεται από:

$$\eta_b (P_{in}^b, T_{b_{rw}}) = a_0^b + a_1^b T_{b_{rw}} + a_2^b T_{b_{rw}}^2 + a_3^b T_{b_{rw}}^3 + a_4^b T_{b_{rw}}^4 + a_5^b T_{b_{rw}}^5 P_{in}^b + a_6^b T_{b_{rw}}^6 P_{in}^b + a_7^b T_{b_{rw}}^7 P_{in}^b \quad (28)$$

για να προσδιοριστούν ορισμένοι κατάλληλοι συντελεστές. Με παρόμοιο τρόπο για την αντλία θερμότητας που έχουμε:

$$Q_{hp} = \eta_{hp} (T_{hp_{rw}}, f_{hp}, T_{amb}) P_{in}^{hp} \quad (29)$$

όπου P_{in}^{hp} είναι η ισχύς εισόδου αντλίας θερμότητας (τυπικά ηλεκτρική), και η_{hp} είναι η καμπύλη αποδοτικότητας του λέβητα, που περιγράφεται από το:

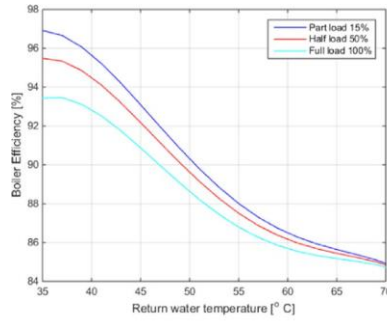
$$\begin{aligned} \eta_{hp}(T_{hp_{rw}}, f_{hp}, T_{amb}) = & a_0^{hp} + a_1^{hp} T_{amb} + a_2^{hp} T_{hp_{rw}} + a_3^{hp} f_{hp} + a_4^{hp} T_{amb}^2 \\ & + a_5^{hp} T_{hp_{rw}}^2 + a_6^{hp} f_{hp}^2 + a_7^{hp} T_{amb} T_{hp_{rw}} + a_8^{hp} T_{amb} f_{hp} + a_9^{hp} T_{hp_{rw}} f_{hp} \end{aligned} \quad (30)$$

για να προσδιοριστούν ορισμένοι κατάλληλοι συντελεστές.

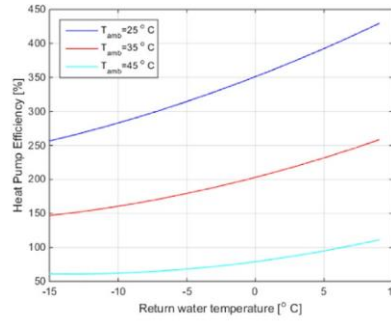
Ομοίως για το ψυκτικό συγκρότημα:

$$\begin{aligned} \eta_c(T_{c_{rw}}, f_c, T_{amb}) = & a_0^c + a_1^c T_{amb} + a_2^c T_{c_{rw}} + a_3^c f_c + a_4^c T_{amb}^2 \\ & + a_5^c T_{c_{rw}}^2 + a_6^c f_c^2 + a_7^c T_{amb} T_{c_{rw}} + a_8^c T_{amb} f_c + a_9^c T_{c_{rw}} f_c \end{aligned} \quad (31)$$

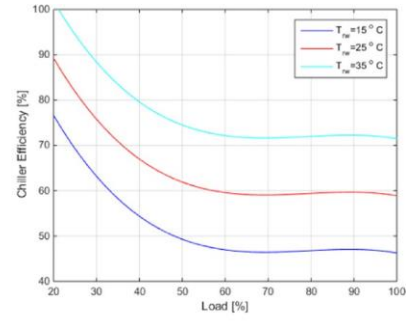
Η **εικόνα2** δείχνει τις καμπύλες πολυωνμικής απόδοσης για αυτόν τον εξοπλισμό HVAC. Για να υπολογίσουμε την υδραυλική ισχύ που καταναλώνεται από την αντλία ενώ περιστρέφεται με μια συγκεκριμένη ταχύτητα q_w , χρησιμοποιούμε τον ακόλουθο τύπο:



(a) Boiler efficiency



(b) Heat pump efficiency



(c) Chiller efficiency

Εικόνα 2. Καμπύλες πολυωνυμικής απόδοσης του λέβητα, της αντλίας θερμότητας και του ψύκτη

$$W_p = \frac{q_w \rho_w g h}{3.6 \cdot 10^6} \quad (32)$$

όπου W_p αντιπροσωπεύει την ισχύ που καταναλώνεται από την αντλία σε [kW], q_w αντιπροσωπεύει την ικανότητα ροής σε [m³ / h], g αντιπροσωπεύει επιτάχυνση λόγω βαρύτητας σε [m / s²] και h αντιπροσωπεύει διαφορικό **κεφάλαιο** σε [m]. Για να υπολογίσουμε την ισχύ που καταναλώνεται από τον ανεμιστήρα W_f σε [kW] για να κυκλοφορήσει ο αέρας στην AHU σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα q_a , χρησιμοποιούμε τον ακόλουθο τύπο [34]:

$$W_f = \frac{\Delta P q_a}{1.0 \cdot 10^3} \quad (33)$$

1.4 Περιγραφή των κτιρίων

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων και της μεθόδου ενσωμάτωσης των κτιρίων σε δίκτυα,χρειάστηκε να δημιουργήσουμε 6 διαφορετικά κτίρια στο εσωτερικό των οποίων λειτουργούν συστήματα κλιματισμού. Οι μεταβλητές των κτιρίων που αφορούν την λειτουργία ενός δικτύου,είναι η ενεργειακή κατανάλωση που έχει και η ικανοποίηση των χρηστών που επικρατεί στο εσωτερικό τους.Όπως αναφέραμε και προηγουμένως,τα συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC) που χρησιμοποιούνται στα οικιαστικά και εμπορικά κτίρια είναι υπεύθυνα για το μεγαλύτερο μέρος της ενεργειακής κατανάλωσης.Έτσι,σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις επιτυγχάνεται η προσομοίωση των κτιρίων με την λειτουργία του συστήματος κλιματισμού,τα αποτελέσματα της οποίας διαφέρουν ανάλογα με τις κατασκευαστικές παραμέτρους που έχουν οριστεί για κάθε κτίριο.

Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που διαφέρουν από κτίριο σε κτίριο είναι :

- Ο όγκος του μπόυλερ
- Τα τετραγωνικά μέτρα
- Τα τετραγωνικά μέτρα των παραθύρων
- Το υλικό του πρώτου και δεύτερου στρώματος δαπέδου
- Η διάμετρος των σωληνώσεων
- Η διάμετρος των αγωγών

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά επιλέχτηκαν,καθώς είναι κάποια από αυτά που επηρεάζουν την κατανάλωση που έχει ένα κτίριο,καθιστώντας έτσι 6 κτίρια με διαφορετική ενεργειακή συμπεριφορά.

1.5. Έλεγχος κτιρίων

Ο έλεγχος που μπορεί να ασκήσει ένας χρήστης σε κάθε κτίριο αφορά την χρήση των HVAC και των κλιματιστικών καθώς και τον καθορισμό της θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται μέσω αυτών. Επίσης, η θερμοκρασία εξαρτάται και από άλλους παράγοντες που σχετίζονται με το μοντέλο της κάθε μονάδας όπως η απόδοσή του, η χωρητικότητα του και άλλοι κατασκευαστικοί λόγοι. Στόχος αυτής της προσομοίωσης είναι η εξαγωγή μιας ρεαλιστικής ενεργειακής κατανάλωσης για κάθε κτίριο. Για αυτό το λόγο, η προσομοίωση διεξάγεται σε πραγματικές ώρες και συνθήκες λειτουργίας, με σκοπό την ενσωμάτωση των κτιρίων στους κόμβους φορτίων ενός δικτύου μοντελοποιώντας έτσι ένα πραγματικό σύστημα. Η ενέργεια που καταναλώνεται από κάθε κτίριο είναι μια μη γραμμική συνάρτηση που εξαρτάται από την διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας που ορίζει ο χρήστης (set point) και της θερμοκρασίας που επικρατεί στην ζώνη λειτουργίας του (zone temperature). Μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει αυτή την συνάρτηση είναι και η ικανοποίηση των χρηστών μέσα σε κάθε κτίριο, η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με το μοντέλο πρόβλεψης μέσης συχνότητας (PMV) ένα από τα πιο αναγνωρισμένα μοντέλα θερμικής άνεσης. [20]

Επίσης, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονίσουμε ότι ο έλεγχος των HVAC είναι εφικτός μόνο κατά την διάρκεια προσομοίωσης του “έξυπνου” δικτύου, και όχι αυτόνομα σε κάθε κτίριο. Η προσομοίωση των κτιρίων λειτουργεί σε δείγματα των 600sec (10 λεπτών). Επομένως, τα αποτελέσματα που εξάγονται από αυτό το σύστημα, συγκεντρώνονται σε έναν πίνακα του οποίου η διάσταση είναι ίση με την ακέραια διαίρεση του χρόνου προσομοίωσης του δικτύου (σε second) με τον χρόνο προσομοίωσης των κτιρίων και κάθε στοιχείο αντιστοιχεί στην ενεργειακή κατανάλωση 10 λεπτών.

Για λόγους απλότητας, θεωρούμε ότι τα HVAC και τα κλιματιστικά έχουν μόνο μια ταχύτητα.

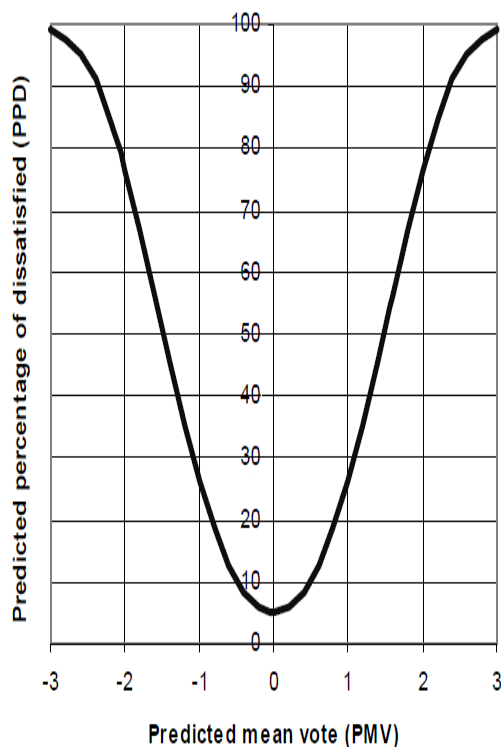
1.5.1. Μοντέλο Θερμικής Ικανοποίησης

Η θερμική ικανοποίηση γενικά αφορά μια πνευματική-σωματική κατάσταση η οποία είναι διαχωρισμένη από τις θερμικές εξισώσεις και την μεταφορά ενέργειας. Παρόλα αυτά, η ικανοποίηση αυτή εξαρτάται από τις μεταβλητές που αφορούν την θερμότητα και την μετακίνηση θερμικών μαζών μέσα στο κτίριο που εξετάζουμε. Η πιο συνηθισμένη προσέγγιση για την πρόβλεψη της θερμικής ικανοποίησης μέσα στο κτίριο είναι η αξιολόγηση ψυχολογικών πειραμάτων και ερευνών σε σχέση με τις θερμικές μεταβλητές. Αυτά τα πειράματα, βασίζονται στην χρησιμοποίηση ανθρώπων με διαφορετικό επίπεδο ένδυσης, κάνοντας διαφορετικές δραστηριότητες και που είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικό περιβάλλον με διαφορετική θερμοκρασία αέρα και επιφάνειας, υγρασία και διαφορετική ταχύτητα ροή αέρα. Έπειτα, τα υποκείμενα ρωτώνται για το επίπεδο της ικανοποίησης τους.

Ένας πίνακας με το βάρος της “ψήφου” του κάθε χρήστη (PMV):

Τιμές	Αίσθηση
+3	Πολύ ζέστη
+2	ζέστη
+1	Λίγο ζέστη
0	Ουδέτερο
-1	Λίγο κρύο
-2	κρύο
-3	Πολύ κρύο

Μετατρέποντας τον παραπάνω πίνακα σε ποσοστά (PPD) έχουμε :



Το πιο συνηθισμένο μοντέλο πειραμάτων και αξιολόγησης της ικανοποίησης είναι το μοντέλο του Fanger (1982). Η ανάλυσή του προτείνει ότι η θερμική αίσθηση και ικανοποίηση του κάθε ανθρώπου εξαρτάται από την θερμοκρασία του δέρματός του καθώς και από τον ρυθμό εφίδρωσης που εξαρτάται από την δραστηριότητα που κάνει το κάθε άτομο. Χρησιμοποιώντας και αυτή την πληροφορία, το μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι συνάρτηση 6 μεταβλητών: θερμοκρασία αέρα, μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας, ταχύτητα ανέμου, υγρασία περιβάλλοντος, ο ρουχισμός και το επίπεδο δραστηριότητας.

Κεφάλαιο 2^ο: Ηλεκτρικό Δίκτυο

2.1. Σταθερότητα συγχρονισμού

Ένα ηλεκτρικό δίκτυο είναι ένα σύστημα ηλεκτρικά συζευγμένων συσκευών, με σκοπό την παροχή ισχύος από γεννήτριες στους καταναλωτές. Ωστόσο, μία σημαντική ανησυχία για τα ηλεκτρικά δίκτυα είναι η σταθερότητα των επιθυμητών καταστάσεων, ιδιαίτερα η σταθερότητα συγχρονισμού των γεννητριών ισχύος, η οποία είναι μια κατάσταση που απαιτείται για την κανονική λειτουργία τους. Η μελέτη της σταθερότητας των σύγχρονων καταστάσεων μιας διασύνδεσης εναλλασσόμενου ρεύματος κατά των διαταραχών απαιτεί ένα μοντέλο δικτύου ικανό να περιγράψει τη συζευγμένη δυναμική των γεννητριών ισχύος.

Για τον λόγο αυτό, η αρχή του «έξυπνου» δικτύου βασίστηκε αρχικά σε ένα μαθηματικό μοντέλο, γνωστό ως Kuramoto model, που χρησιμοποιείται για να περιγράψει φαινόμενα συγχρονισμού. Η κλασική παράσταση του μοντέλου Kuramoto είναι η ακόλουθη :

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \frac{K}{n} \sum_{j=1}^n \sin(\theta_i - \theta_j)$$

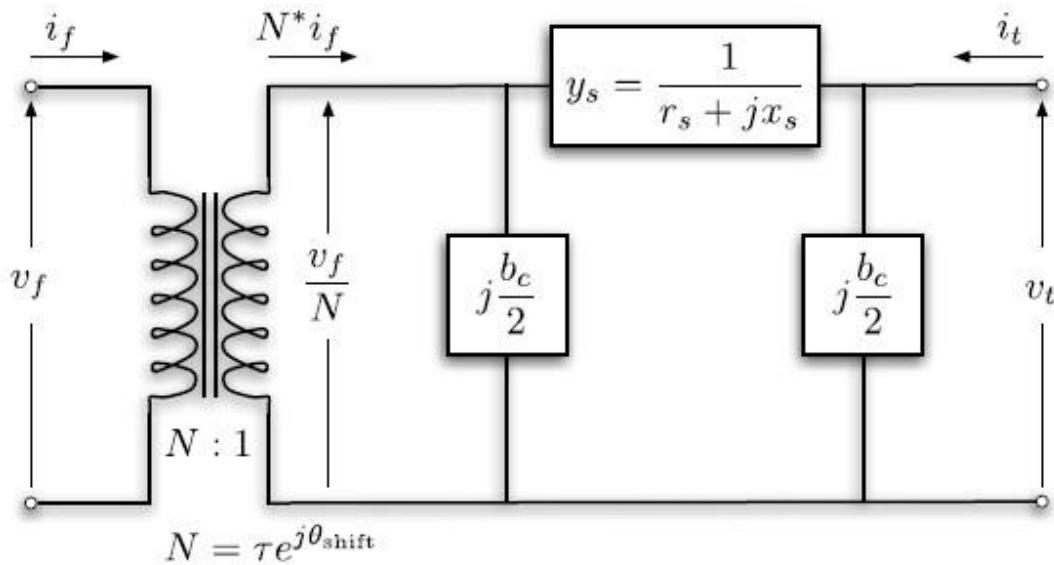
όπου έχουμε N συζευγμένους ταλαντωτές, με το K να αντιπροσωπεύει την ισχύ σύζευξης, θ (σε rad), και ω (στο $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) η φάση και η συχνότητα σφάλματος. Ενώ οι τρέχουσες ταχύτητες των ταλαντωτών Kuramoto τείνουν να συγκλίνουν σε μια συχνότητα ίση με το μέσο όρο των φυσικών συχνοτήτων, τότε είναι εύλογο να σκεφτούμε (και επίσης ελήφθησαν στη βιβλιογραφία [4], [5]) ότι είναι δυνατόν να συγχρονιστεί το δίκτυο του συζευγμένου ταλαντωτή σε μια ορισμένη επιθυμητή συχνότητα. Το αρχικό μοντέλο θεωρεί ότι κάθε ταλαντωτής είναι συνδεδεμένος με όλους τους άλλους. Αφαιρώντας αυτή την παραδοχή και περιγράφοντας το δίκτυο του ταλαντωτή διαμέσου ενός γραφήματος, τότε είναι δυνατόν να αποκτηθεί ένα εκτεταμένο μοντέλο Kuramoto:

$$D_i \ddot{\theta}_i = \omega_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)$$

όπου $D_i > 0$ (σε δευτερόλεπτα) είναι ο συντελεστής απόσβεσης και a_{ij} είναι τα στοιχεία του πίνακα adjacency που περιγράφει τη διασύνδεση όλων των ταλαντωτών.

2.2. Η δομή του δικτύου

Για να μετατραπεί το σύστημα σε δίκτυο, ορίζουμε έναν κόμβο ως ένα σημείο στο σύστημα στο οποίο εισάγεται ενέργεια από μια γεννήτρια ή εξάγεται από τους καταναλωτές ισχύος. Ένας σύνδεσμος ορίζεται στη συνέχεια ως ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ ενός ζεύγους τέτοιων κόμβων και μπορεί να αντιπροσωπεύει μία γραμμή μεταφοράς ή έναν μετασχηματιστή όπως περιγράφεται από την παρακάτω **Εικόνα3**.



Εικόνα3. Μοντέλο π μιας γραμμής μεταφοράς ισχύος

Στην ανάλυση των συστημάτων ισχύος, μια γραμμή μεταφοράς αντιπροσωπεύεται συνήθως από το λεγόμενο π μοντέλο, στο οποίο οι δύο κόμβοι συνδέονται με μια αντίσταση, με δύο πυκνωτές (ίσης χωρητικότητας) που συνδέουν τις δύο πλευρές της σύνθετης αντίστασης στο έδαφος. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι έγκυρο με τις ακόλουθες παραδοχές:

- Η γραμμή λειτουργεί υπό συνθήκες ημιτονοειδούς, ισορροπημένης, σταθερής κατάστασης.

- Η γραμμή μεταφέρεται (Η μεταφορά είναι η περιοδική εναλλαγή των θέσεων των αγωγών μιας γραμμής μεταφοράς, προκειμένου να μειωθούν οι παρεμβολές και αλλιώς βελτίωση της μετάδοσης.)

Το πρότυπο της προσέγγισης, το οποίο και υιοθέτησα, είναι η αναπαράσταση των παραμέτρων της γραμμής μεταφοράς και του μετασχηματιστή από την άποψη των ισοδύναμων εισόδων.

Η δομή ολόκληρου του φυσικού δικτύου μπορεί στη συνέχεια να αναπαρασταθεί από τον πίνακα εισόδου (πολύπλοκων τιμών) $Y = (Y_{ij})$, όπου ένα εκτός διαγωνίου στοιχείο Y_{ij} είναι το αρνητικό της εισόδου μεταξύ των κόμβων i και $j \neq i$ και ενός διαγωνίου στοιχείου Y_{ii} είναι το άθροισμα όλων των εισόδων που συνδέονται με τον κόμβο i (συμπεριλαμβανομένων των εισερχομένων διακλάδωσης στο έδαφος, τα οποία αποτελούν μέρη των μοντέλων για γραμμές μεταφοράς και μετασχηματιστές). Η κατάσταση λειτουργίας ενός ηλεκτρικού δικτύου μπορεί να χαρακτηριστεί από τη διανομή της ροής ισχύος μέσω της φυσικής δικτύωσης και των μετασχηματιστών. Σε ένα πλέγμα εναλλασσόμενου ρεύματος, η ισχύς αντιπροσωπεύεται ως ένας σύνθετος αριθμός, των οποίων τα πραγματικά και φανταστικά συστατικά, P_i και Q_i , ονομάζονται ενεργή και άεργη ισχύς, αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, η κατάσταση της τάσης ισχύος μπορεί επίσης να αναπαρασταθεί ως: $V = |V| \cdot e^{j\varphi}$ όπου $|V|$ αντιπροσωπεύει το μέγεθος τάσης και φ το μέγεθος φάσης. Λαμβάνοντας υπόψη τις θέσεις και τις παραμέτρους των γεννητριών ισχύος και φορτίων, καθώς και τις παραμέτρους του δικτύου που συνοψίζονται στη μήτρα εισόδου Y , είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η κατάσταση της ροής ισχύος του συστήματος που αποτελεί την θεμελιώδη αρχή για την ανάλυση του ηλεκτρικού συστήματος σταθερής κατάστασης.

$$P_i = \sum_{j=1}^N |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\varphi_i - \varphi_j - \gamma_{ij})$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^N |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\varphi_i - \varphi_j - \gamma_{ij})$$

όπου V και φ αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα το μέγεθος και τη γωνία φάσης της τάσης που σχετίζεται με την ιστική-γραμμή μετάδοσης και $\gamma_{ij} = a_{ij} - \pi/2$ όπου a_{ij} παίρνεται η εγγραφή των εισόδων σε πολική μορφή ως $Y = |Y| e^{ja_{ij}}$.

2.3. Μηχανική ερμηνεία του μοντέλου

Όσον αφορά την μηχανική πλευρά του μοντέλου, έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές:

1. Η δυναμική του διεγέρτη δεν λαμβάνεται υπόψη και το ρεύμα του πεδίου θεωρείται ότι είναι σταθερό έτσι ώστε η επαγόμενη από τον στάτορα γεννήτρια τάση να είναι πάντα σταθερή.
2. Η επίδραση των περιελίξεων αμορτισέρ, που υπάρχουν στον στροφέα των σύγχρονων γεννητριών, παραμελείται.
3. Η μηχανική ισχύς εισόδου στη γεννήτρια θεωρείται ότι είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης.
4. Η αξιοπιστία της γεννήτριας παραμελείται, δηλαδή η γεννήτρια θεωρείται ότι είναι κυλινδρικού ρότορα.

Για να εξάγουμε την εξίσωση κίνησης που ρυθμίζει τη δυναμική μιας τέτοιας γεννήτριας, ρυθμίζουμε την ταχύτητα μεταβολής της γωνιακής ορμής του ρότορα ίση με την καθαρή ροπή που ασκεί στον ρότορα:

$$J\ddot{\delta} = \bar{T}_m - D_m \omega - \frac{1}{R} \Delta\omega - D_e \Delta\omega - T_e$$

όπου J είναι η στιγμή αδράνειας σε $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, δ είναι η γωνία του δρομέα σε σχέση με ένα πλαίσιο που περιστρέφεται στη συχνότητα αναφοράς ω_R σε $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$, \bar{T}_m είναι η μηχανική ροπή σε $\text{N} \cdot \text{m}$ που οδηγεί τον δρομέα, D_m είναι η συντελεστή απόσβεσης σε $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ για μηχανική τριβή, ω είναι η γωνιακή συχνότητα του δρομέα σε $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$, R είναι η παράμετρος ρύθμισης σε $\text{rad} / \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ που χαρακτηρίζει τον αναλογικό έλεγχο συχνότητας από έναν ρυθμιστή, $\Delta\omega = \omega - \omega_R$ είναι η απόκλιση συχνότητας, D_e είναι η συντελεστή απόσβεσης για την ηλεκτρική επίδραση των περιελίξεων των αμορτισέρ των γεννητριών, και T_e είναι η συνηθισμένη ροπή επιβράδυνσης

λόγω ηλεκτρικού φορτίου στο δίκτυο. Σημειώνοντας ότι $\dot{\delta} = \omega - \omega_R$, μπορούμε να γράψουμε την εξίσωση ως :

$$J\ddot{\delta} + \bar{D}\dot{\delta} = T_m - T_e$$

όπου $\bar{D} = D_m + D_e + \frac{1}{R}$ και $T_m = \bar{T}_m - D_m \omega_R$ είναι η καθαρή μηχανική ροπή, που αντιστοιχεί στην απώλεια τριβής στη συχνότητα αναφοράς. Πολλαπλασιάζοντας και τις δύο πλευρές με το ω και χρησιμοποιώντας το γεγονός ότι η ροπή σε $\text{N} \cdot \text{m}$ πολλαπλασιαζόμενη με γωνιακή ταχύτητα σε ακτίνια ανά δευτερόλεπτο δίνει ισχύ σε watts, η εξίσωση μπορεί να γραφτεί από την άποψη της ισχύος:

$$J\omega_R\ddot{\delta} + \bar{D}\omega_R\dot{\delta} = \frac{\omega_R}{\omega}(T_m\omega - T_e\omega) \approx \bar{P}_m - \bar{P}_e$$

όπου $\bar{P}_m = T_m\omega$, $\bar{P}_e = T_e\omega$ και $\frac{\omega_R}{\omega}$ θεωρείται ότι είναι σχεδόν ίσο με ένα καθώς η συχνότητα ω της γεννήτριας είναι κοντά στη συχνότητα αναφοράς ω_R . Στη συνέχεια, και οι δύο πλευρές διαιρούνται με μια ισχύ αναφοράς P_r για να εκφράσουν τα P_m και P_e σε ανά μονάδα ποσότητες. Αυτή η διαδικασία κανονικοποίησης, πολύ συνηθισμένη στις μελέτες συστημάτων ισχύος, απλοποιεί πολύ τους υπολογισμούς σε περίπτωση μεγάλου πλέγματος με πολυάριθμους μετασχηματιστές, δεδομένου ότι οι ποσότητες από τη μια ή την άλλη πλευρά του μετασχηματιστή δεν αλλάζουν όταν εκφράζονται ανά μονάδα (p.u.). Το $J\omega_R$ τότε γίνεται $\frac{2H}{\omega_R}$, όπου η αδράνεια

$H = \frac{W}{P_R}$ σε δευτερόλεπτα και η κινητική ενέργεια του ρότορα $W = J\omega_R$ (σε joules). Ο

παράγοντας $\bar{D}\omega_R$ γίνεται $\frac{D}{\omega_R}$, όπου ο συνδυασμένος συντελεστής απόσβεσης είναι $D = \bar{D}\frac{\omega_R}{P_R}$,

σε δευτερόλεπτα. Τώρα είναι εύκολο να αποκτηθούν οι πολύ γνωστές λύσεις :

$$\frac{2H}{\omega_R}\ddot{\delta} + \frac{D}{\omega_R}\dot{\delta} = P_m - P_e$$

Τέλος, ο όρος P_m αντιπροσωπεύει την καθαρή μηχανική ισχύ στην ρότορα, ενώ το P_e αντιπροσωπεύει την ηλεκτρική ισχύ που απαιτείται από το υπόλοιπο δίκτυο και περιλαμβάνει όρους που εξαρτώνται ρητά από το δ και τις μεταβλητές κατάστασης των άλλων γεννητριών και φορτίων στο δίκτυο.

2.4. Ηλεκτρική ερμηνεία του μοντέλου

Για την πλήρη κατανόηση του θέματος, είναι σημαντικό να δοθεί η ερμηνεία του ηλεκτρικού κυκλώματος του μοντέλου. Στη βιβλιογραφία, το λεγόμενο κλασικό μοντέλο αντιπροσωπεύει μια γεννήτρια ως πηγή τάσης με μέγεθος σταθερής τάσης $|E|$ συνδεδεμένο στον τερματικό κόμβο μέσω μιας αντίστασης $x_d > 0$.

Η γωνία φάσης της πηγής τάσης θεωρείται ότι είναι ίση με την γωνία περιστροφής του δρομέα και έτσι υποδηλώνεται από το δ . Επιπλέον, η μηχανική ισχύς P_m προς τον ρότορα στην εξίσωση θεωρείται σταθερή. Το σταθερό μέγεθος τάσης και η μηχανική ισχύς είναι προσεγγίσεις που ισχύουν για τη βραχυπρόθεσμη δυναμική. Επιπλέον, γράφοντας το μέγεθος εσωτερικής τάσης ως $E = |E| e^{j\delta}$ και το μέγεθος τάσης ακροδεκτών ως $V = |V| e^{j\varphi}$, η εξίσωση (8) γίνεται :

$$\frac{2H}{\omega_R} \ddot{\delta} + \frac{D}{\omega_R} \dot{\delta} = P_g^* - \frac{|E^* V|}{x_d} \sin(\delta - \varphi) \quad (9)$$

όπου $P_m = P_g^*$ αντιπροσωπεύει το ενεργό δυναμικό που παράγεται από την γεννήτρια κατά την διάρκεια της σταθερής κατάστασης και $P_e = \frac{|E^* V|}{x_d} \sin(\delta - \varphi)$ αντιπροσωπεύει την ηλεκτρική ισχύ εξόδου. Είναι αξιοσημείωτο ότι ενώ οι H , D και x_d είναι σταθερές που χαρακτηρίζουν τις φυσικές και ηλεκτρικές ιδιότητες μιας συγκεκριμένης γεννήτριας, τα P_g^* και E^* εξαρτώνται από τη σταθερή κατανομή της ροής ισχύος στο δίκτυο. Με την εκμετάλλευση του Ohm's Law, είναι δυνατόν να εκφραστεί το E^* ως συναρτήσεως των P_g^* , V^* , το μέγεθος τάσης ακροδέκτη σε σταθερή κατάσταση (όπου E^* ήταν το εσωτερικό μέγεθος τάσης σε σταθερή κατάσταση) και Q_g^* , η ενεργός ισχύς που εισάγεται σε σταθερή κατάσταση.

$$|E^*|^2 = \left(\frac{P_g^* x_d}{|V^*|} \right)^2 + \left(|V^*| + \frac{Q_g^* x_d}{|V^*|} \right)^2 \quad (10)$$

Αυτό είναι πολύ χρήσιμο αφού τα P_g^* και V^* και όχι το E^* είναι τα διαθέσιμα δεδομένα εισόδου.

Επιπλέον, το Q_g^* λαμβάνεται με την επίλυση των εξισώσεων της ροής ισχύος (3), μαζί με τις τιμές των γωνιών φάσης δ^* και φ^* σε σταθερή κατάσταση, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αρχική συνθήκη του (9). Τέλος, είναι η γωνία φάσης φ που συνδέει τη γεννήτρια με το υπόλοιπο σύστημα.

Στη βιβλιογραφία [6], [7], το μοντέλο συντήρησης δομής (SP) αντιπροσωπεύει όλους τους κόμβους φορτίου ως ταλαντωτές πρώτης τάξης και κάθε γεννήτρια αντιπροσωπεύεται από δύο ταλαντωτές, ένα για το εσωτερικό μέρος (σταθερή γεννήτρια E +) και ένα για το τερματικό τμήμα. Εντούτοις, υποθέτοντας ότι δουλεύουμε με γραμμή χωρίς απώλειες και καθαρά επαγωγική μετάδοση, είναι γνωστό ότι η ληφθείσα μήτρα εισόδου είναι καθαρά φανταστική με θετικό φανταστικό συστατικό και ότι η γωνία μετατόπισης $\gamma_{ij} = 0$. Επιπλέον, επιλέγω να αντιπροσωπεύω κάθε κόμβο του δικτύου με έναν μόνο ταλαντωτή, χρησιμοποιώντας ταλαντωτές δεύτερης τάξης για τις γεννήτριες και ταλαντωτές πρώτης τάξης για τα φορτία όπως προτείνεται στα [8], [9], [10]. Στη συνέχεια, έλαβα τα ακόλουθα μοντέλα:

- Σύγχρονοι γεννήτριες

$$2 \frac{H_i}{\omega_R} \ddot{\theta}_i + \frac{D_i}{\omega_R} \dot{\theta}_i = P_{m,i} - \sum_{j=1}^n K_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (11)$$

όπου θ_i είναι η γωνία του ρότορα της γεννήτριας, $\dot{\theta}_i$ είναι η συχνότητα της γεννήτριας, ω_R η συχνότητα συχρότητας, $P_{m,i}$ είναι η μηχανική ισχύς εισόδου, και H_i και D_i είναι οι συντελεστές αδράνειας και απόσβεσης αντίστοιχα.

- Οι πηγές συνεχούς ρεύματος που συνδέονται με τους μετατροπείς [11]

$$\frac{D_i}{\omega_R} \dot{\theta}_i = P_{d,i} - \sum_{j=1}^n K_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (12)$$

όπου $\frac{1}{D_i}$ μοντελοποιεί την κλίση droop (κάθε πηγή DC τοποθετεί ένα συμβατικό ελεγκτή droop)

- Φορτία

$$\frac{D_i}{\omega_R} \dot{\theta}_i = -P_{l,i} - \sum_{j=1}^n K_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (13)$$

όπου $P_{l,i}$ αντιπροσωπεύει την ποσότητα ισχύος που καταναλώνεται από το φορτίο.

Είναι σαφές πόσο χρήσιμο θα μπορούσε να είναι το μοντέλο ενός μεγάλου δικτύου δικτυακών δικτύων απλά εκμεταλλευόμενος αυτές τις διαφορικές εξισώσεις.

Σε αυτο το σημείο, σημασία έχει τώρα πώς να ανακτήσουμε όλες τις παραμέτρους που υπάρχουν στο μοντέλο και ποιο είναι το φυσικό τους νόημα:

- $K_{ij} = V_i \cdot V_j \cdot J(Y_{ij})$ όπου V_i και V_j είναι τα επίπεδα τάσης του κόμβου i_{th} και j_{th} , το Y_{ij} αντιπροσωπεύει το πλέγμα αποδοχής (ενισχυμένο με τις μεταβατικές αντιδράσεις της γεννήτριας), ένα συμμετρικό κόμβο που περιγράφει πλήρως το ηλεκτρικό δίκτυο και το $J(Y_{ij})$ υποδηλώνει την αναστολή(είναι το φανταστικό μέρος της αποδοχής) της γραμμής μετάδοσης μεταξύ του κόμβου i και του κόμβου j . Ο όρος K_{ij} αντιπροσωπεύει τη

μέγιστη μεταφορά πραγματικής ισχύος μεταξύ οποιωνδήποτε δύο κόμβων i και j .

- $|\theta_i - \theta_j| < \frac{\pi}{2}$ (αποκαλούμενη συνεκτικότητα φάσης) είναι ισοδύναμη με τους περιορισμούς θερμικού ορίου της ηλεκτρικής γραμμής.
- $P_{l,i}, P_{d,i}, P_{m,i}$ είναι οι πραγματικές απαιτήσεις ισχύος.

Παρόλο που επιλέγω να μοντελοποιήσω κάθε γεννήτρια με έναν μόνο ταλαντωτή, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη την εσωτερική αντίδραση που υπάρχει στο κλασσικό μοντέλο. Αυτό μπορεί να γίνει με την αύξηση του πίνακα αποδοχής: αφού ήθελα να διατηρήσω τις διαστάσεις του ίσες με τον αριθμό των κόμβων του πλέγματος, πρόσθεσα τη φανταστική αντίδραση μόνο στο στοιχείο της διαγωνίου που παριστάνουν τις γεννήτριες (αφού, όπως είπαμε προηγουμένως, το κλασσικό μοντέλο αντιπροσωπεύει μια γεννήτρια ως γεννήτρια σταθερής τάσης σε σειρά με μια αντίδραση.)

Όλες οι απαραίτητες παράμετροι μπορούν να βρεθούν μέσω του MATPOWER: έχουν ήδη δοθεί αρκετές δοκιμαστικές περιπτώσεις (από ένα μικρό δίκτυο 9 κόμβων σε ένα μεγάλο δίκτυο 3000 κόμβων), στις οποίες είναι δυνατόν να εκτελεστούν αλγόριθμοι βελτιστοποίησης για να βρεθεί η βέλτιστη ροή ισχύος και να καθοριστούν όλες οι παράμετροι. Η βέλτιστη ροή ισχύος καθορίζει τη βέλτιστη λειτουργία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Ο αισθητήρας βελτιστοποίησης για το τυπικό πρόβλημα βελτιστοποίησης δίνεται από τις γωνίες τάσης και τα μεγέθη, τις απαιτήσεις πραγματικής και αέργου ισχύος της γεννήτριας, $x = [\theta, |V|, Pg., Qg]$. Είναι επίσης δυνατό να τροποποιηθούν οι ονομαστικές περιπτώσεις δοκιμών IEEE προκειμένου να δοκιμαστεί ένα πτητικό έξυπνο σενάριο:

- Κυμαινόμενα φορτία με στοχαστική ζήτηση ισχύος.
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με στοχαστική παραγωγή ενέργειας.
- Γεννήτριες ταχείας αύξησης και ελεγχόμενα φορτία.

2.6. Η τοπολογία του δικτύου

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα δεδομένα εισόδου λαμβάνονται από τις ονομαστικές περιπτώσεις δοκιμών του IEEE που μπορούν να βρεθούν μέσα στον φάκελο του MATPOWER. Στην δικιά μας περίπτωση, το δίκτυο δημιουργήθηκε σύμφωνα με την δοκιμαστική περίπτωση του IEEE case9 και αποτελείται από την παρακάτω τοπολογία:

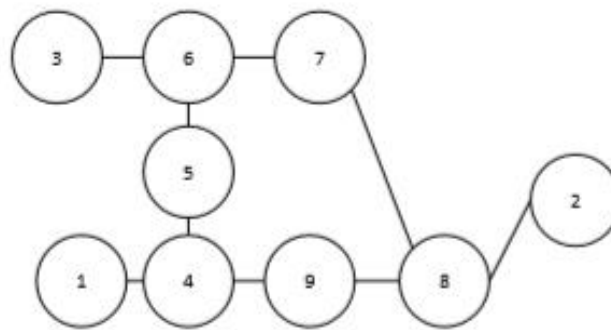


Figure 4: IEEE 9-bus case

Στους κόμβους 1,2,3 έχουν τοποθετηθεί οι γεννήτριες και τα κτίρια έχουν ενσωματωθεί στους κόμβους 4,5,6,7,8,9. Το φορτίο κάθε γεννήτριας υπολογίζεται ως την ισχύ που προσφέρει η γεννήτρια σύμφωνα με το case9 προς την ισχύ του συστήματος βάσης (100MVA). Σε αντίθεση βέβαια με τις γεννήτριες, το φορτίο των κτιρίων υπολογίζεται σε ξεχωριστό τμήμα του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τις καιρικές συνθήκες, τις παραμέτρους του κάθε κτιρίου (τετραγωνικά μέτρα, τύπος δαπέδου, τετραγωνικά μέτρα παραθύρων κ.ά.) και την ικανοποίηση των χρηστών. Επομένως, τροποποιείται η ονομαστική περίπτωση δοκιμής του IEEE και στους κόμβους φορτίων εισάγουμε κυμαινόμενα φορτία και όχι σταθερά όπως ορίζει το case9. Η κατανάλωση ενέργειας για κάθε κόμβο φορτίου, εισάγεται στις εξισώσεις του δικτύου που υπολογίζουν τη συχνότητα, για κάθε βήμα της προσομοίωσης του δικτύου.

2.7. Αλγόριθμος

Όπως ειπώθηκε προηγουμένως, οι διαφορικές εξισώσεις στις (11), (12), (13) έχουν χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιήσουν το πλέγμα μας. Δημιούργησα δύο σενάρια, το μοντέλο SP και το Grid Simulator, τα οποία μαζί εκπληρώνουν το στόχο μας. Το SP_model_new λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου μία από τις δοκιμαστικές περιπτώσεις του IEEE που μπορούν να βρεθούν μαζί με το φάκελο MATPOWER [12]. Λάβετε υπόψη ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί μόνο με εκείνο το πλέγμα το οποίο συνδέει σε κάθε δίαυλο ένα στοιχείο του δικτύου (δηλ. μια γεννήτρια, ένα φορτίο). Οι περιπτώσεις δοκιμής IEEE έχουν πάντα την ίδια δομή: προσδιορίζουν τον αριθμό των διαύλων (αριθμός κόμβων στο δίκτυο), τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται μέσω της γραμμής μετάδοσης (κλάδους), πόσοι από τους κόμβους είναι γεννήτριες και πόσα φορτία. Επιπλέον, αναφέρονται όλες οι φυσικές ποσότητες του δικτύου, όπως είναι η τάση λειτουργίας ενός συγκεκριμένου διαύλου, ποια είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να εγχυθεί από μια γεννήτρια κλπ. Περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν στην [12]. Αυτό το σενάριο εφαρμόζει τον διαφορετικό τύπο SP που εξήγησα προηγουμένως:

- οι παράμετροι (θ_0 , P_m , i , P_1 , i , H_i , D_i , K) μπορούν εύκολα να βρεθούν απλά λύνοντας τις εξισώσεις ροής ισχύος (3) ή επίσης βρίσκοντας τη βέλτιστη κατανομή της ροής ισχύος, βελτιστοποιώντας την παραγόμενη ισχύ και ελέγχοντας το ρεύμα και τις τάσεις. Για περισσότερες πληροφορίες για την ομοιόμορφη ροή ενέργειας και βέλτιστη ροή ισχύος ελέγξτε [13].
- ο πίνακας αποδοχής αυξάνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε η διάσταση παραμένει ίση με τον αριθμό των κόμβων.
- οι όροι σύζευξης βρίσκονται πολλαπλασιάζοντας την τάση της γραμμής μετάδοσης i_{th} και j_{th} μόνο για το φανταστικό μέρος της μήτρας αποδοχής, δεδομένου ότι θεωρήσαμε ότι το δίκτυό μας είναι απωθητικό και καθαρά επαγωγικό.
- αν δεν υπάρχουν ως δεδομένα (όπως στις περισσότερες περιπτώσεις, συμπεριλαμβάνοντας και την δικιά μας), οι σταθερές παράμετροι D_i , H_i και x_d εκτιμώνται, αξιοποιώντας την ισχυρή σχέση μεταξύ αυτών των παραμέτρων και

την ενεργή ισχύ εξόδου P_g^* . Για περισσότερες λεπτομέρειες, χρήσιμες πληροφορίες μπορείτε να βρείτε στο [14].

Το δεύτερο σενάριο, Grid Simulator, ξεκινώντας από τις παραμέτρους που υπολογίζονται από το μοντέλο SP, προσομοιώνει το πλέγμα, συγχρονισμένο χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο νόμο ελέγχου:

$$u = k_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) + m_{ij} (\sin(\theta_i - \theta_0))$$

Οι ελεγχόμενες γεννήτριες γίνονται τότε:

$$\frac{2H_i}{\omega_R} \ddot{\theta}_i + \frac{D_i}{\omega_R} \dot{\theta}_i = P_{m,i} - \sum_{j=1}^n K_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) + u_i \quad (14)$$

Σε αυτή την περίπτωση, το K_{ij} είναι το στοιχείο της συντεταγμένης (i, j) μίας μήτρας σταθερών κερδών που έχει την ίδια δομή με τον πίνακα αποδοχής που περιγράφει το δίκτυο (a_{ij}), ενώ το m_{ii} αντιπροσωπεύει τους κόμβους που συνδέονται με ένα λεγόμενο βηματοδότη που παράγει τη σταθερή επιθυμητή συχνότητα ω_0 , στην περίπτωση μας 60 Hz.

Χρησιμοποιώντας μια είσοδο ελέγχου και για τα φορτία, λαμβάνουμε:

$$\frac{D_i}{\omega_R} \dot{\theta}_i = -P_{l,i} - \sum_{j=1}^n K_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) + u_i \quad (15)$$

Στην συγκεκριμένη εξίσωση, το $P_{l,i}$, ορίζει την ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων. Παρόλο που στο SP_model_new αναφέρονται όλες οι φυσικές ποσότητες που ορίζει η IEEE case9 όπως και η κατανάλωση φορτίων (σταθερών), εμείς επιλέξαμε να εισάγουμε στο σύστημα κατανάλωση που προέρχεται από την προσομοίωση πραγματικών κτιρίων. Επομένως κατά την διάρκεια κάθε βήματος της προσομοίωσης, υπολογίζεται η αντίστοιχη κατανάλωση που εξάγει κάθε κτίριο, η οποία με την σειρά της εισάγεται στην εξίσωση (15).

Τέλος, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος μπορεί να λειτουργήσει είτε βρίσκοντας την κατανομή της ροής ισχύος του συστήματος (πληκτρολογώντας κατά την έναρξη του αλγορίθμου το 1) είτε βρίσκοντας τη βέλτιστη κατανομή της ροής ισχύος (πληκτρολογώντας κατά την έναρξη του αλγορίθμου το 2), βελτιστοποιώντας την παραγόμενη ισχύ και ελέγχοντας το ρεύμα και τις τάσεις.

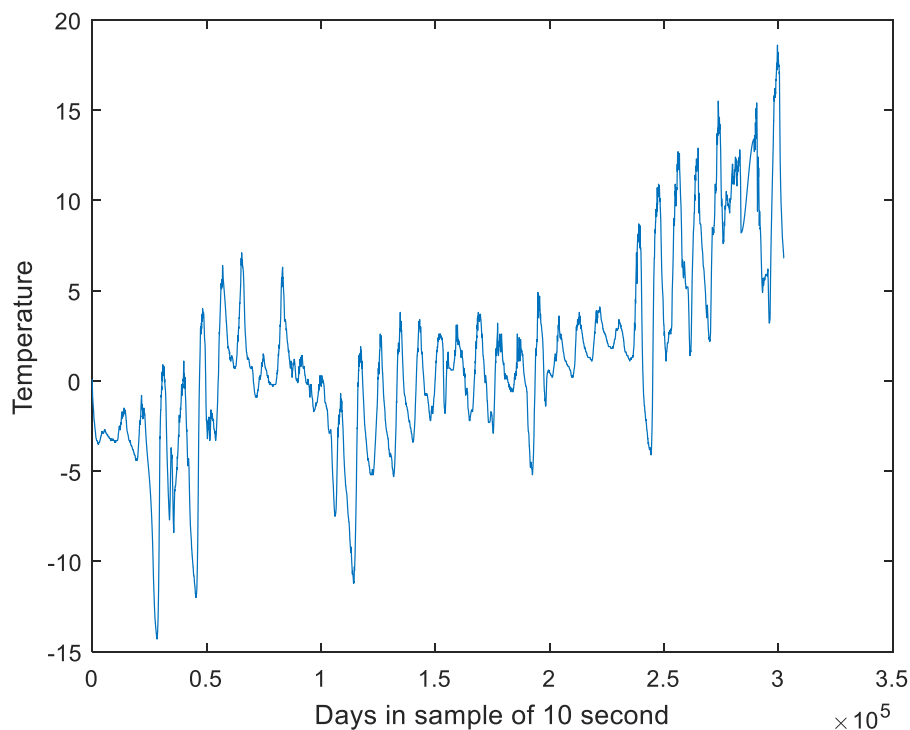
Η δομή του κώδικα είναι πολύ ευέλικτη και επιτρέπει στον χρήστη να προσομοιώνει διαφορετικό πλέγμα μεταβάλλοντας μόνο λίγα πράγματα στον κώδικα :

1. επιλέξτε το πλέγμα που θέλει να προσομοιώνει αλλάζοντας το φορτίο.
2. προσδιορίστε τους κόμβους που συνδέονται με το βηματοδότη τροποποιώντας τη μήτρα συγκράτησης
3. ρυθμίστε την παράμετρο k (η μήτρα πρόσδεσης αποκτάται αυτόματα) για να αλλάξετε την ταχύτητα σύγκλισης

Κεφάλαιο 3^ο:Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της λειτουργίας του “έξυπνου” δικτύου. Είναι εύλογο να αναφέρουμε ότι οι χρόνοι προσομοίωσης καθώς και τα αποτελέσματα που εμφανίζονται,είναι συνάρτηση των καιρικών συνθηκών(θερμοκρασία εξωτερικού χώρου και ηλιακη ακτινοβολία),αφού η προσομοίωση γίνεται σε πραγματικές ώρες και συνθήκες λειτουργίας.Η επιλογή ημέρας της προσομοίωσης έγινε τυχαία ανάμεσα σε 35 ημέρες.Στο παρακάτω διάγραμμα,οι ημέρες παρουσιάζονται σε δείγματα των 10 λεπτών,έτσι ώστε να μπορεί η κατάσταση καιρού να εισαχθεί σαν είσοδος στα δεδομένα των προσομοιώσεων.

(1 ημέρα=8640*10second)



Εικόνα 4.Θερμοκρασία εξωτερικού χώρου σε πραγματικές συνθήκες για την διάρκεια 35 ημερών.

Επιπλέον, μια σημαντική παράμετρος είναι η ενεργειακή κατανάλωση που αφορά τους κόμβους φορτίων, η οποία εισάγεται στο δίκτυο σε δείγματα των 10 λεπτών, όσο δηλαδή διαρκεί η προσομοίωση των κτιρίων. Με άλλα λόγια, το δίκτυο για όσο χρόνο λειτουργεί, αντικρίζει μια κατανάλωση η οποία διαφέρει κάθε δέκα λεπτά, εξαιτίας των παραμέτρων που διέπουν την λειτουργία των κτιρίων.

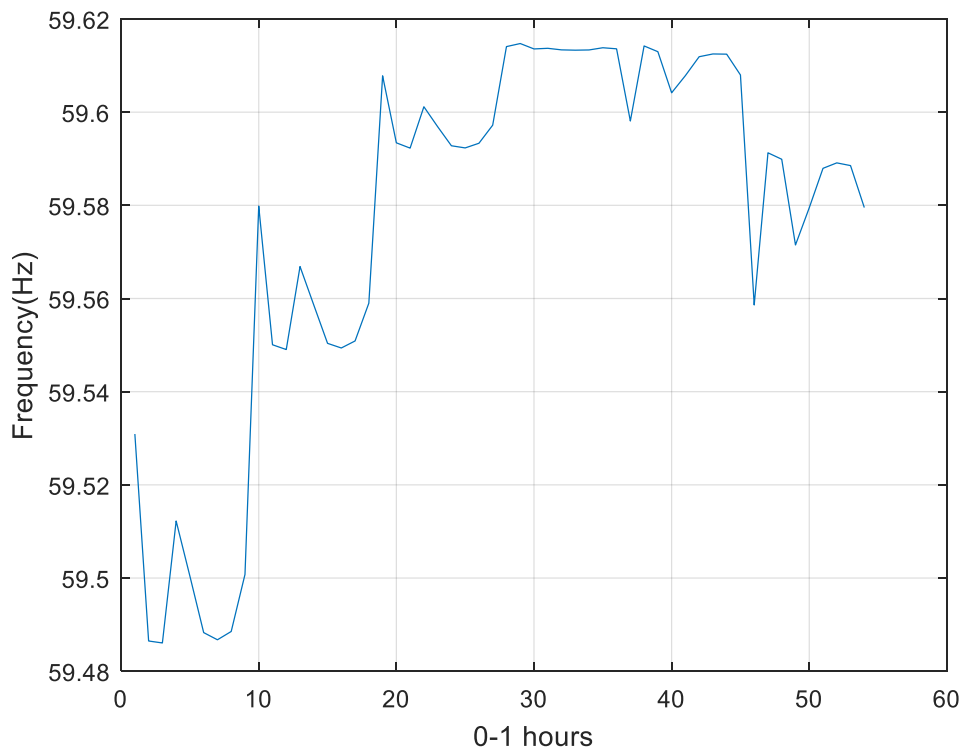
Επομένως, στα διαγράμματα συχνότητας που ακολουθούν, μπορούμε να παρατηρήσουμε την διακύμανση της συχνότητας, για όσο χρόνο προσομοίωσης έχουμε ορίσει για το δίκτυο, σε δείγματα των 10 λεπτών.

3.1. Μια πρώτη προσέγγιση

Σε αυτό το κομμάτι του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα του συστήματος μετά την ενσωμάτωση των κτιρίων στους κόμβους.

Τα πειράματα διεξάγονται για χρόνο προσομοίωσης 1 ώρας και η επιθυμητή θερμοκρασία έχει οριστεί για όλες τις περιπτώσεις που ακολουθούν, στους 22.5° C

Πιο συγκεκριμένα, με φορτίο παραγωγής όσο ορίζει η δοκιμαστική περίπτωση του IEEE case9 και ενεργειακή κατανάλωση όση υπολογίζει η προσομοίωση των κτιρίων, η συχνότητα του συστήματος είναι η ακόλουθη :

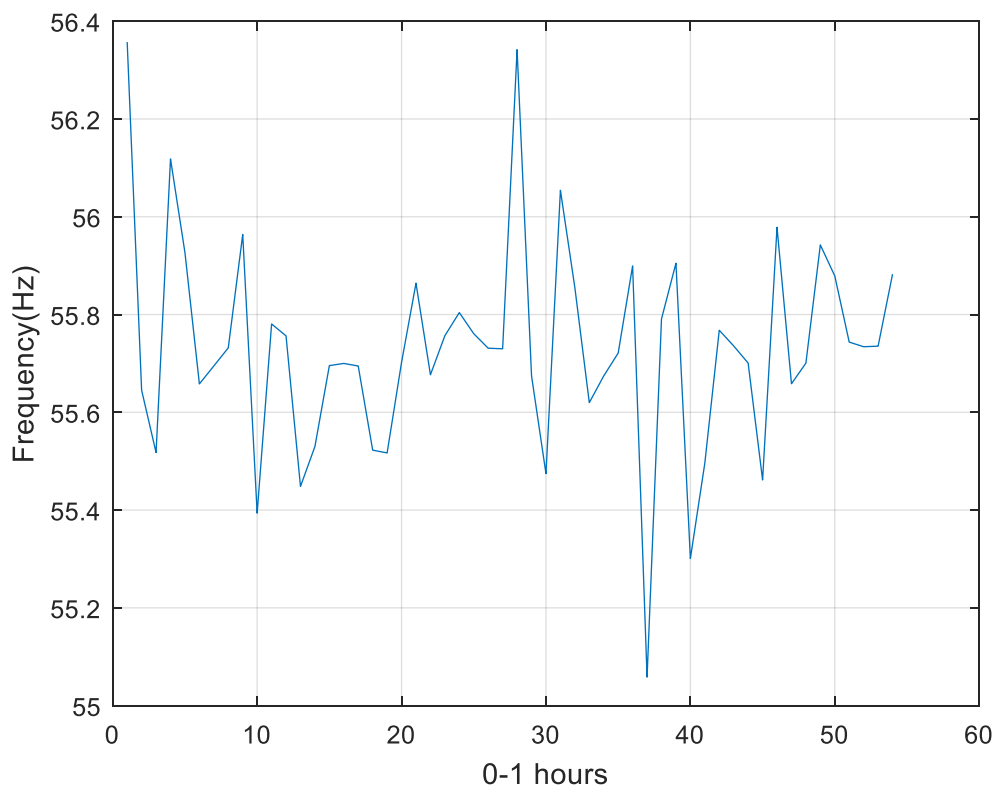


Στη συνέχεια, θα ήταν χρήσιμο να εξετάσουμε την ορθή λειτουργία του συστήματος και να τη συγκρίνουμε με την παραπάνω κυματομορφή, παρατηρώντας την διακύμανση της συχνότητας με αλλαγές τόσο στο φορτίο παραγωγής όσο και στην ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων.

Περίπτωση 1

Η παραγωγή ενέργειας διατηρείται σταθερή, ίση με την τιμή που ορίζει η δοκιμαστική περίπτωση του IEEE case 9, ενώ η κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων αυξάνεται 5 φορές από την τιμή που ορίζει το σύστημα.

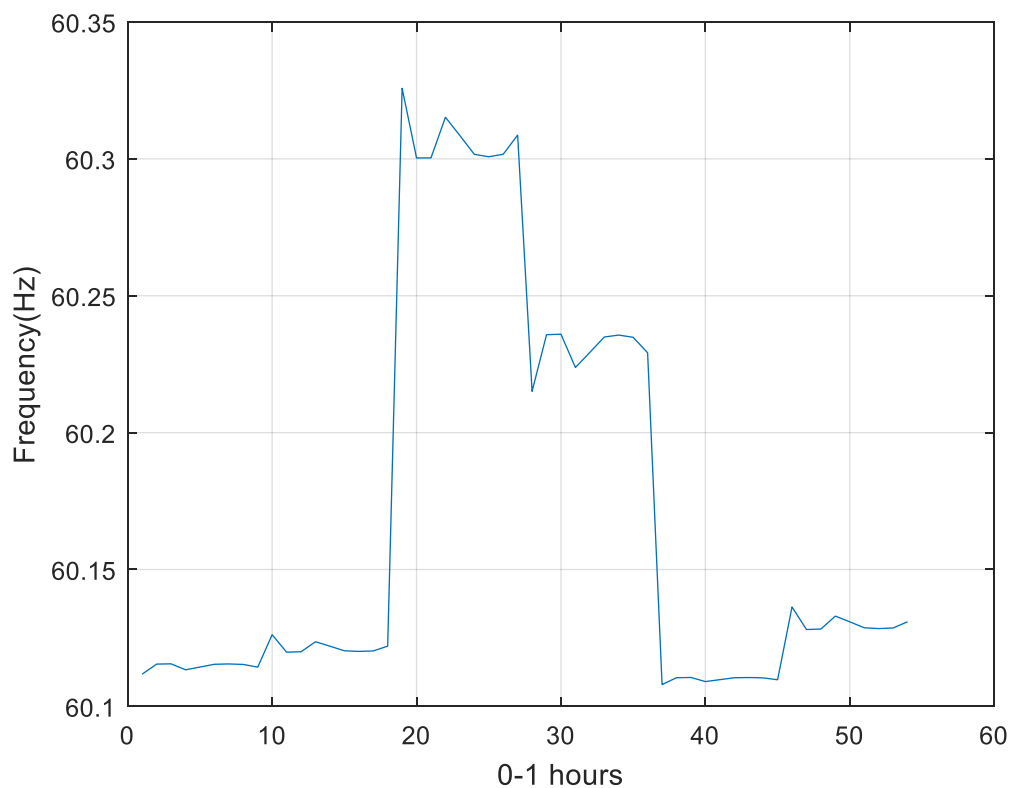
Διάγραμμα συχνότητας :



Περίπτωση 2

Η παραγωγή ενέργειας διατηρείται σταθερή ίση με την τιμή που ορίζει η δοκιμαστική περίπτωση του IEEE case 9, ενώ η κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων μειώνεται κατα 5 φορές από την τιμή που ορίζει το σύστημα.

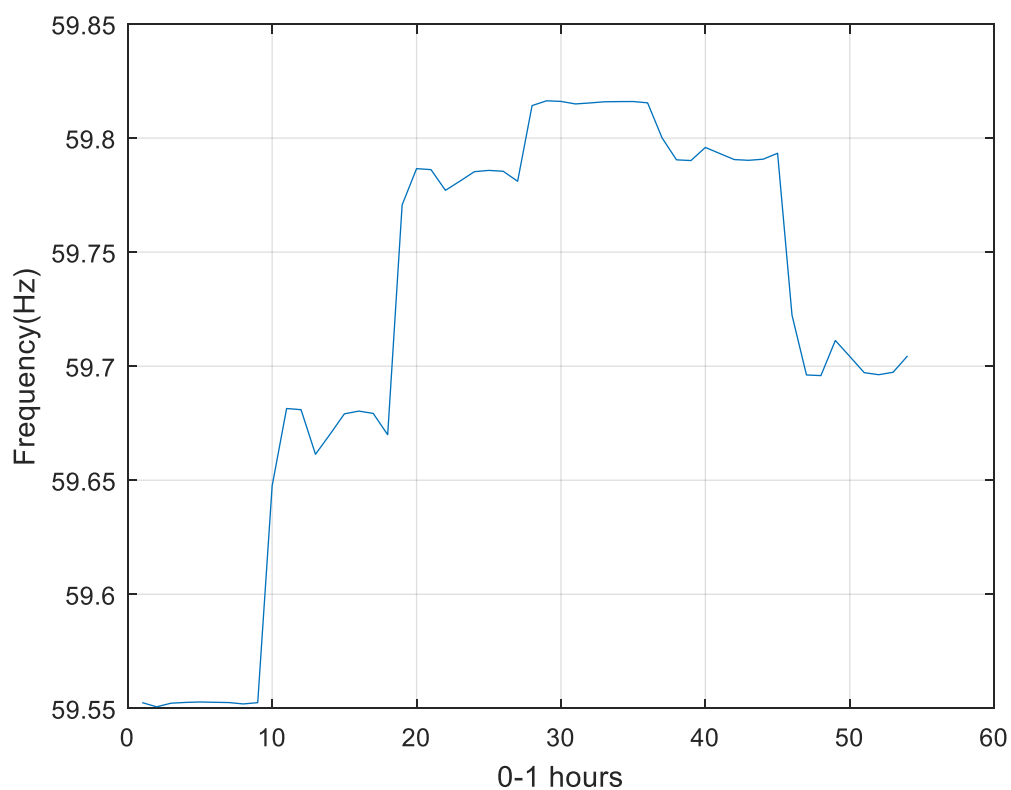
Διάγραμμα συχνότητας :



Περίπτωση 3

Η παραγωγή ενέργειας αυξάνεται κατα μισή μονάδα (0.5) από την τιμή που ορίζει η δοκιμαστική περίπτωση του IEEE case 9, ενώ η κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων είναι ίση με την τιμή που ορίζει το σύστημα.

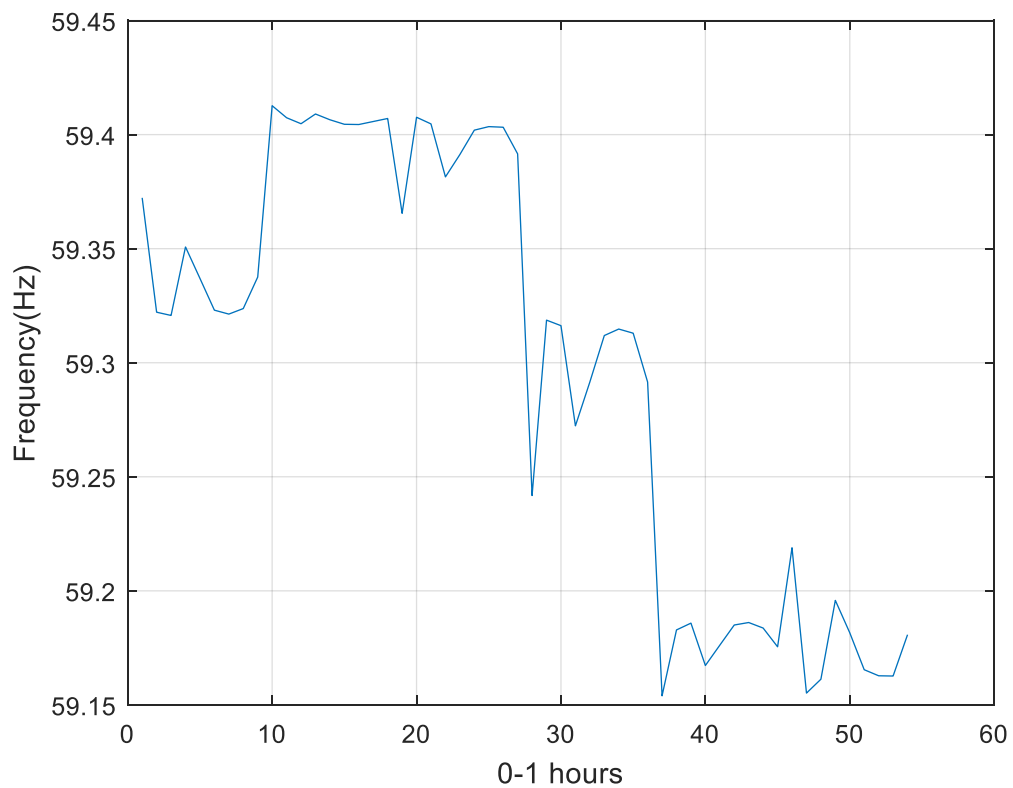
Διάγραμμα συχνότητας :



Περίπτωση 4

Η παραγωγή ενέργειας μειώνεται κατα μισή μονάδα (0.5) από την τιμή που ορίζει η δοκιμαστική περίπτωση του IEEE case 9, ενώ η κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων είναι ίση με την τιμή που ορίζει το σύστημα.

Διάγραμμα συχνότητας:



Η σταθερότητα της συχνότητας σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο είναι συνάρτηση της διατήρησης του ισοζυγίου παραγωγής-ζήτησης. Όπως εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε, αλλάζοντας το ισοζύγιο μεταξύ τους, ο μέσος όρος της συχνότητας του δικτύου αυξάνεται σε σχέση με την αρχικό διάγραμμα όταν η κατανάλωση των κτιρίων μειώνεται σε σχέση με την παραγωγή και η παραγωγή της ενέργειας αυξάνεται σε σχέση με την κατανάλωση, ενώ μειώνεται όταν η κατανάλωση των κτιρίων αυξάνεται σε σχέση με την παραγωγή και η παραγωγή ενέργειας μειώνεται σε σχέση με την κατανάλωση. Αυτή η συμπεριφορά του δικτύου, δεδομένων των αλλαγών στα φορτία, μπορεί να θεωρηθεί ότι ακολουθεί την ορθή λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

3.2. Μια δεύτερη προσέγγιση

Σε αυτό το κομμάτι του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα τα οποία αφορούν τα πειράματα που έγιναν ρυθμίζοντας παραμέτρους όπως η επιθυμητή θερμοκρασία(set point) στην οποία θέλουμε να επικρατεί στο εσωτερικό των κτιρίων. Η ενέργεια που καταναλώνεται από τα κτίρια είναι μια μη γραμμική συνάρτηση που εξαρτάται από την διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας που ορίζει ο χρήστης (set point) και της θερμοκρασίας που επικρατεί στην ζώνη λειτουργίας του(zone temperature).Επομένως,εξαιτίας της διαφορετικής ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων ανάλογα με τις μεταβολές της επιθυμητής θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει,αναμένονται αλλαγές στην διακύμανση της συχνότητας.

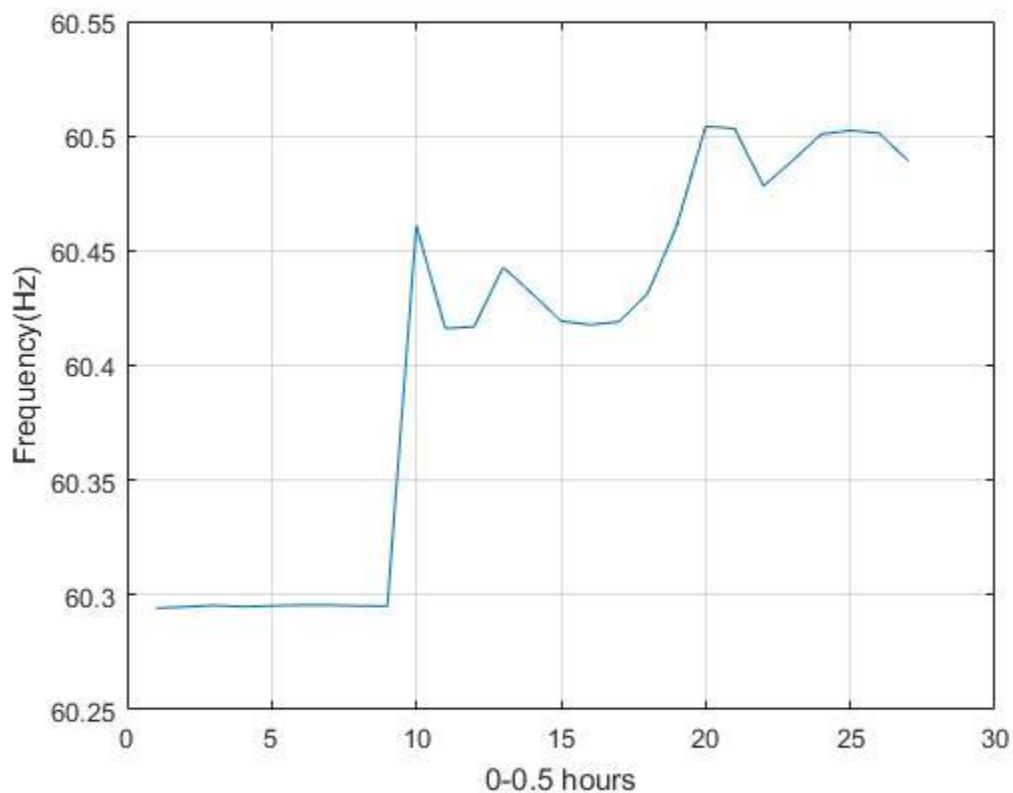
Όσον αφορά τα ποσοστά ικανοποίησης των χρηστών,παρατηρούμε μια όχι και τόσο σταθερή διακύμανση καθώς εξαρτάται από το πως κατανέμεται η ενεργειακή κατανάλωση σε κάθε κτίριο και σε κάθε δείγμα κατα την διάρκεια της προσομοίωσης.

Με την παραγωγή ενέργειας ίση με την τιμή που ορίζει η δοκιμαστική περίπτωση του IEEE case 9 και κατανάλωση ενέργειας όση απαιτείται για να μπορέσουν τα κτίρια να αποκτήσουν στο εσωτερικό τους την επιθυμητή θερμοκρασία που θα ορίσουμε, τα αποτελέσματα της συχνότητας του συστήματος για διάφορους χρόνους προσομοίωσης αναλύονται παρακάτω :

✚ **Για χρόνο προσομοίωσης 30 λεπτών:**

⇒ Για επιθυμητή θερμοκρασία ίση με 19°C:

- Διάγραμμα συχνότητας

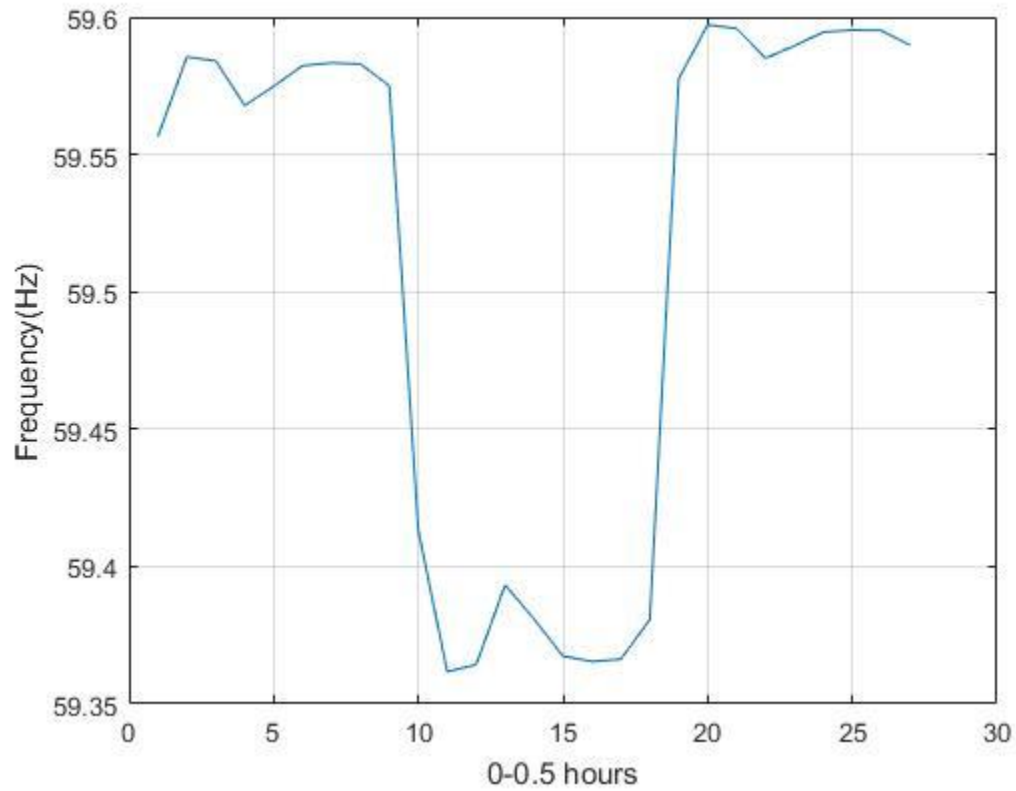


- Πίνακας ποσοστών ικανοποίησης των χρηστών

Κτίρια ▼	Ποσοστά ▼
Κτίριο 1	91.67%
Κτίριο 2	99.34%
Κτίριο 3	100%
Κτίριο 4	100%
Κτίριο 5	99.43%
Κτίριο 6	100%

↳ Για επιθυμητή θερμοκρασία ίση με 22°C:

- Διάγραμμα συχνότητας

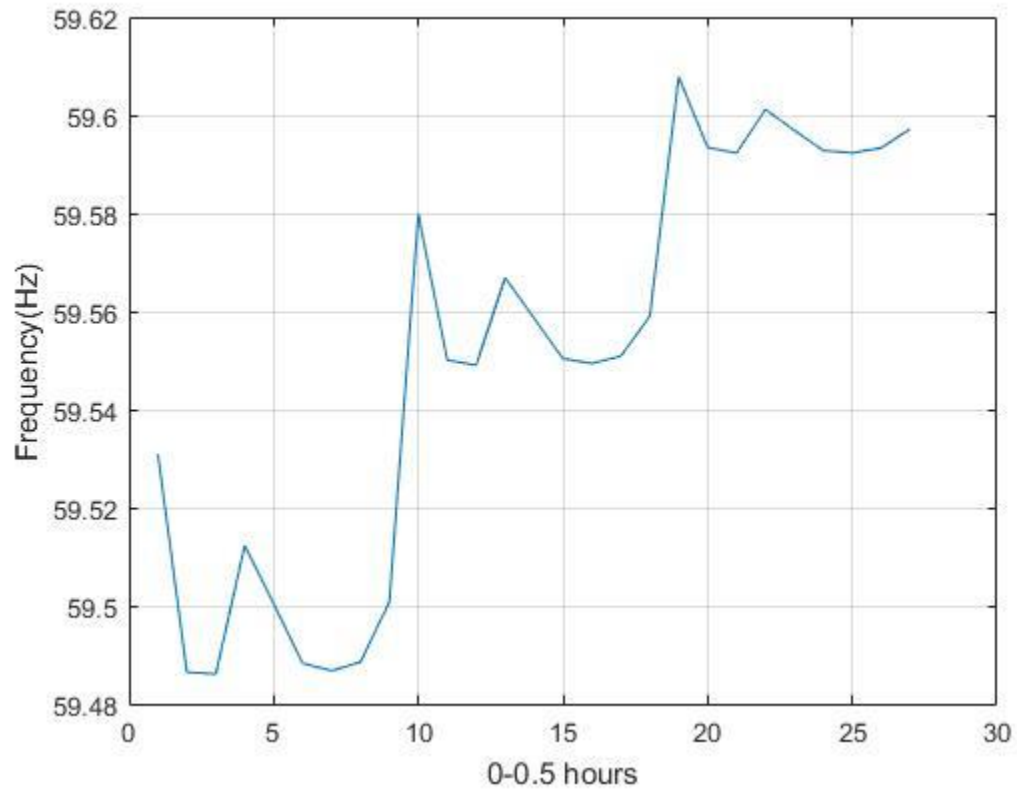


- Πίνακας ποσοστών ικανοποίησης των χρηστών

Κτίρια ▼	Ποσοστά ▼
Κτίριο 1	43.34%
Κτίριο 2	37%
Κτίριο 3	36.67%
Κτίριο 4	37%
Κτίριο 5	38%
Κτίριο 6	37.7%

↳ Για επιθυμητή θερμοκρασία ίση με 25°C:

- Διάγραμμα συχνότητας



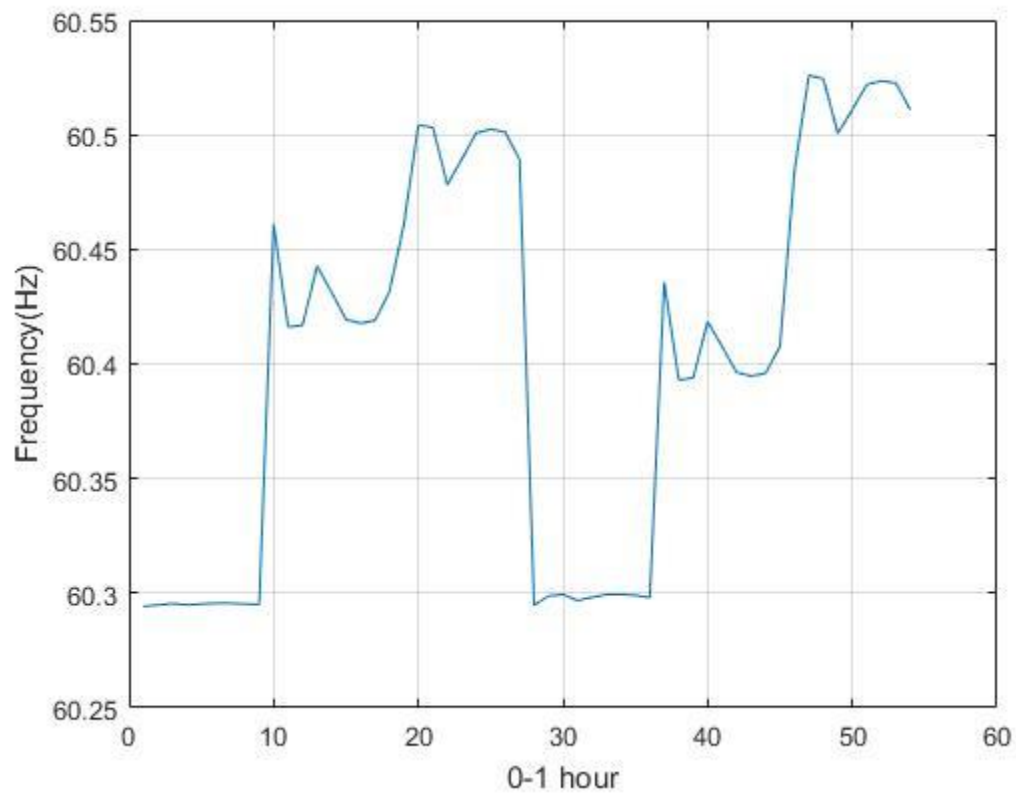
- Πίνακας ποσοστών ικανοποίησης των χρηστών

Κτίρια ▾	Ποσοστά ▾
Κτίριο 1	70%
Κτίριο 2	68.4%
Κτίριο 3	68%
Κτίριο 4	69%
Κτίριο 5	69%
Κτίριο 6	69.3%

✚ Για χρόνο προσομοίωσης 1 ώρας:

↪ Για επιθυμητή θερμοκρασία ίση με 19°C:

- Διάγραμμα συχνότητας

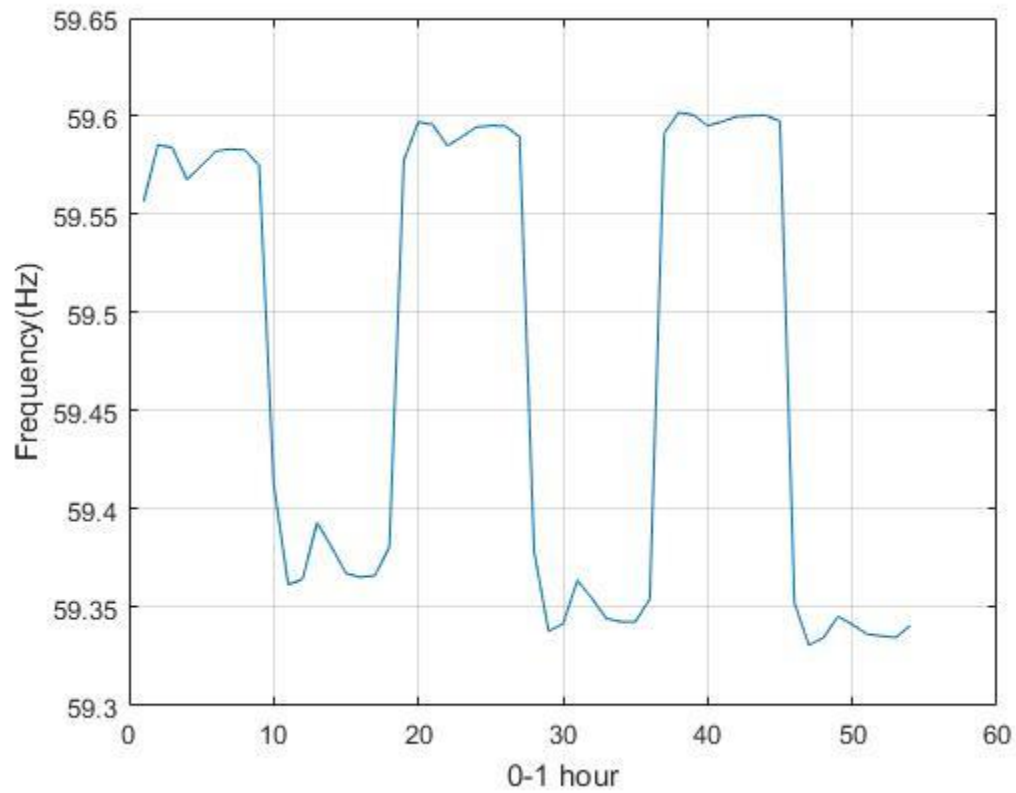


- Πίνακας ποσοστών ικανοποίησης των χρηστών

Κτίρια ▾	Ποσοστά ▾
Κτίριο 1	60.7%
Κτίριο 2	90%
Κτίριο 3	99%
Κτίριο 4	80%
Κτίριο 5	88.5%
Κτίριο 6	81.84%

↪ Για επιθυμητή θερμοκρασία ίση με 22°C:

- Διάγραμμα συχνότητας

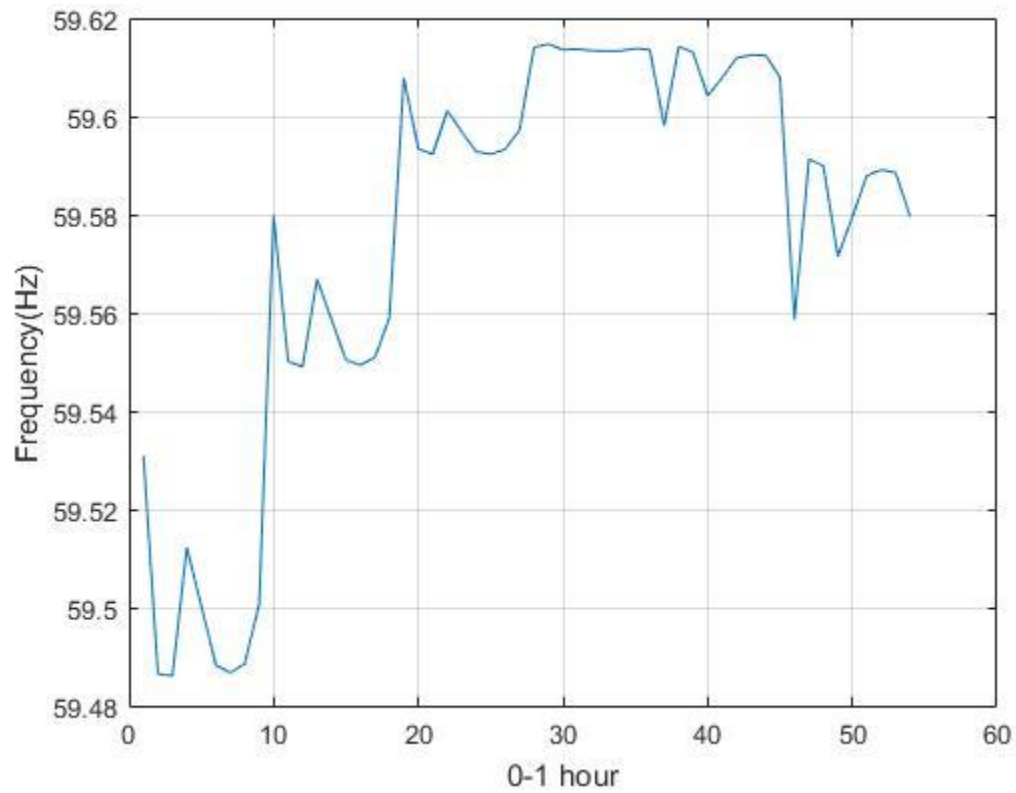


- Πίνακας ποσοστών ικανοποίησης των χρηστών

Κτίρια ▼	Ποσοστά ▼
Κτίριο 1	33.83%
Κτίριο 2	21.83%
Κτίριο 3	22.67%
Κτίριο 4	22%
Κτίριο 5	22.17%
Κτίριο 6	24.34%

↗ Για επιθυμητή θερμοκρασία ίση με 25°C:

- Διάγραμμα συχνότητας



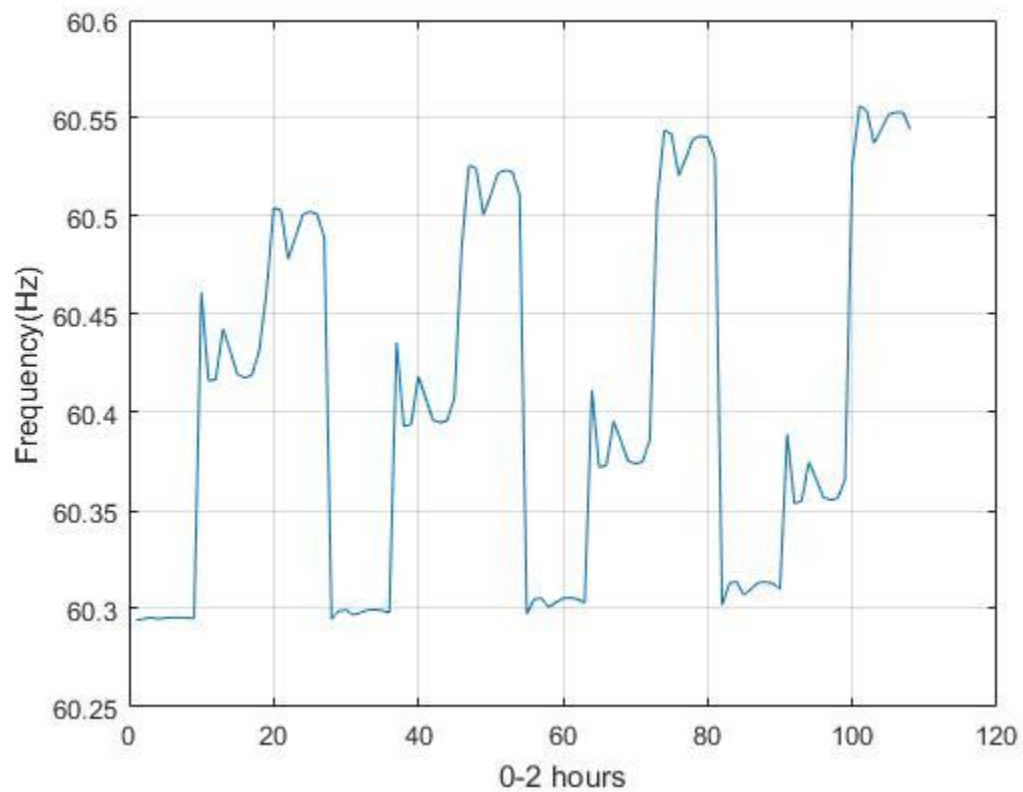
- Πίνακας ποσοστών ικανοποίησης των χρηστών

Κτίρια ▼	Ποσοστά ▼
Κτίριο 1	68.4%
Κτίριο 2	82.84%
Κτίριο 3	80.34%
Κτίριο 4	80.83%
Κτίριο 5	81.67%
Κτίριο 6	81.16%

✚ Για χρόνο προσομοίωσης 2 ωρών:

↪ Για επιθυμητή θερμοκρασία ίση με 19°C:

- Διάγραμμα συχνότητας

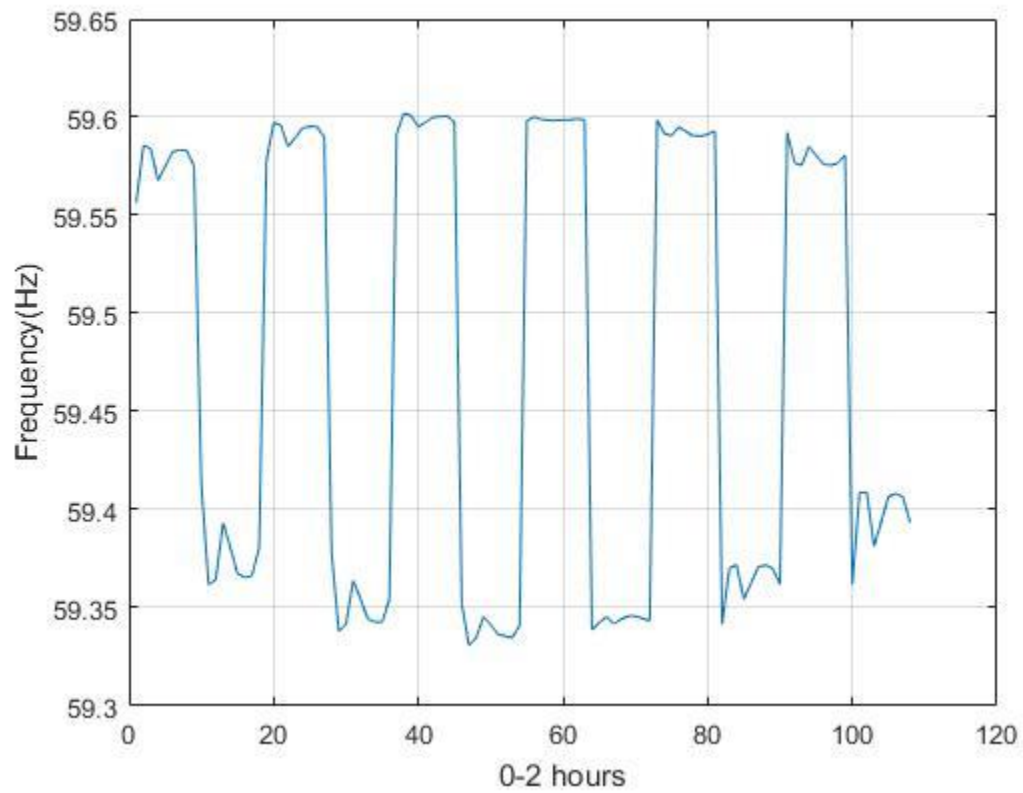


- Πίνακας ποσοστών ικανοποίησης των χρηστών

Κτίρια ▼	Ποσοστά ▼
Κτίριο 1	58.5%
Κτίριο 2	87.58%
Κτίριο 3	99.4%
Κτίριο 4	96%
Κτίριο 5	84.32%
Κτίριο 6	97.8%

⇒ Για επιθυμητή θερμοκρασία ίση με 22°C:

- Διάγραμμα συχνότητας

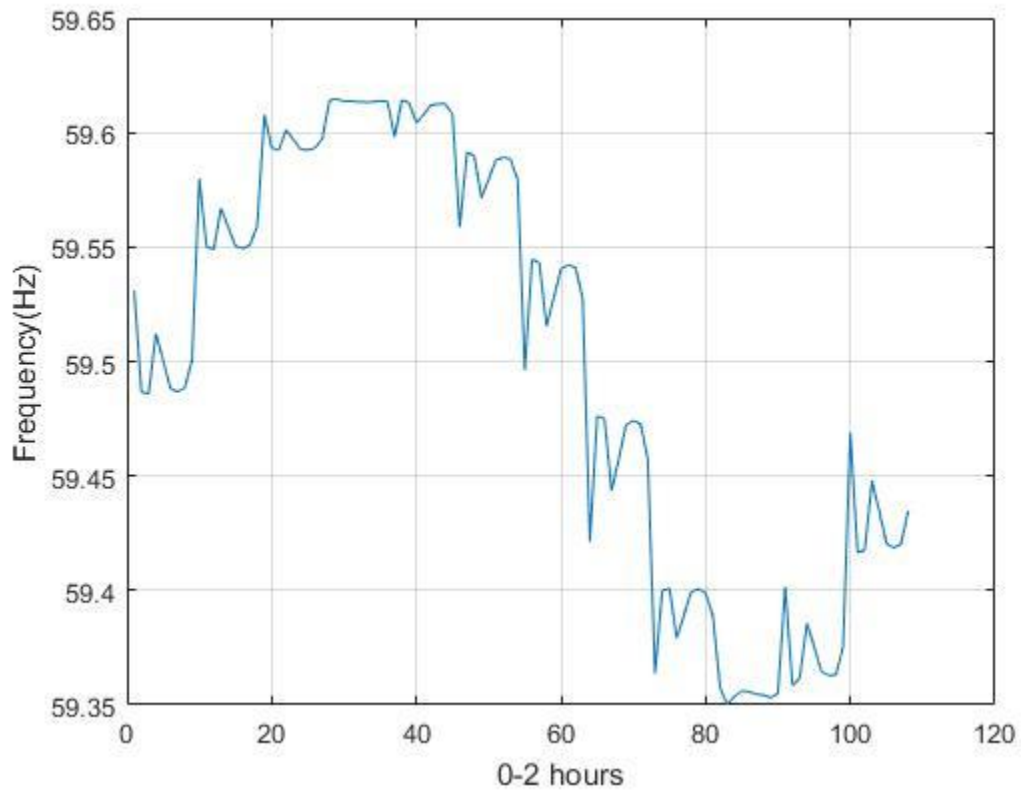


- Πίνακας ποσοστών ικανοποίησης των χρηστών

Κτίρια ▼	Ποσοστά ▼
Κτίριο 1	59.5%
Κτίριο 2	58.5%
Κτίριο 3	65%
Κτίριο 4	64.3%
Κτίριο 5	56%
Κτίριο 6	66.5%

↗ Για επιθυμητή θερμοκρασία ίση με 25°C:

- Διάγραμμα συχνότητας



- Πίνακας ποσοστών ικανοποίησης των χρηστών

Κτίρια ▼	Ποσοστά ▼
Κτίριο 1	89.9%
Κτίριο 2	87.41%
Κτίριο 3	86.56%
Κτίριο 4	86.4%
Κτίριο 5	89.2%
Κτίριο 6	88.43%

Όπως εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε στα παραπάνω διαγράμματα, μπορεί να γίνει αντιληπτή η ποσότητα των δειγμάτων των 10 λεπτών που αντιστοιχούν στους συγκεκριμένους χρόνους προσομοίωσης αλλά και η συμπεριφορά που έχει η συχνότητα στα αντίστοιχα δείγματα. Όπως φαίνεται, η επιθυμητή θερμοκρασία που ορίζουμε σε κάθε περίπτωση, μέσω της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων, επηρεάζει έμμεσα την συχνότητα του δικτύου.

Όσον αφορά τα διαγράμματα που υπολογίζουν τον δείκτη της ικανοποίησης των χρηστών, δεν υπάρχει ένας μοναδικός και καθολικός τρόπος μέτρησης της. Ο δείκτης Fanger χρησιμοποιείται ως μονάδα μέτρησης ικανοποίησης γιατί υπολογίζει το PPD δείκτη σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Παρόλα αυτά αποδεικνύεται ότι ανεξάρτητα από την επιλογή οποιουδήποτε θερμικού δείκτη, η ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων και η ικανοποίηση των χρηστών έχουν μία ανταγωνιστική σχέση: γενικά μιλώντας, για να καταφέρουμε να κρατήσουμε τους χρήστες του κτιρίου ευχαριστημένους, θα χρειαστεί να καταναλώσουμε περισσότερη ενέργεια. Από την άλλη μεριά, μια στρατηγική ελέγχου που στοχεύει στην οικονομία ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα να αφήνει τους χρήστες λιγότερο ικανοποιημένους. Όμως αυτή η θεώρηση είναι αρκετά γενική καθώς εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την δυναμική των κτιρίων. Το ίδιο το κτίριο, χάρις στην ενεργειακή του μάζα, έχει την δυνατότητα να αποθηκεύει θερμική ενέργεια και να την απελευθερώνει. Για παράδειγμα 2 διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου με την ίδια κατανάλωση ενέργειας μπορεί να οδηγήσουν σε δύο πολύ διαφορετικούς δείκτες ικανοποίησης, ανάλογα με το πώς μοιράζεται η κατανάλωση ενέργειας μέσα στην μέρα.

Πιο συγκεκριμένα, οι παραπάνω προσομοιώσεις αποτελούν τις αρχικές καταστάσεις των πειραμάτων που θα διεξαχθούν με σκοπό την ρύθμιση της συχνότητας στα 60 Hz για κάθε χρόνο προσομοίωσης του «έξυπνου» δικτύου, για τα οποία θα γίνει αναφορά σε επόμενη ενότητα.

3.3. Εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης

Αφού συνδέσαμε τα κτίρια στο δίκτυο και πειραματιστήκαμε με τις τιμές των επιθυμητών θερμοκρασιών, ο επόμενος στόχος που τέθηκε ήταν ο συγχρονισμός της συχνότητας του δικτύου στα 60 Hz. Αυτό μας ενδιαφέρει να επιτευχθεί έτσι ώστε να πληρούνται όλες οι απαραίτητες προδιαγραφές για την λειτουργία ενός πραγματικού ηλεκτρικού δικτύου.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ρυθμίζοντας την επιθυμητή θερμοκρασία των κτιρίων επηρεάζουμε έμμεσα και την συχνότητα μέσω της ενεργειακής κατανάλωσης. Για αυτό το λόγο, εφαρμόσαμε αποδοτικές μεθόδους ρύθμισης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό των κτιρίων. Έτσι, μπορούμε να προσδιορίσουμε τις κατάλληλες τιμές θερμοκρασίας που πρέπει να διατηρεί κάθε κτίριο σε κάθε δεκάλεπτο δείγμα ώστε να συγχρονιστεί η συχνότητα του δικτύου στα 60 Hz.

Πιο συγκεκριμένα, οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη του συγχρονισμού είναι ο μη γραμμικός επιλυτής `fmincon` και ο γενετικός αλγόριθμος GA (genetic algorithm). Η λειτουργία και των δύο, στοχεύει στην εύρεση του ελαχίστου μιας συνάρτησης πολλαπλών μεταβλητών. Η χρησιμότητα που έχουν οι δύο αυτές μέθοδοι στην δικιά μας περίπτωση έγκειται στην ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους. Αυτή η ελαχιστοποίηση επιτυγχάνεται μέσω της ρύθμισης των επιθυμητών θερμοκρασιών στο εσωτερικό των κτιρίων.

3.3.1. Συνάρτηση Κόστους

Η συνάρτηση κόστους f που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί είναι ένα κριτήριο που περιλαμβάνει την επιθυμητή συχνότητα των 60Hz και την συχνότητα που επικρατεί στο δίκτυο. Συγκεκριμένα ορίζεται ως το κόστος απόκλισης του μέσου όρου της συχνότητας αναφοράς από την ονομαστική συχνότητα ($W_{\text{real}} - W_{\text{reference}}$). Η συχνότητα αναφοράς υπολογίζεται ως ο αριθμητικός μέσος όρος των μέσων όρων της συχνότητας που επικρατεί σε κάθε βήμα της προσομοίωσης του δικτύου (ανά 10 λεπτά).

$$\text{fun} = -((60 - \text{frequency_average})^{(-6)})$$

Η συνάρτηση κόστους έχει αυτή την μορφή και είναι υψωμένη στην (-6) γιατί η διαφορά των συχνοτήτων για όλη την διάρκεια των πειραμάτων κυμαίνεται σε δεκαδικό επίπεδο. Με αυτή την ύψωση, μεγιστοποιούμε την δεκαδική αυτή διαφορά με σκοπό να γίνει η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους πιο αποδοτική.

3.4. Μια τρίτη προσέγγιση

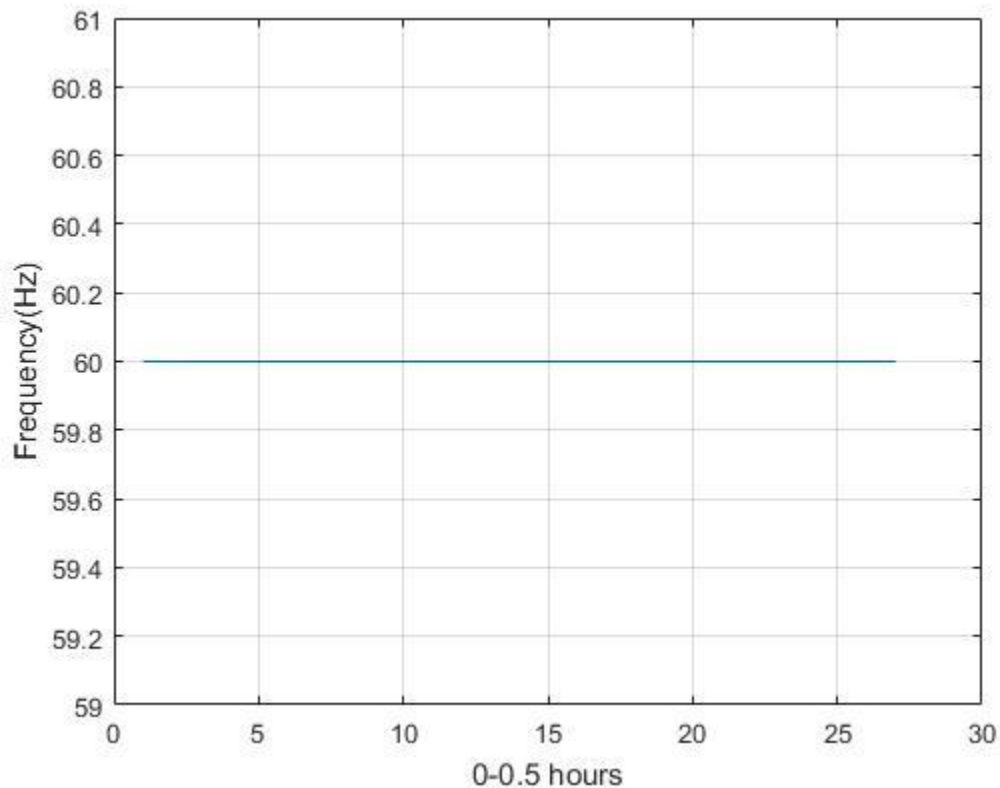
Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετά την εφαρμογή των μεθόδων *fmincon* και GA για τους αντίστοιχους χρόνους προσομοίωσης με την δεύτερη προσέγγιση.

Στην συνέχεια, παρατίθενται οι επιθυμητές τιμές θερμοκρασίας που πρέπει να διατηρεί κάθε κτίριο για τα αντίστοιχα διαγράμματα συχνότητας και ικανοποίησης των χρηστών.

✎ *Με την μέθοδο **fmincon***

✚ Για χρόνο προσομοίωσης 30 λεπτών:

- Διάγραμμα συχνότητας



- Πίνακας ποσοστών ικανοποίησης των χρηστών

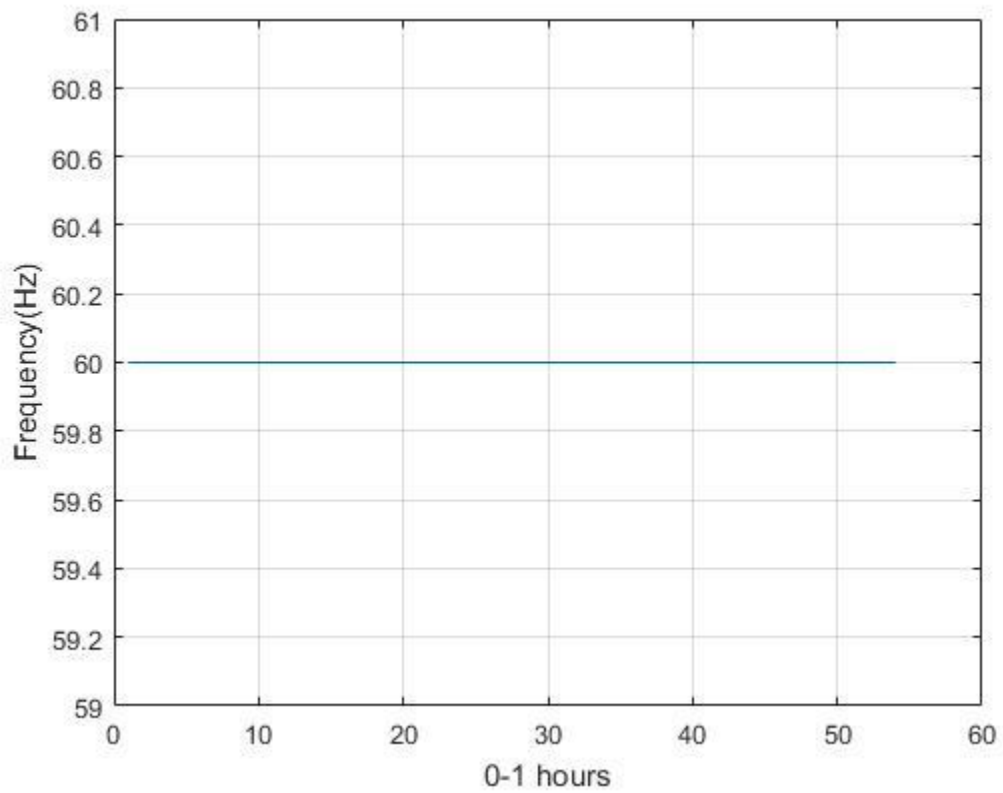
Κτίρια ▼	Ποσοστά ▼
Κτίριο 1	86.34%
Κτίριο 2	53%
Κτίριο 3	48.3%
Κτίριο 4	42%
Κτίριο 5	87.7%
Κτίριο 6	74.4%

Με τις επιθυμητές θερμοκρασίες στο εσωτερικό των κτιρίων :

Δείγμα	Κτίριο 1	Κτίριο 2	Κτίριο 3	Κτίριο 4	Κτίριο 5	Κτίριο 6
1 ^ο Δεκάλεπτο	23.00015°C	22.99999°C	23.00035°C	23.00024°C	23.00031°C	23.00024°C
2 ^ο Δεκάλεπτο	20.2°C	20.2°C	20.2°C	20.2°C	20.2°C	20.2°C
3 ^ο Δεκάλεπτο	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C

✚ Για χρόνο προσομοίωσης 1 ώρας:

- Διάγραμμα συχνότητας



- Πίνακας ποσοστών ικανοποίησης των χρηστών

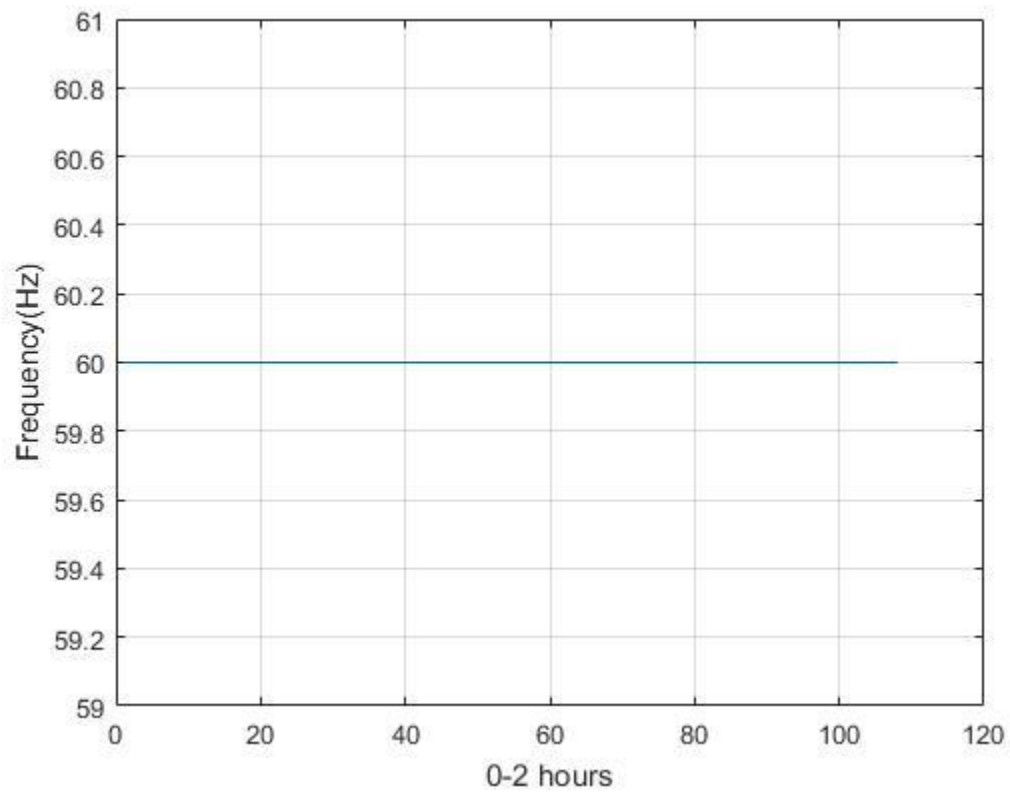
Κτίρια ▾	Ποσοστά ▾
Κτίριο 1	80%
Κτίριο 2	60%
Κτίριο 3	49.4%
Κτίριο 4	38.23%
Κτίριο 5	78.8%
Κτίριο 6	45.3%

Με τις επιθυμητές θερμοκρασίες στο εσωτερικό των κτιρίων :

Δείγμα	Κτίριο 1	Κτίριο 2	Κτίριο 3	Κτίριο 4	Κτίριο 5	Κτίριο 6
1ο Δεκάλεπτο	23.000270°C	23.000135°C	23.000351°C	23.000162°C	23.000243°C	23.000324°C
2ο Δεκάλεπτο	20.2°C	20.2°C	20.2°C	20.2°C	20.2°C	20.2°C
3ο Δεκάλεπτο	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C
4ο Δεκάλεπτο	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C
5ο Δεκάλεπτο	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C
6ο Δεκάλεπτο	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C

✚ Για χρόνο προσομοίωσης 2 ωρών:

- Διάγραμμα συχνότητας



- Πίνακας ποσοστών ικανοποίησης των χρηστών

Κτίρια ▾	Ποσοστά ▾
Κτίριο 1	48.83%
Κτίριο 2	37.3%
Κτίριο 3	37.52%
Κτίριο 4	38.23%
Κτίριο 5	43.76%
Κτίριο 6	24.6%

Με τις επιθυμητές θερμοκρασίες στο εσωτερικό των κτιρίων :

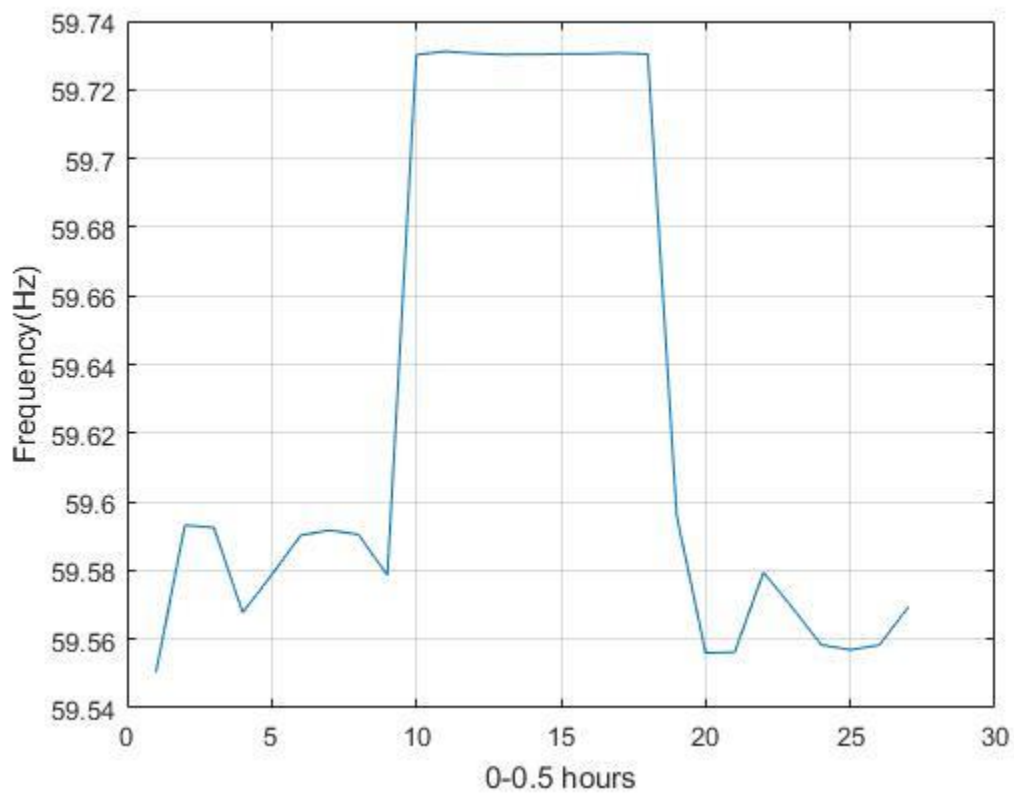
Δείγμα	Κτίριο 1	Κτίριο 2	Κτίριο 3	Κτίριο 4	Κτίριο 5	Κτίριο 6
1 ^ο Δεκάλεπτο	23.000392°C	23.000257°C	23.000324°C	23.000108°C	23.000365°C	23.000230°C
2 ^ο Δεκάλεπτο	20.2°C	20.2°C	20.2°C	20.2°C	20.2°C	20.2°C
3 ^ο Δεκάλεπτο	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C
4 ^ο Δεκάλεπτο	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C
5 ^ο Δεκάλεπτο	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C
6 ^ο Δεκάλεπτο	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C
7 ^ο Δεκάλεπτο	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C
8 ^ο Δεκάλεπτο	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C
9 ^ο Δεκάλεπτο	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C
10 ^ο Δεκάλεπτο	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C
11 ^ο Δεκάλεπτο	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C

12°						
Δεκάλεπτο	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C	23°C

✎ Με την μέθοδο του γενετικού αλγορίθμου(GA)

✚ Για χρόνο προσομοίωσης 30 λεπτών:

- Διάγραμμα συχνότητας



- Πίνακας ποσοστών ικανοποίησης των χρηστών

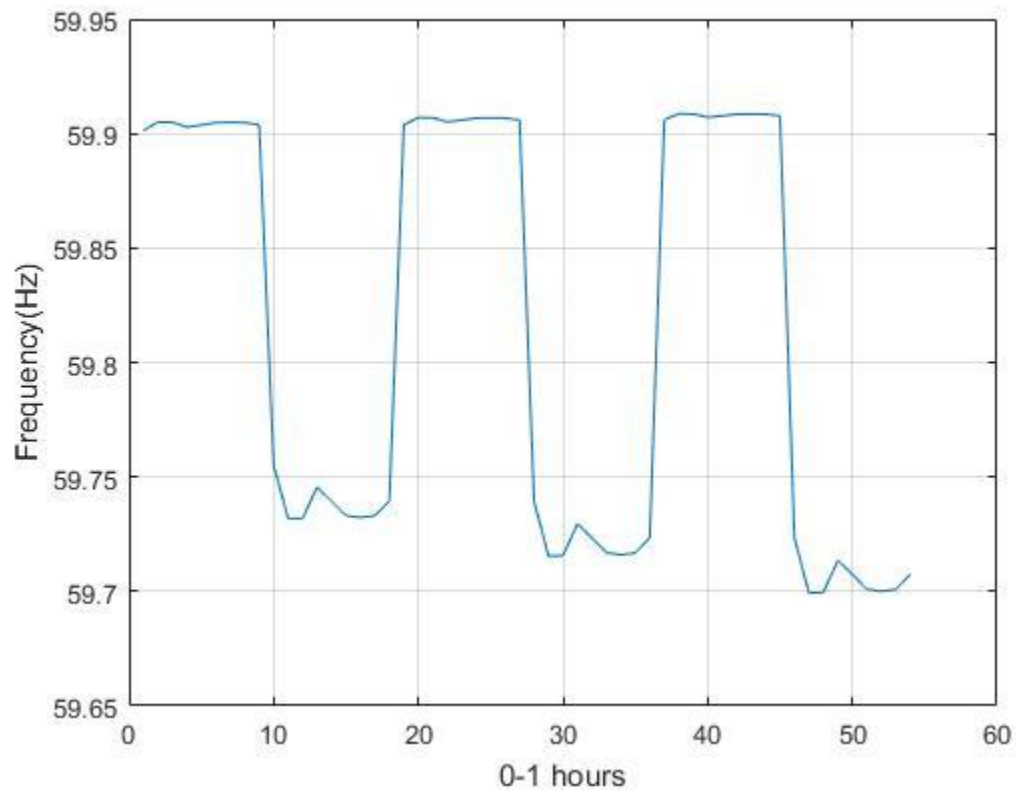
Κτίρια ▼	Ποσοστά ▼
Κτίριο 1	70%
Κτίριο 2	37.3%
Κτίριο 3	68.6%
Κτίριο 4	37%
Κτίριο 5	68.34%
Κτίριο 6	65.34%

Με τις επιθυμητές θερμοκρασίες στο εσωτερικό των κτιρίων :

Δείγμα	Κτίριο 1	Κτίριο 2	Κτίριο 3	Κτίριο 4	Κτίριο 5	Κτίριο 6
1° Δεκάλεπτο	24.30418°C	22.66312°C	20.53176°C	24.681063°C	25.91587°C	22.02674°C
2° Δεκάλεπτο	21.93217°C	25.53807°C	19.67518°C	24.46365°C	23.89122°C	25.66141°C
3° Δεκάλεπτο	25.7182°C	19.59105°C	24.12205°C	19.59861°C	25.33305°C	23.88673°C

✚ Για χρόνο προσομοίωσης 1 ώρας:

- Διάγραμμα συχνότητας



- Πίνακας ποσοστών ικανοποίησης των χρηστών

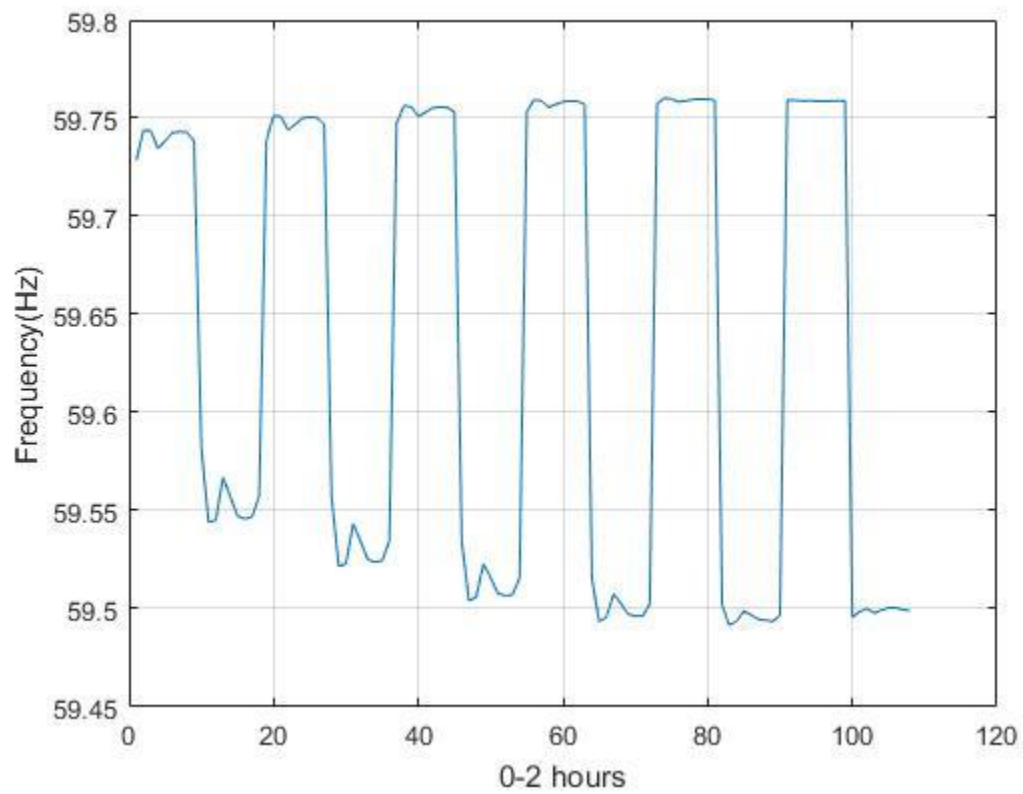
Κτίρια ▾	Ποσοστά ▾
Κτίριο 1	71.17%
Κτίριο 2	76.4%
Κτίριο 3	24.34%
Κτίριο 4	37.67%
Κτίριο 5	29%
Κτίριο 6	22.34%

Με τις επιθυμητές θερμοκρασίες στο εσωτερικό των κτιρίων :

Δείγμα	Κτίριο 1	Κτίριο 2	Κτίριο 3	Κτίριο 4	Κτίριο 5	Κτίριο 6
1°Δεκάλεπτο	19.023438°C	25.609979°C	19.213787°C	23.211275°C	22.356243°C	19°C
2°Δεκάλεπτο	20.819038°C	20.284578°C	22.49181°C	19°C	25.848248°C	23.503°C
3°Δεκάλεπτο	19°C	21.462902°C	19°C	23.514745°C	19.039063°C	22.833°C
4°Δεκάλεπτο	24.237061°C	20.321058°C	19.0625°C	19.035401°C	21.824416°C	21.935°C
5°Δεκάλεπτο	25.972943°C	24.669602°C	20.246927°C	23.501724°C	19.078125°C	19.027°C
6°Δεκάλεπτο	19.054688°C	19°C	19.003906°C	19.007813°C	23.87667°C	19°C

✚ Για χρόνο προσομοίωσης 2 ωρών:

- Διάγραμμα συχνότητας



- Πίνακας ποσοστών ικανοποίησης των χρηστών

Κτίρια ▼	Ποσοστά ▼
Κτίριο 1	73.5%
Κτίριο 2	20.25%
Κτίριο 3	76.75%
Κτίριο 4	48.42%
Κτίριο 5	36.9%
Κτίριο 6	59.75%

Με τις επιθυμητές θερμοκρασίες στο εσωτερικό των κτιρίων :

Δείγμα	Κτίριο 1	Κτίριο 2	Κτίριο 3	Κτίριο 4	Κτίριο 5	Κτίριο 6
1° Δεκάλεπτο	19°C	24.72283°C	24.18880°C	19°C	24.70177°C	21.79314°C
2° Δεκάλεπτο	19°C	22.68813°C	22.09613°C	23.84772°C	24.08042°C	22.81434°C
3° Δεκάλεπτο	19°C	19°C	25.64512°C	25.60105°C	19°C	22.03282°C
4° Δεκάλεπτο	19°C	20.19784°C	23.87667°C	23.79519°C	23.38156°C	25.86632°C
5° Δεκάλεπτο	22.42476°C	21.03308°C	25.92965°C	19.76828°C	22.69492°C	25.53451°C
6° Δεκάλεπτο	20.28457°C	21.9602°C	23.07012°C	20.91057°C	20°C	23.19207°C
7° Δεκάλεπτο	24.46159°C	19°C	19.29856°C	19°C	25.90249°C	19°C
8° Δεκάλεπτο	21.45419°C	19°C	22.91920°C	25.39660°C	20.35271°C	21.27398°C
9° Δεκάλεπτο	19.59861°C	19°C	19°C	21.45543°C	22.02204°C	21.11208°C
10° Δεκάλεπτο	25.74162°C	23.533323°C	24.727428°C	22.575831°C	22.865831°C	24.786407°C
11° Δεκάλεπτο	25.048592°C	21.91311°C	22.6532°C	22.615907°C	20.612681°C	25.762369°C
12° Δεκάλεπτο	24.638426°C	19°C	22.092054°C	19.14375°C	19°C	19.546483°C

Όπως είναι προφανές, η μέθοδος `fmincon` έχει εξάγει καλύτερα αποτελέσματα από την μέθοδο του γενετικού αλγορίθμου όσον αφορά τον συγχρονισμό της συχνότητας. Πιο συγκεκριμένα, έχει καταφέρει με την ρύθμιση των επιθυμητών θερμοκρασιών να συγχρονίσει την συχνότητα του δικτύου ακριβώς στα 60 Hz, ανεξαρτήτως των χρόνων προσομοίωσης.

Σχετικά με τα ποσοστά της ικανοποίησης των χρηστών, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, εξαρτώνται από το πως κατανέμεται η ενεργειακή κατανάλωση στην διάρκεια της προσομοίωσης. Για αυτόν τον λόγο, μπορούμε να παρατηρήσουμε ποικίλες διακυμάνσεις των ποσοστών για διαφορετικούς χρόνους προσομοίωσης.

Επίλογος και μελλοντική εργασία

Όπως είναι προφανές, η παρούσα εργασία μπορεί να αποτελέσει εφαλτήριο για μελλοντική εργασία με διάφορες κατευθύνσεις. Παρουσιάσαμε μια δημιουργία ενός ηλεκτρικού δικτύου με κυμαινόμενα φορτία, στα οποία λειτουργούσαν και συστήματα HVAC. Στην συνέχεια, καταφέραμε την βελτιστοποίηση του συστήματος και την λειτουργία του σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ηλεκτρικού δικτύου των Η.Π.Α.

Η δουλειά που υλοποιήθηκε, μπορεί να αποτελέσει το υπόβαθρο για την δημιουργία ενός «έξυπνου» και αυτόνομου δικτύου. Αυτό μπορεί να διευρυνθεί ακόμα και με την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Στόχος αυτών, είναι η παροχή ισχύος σε ώρες αιχμής πετυχαίνοντας μεγάλη οικονομία στην ενέργεια, χωρίς όμως να θυσιάσουμε την ικανοποίηση των χρηστών.

Επίσης, μεγάλο ενδιαφέρον έχει η περαιτέρω έρευνα σε στρατηγικές ελέγχου που αποσκοπούν στην αποδοτικότερη χρήση των κτιρίων είτε αυτά αποτελούν χώρο εργασίας, είτε αποτελούν κατοικία.

Τέλος, εύκολα καταλαβαίνουμε την ανάγκη για περαιτέρω προσπάθεια και έρευνα στην δημιουργία τεχνικών για την αποδοτικότερη χρήση τόσο του δικτύου όσο και των κτιρίων που βρίσκονται ενσωματωμένα στους κόμβους φορτίων. Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή ο δημιουργικός σχεδιασμός των μεθόδων ενσωμάτωσης των κτιρίων σε δίκτυα **Buildings-to-Grid** (BtG) αποτελεί βασικό στοιχείο των έξυπνων πόλεων. Πιο συγκεκριμένα, οι πόλεις που είναι εξοπλισμένες με βελτιστοποιημένα σχέδια κτιρίων, έχουν τη δυνατότητα να περιορίσουν την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας διατηρώντας παράλληλα σταθερές λειτουργίες του ηλεκτρικού πλέγματος. Έτσι, όλοι μπορούμε να αντιληφθούμε τα ωφέλη που έχει ολόκληρη η ανθρωπότητα από την αποδοτικότερη χρήση των παραπάνω, που τόσος λόγος γίνεται για την εξάντληση των φυσικών πόρων και την έλλειψη σε αποθέματα ενέργειας

Βιβλιογραφία

- [1] **Impact of Occupancy-Based Buildings-to-Grid Integration on Frequency Regulation** Bing Dong¹, Ahmad F. Taha², Nikolaos Gatsis², Zhaoxuan Li¹, and Ankur Pipri² ¹Department of Mechanical Engineering, ²Department of Electrical and Computer Engineering The University of Texas at San Antonio, 1 UTSA Circle, San Antonio, TX 78249 Emails: {Bing.Dong, Ahmad.Taha, Nikolaos.Gatsis, Zhaoxuan.Li}
- [2] P. S. Skardal and A. Arenas, **“Control of coupled oscillator networks with application to microgrid technologies,”** *Science advances*, vol. 1, no. 7, p. e1500339, 2015.
- [3] G. Filatrella, A. H. Nielsen, and N. F. Pedersen, **“Analysis of a power grid using a kuramoto-like model,”** *The European Physical Journal B*, vol. 61, no. 4, pp. 485–491, 2008.
- [4] P. Rao, X. Li, and M. J. Ogorzalek, **“Stability of synchronous solutions in a directed kuramotooscillator network with a pacemaker”** *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 64, no. 10, pp. 1222–1226, 2017.
- [5] X.Liand P.Rao,**“Synchronizing a weighted and weakly-connected kuramoto-oscillator digraph with a pacemaker”** *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 62, no. 3, pp. 899– 905, 2015.
- [6] A. R. Bergen and D. J. Hill, **“A structure preserving model for power system stability analysis”** *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, no. 1, pp. 25–35, 1981
- [7] F. Dörfler, M. Chertkov, and F. Bullo, **“Synchronization in complex oscillator networks and smart grids”** *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 110, no. 6, pp. 2005–2010, 2013.
- [8] F. Dorfler and F. Bullo, **“Synchronization and transient stability in power networks and nonuniform kuramoto oscillators”** *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 50, no. 3, pp. 1616–1642, 2012.
- [9] J.Giraldo, E.Mojica-Nava, and N.Quijano, **“Synchronization of dynamical networks with a communication infrastructure: A smart grid application”** in *Decision and Control (CDC), 2013 IEEE 52nd Annual Conference on*. IEEE, 2013.

- [10] —, **“Tracking of kuramoto oscillators with input saturation and applications in smart grids”** in *American Control Conference (ACC), 2014*. IEEE, 2014.
- [11] J. W. Simpson-Porco, F. Dörfler, and F. Bullo, **“Droop-controlled inverters are kuramoto oscillators”** *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 26, pp. 264–269, 2012.
- [12] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, **“Matpower: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education”** *IEEE Transactions on power systems*, vol. 26, no. 1, pp. 12–19, 2011.
- [13] R. D. Zimmerman, **“Matpower 4.0 b4 user’s manual”** *Power Syst Eng Res Cent*, pp. 1–105, 2010.
- [14] S. Frank and S. Rebennack, **“An introduction to optimal power flow: Theory, formulation, and examples”** *IIE Transactions*, vol. 48, no. 12, pp. 1172–1197, 2016.
- [15] T.Nishikawa and A.E.Motter,**“Comparative analysis of existing models for power-grid synchronization”** *New Journal of Physics*, vol. 17, no. 1, p. 015012, 2015.
- [16] **Prediction of Thermal Comfort** - <http://personal.cityu.edu.hk/~bsapplec/newpage315.htm>