

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική εργασία

Μελέτη θερμικής συμπεριφοράς κτιρίου με υλοποίηση ισοδύναμου κυκλωματικού μοντέλου στο Matlab/Simulink

Εκπόνηση Αντιφάκος Σταύρος

Επιτροπή Επιβλέπων : Καθ. Σταυρακάκης Γεώργιος

Μέλη επιτροπής Καθ. Καλαιτζάκης Κωνσταντίνος Επικ. Καθ. Κολοκοτσά Διονυσία

Χανιά, Δεκέμβριος 2009

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1º	1
Εισαγωγή	1
 1.1 Προγενέστερες προσπάθειες προσέγγισης του προβλήματος 	1
1.2 Στόχος διπλωματικής εργασίας	2
Κεφάλαιο 2°	3
Θεμελιώδεις έννοιες και Θεωρητικό υπόβαθρο	3
2.1 Θερμοδυναμική	3
2.1.1 Ενέργεια και Πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής	3
2.1.2 Διατήρηση της Ενέργειας – Ο Πρώτος Νόμος της Θερμοδυναμικής.	4
2.1.3 Εντροπία και Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής	4
2.1.4 Ο νόμος του Νεύτωνα περί απώλειας θερμότητας	5
2.2 Μετάδοση Θεομότητας	7
2.2 Metaboli Oephotiftas	·····/ 7
$2.2.1$ Metaboli veppotitus $\mu e a wiji \dots 2.2.2$ Metaboli veppotitus $\mu e a wiji \dots 2.2.1$	·····/ 8
$2.2.2$ Metaboli verti α_{μ} per verti α_{μ}	0 Q
$2.2.5$ Metaboli vepuotitius μ e hetavopu	0 0
$2.2.4 \text{ H}$ EVVolu 11 ζ θερμική ζ αντιστασή ζ	9
2.2.5 H EVVOID THE DEPHIKIES a substituting the theory is a substituting the second s	10
2.3 Κυκλωματικό ισοδύναμο RC του κτιρίου	10
2.3.1 Διαστασιολόγηση του κτιρίου	11
2.3.2 Ανάλυση RC κυκλώματος	12
2.3.3 Εξαγωγή διαφορικών εξισώσεων	14
2.3.4 Μελέτη παραμέτρων του θερμικού μοντέλου	15
2.3.5 Μελέτη θερμικών χαρακτηριστικών κτιρίου	16
Κεφάλαιο 3°	19
Υλοποίηση ισοδύναμου θερμικού μοντέλου RC κτιρίου στο Simulink	19
3.1 Στοιγεία Εισόδων του μοντέλου	19
3.1.1. Είσοδος Op	19
3.1.2 Eigodoc Oe	20
$2 1 2 E(-2) \log \Omega_{0}$	20
5.1.5. Eloooog QS	20
3.1.4. Εισοοος Ταο	20
3.2 Στοιχεία του Κτιριακού μοντέλου	21
3.3 Στοιχεία Εξόδων του μοντέλου	24
Κεφάλαιο 40	25
Ποοσομοίωση αποτελεσμάτων του μοντέλου Hudson	25
4.1 Εκτίμηση Ευστάθειας RC Μοντέλου και επιλονή αργικών συνθηκών	
4.1.1 Μελέτη των ιδιοτιμών	
4.1.2 Αρχικές συνθήκες προσομοίωσης	25
	_
4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης	26
4.2.1 Μηδενική παροχή ενέργειας (Qp=0)	26
4.2.2 Παροχή ενέργειας με μορφή παλμικής εισόδου	28

Κεφάλαιο 5°	33
Θερμικό μοντέλο συγκερασμού μεθοδολογιών Mendes – Hudson	33
5.1 Μεθοδολογία Mendes για την ανάπτυξη θερμικού μοντέλου κτιρίου	33
5.1.1 Μαθηματική περιγραφή του θερμαντήρα και αισθητήρα	34
5.1.2 Δημιουργία μοντέλου συγκερασμού μεθοδολογιών Hudson-Mende	s36
5.2 Επιλογή αρχικών συνθηκών προσομοίωσης	36
5.3 Συνδεσμολογία του κτιριακού μοντέλου σε περιβάλλον Simulink	36
5.4 Επίδραση θερμοχωρητικότητας των κτιριακών υλικών	39
5.5 Μοντελοποίηση θερμικής ακτινοβολίας του θερμαντήρα	39
5.6 Υλοποίηση συστήματος έλεγχου θερμοκρασίας με χρήση on off controller	:41
5.7 Μελέτη επίδρασης ακτινοβολίας με τη χρήση on off controller	43
5.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων του νέου μοντέλου με το μοντέλο Mendes	48
Κεφάλαιο 6[°]	49
Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία	49
6.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα	49
6.2 Μελλοντική εργασία	50
6.2.1 Προσθήκη προσομοίωσης ηλιακής ακτινοβολίας, υγρασίας και	
εξαερισμού	50
6.2.2 Χρήση του θερμικού μοντέλου σε έρευνα ευρύτερης κλίμακας	51
Βιβλιογραφία	52
Παράρτημα	53

Κεφάλαιο 1° Εισαγωγή

Η σύγχρονη ανάπτυξη μεθόδων για την ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας και κατ' επέκταση την ενεργειακή βιωσιμότητα των κτιριακών συγκροτημάτων επιβάλλουν παράλληλα την δημιουργία νέων θερμικών μοντέλων περιγραφής κτιρίων.

Θερμικά μοντέλα με στόχο την πρόβλεψη της θερμικής συμπεριφοράς κτιρίων έχουν ερευνηθεί εδώ και πολλά χρόνια. Ήδη το 1940 ο Bruckmayer πρότεινε μια διαδικασία υπολογισμού μιας απλής θερμικής σταθεράς χρόνου για ένα κτιριακό στοιχείο πολλαπλών στρωμάτων (multilayered). Από εκεί και έπειτα πολλές μελέτες έχουν διεξαχθεί για την επέκταση αυτής της ιδέας σε ολόκληρο και ενιαίο συνολικά κτιριακό χώρο.

Η αιτία της συνεχούς αυτής έρευνας φαίνεται να υποκινείται από δυο σημαντικούς παράγοντες. Αρχικά, η ολοένα και πιο απλή αναπαράσταση ενός κτιρίου οδηγεί σε μη περίπλοκες και αποδοτικές μεθόδους και εν συνεχεία διάφορες μελέτες σε κτίρια καταδεικνύουν ότι θερμικά μοντέλα μικρότερης τάξης (περιπλοκότητας) μπορούν επαρκώς να προσομοιώσουν διαδικασίες ανταλλαγής θερμότητας και να χρησιμοποιηθούν σε περαιτέρω σχεδίαση μεγαλυτέρων συστημάτων.

1.1 Προγενέστερες προσπάθειες προσέγγισης του προβλήματος

i) Οι Lorenz και Masy (1982) περιγράφουν ένα απλό μοντέλο βασισμένο στη λογική RC κυκλωμάτων που αποτέλεσε βάση για περαιτέρω μελέτη και συχνή χρήση. Πρόκειται για ένα μοντέλο (κύκλωμα) δυο σταθερών χρόνου, εκ των οποίων η μια σχετίζεται με την οντότητα του αέρα και η δεύτερη με την οντότητα των εσωτερικών και εξωτερικών δομικών στοιχείων.

Οι δυο σταθερές περιγράφουν την κοινώς αποδεκτή και διαδεδομένη διαδικασία απώλειας θερμότητας σε ένα κτίριο. Αρχικά περιγράφεται μια σχετικά ραγδαία πτώση θερμοκρασίας σχετιζόμενη με την χωρητικότητα σε αέρα, ακολουθούμενη από μια πιο αργή πτώση που συνδέεται με την οικοδομική μάζα.

ii) Ο Levermore (1992) εισάγει ένα μοντέλο βελτιστοποίησης θερμικών συστημάτων όπου περιγράφει το κτίριο με στοιχεία πρώτης τάξης. Στο συγκεκριμένο μοντέλο η αρχική θερμοκρασία όλων των υλικών του κτιρίου θεωρείται μεταβλητή. Τα κατασκευαστικά υλικά θεωρείται ότι θερμαίνονται και ψύχονται στις αντίστοιχες θερμοκρασίες κατά την σταθερή τους κατάσταση (steady-state). Η εσωτερική δομή του κτιρίου θεωρείται ότι διατηρεί ίδια θερμοκρασία με την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα καθώς οποιαδήποτε εσωτερική θερμική αντίσταση έχει σκόπιμα αγνοηθεί.

Ο Levermore (1988) ισχυρίζεται πως ένα τυπικό μοντέλο δυο σταθερών χρόνου έχει μια δευτερεύουσα (μικρής χρονικής κλίμακας) σταθερά χρόνου λογικά συνδεδεμένη με την οντότητα του αέρα και μια κύρια συσχετισμένη με την οντότητα της κατασκευαστικής δομής. Η κύρια σταθερά χρόνου θεωρήθηκε ως ο παράγοντας έλεγχου του μοντέλου. Η παραπάνω υπόθεση αγνοεί αποτελεσματικά την δευτερεύουσα σταθερά χρόνου και θεωρείται επαρκής ως προς την πρόβλεψη θερμοκρασίας για βελτιστοποιητές έλεγχου αλλά παραμένει περιορισμένων δυνατοτήτων όσον αφορά προβλήματα υψηλής συχνότητας.

iii) O McLaughlin et al (1981) ισχυρίζεται πως τα κτίρια παρουσιάζουν δυο ή και τρεις σταθερές χρόνου. Σε αντίθεση με τον Levermore και τους Lorenz και Masy η μικρότερη σταθερά χρόνου οφείλεται σε απώλεια θερμότητας του αέρα λόγω ψύξης και όχι κατά αποκλειστικότητα στην χωρητικότητα του αέρα.

iv) O Tindale (1993) ανέπτυξε το βασικό μοντέλο Lorenz και Masy και ως συμπέρασμα επεσήμανε ορισμένα μειονεκτήματα. Μια από αυτές ήταν η ανεπαρκής προσομοίωση κτιρίων με μεγάλη θερμοχωρητικότητα

Συνεπώς μιας και η σύγχρονη τάση περιλαμβάνει ως επί το πλείστον κτίρια με υψηλή θερμοχωρητικότητα, κρίθηκε αναγκαία η βελτίωση της μεθόδου μοντελοποίησης ενός θερμικού μοντέλου με την βοήθεια RC κυκλωμάτων.

1.2 Στόχος διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία κύριος μας στόχος αποτελεί η υλοποίηση δυο ξεχωριστών απλοποιημένων εκδοχών θερμικού μοντέλου κτιρίου που βασίζονται θεωρητικά σε δυο διαφορετικές μεθοδολογίες. Η κύρια διαφορά μεταξύ τους επικεντρώνεται στην τάξη των συστημάτων που τα περιγράφουν. Κοινό θεωρητικό υπόβαθρο αποτελεί η θεώρηση ενός κτιριακού χώρου ως ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα (lumped capacitance model).

Αρχικά υλοποιείται ένα θερμικό μοντέλο πρώτης τάξης βασιζόμενο στη μέθοδο του Hudson^[1] ενώ στη συνεχεία υλοποιείται ένα θερμικό μοντέλο μεγαλύτερης τάξης βασισμένο στη μεθοδολογία του Mendes^[2].

Παράλληλα εξετάζεται η επίδραση των διαφόρων θερμικών χαρακτηριστικών των κτιριακών τμημάτων καθώς και θερμικών φαινομένων στην συνολική θερμική συμπεριφορά του κτιριακού χώρου. Απώτερος στόχος μας είναι η σύγκριση μεταξύ των δυο υλοποιήσεων και η εξαγωγή συμπερασμάτων με μετρήσιμους όρους που σχετίζονται με την πολυπλοκότητα της εκάστοτε υλοποίησης.

Για την προσομοίωση και κατ επέκταση την επαλήθευση και σύγκριση μεταξύ αυτών των δυο μεθοδολογιών επιλέξαμε το προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab/Simulink. Το Matlab/Simulink αποτελεί ένα ολοκληρωμένο εργαλείο προσομοίωσης και η επιλογή αυτού βασίστηκε κυρίως στις αυξημένες δυνατότητες που παρουσιάζει όσον αφορά την γρήγορη και μεθοδική ανάπτυξη δυναμικών συστημάτων καθώς και στη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης σε ευρύτερης κλίμακας μελέτες.

Κεφάλαιο 2° Θεμελιώδεις έννοιες και Θεωρητικό υπόβαθρο

Η σχεδίαση και ανάλυση συστημάτων μετατροπής ενέργειας απαιτούν ενδελεχή κατανόηση βασικών αρχών της θερμοδυναμικής και της μεταφοράς θερμότητας.

Η θερμοδυναμική είναι ο κλάδος της επιστήμης της μηχανικής που περιγράφει τη σχέση και την αλληλεπίδραση ενός συστήματος με το ευρύτερο περιβάλλον του. Η παραπάνω αλληλεπίδραση συναντάται συνήθως ως μεταφορά ενέργειας ,μάζας ή ορμής ανάμεσα στο σύστημα και το περιβάλλον του.

Οι νόμοι της θερμοδυναμικής χρησιμοποιούνται συχνά για την πρόβλεψη των μεταβολών που προκύπτουν σε ένα σύστημα κατά τη μετάβαση αυτού από μια κατάσταση ισορροπίας σε μια άλλη.

Η επιστήμη της μεταφοράς θερμότητας συμπληρώνει τη επιστήμη της θερμοδυναμικής παρέχοντας μας επιπρόσθετες πληροφορίες σχετικά με την ενέργεια που διαπερνά τα όρια ενός συστήματος.

Οι νόμοι της μεταφοράς θερμότητας μας παρέχουν αρχικά πληροφορία σχετική με το μηχανισμό μεταφοράς ενέργειας με τη μορφή θερμότητας καθώς και τους απαραίτητους συσχετισμούς για τον υπολογισμό του ρυθμού μεταφοράς ενέργειας ως θερμότητα.

2.1 Θερμοδυναμική

Κάθε μηχανικό σύστημα αποτελείται από διάφορα επιμέρους υποσυστήματα και η βέλτιστη απόδοση του υπόκειται στην λειτουργία τους καθώς και στην αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων η αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων αυτών υποσυστημάτων εντοπίζεται στη μεταφορά μάζας η ενέργειας.

Η Θερμοδυναμική είναι η επιστήμη της μηχανικής που περιγράφει την μετατροπή της ενέργειας από μια μορφή σε μια άλλη στο ίδιο μηχανικό σύστημα. Σε αυτή την ενότητα θα επικεντρωθούμε στους νόμους της Θερμοδυναμικής και στην εφαρμογή τους σε συστήματα μετατροπής ενέργειας

2.1.1 Ενέργεια και Πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής

Προτού προβούμε σε θερμοδυναμική ανάλυση ενός συστήματος θα πρέπει αρχικά να ορίσουμε το σύστημα προς μελέτη.

Αφότου οριστεί σωστά ένα θερμοδυναμικό σύστημα οτιδήποτε εκτός συστήματος θα νοείται ως περιβάλλον. Το ενδιαφέρον μας επικεντρώνεται από εκεί και πέρα στην αλληλεπίδραση του συστήματος με το περιβάλλον.

Στην θερμοδυναμική ανάλυση τα συστήματα διακρίνονται είτε σε ελεγχόμενης μάζας (controlled mass, CM) είτε σε ελεγχόμενου όγκου (control volume, CV).

Σε ένα σύστημα ελεγχόμενης μάζας, η ενέργεια – αλλά όχι η μάζα – μπορεί να διασχίσει τα όρια του συστήματος καθώς το σύστημα διέρχεται μέσα από θερμοδυναμική διαδικασία. Τα συστήματα ελεγχόμενης μάζας αποκαλούνται και κλειστά συστήματα.

Κατ αναλογία σε ένα σύστημα ελεγχόμενου όγκου – συχνά αναφέρεται και ως ανοικτό σύστημα – τόσο η ενέργεια όσο και η υλη μπορούν να διέλθουν των ορίων του συστήματος.

Με βάση τον παραπάνω διαχωρισμό προκύπτει και μια τρίτη κατηγορία αυτή των απομονωμένων συστημάτων που ούτε ενέργεια αλλά ούτε και υλη διέρχεται των ορίων τους.

Η ενεργεία ενός συστήματος αποτελείται από τρία μέρη την κινητική ενέργεια , την δυναμική καθώς και η εσωτερική ενέργεια. Η κινητική και η δυναμική ενέργεια είναι μακροσκοπικά παρατηρήσιμες.

Η εσωτερική ενέργεια συσχετίζεται με την τυχαία και χαοτική πλευρά των μορίων ενός συστήματος και δε είναι άμεσα παρατηρήσιμη.

Στην Θερμοδυναμική ανάλυση η ενέργεια του συστήματος προκύπτει από το άθροισμα των παραπάνω τριών μορφών ενέργειας.

2.1.2 Διατήρηση της Ενέργειας – Ο Πρώτος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Ο Πρώτος Νόμος της Θερμοδυναμικής διατείνεται πως η ενέργεια διατηρείται, δε μπορεί να δημιουργηθεί η να καταστραφεί αλλά μετατρέπεται από τη μια μορφή στην άλλη

Η ενέργεια ενός κλειστού συστήματος εκφράζεται ως :

$$E = me + \frac{mu^2}{2g_2} + \frac{mgz}{g_c},$$

Όπου Ε η συνολική ενέργεια του συστήματος, e η εσωτερική ενέργεια ανά μονάδα μάζας και οι δυο τελευταίοι όροι της εξίσωσης να αντιπροσωπεύουν κατ αντιστοιχία την κινητική και δυναμική ενέργεια του συστήματος.

Όταν ένα σύστημα υπόκειται σε αλλαγές η μετατροπή ενέργειας μέσα στο σύστημα εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση διατήρησης της ενέργειας.

Ενέργεια = Ενέργεια που εισέρχεται - Ενέργεια που εξέρχεται + Ενέργεια
 συστήματος του συστήματος του συστήματος που δημιουργείται εντός του

συστήματος

2.1.3 Εντροπία και Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Σε πολλές των περιπτώσεων ένα απομονωμένο σύστημα δύναται να αλλάξει προς μια δεδομένη κατεύθυνση ενώ η αντίστροφη διαδικασία παραμένει αδύνατη. Για παράδειγμα η αντίδραση μεταξύ οξυγόνου και υδρογόνου θα παράγει νερό ενώ η αντίστροφη διαδικασία (ηλεκτρόλυση) δε μπορεί να συμβεί χωρίς εξωτερική παρέμβαση. Τέτοιου τύπου συμβάντα εξηγούνται από τον δεύτερο νόμο της Θερμοδυναμικής που παρέχει τα απαραίτητα εργαλεία για την ερμηνεία μη αναστρέψιμων διαδικασιών όπως αυτής του προαναφερθέντος παραδείγματος. Αντίθετα με τον Πρώτο Νόμο της Θερμοδυναμικής, ο Δεύτερος Νόμος ενδιαφέρεται για την κατεύθυνση της διαδικασίας.

Προς καλύτερη κατανόηση του Δευτέρου Νόμου της Θερμοδυναμικής θα πρέπει να εισάγουμε μια θερμοδυναμική ιδιότητα με το όνομα εντροπία (συμβολίζεται με S όσον αφορά τη συνολική εντροπία και με s όσον άφορα την εντροπία ανά μονάδα μάζας)

Η εντροπία ενός συστήματος μας παρέχει ένα τρόπο μέτρησης της αταξίας σε μικροσκοπικό επίπεδο μέσα σε ένα σύστημα

Κατά την εξέλιξη μιας θερμοδυναμικής διαδικασίας παράγεται αταξία στο σύστημα και επομένως απαιτείται ενέργεια για την επαναφορά του σε τάξη. Συνεπώς ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής εκφράζεται από την αρχή ότι η εντροπία μπορεί να παραχθεί αλλά δε μπορεί ποτέ να εκλείψει.

$$\Delta S = S_{\rm final} - S_{\rm initial} \ge 0$$

Οι θερμοδυναμικές διαδικασίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αναστρέψιμες και μη αναστρέψιμες διαδικασίες. Μια αναστρέψιμη διαδικασία είναι μια διαδικασία κατά την οποία η συνολική εντροπία του συστήματος παραμένει αμετάβλητη.

Η εντροπία για ένα κλειστό σύστημα σταθερής μάζας σε μια αναστρέψιμη διαδικασία υπολογίζεται από τη ακόλουθη σχέση

$$dS = \frac{dQ}{T},$$

Όπου dS είναι η αύξηση της εντροπίας, dQ η θερμότητα που απορροφάται και T η απόλυτη θερμοκρασία του συστήματος. Παρόλα αυτά η συνολική εντροπία για όλα τα συμμετέχοντα συστήματα σε μια αναστρέψιμη διαδικασία πρέπει να ισούται με τη μηδενική, οπότε θα ισχύει

$$\Delta S = \sum dS = \sum \frac{dQ}{T} = 0.$$

Επειδή οι περισσότερες πραγματικές διαδικασίες δε είναι αναστρέψιμες και συνεπώς η εντροπία δε διατηρείται θα ισχύει η παρακάτω σχέση

$$dS \ge \frac{dQ}{T},$$

όπου η ισότητα αναπαριστά την αναστρέψιμη διαδικασία

2.1.4 Ο νόμος του Νεύτωνα περί απώλειας θερμότητας

Ο νόμος του Νεύτωνα περί απώλειας θερμότητας διατείνεται ότι ο ρυθμός απώλειας θερμότητας σε ένα σώμα είναι ανάλογος της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του σώματος και του περιβάλλοντος του. Ο νόμος έχει ως εξής:

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot A(T_{\rm env} - T_0)$$

όπου

Q = Θερμική ενέργεια σε Joules h = Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας A = Περιοχή της επιφάνειας που μεταφέρεται η θερμότητα Tenv= Θερμοκρασία περιβάλλοντος Η παραπάνω μαθηματική έκφραση της αρχής απώλειας θερμότητας δε είναι πάντα ακριβής . Μια ακριβέστερη διατύπωση θα απαιτούσε ανάλυση της ροής της θερμότητας , βασισμένη στην εξίσωση μεταφοράς θερμότητας σε ένα ανομοιογενές μέσο.

Η ακόλουθη απλοποίηση ονομάζεται θερμική ανάλυση συσσωρευμένου συστήματος (lumped system thermal analysis) και μπορεί να εφαρμοστεί υπό την ακόλουθη παραδοχή. Το αντικείμενο έχει την ίδια ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλη του τη μάζα ακόμη κι αν αυτή η θερμοκρασία διαφοροποιείται καθώς το αντικείμενο ψυχραίνεται λόγω εξωτερικού περιβάλλοντος. Με βάση αυτή τη παραδοχή ολόκληρο το σώμα εκλαμβάνεται ως θερμική αποθήκη συσσωρευμένης χωρητικότητας με συνολικό θερμικό περιεχόμενο ανάλογο της θερμοχωρητικότητας C και της θερμοκρασίας του αντικειμένου T. Οπότε ισχύει η ακόλουθη σχέση

$$Q = C \cdot T$$

Από τον ορισμό της θερμοχωρητικότητας C προκύπτει η σχέση

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

Διαφορίζοντας την παραπάνω εξίσωση στο χρόνο (αν κ εφόσον η θερμοκρασία παραμένει ομοιόμορφη σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή) έχουμε

$$\frac{dQ}{dT} = C \, \frac{dT}{dt}$$

Η έκφραση αυτή σε συνδυασμό με την αρχική διατύπωση του Νόμου του Νεύτωνα μας οδηγεί στην ακόλουθη σχέση.

$$\frac{dT(t)}{dt} = -r(T - T_{\rm env})$$

όπου,

T(t) = θερμοκρασία του αντικειμένου σε χρονική στιγμή **t Tenv** = περιβάλλουσα του αντικειμένου θερμοκρασία και r = hA/C χρονική σταθερά του συστήματος

Η λύση της διαφορικής εξίσωσης μας δίνει

$$T(t) = T_{\text{env}} + (T(0) - T_{\text{env}}) e^{-rt}.$$

όπου T(0) η αρχική θερμοκρασία για t=0

2.2 Μετάδοση Θερμότητας

Στην ενότητα 1.1 αναλύσαμε τους δυο θεμελιώδεις νόμους της θερμοδυναμικής και διαπιστώσαμε την εφαρμογή τους στην αλληλεπίδραση ενός συστήματος με το περιβάλλον του.

Οι θερμοδυναμικοί νόμοι αναφέρονται στην κατάσταση ισορροπίας ενός συστήματος και χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν ποσοτικά την ενέργεια που απαιτείται ώστε το σύστημα να επέλθει από μια κατάσταση ισορροπίας σε μια άλλη αντίστοιχη.

Οι Νόμοι της Θερμοδυναμικής δε ποσοτικοποιούν τη μετάδοση ενέργειας η το ρυθμό της. Οι σχέσεις μετάδοσης θερμότητας , παρόλα αυτά συμπληρώνουν τους θερμοδυναμικούς νόμους παρέχοντας μας εξισώσεις που εκφράζουν το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας μεταξύ ενός συστήματος και του περιβάλλοντος του.

Η διαδικασία μετάδοσης ή ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ δυο μέσων προκύπτει σαν αποτέλεσμα διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα τους . Η θερμότητα μεταδίδεται στο χώρο με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Με αγωγή, με μεταφορά και με ακτινοβολία όπως φαίνεται συνοπτικά στο ακόλουθο σχήμα :



2.2.1 Μετάδοση θερμότητας με αγωγή

Μετάδοση με θερμική αγωγή ονομάζεται η μετάδοση της θερμότητας από μόριο σε μόριο στα στερεά, υγρά και αέρια σώματα. Για ομοιογενή στρώση υλικού είναι :

$$\mathbf{Q} = \frac{\lambda}{d} \mathbf{F} \mathbf{F} (\mathbf{t}_1 - \mathbf{t}_2) \mathbf{z} \quad \sigma \mathbf{\varepsilon} \quad (\mathbf{W}^* \mathbf{h})$$

όπου είναι :

Q η ποσότητα της θερμότητας, η οποία διέρχεται διαμέσου του υλικού, όταν $t_i > t_2$ σε βατώρες (W*h),

λ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού σε βατ ανά μέτρο και βαθμό Κέλβιν (W/m*K),

d το πάχος του υλικού σε μέτρα (m),

F το εμβαδόν της επιφάνειας του υλικού σε τετραγωνικά μέτρα (m2),

ti η θερμοκρασία της μίας επιφάνειας του υλικού σε βαθμούς Κέλβιν (K),

t2η θερμοκρασία της άλλης επιφάνειας σε βαθμούς Κέλβιν (K) και z ο χρόνος ροής της θερμότητας σε ώρες (h).

2.2.2 Μετάδοση θερμότητας με θερμική ακτινοβολία

Μετάδοση με θερμική ακτινοβολία ονομάζεται η ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ των επιφανειών στερεών σωμάτων που απέχουν μεταξύ τους. Για τη μετάδοση της θερμότητας με ακτινοβολία ισχύει η σχέση:

$$Q = \alpha_s * F^*(t_1 - t_2) * z \sigma \varepsilon (W^*h)$$

όπου είναι :

Qη ποσότητα της θερμότητας την οποία ακτινοβολεί η θερμότερη επιφάνεια σε βατώρες (W*h),

α_s ο συντελεστής θερμικής μετάδοσης ακτινοβολίας σε βατ ανά τετραγωνικό μέτρο και βαθμό Κέλβιν (W/m2*K),

F το εμβαδόν της θερμότερης επιφάνειας σε τετραγωνικά μέτρα (m2),

ti η θερμοκρασία της θερμότερης επιφάνειας σε βαθμούς Κέλβιν (K),

 t_2 η θερμοκρασία της επιφάνειας του άλλου σώματος σε βαθμούς Κέλβιν (K) και z ο χρόνος ροής σε ώρες (h).

2.2.3 Μετάδοση θερμότητας με μεταφορά

Μετάδοση με μεταφορά ονομάζεται η μετάδοση της θερμότητας με τη μετακίνηση θερμών μορίων υγρών ή αερίων διαμέσου του χώρου.

Για τη μετάδοση της θερμότητας μεταξύ υλικού και αέρα ισχύει η σχέση:

$$Q = \alpha^* F^*(t_L - t_o)^* z \sigma \varepsilon (W^*h)$$

όπου είναι :

Q η ποσότητα της θερμότητας, η οποία μεταβιβάζεται από τον αέρα στην επιφάνεια του υλικού, όταν $t_L\!\!>\!\!t_o$, σε βατώρες (W*h),

α ο συντελεστής θερμικής μεταβίβασης μεταξύ της επιφάνειας του υλικού και του αέρα που βρίσκεται σε επαφή μ'αυτή, σε βατ ανά τετραγωνικό μέτρο και βαθμό Κέλβιν (W/ m2*K),

F το εμβαδόν της επιφάνειας του υλικού σε τετραγωνικά μέτρα (m2),

t
ι η μέση θερμοκρασία του αέρα σε κάποια απόσταση από την επιφάνεια του υλικού σε βαθμούς Κέλβιν (K),

to η θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού σε βαθμούς Κέλβιν (K) και z ο χρόνος ροής της θερμότητας σε ώρες (h).

Η μεταφορά είναι η διαδικασία μετάδοσης θερμότητας που προκύπτει σε στερεά, υγρά και αέρια μέσω μοριακής αλληλεπίδρασης ως αποτέλεσμα μεταβολής θερμοκρασίας. Η ενέργεια που μεταφέρεται ανάμεσα σε γειτνιάζοντα μόρια δε απαιτεί σημαντική φυσική αναδιάταξη των μορίων.

Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας μέσω μεταφοράς μπορεί να υπολογιστεί από το Νόμο του Fourier, όπου το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των μορίων του μέσου μεταφοράς εκφράζεται σαν ιδιότητα του μέσου και ονομάζεται θερμοπερατότητα. Σε αυτή την ενότητα θα μελετήσουμε την μετάδοση θερμότητας με μεταφορά διαμέσου ενός ομογενούς σώματος.

Ο νόμος του Fourier τεκμηριώνει πως ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας μέσω μεταφοράς είναι απευθείας ανάλογος με τη μεταβολή στη κλίση της θερμοκρασίας και την επιφάνεια διαμέσου της οποίας ρέει η θερμότητα.

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Η σταθερά k αντιστοιχεί στην θερμοπερατότητα του μέσου μεταφοράς της θερμότητας και μετριέται σε W/mK. Ενδέχεται να μεταβάλλεται κατά τη μεταβολή θερμοκρασίας αλλά για τα περισσότερα υλικά θεωρείται σταθερή σε ένα περιορισμένο φάσμα θερμοκρασιών.

Η παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιείται για να εκφράσει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας διαμέσου ενός μονοδιάστατου μέσου με ενιαίο k .Ας υποθέσουμε πως έχουμε προς μελέτη ένα τμήμα τοίχου με πάχος L (τέτοιο ώστε να είναι αμελητέο συγκριτικά με τις άλλες διαστάσεις του τοίχου).



Εικόνα 2.1 Αναλογία μεταξύ ηλεκτρικού και θερμικού κυκλώματος

Η μια πλευρά του τοίχου έχει θερμοκρασία T_1 και η άλλη T_2 όπου $T_{1>}T_{2.}$ Ολοκληρώνοντας την εξίσωση του Fourier με σταθερές A και k, ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας μέσω του τοίχου θα δίνεται από τη ακόλουθη σχέση.

$$\dot{Q} = kA \frac{T_1 - T_2}{L},$$

όπου k η θερμοπερατότητα του τοίχου

2.2.4 Η έννοια της θερμικής αντίστασης

Στο σχήμα 2.1 είναι εμφανής η αναλογία μεταξύ ηλεκτρικών και θερμικών κυκλωμάτων.

Ας θεωρήσουμε το ηλεκτρικό ρεύμα I που ρέει διαμέσου της αντίστασης Re όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 . Η τάση $\Delta V = V_1 - V_2$ η κινητήριος δύναμη για τη ροη του ηλεκτρικού ρεύματος. Για το ηλεκτρικό ρεύμα επομένως θα ισχύει :

$$I = \frac{\Delta V}{R_e}$$

Κατ αναλογία με τη ροη ηλεκτρικού ρεύματος , η ροη θερμότητας προκύπτει από την διαφορά θερμοκρασιών και δίνεται από τη σχέση

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R}$$

όπου $R = \frac{L}{A k}$ και ονομάζεται θερμική αντίσταση (θερμοαντίσταση). Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό η θερμική αντίσταση για μετάδοση θερμότητας μέσω μεταφοράς που παρουσιάσαμε στην ενότητα **1.2.1** (Νόμος του Νεύτωνα) θα ισούται με $R = \frac{1}{hA}$

Η παραπάνω διαπίστωση περί αναλογίας και παρόμοιας συμπεριφοράς θερμικών και ηλεκτρικών κυκλωμάτων μας επιτρέπει να μοντελοποιήσουμε τα δομικά στοιχεία ενός κτιριακού συγκροτήματος με τη μορφή ηλεκτρικού κυκλώματος RC.

2.2.5 Η έννοια της θερμικής αγωγιμότητας

Η θερμική αγωγιμότητα που συμβολίζεται με το σύμβολο U, εκφράζει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας (σε watt) ανά κυβικό μέτρο του σώματος, διαιρούμενο με τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα δυο άκρα του και δίνεται μαθηματικά από τη σχέση

$$U = \frac{1}{R}$$

όπου R η θερμική αντίσταση του εκάστοτε δομικού στοιχείου.

2.3 Κυκλωματικό ισοδύναμο RC του κτιρίου

Μερικές από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των κτιριακών υλικών είναι το βάρος και η αντοχή τους . Με όρους διατήρησης ενέργειας , οι πιο σημαντικές ιδιότητες είναι η ικανότητα απορρόφησης και μετάδοσης ενέργεια. Οι ιδιότητες αυτές καθορίζουν το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό χώρο του κτιρίου, το ποσό θερμότητας που μπορεί να αποθηκευθεί σε ένα υλικό καθώς και το ποσό που απορροφάται μέσω ακτινοβολίας.

Επομένως ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας είναι αυτός που καθορίζει το μέγεθος των ενεργειακών απωλειών ενός κτιρίου και κατά συνέπεια παίζει ζωτικό ρολό στην επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού για την διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας εντός του κτιρίου. Η απώλεια και το θερμικό κέρδος ενός κτιρίου είναι

μια περίπλοκη διαδικασία που εμπλέκει τέσσερις βασικούς μηχανισμούς, τη μετάδοση θερμότητας λόγω μεταφοράς από τα κτιριακά στοιχεία, τη μετάδοση θερμότητας από τον αέρα στα κτιριακά στοιχεία , την θερμότητα λόγω ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και τη θερμική μετάδοση λόγω εξαερισμού του κτιριακού χώρου.

Για να μπορέσουμε να καθορίσουμε τη θερμική συμπεριφορά του μοντέλου μας πρέπει επομένως να εξετάσουμε διεξοδικά τις θερμικές ιδιότητες των υλικών που το απαρτίζουν.

2.3.1 Διαστασιολόγηση του κτιρίου

Αρχικό μέλημα της διαδικασίας μας είναι η σωστή διαστασιολόγηση του κτιρίου. Ουσιαστικά αυτή η διαδικασία γίνεται για να καλυφθούν σωστά συντελεστές και παράμετροι που λαμβάνουν τιμές μέσα στις διαφορικές εξισώσεις (που περιγράφουν το κύκλωμα) του κτιρίου.

Μιας και η λογική που ακολουθήσαμε για την υλοποίηση του RC κυκλώματος ήταν να μοντελοποιήσουμε κάθε τοίχωμα μόνο σαν να αποτελείται από εξωτερική και εσωτερική τοιχοποιία (μεθοδολογία Hudson^[1]) αγνοούμε προς το παρόν τα ενδιάμεσα στρωματά που συνθέτουν κάθε επιφάνεια του κτιρίου μας (μόνωση, δρομικό τοίχο, πάχος επιφάνειας του σοβά).

Έτσι με το παραπάνω σκεπτικό μετρήσαμε για κάθε επιφάνεια (κόμβο στην αναλογία των κυκλωμάτων) και με την βοήθεια των αρχιτεκτονικών σχεδίων που έχουμε στη διάθεση μας, την επιφάνεια της κάθε τοιχοποιίας χωρίς να συμπεριλαμβάνουμε την επιφάνεια ,που καταλαμβάνουν τα παράθυρα μέσα σε αυτή μιας και τα παράθυρα παίζουν διαφορετικό ρόλο όσον αφορά την θερμομόνωση του κτιρίου (ηλιακή ακτινοβολία κτλ). Τα παράθυρα πιθανόν να χρησιμοποιηθούν σε εξωτερικό στοιχείο στην προγραμματιστική διαδικασία και να έχουν καθαρά το ρόλο της εισόδου στο component του κτιρίου ή σε μια πιο απλή εκδοχή του προβλήματος να προσμετρηθούν όλες οι επιφάνειες μαζί ανεξαρτήτως προσανατολισμού τους .Στην τελευταία εκδοχή οι επιφάνειες των παραθύρων αποτελούν ένα επιπλέον path στο κύκλωμα μας.

Επιφάνεια	Παράμετρος	Αριθμητική τιμή σε τ.μ (m^2)
Επιφάνεια τοίχου W ₁	Aw1	60.9
Επιφάνεια τοίχου W2	Aw2	74.3
Επιφάνεια τοίχου W3	Aw3	68.5
Επιφάνεια τοίχου W4	Aw4	60.9
Επιφάνεια τοίχου W5	Aw5	21.3
Επιφάνεια οροφής	Ac	135.2
Επιφάνεια δαπέδου	Af	105
Συνολική επιφάνεια υαλοπινάκων του κτιρίου	Ag	43

2.3.2 Ανάλυση RC κυκλώματος

Η μεταφορά θερμότητας διαμέσου των τοιχωμάτων, του δαπέδου και της οροφής ενός κτιρίου εξαρτάται άμεσα από τη διαφορά εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας και τη θερμική αγωγιμότητα κάθε κτιριακού στοιχείου. Η εξίσωση που περιγράφει επομένως τις θερμικές απώλειες του κτιρίου εξαιτίας αυτής της διαφοράς θερμοκρασίας φαίνεται παρακάτω:

$$Q_{tr} = \sum_{i} (UA)_{i} \Delta T$$

Όπου

 ΔT είναι η διαφορά εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας, σε K(°C)

U είναι η θερμική αγωγιμότητα του στοιχείου, W/m2K

Γνωρίζοντας πως η θερμική αγωγιμότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμικής αντίστασης παραπάνω εξίσωση μας δίνει μια εικόνα για την αντίσταση που παρουσιάζει στη ροη θερμότητας το εκάστοτε κτιριακό στοιχείο προς μελέτη. Αναφορικά με την περίπτωση του κτιρίου του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και ΑΠΕ του Πολυτεχνείου Κρήτης το επιμέρους κύκλωμα RC που περιγράφει την τοπολογία των τοιχωμάτων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Παρατηρούμε ότι κάθε path αντιπροσωπεύει ένα τοίχωμα καθώς και ότι συνδέεται παράλληλα με τα υπόλοιπα μιας και κοινοί τους κομβόι αποτελούν

- i) η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος-αέρα (Tao) και
- ii) η εσωτερική θερμοκρασία αέρα (Tai).

Επίσης κάτι που πρέπει να επισημανθεί είναι το γεγονός πως κάθε τοίχωμα χαρακτηρίζεται από

- i) Ui (εσωτερική θερμική αγωγιμότητα)
- ii) Uo (εξωτερική θερμική αγωγιμότητα)

Είναι εμφανές πως η αντίσταση σαν στοιχείο του κυκλώματος αντιστοιχεί στη μονάδα της θερμικής αντίστασης (thermal resistance) για το θερμικό μοντέλο που επιχειρούμε να διαμορφώσουμε και συνδέεται άμεσα με την θερμική αγωγιμότητα (thermal transmittance) με τη σχέση

$$U = \frac{1}{R}$$

Σχηματικά κάθε path αποτελείται από δυο επιμέρους paths που περιλαμβάνουν μια αντίσταση. π.χ για το τοίχωμα 1 (wall1) έχουμε πως το εξωτερικό τοίχωμα χαρακτηρίζεται από θερμική αγωγιμότητα Uow1 και το εσωτερικό τοίχωμα από θερμική αγωγιμότητα Uow2.

Τα δυο τοιχώματα ενώνονται σε έναν κοινό κόμβο Twi που περιγράφει την κοινή τους θερμοκρασία και στη συνέχεια άμεσα με τον κόμβο Twi συνδέεται η θερμική χωρητικότητα του τοιχώματος που περιγράφεται με την μεταβλητή Cwi.



2.3.3 Εξαγωγή διαφορικών εξισώσεων

Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το κύκλωμα που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα θα είναι οι ακόλουθες:

1)Wall_1:

$$\frac{dTw_{1}}{dt} = \frac{Aw_{1}}{Cw_{1}} \left[Uiw_{1}(Tai - Tw_{1}) + Uow_{1}(Tao - Tw_{1}) \right]$$

2)Wall_2:

$$\frac{dTw_2}{dt} = \frac{Aw_2}{Cw_2} \left[Uiw_2(Tai - Tw_2) + Uow_2(Tao - Tw_2) \right]$$

3)Wall_3:

$$\frac{dTw_3}{dt} = \frac{Aw_3}{Cw_3} \left[Uiw_3(Tai - Tw_3) + Uow_3(Tao - Tw_3) \right]$$

4)Wall_4:

$$\frac{dTw_4}{dt} = \frac{Aw_4}{Cw_4} \left[Uiw_4 (Tai - Tw_4) + Uow_4 (Tao - Tw_4) \right]$$

5)Floor:

$$\frac{dTf}{dt} = \frac{Af}{Cf} \left[\frac{Qs}{Af} + Uf(Tai - Tf) \right]$$

6)Air:

$$\frac{dTai}{dt} = \frac{1}{Ca} \begin{bmatrix} Qp + Qe + (A_gU_g + U_v)(Tao - Ti) + \\ Aw_1Uiw_1(Tw_1 - Ti) + Aw_2Uiw_2(Tw_1 - Ti) + \\ Aw_3Uiw_3(Tw_3 - Ti) + Aw_4Uiw_4(Tw_4 - Ti) + \\ A_cU_c(T_c - Tai) \end{bmatrix}$$

7)Ceiling:

$$\frac{dTc}{dt} = \frac{Ac}{Cc} \left[Uc(Tai - Tc) \right]$$

NOMENCLATURE

- T temperature (o C)
- **Q** heat flux (W)
- A surface area (m-2)
- U thermal transmittance (Wm-2K-1)
- Ui inner thermal transmittance (Wm-2K-1)
- **Uo** outer thermal transmittance (Wm-2K-1)
- Uv ventilation thermal transmittance (WK-1)

Subscripts:

w1	external wall 1
w2	external wall 2
f	floor
c	ceiling
ai	air – internal
ao	air – external
S	solar
g	glazing
e	casual sources (internal heat gains)
р	plant

2.3.4 Μελέτη παραμέτρων του θερμικού μοντέλου

Οι εξισώσεις συνθέτουν ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει δυναμικά την απόκριση του κτιρίου σε διάφορες εισόδους κατά την πάροδο του χρόνου. Επομένως κρίνεται αναγκαία η ανάλυση των επιμέρους παραμέτρων του εν λόγω συστήματος.

Καταστάσεις (States)

Το σύστημα διαφορικών εξισώσεων ελέγχει οκτώ θερμοκρασίες που συνοψίζονται στον ακόλουθο πινάκα

Tw_1	Θερμοκρασία τοίχου με δείκτη ονομασίας 1
Tw ₂	Θερμοκρασία τοίχου με δείκτη ονομασίας 2
Tw3	Θερμοκρασία τοίχου με δείκτη ονομασίας 3
Tw4	Θερμοκρασία τοίχου με δείκτη ονομασίας 4
Tw5	Θερμοκρασία τοίχου με δείκτη ονομασίας 5
Tc	Θερμοκρασία τοιχώματος οροφής
Tf	Θερμοκρασία δαπέδου
Tai	Εσωτερική θερμοκρασία αέρα

<u>Είσοδοι</u>

Οι είσοδοι και έξοδοι του συστήματος παρουσιάζονται στους πινάκες που ακολουθούν

Qp	Θερμικό κέρδος του κτιρίου λόγω θέρμανσης (Q plant)
Qe	Θερμικό κέρδος του κτιρίου λόγω εσωτερικής κινητικότητας
Qs	Θερμικό κέρδος του κτιρίου λόγω ηλιακής ακτινοβολίας
Tao	Εξωτερική θερμοκρασία αέρα

Έξοδοι

Twall	Θερμοκρασία τοιχωμάτων
Tai	Εσωτερική θερμοκρασία αέρα

Το σύστημα αρχικά θα δέχεται τέσσερις εισόδους ενώ οι έξοδοι προς μελέτη είναι δυο. Ο αριθμός των εισόδων και εξόδων θα αλλάξει ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε προσομοίωσης αποτελεσμάτων.

2.3.5 Μελέτη θερμικών χαρακτηριστικών κτιρίου

Οι παράμετροι που σχετίζονται με τα θερμικά χαρακτηριστικά του κτιρίου προς μελέτη παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους ακόλουθους πίνακες.

α) Θερμικές αγωγιμότητες

Για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας του τοιχώματος του παρακάτω σχήματος έχουμε την ακόλουθη διαδικασία :



Η θερμική αντίσταση του τοιχώματος πολλαπλών στρώσεων υπολογίζεται από την σχέση : $R = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4}$, όπου d₁, d₂, d₃ και d₄ το πάχος των δομικών

στρωμάτων του τοιχώματος (σε μέτρα) και λ_1 , λ_2 , λ_3 και λ_4 οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας των αντιστοίχων στρωμάτων. Έχοντας γνωστή τη θερμική αντίσταση του τοιχώματος, η θερμική αγωγιμότητα προκύπτει από την σχέση

$$U = \frac{1}{R}$$

Οι ακριβείς τιμές για το κτίριο προς μοντελοποίηση παρατίθενται στο παράρτημα Α του συγγράμματος. Επομένως προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας όπου συνοψίζονται οι τιμές θερμοαγωγιμότητας των κτιριακών στοιχείων

Θερμοαγωγιμότητα	Παράμετρος	Αριθμητική τιμή (W / K·m ²)
Θερμική αγωγιμότητα της εσωτερικής τοιχοποιίας με δείκτη i=15	Uiwi	0.25
Θερμική αγωγιμότητα της εξωτερικής τοιχοποιίας με δείκτη i=15	Uowi	1.5
Θερμική αγωγιμότητα της εσωτερικής τοιχοποιίας της οροφής του κτιρίου	Uic	0.25
Θερμική αγωγιμότητα της εξωτερικής τοιχοποιίας της οροφής του κτιρίου	Uoc	1.5
Θερμική αγωγιμότητα δαπέδου	Uf	1.0
Θερμική αγωγιμότητα υαλοπινάκων	Ug	4.5
Θερμική αγωγιμότητα εισερχόμενου αέρα	Uv	2

<u>γ)Θερμοχωρητικότητες</u>

Θερμοχωρητικότητα ενός σώματος ή στοιχείου κατασκευής είναι η ικανότητά του να αποθηκεύει κάποια ποσότητα θερμότητας, όταν θερμαίνεται. Η ποσότητα της θερμότητας, η οποία αποθηκεύεται, αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του στοιχείου της κατασκευής και του αέρα που το περιβάλλει και είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα και η μάζα του στοιχείου.

Η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας εξωτερικού τοίχου, όταν ο εσωτερικός χώρος θερμαίνεται διαρκώς και η θερμοκρασία του αέρα είναι σταθερή, εξαρτάται κυρίως από τη θερμομονωτική ικανότητα του τοίχου και την εξωτερική θερμοκρασία. Όταν, όμως, η θέρμανση είναι περιοδική και η εξωτερική θερμοκρασία μεταβάλλεται, η θερμοκρασία αυτή επηρεάζεται και από τη θερμοχωρητικότητα του τοίχου. Στην περίπτωση όπου η θερμοχωρητικότητα είναι αυξημένη, ο ρυθμός θέρμανσης και ψύξης του χώρου είναι αργός και τις ζεστές ημέρες παρατηρείται ελαττωμένη θέρμανση του χώρου. Η αυξημένη θερμοχωρητικότητα συντελεί στην εξισορρόπηση της θερμοκρασίας κατά τις απότομες εναλλαγές θερμότητας-ψύχους.

Η θερμοχωρητικότητα των κτιριακών στοιχείων προς μελέτη (τοιχωμάτων, δαπέδου, οροφής) υπολογίζονται με βάση την ακόλουθη μαθηματική έκφραση:

$$C = V \cdot p \cdot c_p$$

όπου V ο όγκος του δομικού στοιχείου (σε m³), p η πυκνότητα μάζας του υλικού του δομικού στοιχείου (σε Kg/m³) και c_p ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας του εν λόγω υλικού (J/Kg·K). Οι ακριβείς τιμές παρατίθενται στο παράρτημα A του συγγράμματος.

Επομένως προκύπτει ο πίνακας που συνοψίζει τις τιμές θερμοχωρητικότητας των κτιριακών μας στοιχείων

Θερμοχωρητικότητα	Παράμετρος	Αριθμητική τιμή (σε J /K)
Θερμική χωρητικότητα του wall1	Cw1	12789000
Θερμική χωρητικότητα του wall2	Cw2	15603000
Θερμική χωρητικότητα του wall3	Cw3	14385000
Θερμική χωρητικότητα του wall4	Cw4	12789000
Θερμική χωρητικότητα του wall5	Cw5	4473000
Θερμική χωρητικότητα οροφής	Cc	17035000
Θερμική χωρητικότητα δαπέδου	Cf	63000000
Θερμική χωρητικότητα αέρα	Ca	635788

Κεφάλαιο 3° Υλοποίηση ισοδύναμου Μοντέλου κτιρίου RC στο Simulink

Στο Κεφάλαιο 1 θέσαμε το θεωρητικό υπόβαθρο της θερμικής συμπεριφοράς ενός κτιρίου και καταλήξαμε στη μεθοδολογία της αντιστοιχίας ενός ηλεκτρικού κυκλώματος RC με ένα θερμικό κύκλωμα . Ακολούθως πρόεκυψε η ακριβής συνδεσμολογία ενός θερμικού κυκλώματος που προσομοιώνει το κτίριο προς μελέτη και κατά συνέχεια οι μαθηματικές σχέσεις που το διέπουν.

Στο παρόν Κεφάλαιο έχοντας εξάγει το μαθηματικό μοντέλο του θερμικού κυκλώματος του κτιρίου, θα ασχοληθούμε με την προσομοίωση του σε ένα δυναμικό προγραμματιστικό περιβάλλον.

Η επίλογή του εργαλείου προσομοίωσης μας είναι το εργαλείο Simulink /Matlab.Το εργαλείο του Simulink μας δίνει τα δυνατότητα να μοντελοποιούμε, να προσομοιώνουμε και να αναλύουμε εν τέλει τη συμπεριφορά δυναμικών συστημάτων, διατηρώντας το πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της επαναχρησιμοποίησης (reusability) ενός συστήματος για μελλοντική χρήση σε ενός ευρύτερου ενδιαφέροντος ερευνητικό εγχείρημα.

Το πλεονέκτημα αυτό πηγάζει από την εν γένει λειτουργία του προγράμματος να διαχειρίζεται τα επιμέρους υποσυστήματα (ενός ευρύτερου δυναμικού συστήματος) ως ανεξάρτητα block- components που αλληλεπιδρούν.

Ανακύπτει η ανάγκη αρχικά να ορίσουμε επακριβώς τα επιμέρους components των υποσυστημάτων του κτιριακού μας μοντέλου

3.1 Στοιχεία Εισόδων του μοντέλου

Από την ανάλυση του μαθηματικού ισοδυνάμου του θερμικού κυκλώματος οι είσοδοι που δέχεται το κτιριακό μοντέλο είναι το θερμικό κέρδος του κτιρίου λόγω θέρμανσης (Qp), το θερμικό κέρδος κτιρίου λόγω εσωτερικής κινητικότητας (Qe), το θερμικό κέρδος του κτιρίου λόγω ηλιακής ακτινοβολίας (Qs) και η εξωτερική θερμοκρασία αέρα (Tao). Επόμενο μας μέλημα είναι η επιλογή των κατάλληλων block στο περιβάλλον του Simulink για την ακριβέστερη προσομοίωση των εισόδων.

3.1.1. Είσοδος Qp

Για το στοιχείο της εισόδου που εκφράζει το θερμικό κέρδος λόγω θέρμανσης , επιλέξαμε ένα block σταθερής τιμής στο χρόνο δηλαδή της μορφής

$$Qp(t) = c$$

όπου c σταθερά, που εκφράζει την ενέργεια που εισέρχεται σταθερά (σταθερή ποσότητα ανά μονάδα χρόνου) στο σύστημα μας λόγω θέρμανσης . Η επιλογή σταθερής θέρμανσης έγινε για την διευκόλυνση της προσομοίωσης και της ερμηνείας των αποτελεσμάτων της. Σχηματικά το block που την περιγράφει φαίνεται παρακάτω:

3.1.2. Είσοδος Qe

Το θερμικό κέρδος του κτιρίου λόγω εσωτερικής κινητικότητας στο κτίριο αναπαρίσταται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης με ένα block σταθερής τιμής στο χρόνο.

Η επιλογή της τιμής της σταθεράς επαφίεται στην κρίση μας μιας και η εσωτερική κινητικότητα του κτιρίου θα θεωρείται σταθερή για το διάστημα προσομοίωσης και θα λαμβάνει ενδεικτικές τιμές κατά περίπτωση (όπως Qe = 0 για την παραδοχή απουσίας ανθρώπων κατά το χρονικό διάστημα έλεγχου του συστήματος). Σχηματικά το block φαίνεται παρακάτω



όπου e η σταθερά που στη απλουστευμένη εκδοχή προσομοίωσης λαμβάνει μηδενική τιμή

3.1.3. Είσοδος Qs

Για την αναπαράσταση του θερμικού κέρδους του κτιρίου λόγω ηλιακής ακτινοβολίας στο κτίριο Qs, επιλεγούμε επίσης ένα block σταθερής τιμής

$$Qs(t) = s$$

Όπου s σταθερή τιμή για το διάστημα προσομοίωσης. Ισχύει η παραδοχή πως η ηλιοφάνεια κατά τη διάρκεια έλεγχου του συστήματος θα διατηρείται στα ίδια επίπεδα. Σχηματικά έχουμε

3.1.4. Είσοδος Ταο

To component της εισόδου που αναπαριστά την εξωτερική θερμοκρασία του αέρα (Tao) είναι ένα block μιας συνάρτησης τυχαίας γεννήτριας θερμοκρασιών με Gaussian κατανομή και σχηματικά φαίνεται παρακάτω. Υποθέτουμε πως οι μεταβολές θερμοκρασίας μέσα σε μια τυπική ημέρα είναι αρκετά μικρές με variance που κυμαίνεται στους 3 βαθμούς Κελσίου.

Αν μειώσουμε το χρονικό εύρος προσομοίωσης του συστήματος μας (από 24 ώρες σε χρονικό πεδίο 6 ωρών) τότε η τυχαία γεννήτρια θερμοκρασιών αποκτά φυσικό νόημα και εξυπηρετεί τη διαδικασία προσομοίωσης του συστήματος.

Σχηματικά το στοιχείο εξωτερικής θερμοκρασίας έχει την ακόλουθη μορφή



3.2 Στοιχείο του Κτιριακού μοντέλου

Το βασικό στοιχείο του συστήματος μας όπως είναι αντιληπτό θα είναι αυτό που θα αναπαριστά την παρουσία του κτιρίου .

Σύμφωνα με τις μαθηματικές σχέσεις που προέκυψαν στο Κεφάλαιο 1 το θερμικό κύκλωμα για το κτίριο αναπαρίσταται από ένα σύστημα γραμμικών διαφορικών εξισώσεων της μορφής

$$\begin{array}{rcl} & & \\ x & = & A x + B u \\ y & = & C x + D u \end{array}$$

και συμβολίζεται με το ακόλουθο block

$$\begin{array}{c} x^{i} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{array}$$

όπου x το διάνυσμα καταστάσεων του συστήματος, u το διάνυσμα εισόδων και y to διάνυσμα εξόδων. Οι διαστάσεις των πινάκων A,B,C και D πρέπει να είναι

- Ο Α είναι πίνακας ν×ν ,όπου ν=8 ο αριθμός καταστάσεων του συστήματος
- O B eínai pínakaz n×m ,ópou m=4 o aribmós eisódwn tou sustímatos
- Ο C είναι πίνακας κ×ν ,όπου κ=8 ο αριθμός εξόδων του συστήματος
- Ο D είναι πίνακας κ×μ

Επομένως σύμφωνα με τις σχέσεις του Κεφαλαίου 1 προκύπτει πως για το σύστημα μας οι πίνακες A,B,C και D θα έχουν ως εξής.

$$A = \begin{bmatrix} a_{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{2} \\ 0 & a_{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{4} \\ 0 & 0 & a_{5} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{6} \\ 0 & 0 & 0 & a_{7} & 0 & 0 & 0 & a_{8} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{9} & 0 & 0 & a_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{11} & 0 & a_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{13} & a_{14} \\ a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} & a_{19} & a_{20} & a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$
$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & b_{1} \\ 0 & 0 & 0 & b_{2} \\ 0 & 0 & 0 & b_{3} \\ 0 & 0 & 0 & b_{4} \\ 0 & 0 & 0 & b_{5} \\ 0 & 0 & 0 & b_{6} \\ 0 & 0 & 0 & b_{11} \end{bmatrix}$$

C = I, όπου I ο μοναδιαίος πίνακας με διαστάσεις 8×8

D = O, ο μηδενικός πίνακας

Το υποσύστημα των διαφορικών εξισώσεων δέχεται ένα διάνυσμα εισόδων ως είσοδο , ενώ η έξοδος του είναι επίσης ένα διάνυσμα με διαστάσεις που προκύπτουν από τις διαστάσεις των πινάκων A, B, C και D.

Άρα σχηματικά θα έχουμε το υποσύστημα των διαφορικών εξισώσεων που θα έχει την ακόλουθη μορφή



Η δυνατότητα του Simulink να αξιοποιεί το προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab μας παρέχει τον τρόπο να αρχικοποιήσουμε το στοιχείο του κτιρίου με τη βοήθεια κώδικα, που ουσιαστικά υποδεικνύει τη θερμική συμπεριφορά του. Μέσω της επιλογής mask subsystem ουσιαστικά δημιουργούμε ένα υποσύστημα με την διαδικασία που φαίνεται παρακάτω.

Θέτουμε νέα εικόνα για το στοιχείο του κτιρίου (building)

Mask Editor : Subsystem1
Icon Parameters Initialization Documentation
Icon options Drawing commands
Frame = image (imread('homepic.jpg'))
Visible
Transparency 4 III >
Onaque
Examples of drawing commands
Command port_label (label specif •
Syntax port_label('output', 1, 'xy')
Unmask OK Cancel Help Apply

Αρχικοποιούμε το μοντέλο μας με τον κώδικα που υλοποιεί ουσιαστικά το γραμμικό σύστημα διαφορικών εξισώσεων

Mask Editor : Subsystem1
Icon Parameters Initialization Documentation
Dialog Initialization commands
Initialization
Allow library block to modify its contents
Unmask OK Cancel Help Apply

Αφού το υποσύστημα μας έχει δημιουργηθεί και αρχικοποιηθεί με βάση το σύστημα διαφορικών εξισώσεων για το θερμικό κύκλωμα του κτιρίου, επόμενο μας βήμα είναι να δώσουμε παραμέτρους στο block του state space. Οπότε μέσω του παραθύρου που ακολουθεί σχηματικά δίνουμε τιμές στους πίνακες A,B,C,D (ουσιαστικά παραπέμπουμε στο κώδικα αρχικοποίησης Initialization.m και στα αντίστοιχα A,B,C,D που ορίζονται εκεί.). Στο σχήμα φαίνεται η ακόλουθη διαδικασία.

🙀 Function Block Parameters: State-Space	x
State Space	
State-space model: dx/dt = Ax + Bu	
y = Cx + Du	
Parameters	
A:	
В:	
В	
C:	
С	
D:	
D	
Initial conditions:	
0	
Absolute tolerance:	
auto	
State Name: (e.g., 'position')	
OK Cancel Help Apply	

Επομένως το στοιχείο που εμπεριέχει και το block του State space υποσυστήματος , είναι το στοιχείο του κτιρίου και δείχνει ως εξής .



3.3 Στοιχεία Εξόδων του μοντέλου

Οι έξοδοι του θερμικού κυκλώματος του κτιρίου μας θα είναι οι θερμοκρασίες των τοιχωμάτων, της οροφής του δαπέδου και του αέρα εσωτερικά του κτιρίου.

Επόμενο μας μέλημα είναι η επιλογή των κατάλληλων block στο περιβάλλον του Simulink για την ακριβέστερη προσομοίωση των εξόδων.

To block που εξυπηρετεί την άμεση παρατήρηση των αποτελεσμάτων των εξόδων είναι αυτό του Scope.

Το συνολικό μοντέλο για την στοιχειώδη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου δίνεται από την παρακάτω εικόνα:



Κεφάλαιο 4° Προσομοίωση αποτελεσμάτων του μοντέλου Hudson^[1]

4.1 Μελέτη της Ευστάθειας RC Μοντέλου και επιλογή αρχικών συνθηκών.

Για την μελέτη της ευστάθειας του συστήματος μας, μια αξιόπιστη επιλογή μεθόδου είναι η μελέτη των ιδιοτιμών του πίνακα **A** (όπου ο πίνακας A προκύπτει από το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων) που περιγράφουν εν γένει τη δυναμική λειτουργία του εν λόγω κτιρίου σύμφωνα με τις προσεγγίσεις και τις παραδοχές που έχουν γίνει ως τώρα.

4.1.1 Μελέτη των ιδιοτιμών

Για να αποδειχτεί ότι το σύστημα μας έχει δομηθεί με την ιδιότητα της ευστάθειας αρκεί οι ιδιοτιμές του πίνακα Α να ανήκουν στο αριστερό ημιεπίπεδο (να παρουσιάζουν αρνητική τιμή).

Με την εντολή eig(A) λαμβάνουμε απευθείας την κατάσταση των ιδιοτιμών του συστήματος μας. Το διάνυσμα Λ μας δίνει τις ιδιοτιμές του πίνακα A.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -0.6390 \times 10^{-3} \\ -0.0012 \times 10^{-3} \\ -0.0083 \times 10^{-3} \\ -0.0081 \times 10^{-3} \\ -0.0137 \times 10^{-3} \\ -0.0083 \times 10^{-3} \\ -0.0083 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι προφανές ότι το σύστημα μας χαρακτηρίζεται από ευστάθεια αφού οι ιδιοτιμές του λαμβάνουν αρνητική αριθμητική τιμή.

4.1.2 Αρχικές συνθήκες προσομοίωσης

Η επιλογή αρχικών συνθηκών του κτιρίου είναι ένα ζήτημα που σχετίζεται άμεσα με την επιλογή του χρονικού διαστήματος προσομοίωσης του μοντέλου. Η αρχική εσωτερική θερμοκρασία αέρα θα μπορούσε κάλλιστα να τεθεί ίση με τις αρχικές θερμοκρασίες των κτιριακών στοιχείων (τοιχωμάτων, δαπέδου, οροφής). Μια τέτοια θεώρηση θα ήταν σωστή για προσομοίωση σε βάθος χρόνου ενώ για μικρά διαστήματα προσομοίωσης θα είχε άμεσο αντίκτυπο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Δεδομένου πως το χρονικό διάστημα προσομοίωσης του μοντέλου μας είναι τέτοιο ώστε η αρχική τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα να μην επηρεάζει εν

γένει το σύνολο των αποτελεσμάτων, θέτουμε ως αρχική τιμή την ενιαία αρχική θερμοκρασία των κτιριακών στοιχείων που ισούται με 16 C°

4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Για την ενδελεχή μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς του μοντέλου μας σε περιβάλλον Simulink κρίνεται αναγκαίο να επιλέξουμε διάφορες περιπτώσεις βασισμένες στην μορφή των εισόδων καθώς και στο διάστημα προσομοίωσης. Οι δυο κύριες είσοδοι σύμφωνα με τις παραδοχές που κάναμε στο Κεφάλαιο 2 θα είναι το θερμικό κέρδος του κτιρίου λόγω παροχής θέρμανσης (Qp) και η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος Tao.

4.2.1 Μηδενική παροχή ενέργειας (Qp=0)

Θεωρούμε αρχικά πως το κτίριο δεν θερμαίνεται καθ όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Όποτε δεδομένου ότι Qp=0 έχουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις

 i) Η εξωτερική θερμοκρασία δίνεται από ημιτονοειδή συνάρτηση με πλάτος ίσο με 4 C° αρχική θερμοκρασία ίση με 20 C° και περίοδο ίση με 12 ώρες. Με μορφή διαγράμματος έχουμε το σχήμα της Εικονας 4.1



Εικόνα 4.1: Εξωτερική θερμοκρασία αέρα

Η έξοδος που συνοψίζει διαγραμματικά την θερμοκρασία τοιχωμάτων, δαπέδου, οροφής καθώς και την εσωτερική θερμοκρασία αέρα φαίνεται ακολούθως στο σχήμα 4.2



Εικόνα 4.2: Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα ,τοιχωμάτων , δαπέδου και οροφής

 ii) Η εξωτερική θερμοκρασία δίνεται από συνάρτηση τυχαίας κατανομής θερμοκρασιών με μέση τιμή για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης ίση με 20 C°
 και variance τιμών ίσο με 3 C° και έχει την μορφή του ακόλουθου σχήματος 4.3



Εικόνα 4.3: Εξωτερική θερμοκρασία αέρα με τυχαία κατανομή

Η έξοδος του συστήματος για την περίπτωση τυχαίας κατανεμημένης θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε συνδυασμό με Qp = 0 θα είναι:



Εικόνα 4.4: Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα με είσοδο εξωτερική θερμοκρασία τυχαίας κατανομής

4.2.2 Παροχή ενέργειας με μορφή παλμικής εισόδου

Αφού εξετάσαμε την απλή περίπτωση όπου στο σύστημα μας δεν παρέχεται ενέργεια λόγω θέρμανσης (δηλαδή Qp = 0 watt) και αποκτήσαμε σαφή εικόνα για την μορφή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στη συνέχεια ανακύπτει το ενδεχόμενο η είσοδος να ακολουθεί την λογική on-off heating ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Μια τέτοια λογική μπορεί να αναπαρασταθεί από μια παλμική είσοδο με σταθερό πλάτος και περίοδο.

Για την διαδικασία προσομοίωσης θέτουμε ως πλάτος Qp = 4000 Watt ενώ η περίοδος παλμού αρχικά θα είναι ίση με 6 ώρες. Σχηματικά για τη παλμική είσοδο έχουμε το σχήμα της Εικόνας 4.5





Με δεδομένη την παλμική είσοδο του σχήματος 4.5 εξετάζουμε ξανά τις διάφορες περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος θα έχει η ημιτονοειδή μορφή όπως αυτή του σχήματος 4.1, τυχαία κατανομή όπως του σχήματος 4.3 η τη περίπτωση σταθερής θερμοκρασίας. Για τις τρεις αυτές επιλογές έχουμε τα αντίστοιχα γραφήματα των σχημάτων 4.6, 4.7 και 4.8.



Εικόνα 4.6: Θερμοκρασία αέρα με παλμική είσοδο και ημιτονοειδή εξωτερική θερμοκρασία



Εικόνα 4.7: Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα με παλμική είσοδο και εξωτερική θερμοκρασία τυχαίας κατανομής



Εικόνα 4.8: Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα με παλμική είσοδο και σταθερή εξωτερική θερμοκρασία

Μια πρώτη εκτίμηση είναι πως η θερμική συμπεριφορά του κτιρίου εξαρτάται άμεσα από την περίοδο της παλμικής εισόδου. Μειώνοντας την περίοδο του παλμού από την αρχική τιμή των 6 ωρών στην νέα τιμή της 1 ώρας τα γραφήματα της εξόδου υφίστανται τις παρακάτω αλλαγές όπως καταδεικνύουν τα γραφήματα των εικόνων 4.10, 4.11 και 4.12.



Εικόνα 4.10: Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα με παλμική είσοδο μικρότερης περιόδου και ημιτονοειδή εξ. θερμοκρασία



Εικόνα 4.11: Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα με παλμική είσοδο μικρότερης περιόδου και εξ. θερμοκρασία τυχαίας κατανομής



Εικόνα 4.12: Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα με παλμική είσοδο μικρότερης περιόδου και σταθερή εξωτερική θερμοκρασία

Γίνεται άμεσα αντιληπτό πως για μικρότερες χρονικά περιόδους του παλμού της θερμικής εισόδου, το κτιριακό σύστημα παρουσιάζει μια σταδιακή αύξηση θερμοκρασίας.

Μελετώντας το γράφημα της Εικόνας 4.12 Όπου η εξωτερική θερμοκρασία παραμένει σταθερή καθ όλη τη διάρκεια προσομοίωσης , παρατηρούμε αύξηση σχεδόν ενός βαθμού κελσίου τόσο στην εσωτερική θερμοκρασία αέρα, όσο και στα τοιχώματα του κτιρίου. Επομένως ένα αρχικό εύλογο συμπέρασμα είναι πως η προαναφερθείσα αύξηση θερμοκρασίας θα μπορούσε δυνητικά να είναι μεγαλύτερη αν η περίοδος του θερμικού παλμού ήταν μικρότερη ή αν τα κτιριακά στοιχεία χαρακτηριζόταν από μικρότερη θερμοχωρητικότητα, μιας και εξ ορισμού η θερμοχωρητικότητα σχετίζεται άμεσα με το ποσό ενέργειας που απαιτείται για να μεταβληθεί η θερμοκρασία ενός σώματος.

Κεφάλαιο 5° Θερμικό μοντέλο συγκερασμού μεθοδολογιών $Hudson^{[1]} - Mendes^{[2]}$

Στο Κεφάλαιο 3 εξετάσαμε τη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου βασιζόμενοι στη μεθοδολογία του Hudson.

Μια πιο λεπτομερής προσέγγιση του προβλήματος θα απαιτούσε να εξετάσουμε και τη συμπεριφορά του κτιριακού μοντέλου όταν υπεισέρχονται σε αυτό παράγοντες όπως στοιχεία θερμικού κέρδους του κτιρίου καθώς και φαινόμενα θερμικής ακτινοβολίας.

Για αυτή τη περίπτωση προσαρμόσαμε στο αρχικό μοντέλο, που βασίστηκε ως επί το πλείστον στην μεθοδολογία του Hudson, νέες μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφουν την λειτουργία ενός θερμικού στοιχείου (π.χ θερμαντήρα) καθώς και ενός αισθητήρα για την μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα εντός του κτιρίου.

5.1 Μεθοδολογία Mendes για την ανάπτυξη θερμικού μοντέλου κτιρίου.

Το θερμικό μοντέλο κτιρίου που προτείνει ο Mendes αναφέρεται στην περίπτωση κτιρίων υψηλής θερμοχωρητικότητας. Η κυκλωματική περιγραφή του κτιρίου με βάση αυτή τη μεθοδολογία, συνοψίζεται σε ένα μοντέλο πολλαπλής διαστρωμάτωσης. Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το κυκλωματικό ανάλογο του κτιρίου με m επιφάνειες είναι της μορφής:

$$\rho_{A}c_{A}V_{A}\frac{dT_{A}(t)}{dt} = \sum_{i=1}^{m} h_{int}A_{i}[T_{n,i}(t) - T_{A}(t)] + h_{c}A_{c}[T_{c}(t) - T_{A}(t)] + D(t),$$

όπου ρ_A , c_A , V_A , $T_{n,i}$ (t), h_{int} και A_i είναι αντίστοιχα, η πυκνότητα του αέρα (σε kg/m³), η ειδική θερμοχωρητικότητα (J/kg·K), ο όγκος κτιρίου (σε m³), η θερμοκρασία του n στρώματος του τοίχου i (σε °C), ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω μεταφοράς (σε W/m·K) και η i επιφάνεια του κτιρίου (σε m²).

Ο όρος D(t) εκφράζει τη θερμότητα που ανταλλάσσεται μέσω του εξωτερικού αέρα διαμέσου παραθύρων και θυρών του κτιρίου , καθώς και το θερμικό κέρδος λόγω εσωτερικής κινητικότητας, φωτισμού και εξοπλισμού του κτιρίου. Αναλυτικά δίνεται από τη σχέση

$$D(t) = \sum_{j=1}^{m} \frac{T_{eq}(t) - T_A(t)}{R_j} + q_p + q_e + q_I$$

όπου q_p ,q_e ,q_I είναι τα ενεργειακά κέρδη (se Watt) λόγω παρουσίας ανθρώπων, κτιριακού εξοπλισμού και φωτισμού και Rj θερμική αντίσταση της j επιφάνειας μικρής θερμοχωρητικότητας (σε m²·K/W). Για κάθε διαστρωμάτωση k του τοίχου i προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση διατήρησης ενέργειας .

$$\rho_{k,i} c_{k,i} V_{k,i} \frac{dT_{k,i}(t)}{dt} = K_{k+1,i} A_i \Big[T_{k+1,i}(t) - T_{k,i}(t) - K_{k,i} A_i \Big[T_{k,i}(t) - T_{k-1,i}(t) \Big],$$

όπου ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας Κ προκύπτει από τη σχέση

$$K_{k,i} = \frac{1}{(L_{k-1,i}/2)/\lambda_{k-1,i} + (L_{k,i}/2)/\lambda_{k,i}}$$

με $L_{k,i}$ να εκφράζει το πάχος του στρώματος k (σε m) και $\lambda_{k,i}$ την αντίστοιχη θερμική αγωγιμότητα ($W/m^2 \cdot K$).

Η θερμοκρασία του εξωτερικού στρώματος κάθε τοίχου δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση αρχικής συνθήκης .

$$K_{1,i}(T_{2,i} - T_{1,i}) = h_{ext}(T_{1,i} - T_{eq})$$

με Τ_{eq} την ισοδύναμη θερμοκρασία λόγω παρουσίας ηλιακής ακτινοβολίας

$$T_{eq} = T_{ext} + \frac{\alpha I}{h_{ext}}$$

με α την ικανότητα απορρόφησης θερμότητας της εξωτερικής επιφάνειας του τοίχου, Ι η συνολική ηλιακή ακτινοβολία και h_{ext} ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω μεταφοράς.

Η θερμοκρασία του εσωτερικού στρώματος κάθε τοίχου δίνεται αντίστοιχα από την ακόλουθη εξίσωση αρχικής συνθήκης.

$$\begin{split} K_{n,i}A_{i}(T_{n-1,i} - T_{n,i}) &= h_{\text{int}}A_{i}(T_{n,i}(t) - T_{A}(t)) + \\ \sigma\varepsilon_{c}A_{c}F_{s,c-i}[T_{n,i}^{4}(t) - T_{c}^{4}(t)] + \\ \sigma\varepsilon_{i}A_{i}\sum_{j=1}^{m}F_{s,j-i}[T_{n,i}^{4}(t) - T_{n,j}^{4}(t)] \end{split}$$

όπου σ,ε και Fs η σταθερά Stefan-Boltzman ,η θερμική ακτινοβολία και ο παράγοντας σχήματος του αντικείμενου (shape factor).

5.1.1 Μαθηματική περιγραφή του θερμαντήρα και αισθητήρα

Η μαθηματική έκφραση που μας παρέχει τη θερμοκρασία του θερμαντήρα δίνεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση.

$$p_c c_c V_c \frac{dT_c(t)}{dt} = Q(t) - h_c A_c [T_c(t) - T_A(t)]$$
$$-\sigma \varepsilon A_c [T_c(t)^4 - T_w(t)^4]$$

Εξίσωση 5.1 Διαφορική εξίσωση της θερμοκρασίας του θερμαντήρα

όπου p_c η πυκνότητα μάζας, c_c η ειδική θερμοχωρητικότητα ,Vc ο όγκος , h_c ο συντελεστής θερμοπερατότητας και Ac η επιφάνεια του θερμαντήρα. Οι σταθερές σ και ε εκφράζουν αντίστοιχα τη σταθερά Stefan-Boltzman και την

Οι σταθερες σ και ε εκφραζουν αντιστοιχα τη σταθερα Stefan-Boltzman και την ικανότητα ακτινοβολίας του υλικού του θερμαντήρα.

Όπως είναι διαισθητικά αντιληπτό από την παραπάνω εξίσωση, σημαντικός όρος αποτελεί ο Q(t) ο οποίος εκφράζει το ρυθμό παραγωγής ενέργειας στο εσωτερικό του θερμαντήρα εξαιτίας της επίδρασης του φαινομένου του Joule.

Ο όρος

$$Q_{radiation} = \sigma \varepsilon A_c [T_c(t)^4 - T_w(t)^4]$$

εκφράζει ουσιαστικά το ποσό ενέργειας που διαφεύγει από την επιφάνεια του θερμαντήρα λόγω φαινομένων θερμικής ακτινοβολίας.

Ο παραπάνω όρος δε θα εισαχθεί άμεσα στο σύστημα διαφορικών εξισώσεων αλλά θα αναπαρασταθεί από κυκλωματική διάταξη στο περιβάλλον Simulink ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ της εσωτερικής θερμοκρασίας αέρα με ύπαρξη θερμικής ακτινοβολίας η μη.

Η μαθηματική έκφραση , που μας παρέχει τη θερμοκρασία του αισθητήρα δίνεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση

$$\rho_s c_s V_s \frac{dT_s(t)}{dt} = h_s A_s [T_A(t) - T_S(t)]$$

Εξίσωση 5.2 Διαφορική εξίσωση της θερμοκρασίας του αισθητήρα

όπου p_s η πυκνότητα μάζας, c_s η ειδική θερμοχωρητικότητα ,Vs ο όγκος , h_s ο συντελεστής θερμοπερατότητας και As η επιφάνεια του αισθητήρα. Οι θερμικές ιδιότητες του θερμαντήρα και αισθητήρα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.

	Πυκνότητα Ρ (Kg/m ³)	Ειδική θερμοχωρητικότητα C (J /Kg-K)	Όγκος V (m ³)	Συντελεστής Θερμοπερατότη τας h (W/m ² -K)	Επιφάνεια Α (m ²)
Θερμαντήρας	884,1	1909	0,002	5	5
Αισθητήρας	8933	385	1,26*10 ⁻⁵	5	4,2*10 ⁻⁹

Πίνακας 5.1	Θερμικές	ιδιότητες	θερμαντήρα	-αισθητήρα
-------------	----------	-----------	------------	------------

5.1.2 Δημιουργία μοντέλου με συγκερασμό μεθοδολογιών Hudson-Mendes.

Ουσιαστικά, με τη μεθοδολογία που ανέπτυξε ο Mendes λαμβάνουμε ως καταστάσεις του συστήματος διαφορικών εξισώσεων, τις θερμοκρασίες ανάμεσα στις διαστρωματώσεις εντός των τοιχωμάτων και γενικότερα των κτιριακών μελών του κτιρίου.

Γίνεται αντιληπτό επομένως, ότι για να ελέγξουμε τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα, έχουμε αύξηση των καταστάσεων του συστήματος διαφορικών εξισώσεων που εκφράζει με μαθηματικούς όρους το θερμικό μοντέλο. Η αύξηση αυτή θα είναι τάξης m, όπου m o αριθμός των εσωτερικών στρωμάτων της τοιχοποιίας. Συνεπώς με βάση τη μεθοδολογία του Mendes οι καταστάσεις που θα έπρεπε να ελέγξουμε συνολικά και αφορούν τις θερμοκρασίες των τοιχωμάτων θα είναι

7 (αριθμός τοιχωμάτων) * 5 (αριθμός στρωματώσεων) = 32 καταστάσεις

Συγκρίνοντας το σύστημα διαφορικών εξισώσεων που προκύπτει με τη μεθοδολογία Mendes με το αντίστοιχο της μεθοδολογίας Hudson παρατηρούμε μια εμφανή αύξηση των καταστάσεων που πρέπει να ελέγχει το θερμικό μοντέλο μας (από 7 σε 32) για να εξάγει ουσιαστικά την ίδια έξοδο της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα.

Στο νέο μοντέλο που προκύπτει με συγκερασμό των δυο μεθοδολογιών χρησιμοποιούμε τις διαφορικές εξισώσεις 1-7 του Κεφαλαίου 1 που απαιτούνται για την εξαγωγή και τον έλεγχο της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα και εν συνεχεία προσαρμόζουμε τις εξισώσεις 5.1 και 5.2 στο υπάρχον γραμμικό σύστημα διαφορικών εξισώσεων.

5.2 Επιλογή αρχικών συνθηκών προσομοίωσης

Η επιλογή αρχικών συνθηκών του κτιρίου είναι ένα ζήτημα που σχετίζεται άμεσα με την επιλογή του χρονικού διαστήματος προσομοίωσης του μοντέλου.

Στη παρούσα μεθοδολογία θέτουμε ως διάστημα προσομοίωσης ένα χρονικό διάστημα τεσσάρων ημερών. Η επιλογή του συγκεκριμένου διαστήματος έγινε λαμβάνοντας υπόψη πως είναι επαρκές έτσι ώστε να εξαλειφτεί η επήρεια των αρχικών συνθηκών των κτιριακών στοιχείων (τοιχώματα, οροφή, δάπεδο) στα αποτελέσματα της εξόδου του μοντέλου μας.

Η αρχική θερμοκρασία των κτιριακών στοιχείων τίθεται ίση με 13 ^OC και ταυτίζεται με την αρχική εξωτερική θερμοκρασία ενώ η περίοδος της ημιτονοειδούς συνάρτησης που αποδίδει την εξωτερική θερμοκρασία τίθεται ίση με 12 ώρες. Το γεγονός αυτό εξυπηρετεί τη διαδικασία προσομοίωσης μιας και αποφεύγεται το αρχικό διάστημα εξισορρόπησης της εξωτερικής θερμοκρασίας με τη θερμοκρασία των κτιριακών στοιχείων.

5.3 Συνδεσμολογία του κτιριακού μοντέλου σε περιβάλλον Simulink

Η προσθήκη των επιπλέον δυο διαφορικών εξισώσεων 4.1 και 4.2 στο ήδη υπάρχον γραμμικό σύστημα του Κεφαλαίου 2 ,όπως ήταν αναμενόμενο, επιφέρει αλλαγές στη διαδικασία αρχικοποίησης του κτιριακού μοντέλου.

Η αλλαγή επικεντρώνεται στους πίνακες συντελεστών A ,B ,C και D του γραμμικού συστήματος διαφορικών εξισώσεων. Ο κώδικας αρχικοποίησης του συστήματος μας παρατίθεται στο παράρτημα του Κεφαλαίου 4. Όσον αφόρα την αρχική διάταξη προσομοίωσης του νέου μοντέλου επιλεγούμε την διάταξη του σχήματος Κεφάλαιο 2 με τη διαφορά πως το σύστημα μας αρχικοποιείται πλέον από τους νέους πίνακες συντελεστών.

Σχηματικά το σύστημα μας δίνεται από το ακόλουθο σχήμα της εικόνας 5.1



Εικόνα 5.1 Simulink block της αρχικής διάταξης προσομοίωσης

Μια αρχική εκτίμηση για τη θερμική συμπεριφορά του μοντέλου προκύπτει εάν υποθέσουμε πως η μοναδική είσοδος του συστήματος είναι η εξωτερική θερμοκρασία ημιτονοειδούς μορφής της εικόνας 4.3 και οι υπόλοιπες είσοδοι έχουν αρχικά παραβλεφθεί.

Η εσωτερική θερμοκρασία αέρα, η θερμοκρασία τοιχωμάτων και η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος δίνονται σχηματικά στην εικόνα 5.2



Air Internal temperature without qplant

Εικόνα 5.2 : Διάγραμμα εσωτερικής -εξωτερικής θερμοκρασίας

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει το αρχικό συμπέρασμα πως η εσωτερική θερμοκρασία αέρα ακολουθεί την ημιτονοειδή μορφή της εξωτερικής θερμοκρασίας με μια διαφορά φάσης καθώς και με μειωμένο πλάτος ημιτονοειδούς παλμού.

Η εσωτερική θερμοκρασία αέρα λαμβάνει την ανώτερη τιμή της θερμοκρασίας Tpeak = 16.21 °C κατά τη χρονική στιγμή t = 4.86 h , ενώ αντίστοιχα η μέγιστη εξωτερική θερμοκρασία Text_peak = 19 °C λαμβάνει χώρα κατά τη χρονική στιγμή t = 4.36 h .

Παρατηρούμε λοιπόν μια διαφορά φάσης ίση με μισή ώρα καθώς και με διαφορά μέγιστης θερμοκρασίας της τάξης των 2.8 °C, γεγονός που συνάδει με την επίδραση της θερμοχωρητικότητας και το σύνολο των θερμικών ιδιοτήτων του κτιριακού όγκου.

Δεδομένων των παραπάνω εισόδων του συστήματος συγκρίνουμε την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα που προκύπτει από το μοντέλο Hudson με την αντίστοιχη της μεθοδολογίας του Mendes. Οι κυματομορφές των δυο εξόδων παρουσιάζονται στο διάγραμμα της εικόνας 5.3



Hudson-Mendes Internal Temperature Comparison

Εικόνα 5.3 : Διάγραμμα σύγκρισης εσωτερικής θερμοκρασίας Mendes Hudson

Παρατηρούμε μια μικρή απόκλιση στο πλάτος των δυο κυματομορφών της τάξης των 0.2 °C καθώς και μια αμελητέα διαφορά φάσης της τάξης των 5 λεπτών, γεγονός που οφείλεται στην παρουσία του θερμαντήρα και αισθητήρα το νέο σύστημα προς μελέτη.

5.4 Επίδραση θερμοχωρητικότητας των κτιριακών υλικών.

Η θερμοχωρητικότητα των κτιριακών υλικών έχει άμεσο αντίκτυπο στη μεταβολή των αποτελεσμάτων του συστήματος που υλοποιήσαμε.

Ο παραπάνω ισχυρισμός τεκμηριώνεται εάν μεταβάλλουμε την θερμοχωρητικότητα των κτιριακών υλικών κατά μια τάξη μεγέθους και μελετήσουμε την επίδραση των αλλαγών στην εσωτερική θερμοκρασία αέρα του κτιρίου. Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτει το διάγραμμα της εικόνας 5.4.



Εικόνα 5.4 : Επίδραση θερμοχωρητικότητας στην εσωτερικής θερμοκρασία αέρα

5.5 Μοντελοποίηση θερμικής ακτινοβολίας του θερμαντήρα

Όπως προαναφέραμε η μαθηματική σχέση που αποτυπώνει τη θερμική ακτινοβολία του θερμικού στοιχείου του συστήματος μας, δίνεται από τον όρο

$$Q_{radiation} = \sigma \varepsilon A_c [T_c(t)^4 - T_w(t)^4]$$

Η θερμική ακτινοβολία που περιγράφεται από την παραπάνω σχέση υλοποιήθηκε στο περιβάλλον Simulink ως αυτοτελές component και έχει το ρόλο της εισόδου στο σύστημα του κτιριακού μοντέλου. Ουσιαστικά απομονώνουμε τις εξόδους που περιγράφουν τη θερμοκρασία του θερμαντήρα και τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων του κτιρίου και υλοποιούμε κατά αυτόν τον τρόπο την αφαίρεση του παραπάνω μαθηματικού όρου. Εν συνεχεία χρησιμοποιούμε το block κέρδους για να αποδώσουμε το γινόμενο του όρου. Σχηματικά έχουμε



Εικόνα 5.5 : Simulink block της θερμικής ακτινοβολίας

Επομένως το μοντέλο του κτιρίου σε περιβάλλον Simulink με την παρουσία της επίδραση θερμικής ακτινοβολίας του θερμικού στοιχείου θα είναι το ακόλουθο



Εικόνα 5.6 : Simulink block του συνολικού μοντέλου Mendes

5.6 Υλοποίηση συστήματος έλεγχου θερμοκρασίας με χρήση on off controller

Η υλοποίηση του κτιριακού μοντέλου που περιγράψαμε έως τώρα, μας οδηγεί εύλογα στη σκέψη δημιουργίας ενός συστήματος έλεγχου της εσωτερικής θερμοκρασίας αέρα. Χρησιμοποιώντας το block της εικόνας 5.6 λαμβάνουμε το σύστημα έλεγχου θερμοκρασίας της εικόνας 5.7



Εικόνα 5.7 : Simulink block του συστήματος έλεγχου θερμοκρασίας

Όπως παρατηρούμε, ο έλεγχος πραγματοποιείται από έναν θερμοστάτη για τη δημιουργία του οποίου συνθέσαμε το παρακάτω component



Thermostat Subsystem

Η θερμοκρασία αναφοράς του relay του ελεγκτή έχει οριστεί στους 22 °C και το κατώφλι έλεγχου του θερμοστάτη ορίζεται στον 1 °C. Ο θερμοστάτης έχει δυαδική έξοδο 0 και 1. Η έξοδος του θερμοστάτη λαμβάνει τιμή 1 όταν η διαφορά εσωτερικής θερμοκρασίας αέρα και set point είναι μικρότερη του κατωφλίου έλεγχου, ενώ σε αντίθετη περίπτωση λαμβάνει τιμή 0. Άρα εφόσον η διαφορά θερμοκρασίας παραμένει μικρότερη του ενός βαθμού κελσίου το θερμικό στοιχείο μένει ανοικτό προσδίδοντας ενέργεια στο κτίριο.

Στο διάγραμμα της εικόνας 5.8 δίνεται οπτικά η επίδραση του ελεγκτή ανοικτό-κλειστό (on-off) στην εσωτερική θερμοκρασία αέρα σε συνάρτηση με το χρόνο.



Air Internal temperature with an on-off controller

Εικόνα 5.8 : Εσωτερική θερμοκρασία αέρα με τη παρουσία on-off controller

Η κυματομορφή της εσωτερικής θερμοκρασίας αέρα γίνεται πιο διακριτή εάν απομονώσουμε το χρονικό διάστημα από 6h έως 9.5h, όπως παρατηρούμε στην εικόνα 5.9.



Εικόνα 5.9 : Εσωτερική θερμοκρασία αέρα με τη παρουσία on-off controller

5.7 Μελέτη επίδρασης ακτινοβολίας με τη χρήση on off controller

Στην παράγραφο 5.5 εισάγαμε στο αρχικό μοντέλο της μεθοδολογίας τον όρο της θερμικής ακτινοβολίας του θερμαντήρα. Εν συνεχεία στη παράγραφο 5.6 παρουσιάσαμε ένα σύστημα έλεγχου θερμοκρασίας συστήματος βασιζόμενο στην χρήση ενός ελεγκτή της λογικής ανοικτό-κλειστό (on-off control).

Έχοντας οικοδομήσει επομένως τα εργαλεία που απαιτούνται για την λεπτομερέστερη μελέτη της μεθοδολογίας μας, επόμενο μας βήμα είναι η μελέτη της επίδρασης της θερμικής ακτινοβολίας στην εσωτερική θερμοκρασία του αέρα καθώς και στην θερμοκρασία που αναπτύσσει ο θερμαντήρας. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού υλοποιήσαμε το Simulink model της Εικόνας 5.10



Εικόν
α 5.10 : Simulink model για τον έλεγχο της επίδρασης της θερμικής ακτινοβολίας

Για την υλοποίηση του μοντέλου της Εικόνας 5.10 χρησιμοποιήσαμε το component της Εικόνας 5.6. Εν συνεχεία εξετάζουμε τις δυο περιπτώσεις όπου θεωρούμε υπαρκτή ή απούσα τη θερμική ακτινοβολία και απομονώνουμε αρχικά τις εξόδους που αποδίδουν την θερμοκρασία του θερμαντήρα. Με τη χρήση ενός ελεγκτή ανοικτό-κλειστό ελέγχουμε τα όρια που λαμβάνει η εσωτερική θερμοκρασία αέρα και λαμβάνουμε στην έξοδο τη θερμοκρασία του θερμικού στοιχείου για τις περιπτώσεις ύπαρξης θερμικής ακτινοβολίας η μη στο σύστημα μας.

Στο διάγραμμα της εικόνας 5.11 παρατηρούμε την επίδραση που έχει η θερμική ακτινοβολία στην θερμοκρασία του θερμαντήρα.



Εικόνα 5.11 : Επίδραση της θερμικής ακτινοβολίας στην θερμοκρασία του θερμαντήρα

Μελετώντας το διάγραμμα της Εικόνας 4.10 παρατηρούμε πως οι δυο κυματομορφές παρουσιάζουν το ίδιο πλάτος (amplitude) -όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο- μιας και υπόκεινται στο ίδιο έλεγχο μέσω του on-off controller. Εμφανής είναι επίσης η αναμενόμενη διαφορά φάσης μεταξύ τους που κυμαίνεται στο χρονικό διάστημα των 5 λεπτών.

Αξίζει να τονιστεί πως η θερμοκρασία του θερμικού στοιχείου δε παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία στην παρουσία της θερμικής ακτινοβολίας, μιας και η διαφορά φάσης χρονικού διαστήματος 5 λεπτών κρίνεται αρκετά μικρή. Απεναντιας, η θερμοχωρητικότητα του θερμαντήρα δεν είναι επαρκής μιας και παρατηρούμε μεγάλες αυξομειώσεις σε μικρά χρονικά διαστήματα.

Αν υποθέσουμε πως η θερμική ακτινοβολία του θερμικού στοιχείου αυξάνεται κατά μια τάξη μεγέθους, η διαφορά φάσης μεταξύ των δυο κυματογράφων θα είναι διπλάσια, δηλαδή θα κυμαίνεται χοντρικά στο χρονικό διάστημα των ~ 10 λεπτών. Ο παραπάνω ισχυρισμός αποδεικνύεται παρατηρώντας το διάγραμμα της Εικόνας 5.12 όπου η θερμική ακτινοβολία του θερμαντήρα είναι μεγαλύτερη κατά μια τάξη μεγέθους σε σχέση με την αρχική τιμή της θερμικής ακτινοβολίας.



Εικόνα 5.12: Αύξηση της διαφοράς φάσης με μεταβολή του μεγέθους της θερμικής ακτινοβολίας

Κατά αναλογία με τη μελέτη της επίδρασης της θερμικής ακτινοβολίας στη θερμοκρασία του θερμαντήρα , εξετάζουμε και την επίδραση της θερμικής ακτινοβολίας στην εσωτερική θερμοκρασία αέρα.

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο της Εικόνας 5.9, απομονώνουμε τις εξόδους που αποδίδουν την θερμοκρασία αέρα εντός του κτιριακού χώρου και τις ελέγχουμε μέσω του ίδιου ελεγκτή on-off.

Οι κυματομορφές της συνολικής εξόδου του συστήματος συνοψίζονται στο διάγραμμα της Εικόνας 5.13



Εικόνα 5.13: Επίδραση της θερμικής ακτινοβολίας στην θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα.

Στο διάγραμμα 5.13 παρατηρούμε πως και η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα μεταβάλλεται κατά ανάλογο τρόπο με τη θερμοκρασία του θερμαντήρα. Η παρουσία θερμικής ακτινοβολίας προκαλεί μια διαφορά φάσης μεταξύ των δυο κυματομορφών της τάξης των 5 λεπτών, δηλαδή ανάλογη με τη διαφορά φάσης που προκαλεί στη θερμοκρασία του θερμαντήρα η παρουσία θερμικής ακτινοβολίας.

Αν υποθέσουμε πως η θερμική ακτινοβολία αυξάνεται κατά μια τάξη μεγέθους , η διαφορά φάσης θα αυξηθεί κατά το διπλάσιο όπως συνέβη και στη περίπτωση μελέτης της επίδρασης της θερμικής ακτινοβολίας στην θερμοκρασία του θερμαντήρα. Επομένως αναμένουμε η διαφορά φάσης μεταξύ των δυο κυματομορφών να κυμανθεί στα επίπεδα των 10 λεπτών.

Η παραπάνω υπόθεση αποδεικνύεται με την εξαγωγή του γραφήματος 5.14 στη έξοδο του συστήματος μας.



Εικόνα 5.14: Αύξηση της διαφοράς φάσης με μεταβολή του μεγέθους της θερμικής ακτινοβολίας

Συμπερασματικά, παρατηρούμε πως η θερμική ακτινοβολία, όπως ήταν αναμενόμενο επιδρά άμεσα στην διαφορά φάσης μεταξύ των δυο κυματομορφών. Η απουσία θερμικής ακτινοβολίας υποδηλώνει πως η θερμότητα μεταφέρεται απευθείας μέσω συνεπαγωγής από την επιφάνεια του στοιχείου θέρμανσης στον εσωτερικό αέρα .Στοιχείο που επηρεάζει επίσης το μέγεθος της επίδρασης που θα έχει η θερμική ακτινοβολία στη θερμοκρασία του αέρα, οφείλεται στην ικανότητα διάχυσης θερμότητας των κτιριακών στοιχείων. Υψηλότερη ικανότητα διάχυσης θερμότητας συνεπάγεται μείωση της επίδρασης της θερμικής ακτινοβολίας και εν τέλει πιο άμεση και γρήγορη απορρόφηση θερμότητας από το εσωτερικό αέρα.

5.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων νέου μοντέλου με μοντέλο Mendes.

Στη παρούσα ενότητα αντιπαραθέτουμε τα αποτελέσματα που έχουμε ήδη εξάγει από την υλοποίηση του νέου μοντέλου με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την υλοποίηση της μεθοδολογίας του Mendes. Στόχος είναι να γίνει εμφανής και διαγραμματικά η ακριβής προσέγγιση μεταξύ των δυο μεθοδολογιών.



Εικόνα 5.9 : Εσωτερική θερμοκρασία αέρα με τη παρουσία on-off controller του νέου μοντέλου



Εικόνα 5.9 : Εσωτερική θερμοκρασία αέρα με τη παρουσία on-off controller του μοντέλου Mendes

Συγκρίνοντας τα παραπάνω διαγράμματα που αποδίδουν την εσωτερική θερμοκρασία αέρα με παρουσία on-off controller διαπιστώνουμε την ίδια θερμική συμπεριφορά μεταξύ των δυο μεθοδολογιών Κατ αντιστοιχία με την εσωτερική θερμοκρασία αέρα, όσον αφόρα την επίδραση της θερμικής ακτινοβολίας στη θερμοκρασία του θερμικού στοιχείου συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας Mendes με τα αποτελέσματα της νέας μεθοδολογίας που προτείνουμε και έχουμε τα ακόλουθα διαγράμματα.



Διατηρώντας τα ίδια αριθμητικά δεδομένα τόσο για τη θερμοχωρητικότητα όσο και για την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των κτιριακών στοιχείων, η διαφορά φάσης που προκύπτει και για τις δυο μεθοδολογίες είναι της τάξης των 5 λεπτών, ενώ το πλάτος της θερμοκρασίας του θερμικού στοιχείου παρουσιάζει διαφορά της τάξης του 1°C.Η περίοδος κυμαίνεται στα επίπεδα του χρονικού διαστήματος της μισής ώρας, γεγονός που οφείλεται εξ ολοκλήρου στην τιμή θερμοχωρητικότητας του θερμικού στοιχείου (θερμαντήρα).



Κεφάλαιο 6⁰ Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο την μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς ενός τυπικού κτιρίου.

Βασικό θεωρητικό υπόβαθρο για την επίτευξη του στόχου μας, αποτέλεσε το σύνολο των μεθοδολογιών που έχουν ήδη αναπτυχτεί στα πλαίσια της επιστημονικής έρευνας του τομέα της ενεργειακής διαχείρισης κτιρίων.

Η επαλήθευση καθώς και η σύγκριση μεταξύ των παραπάνω μεθοδολογιών αποτέλεσε ένα εξίσου κύριο στόχο, γεγονός που κατέστησε αναγκαία την υλοποίηση ενός ισοδύναμου RC κτιριακού μοντέλου σε ένα προγραμματιστικό περιβάλλον.

Συνεπώς αναζητούσαμε ένα ολοκληρωμένο προγραμματιστικό περιβάλλον που θα μας παρείχε και τα απαραίτητα μαθηματικά εργαλεία για την προσομοίωση δυναμικών συστημάτων. Μια τέτοια προγραμματιστική πλατφόρμα όπου θα καθιστούσε εύκολη την ανάπτυξη ενός πολύπλοκου συστήματος όπως ένα κτιριακό συγκρότημα κρίθηκε πως είναι το Simulink/Matlab. Παράγοντας που συνετέλεσε επίσης στην επιλογή αυτού του εργαλείου είναι και η ιδιότητα της επεκτασιμότητας που μας προσφέρει το Simulink για επαναχρησιμοποίηση του μοντέλου σε μελλοντικές εργασίες ανάλογου ενδιαφέροντος.

Με τη βοήθεια του Simulink/Matlab υλοποιήσαμε ένα ισοδύναμο RC κτιριακό μοντέλο που διατηρούσε τα αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά δεδομένα του κτιρίου του εργαστηρίου των Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και ΑΠΕ του Πολυτεχνείου Κρήτης και εξάγαμε αποτελέσματα για τις διάφορες εκδοχές υλοποίησης του κτιριακού μοντέλου (ανάλογα με την μεθοδολογία που ακολουθήσαμε).

Μετά την εκπόνηση της εργασίας το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην αξιοποίηση των παραπάνω συγκριτικών αποτελεσμάτων καθώς και στη χρησιμοποίηση του κτιριακού μας μοντέλου σε ευρύτερης κλίμακας μελέτες.

6.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Οι βασικές μεθοδολογίες που εξετάσαμε στην παρούσα διπλωματική εργασία βασίζονται στην ενιαία ιδέα περιγραφής ενός θερμικού κυκλώματος με τη βοήθεια ενός ηλεκτρικού ισοδύναμου.

Η κύρια διαφορά μεταξύ των δυο αυτών μεθόδων εντοπίζεται στο εξής γεγονός. Το θερμικό κύκλωμα που περιγράφεται στην εργασία του Hudson αγνοεί τις καταστάσεις των θερμοκρασιών εντός των διαστρωματώσεων των κτιριακών υλικών. Η μεθοδολογία Mendes λαμβάνει υπόψη της όλες αυτές τις καταστάσεις ενώ ενσωματώνει επίσης θερμαντήρες και θερμική ακτινοβολία αυτών, συντελώντας στην μαθηματική έκφραση ενός μεγαλύτερης τάξης συστήματος. Εφόσον και οι δυο μεθοδολογίες έχουν ως κύριο στόχο την μελέτη της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα, διατηρήσαμε το αρχικό σύστημα διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει ο Hudson, ενσωματώνοντας παράλληλα τις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τα θερμικά φαινόμενα που προκύπτουν από την παρουσία θερμαντήρα και αισθητήρα, όπως προστάζει η μεθοδολογία του Mendes.

Απώτερος στόχος αυτού του συγκερασμού των δυο μεθοδολογιών ήταν η απόδειξη πως για μεγάλο διάστημα προσομοίωσης (της τάξης των τεσσάρων ημερών) η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα για τις δυο αυτές μεθοδολογίες δε παρουσιάζει σημαντική διαφορά.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που εξάγαμε μετά την ανάπτυξη διαφόρων εκδοχών του κτιριακού μοντέλου προκύπτει το γράφημα της Εικόνας 6.1



Εικόνα 6.1 : Διάγραμμα σύγκρισης εσωτερικής θερμοκρασίας Mendes Hudson

Το διάστημα προσομοίωσης ορίστηκε σε τέσσερα 24ωρα, τέτοιο ώστε να εξαλειφτεί η επίδραση των αρχικών συνθηκών.

Παρατηρούμε επομένως μια μικρή απόκλιση στο πλάτος των δυο κυματομορφών της τάξης των 0.2 °C καθώς και μια αμελητέα διαφορά φάσης της τάξης των 5 λεπτών, γεγονός που οφείλεται στην παρουσία του θερμαντήρα και αισθητήρα το νέο σύστημα προς μελέτη. Μελετώντας επομένως τα παραπάνω αποτελέσματα της πρότασης που εισάγαμε το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως η θερμοκρασία του αέρα εντός του κτιρίου παρουσιάζει αμελητέα διαφορά της τάξης του 2% επί της μέγιστης θερμοκρασίας

6.2 Μελλοντική εργασία

Μετά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας οι στόχοι που ανακύπτουν επικεντρώνονται στην μελλοντική εργασία και μελέτη που μπορεί να γίνει έχοντας ως βάση την υπάρχουσα υλοποίηση του θερμικού μοντέλου του κτιρίου.

6.2.1 Προσθήκη φαινομένων ηλιακής ακτινοβολίας, υγρασίας και εξαερισμού (humidity and air conditioning).

Στην παρούσα εργασία επιλέξαμε να παρουσιάσουμε την επίδραση που έχει η θερμική ακτινοβολία ενός θερμικού στοιχείου, στο εσωτερικό χώρο του κτιρίου Το προγραμματιστικό περιβάλλον του Simulink μας παρέχει την ευελιξία να ενσωματώσουμε νέα μη γραμμικά φαινόμενα στο ήδη υπάρχον μοντέλο. Μια τέτοια διαδικασία, όπως γίνεται εύκολα, αντιληπτό θα προσέγγιζε με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματικότητα.

Μια λεπτομερέστερη εκδοχή της υλοποίησης μας θα μπορούσε να περιλαμβάνει φαινόμενα,

- ηλιακής ακτινοβολίας (solar radiation)
- υγρασίας (humidity)
- εξαερισμού (air conditioning)

Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε την προσθήκη νέων διαφορικών εξισώσεων στο σύστημα μας μιας και θα μεταβαλλόταν, εν γένει, η κυκλωματική διάταξη του ηλεκτρικού ισοδυνάμου του κτιρίου. Η ύπαρξη νέων μεταβλητών και παραμέτρων, αποφέρει μεγαλύτερη μαθηματική πολυπλοκότητα και κατά συνέπεια γεννά την ανάγκη για μεγαλύτερης κλίμακας έλεγχο του συστήματος.

Τέλος η προσθήκη τέτοιων φαινομένων δημιουργεί απαιτήσεις για ενεργειακό έλεγχο της αλληλεπίδρασης τους με τον κτιριακό χώρο προς μελέτη οπότε και θα έθετε εύλογα ερωτήματα προς την εύρεση αποδοτικότερων τρόπων έλεγχου.

6.2.2 Χρήση του θερμικού μοντέλου σε έρευνα ευρύτερης κλίμακας.

Η πλειοψηφία των συστημάτων θέρμανσης που συνίστανται από ηλεκτρικές αντιστάσεις έχουν στην διάθεση τους ελεγκτές on-off. Παρόλα αυτά η ακρίβεια αυτής της στρατηγικής έλεγχου παρουσιάζει άμεση και ισχυρή εξάρτηση με τα θερμικά χαρακτηριστικά των κτιριακών στοιχείων. Επιπρόσθετα στην πράξη, σε πολλές των περιπτώσεων, παρουσιάζεται μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα σημεία έλεγχου θερμοκρασίας γεγονός που καθιστά ακόμη πιο δύσκολη τη διαδικασία έλεγχου.

Για τον έλεγχο του κτιριακού μοντέλου που υλοποιήσαμε στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε ελεγκτές της δυαδικής λογικής ανοικτό-κλειστό. Παρόλα αυτά ο έλεγχος θερμοκρασίας κατά αυτόν τον τρόπο, κρίνεται ασύμφορος όσο αναφορά την ενεργειακή κατανάλωση. Επομένως θα ήταν εύλογο να μας απασχολήσουν νέες μέθοδοι έλεγχου θερμοκρασίας που θα ελαχιστοποιούσαν όσο το δυνατό τη κατανάλωση ενέργειας.

Το προγραμματιστικό περιβάλλον του Simulink/Matlab, αποδείχτηκε πως έχει υψηλές δυνατότητες που καθιστούν εφικτή την ανάπτυξη νέων στρατηγικών έλεγχου του κτιριακού μοντέλου. Θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον, επομένως, η υλοποίηση νέων controller βασισμένων σε διαφορετική λογική από την απλή αλλά ενεργειοβορα λογική του ελεγκτή on off. Περιληπτικά τέτοιοι μέθοδοι θα μπορούσαν να είναι

- fuzzy controllers
- adaptive controllers
- predictive controllers

Ο τρόπος με τον οποίο δομήθηκε το μοντέλο μας επιτρέπει την ενσωμάτωση των νέων ελεγκτών στα υπάρχοντα Simulink blocks. Συνεπώς αντικείμενο μελλοντικής έρευνας θα μπορούσε να είναι η σύγκριση των νέων ελεγκτών με όρους κατανάλωσης ενέργειας.

Βιβλιογραφία

[1] Hudson G. and Underwood C.P., 1999, A Simple building modelling procedure for MATLAB/SIMULINK, Proceedings of the 6th International Conference on Building Performance Simulation (IBPSA'99), September, Kyoto-Japan, pp.777-783.

[2] Mendes, N., Oliveira, G. H. C. and Araújo, H. X. (2001). Building thermal performance analysis by using matlab/simulink. Proc. of the Building Simulation Conference (IBPSA'01), Vol. 1, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 473-480.

[3] ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (1997), Handbook of Fundamentals. Atlanta:ASHRAE

[4] E.H. Mathews, P.G. Richards, C. Lombard (1994) A first-order thermal model for building design, Energy and Buildings 21 (1994) 133-145

[5] Handbook of Heating, Ventilation, and Air Conditioning Jan F. Kreider (2001)

[6] Gerson H. dos Santos , Nathan Mendes Analysis of numerical methods and simulation time step effects on the prediction of building thermal performance (2004) Applied Thermal Engineering 24 (2004) 1129–1142

[7] Clarke, J.A., 1985, Energy Simulation in Building Design, Adam Hilger Ltd.

[8] Tindale, A. (1993) Third-order lumped-parameter simulation method Building Services Engineering Research & Technology, 14 (3), pp 87-97.

[9] Crabb, J. A., Murdoch, N., Penman, J. M.(1987) A simplified thermal response model Building Services Engineering Research & Technology, 8 (1), pp13-19.

[10] ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ ΚΕΛΥΦΟΥΣ (2001),ΝΙΟΒΗ ΧΡΥΣΟΜΑΛΛΙΔΟΥ ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘ. ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΠΟΛ. ΜΗΧ. ΑΠΘ

Παράρτημα

Πίνακας θερμικών χαρακτηριστικών δομικών υλικών^[10]

	Πυκνότητα μάζας p (kg/m ³)	Συντελεστής θερμοχωρητικότητας c _p (J/kg·K)	Συντελεστής θερμοαγωγιμοτητας λ (W/m·K)	Πάχος σε μέτρα
Σκυρόδεμα	1400	1000	0,51	0.15
Πολυουρεθανη	30	1400	0,025	0.035
Γυψοκονίαμα	500	1050	0.70	0.02
Ασβεστοκονίαμα	700	1050	0.87	0.02
Υαλοπίνακας	12	840	0.40	0.02