



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία:

Μέθοδοι Προσομοίωσης της Θερμικής Συμπεριφοράς των Κτιρίων και Εφαρμογές

Συγγραφέας: Τσουκαλάς Κωνσταντίνος
Α.Μ.: 02105067

Επιβλέπων: Κίμων Α. Αντωνόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2011

“Μέθοδοι προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς των κτιρίων και εφαρμογές.”

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011

Ολοκληρώνοντας αυτήν την εργασία νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα μου κύριο Κ.Α.Αντωνόπουλο για την αμέριστη βοήθειά του καθώς και για το πνεύμα επιστημονικής περιέργειας που μου εμφύσησε κατά την διάρκεια της συνεργασίας μας. Επιπλέον, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στις φίλες και συναδέλφους μου Πατρικίου Ελένη και Ορφανού Ελένη για την στήριξη και την συμπαράστασή τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή	12
Κεφάλαιο 2 : Μηχανισμοί Μετάδοσης Θερμότητας	14
2.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή.....	14
2.1.1.Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα Αέρια/Υγρά/Στερεά.	15
2.2.Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.....	16
2.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	19
Κεφάλαιο 3 : Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας	19
3.1 Εισαγωγή.....	19
3.2 Μέθοδοι αποθήκευσης Ενέργειας.....	20
Κεφάλαιο 4 : Θερμικά Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας	23
4.1 Εισαγωγή.....	23
4.2 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας.....	24
4.2.1 Στερεά υλικά.....	26
4.2.2 Υγρά υλικά.....	27
4.2.3 Άλλα υλικά.....	27
4.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας (PCM)	28
Κεφάλαιο 5 : Ενεργητικά – Παθητικά Συστήματα	29

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ
ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Κεφάλαιο 6 : Εισαγωγή στις Θερμικές Υπολογιστικές Μεθόδους.....	32
Κεφάλαιο 7 : Συνάρτηση Απόκρισης.....	32
7.1 Εισαγωγή.....	32
7.2 Απόκριση στο πεδίο του χρόνου.....	36
7.3 Απόκριση στο πεδίο συχνότητας.....	42
7.4 Μεθοδολογίες βασισμένες στην υπολογιστική μέθοδο της απόκρισης.	43
7.4.1 Μέθοδος Συνάρτησης Μεταφοράς – TFM.....	43
7.4.2 Μέθοδος Ισοδύναμης Θερμοκρασιακής Διαφοράς - TETD Method ...	44
7.4.3 Μέθοδος Θερμοκρασιακής Διαφοράς Ψυκτικού Φορτίου - CLTD.....	44
Κεφάλαιο 8 : Μέθοδος χρονικών σειρών ακτινοβολίας και αγωγής (RTS/CTS)	46
Κεφάλαιο 9 : Πεπερασμένες Διαφορές.....	48
9.1 Μαθηματική θεμελίωση – Διακριτοποίηση διαφορικής εξίσωσης.....	48
9.2 Οριακές συνθήκες	57
9.2.1 Οριακές συνθήκες Dirichlet.....	57
9.2.2 Οριακές συνθήκες Neumann.....	57
9.2.3 Οριακές συνθήκες συναγωγής.....	58
9.3 Επίλυση συστήματος τριδαγώνιας μορφής.....	58
Κεφάλαιο 10 : Πεπερασμένοι Όγκοι.....	61
10.1 Εισαγωγή.....	61
10.2 Ολοκλήρωση σε όγκο αναφοράς.....	61
10.3 Οριακές συνθήκες.....	63

Κεφάλαιο 11 : Λογισμικά Προσομοίωσης (CODES)	66
11.1 Εισαγωγή	66
11.2 Αναφορά στις δημοφιλέστερες εφαρμογές	66
11.2.1 TRNSYS.....	66
11.2.2 DOE-2.....	67
11.2.3 BLAST.....	68
11.2.4 Energy Plus	68
11.2.5 ECOTECT.....	68
11.2.6 TAS.....	69
11.2.7 ESP-r	69

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ

ΜΗ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Κεφάλαιο 12 : Ηλεκτρικό Ανάλογο	71
12.1 Εισαγωγή.....	71
12.2. Προσομοίωση αγωγής.....	72
12.3. Προσομοίωση συναγωγής.....	73
12.4 Προσομοίωση ακτινοβολίας.....	74
Κεφάλαιο 13: Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial intelligence)	76
Κεφάλαιο 14 : Ασαφής Λογική (Fuzzy logic)	78
Κεφάλαιο 15 : Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks)	79
15.1 Εισαγωγή	79
15.2. Μοντέλο βιολογικού Νευρώνα.....	80
15.3 Μοντέλο τεχνητού νευρώνα.....	81

15.3.1. Ένας απλός νευρώνας.....	83
15.3.2. Κανόνες πυροδότησης.....	84
15.3.3. Ένας πιο πολύπλοκος νευρώνας.....	85
15.4 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.....	86
15.4 Σύγκριση νευρωνικών δικτύων και συμβατών υπολογιστών.....	89
15.6 Βασικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα νευρωνικών δικτύων.....	90
15.7 Μάθηση και ανάκληση.....	92
Κεφάλαιο 16 : Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms)	94
16.1 Εισαγωγή.....	94
16.2 Πλεονεκτήματα των Γενετικών Αλγορίθμων.....	96
16.3 Βασικά Χαρακτηριστικά Γενετικών Αλγορίθμων.....	98
Κεφάλαιο 17 : Έμπειρα συστήματα (Expert Systems)	99
17.1 Εισαγωγή.....	99
17.2 Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα Έμπειρου Συστήματος σε σχέση με Άνθρωπο – Ειδικό.....	101
17.3 Εφαρμογές των Εμπείρων Συστημάτων.....	102
17.4 Αρχιτεκτονική και διαδικασία ανάπτυξης Εμπείρων Συστημάτων.....	104
Κεφάλαιο 18 : Προβλεπτικό Μοντέλο (Model Predictive Control, MPC)	108

ΜΕΡΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 19 : Υπολογισμός της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτιρίου.	110
Κεφάλαιο 20 : Διερεύνηση της επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας Το στην κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας.	115
Κεφάλαιο 21 : Διερεύνηση της επίδραση του μηχανικού φορτίου στην κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας.	120
Κεφάλαιο 22 : Διερεύνηση της επίδραση της ειδικής θερμοχωρητικότητας στην κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας.	123
Κεφάλαιο 23 : Υπερθέρμανση.....	127
Κεφάλαιο 24 : Υπόψυξη.....	134
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	139
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	155

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Το ενεργειακό πρόβλημα είναι ένα από τα σημαντικότερα και πολυπλοκότερα παγκόσμια προβλήματα. Συνηθίζεται να λέγεται ότι τα ενεργειακά αποθέματα του πλανήτη εξαντλούνται. Η άποψη αυτή δεν είναι απολύτως ορθή. Όλο το επιστημονικό οικοδόμημα του ανθρώπου στηρίζεται στην αρχή της διατήρησης της ενέργειας. Άρα, είναι ορθότερο να λέγεται ότι δεν εξαντλούνται τα ενεργειακά αποθέματα, αλλά εξαντλούνται οι μέθοδοι άντλησης της ενέργειας. Συνεπώς, μια λύση του ενεργειακού προβλήματος είναι η επινόηση νέων μεθόδων άντλησης της ενέργειας, που να μην έχουν τα μειονεκτήματα των σημερινών ή να τα έχουν σε μικρότερο βαθμό. Επομένως, οι νέες μέθοδοι άντλησης της ενέργειας δεν πρέπει να προκαλούν εξαρτήσεις, πολιτικούς, οικονομικούς και πολεμικούς ανταγωνισμούς, δεν πρέπει να εξαντλούνται και πρέπει να είναι οικολογικά καθαρές.

Η πρώτη από τις προσπάθειες αντικατάστασης του πετρελαίου και του άνθρακα βασίστηκε στην πυρηνική σχάση. Εμφανίστηκε για πρώτη φορά μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο σαν λύση καθαρής και φθηνής ενέργειας, όμως δεν επεκτάθηκε όσο αναμενόταν λόγω της αδυναμίας ανεύρεσης αποτελεσματικότερης μεθόδου διαχείρισης των αποβλήτων της καθώς και λόγω ατυχημάτων (Τσέρνομπιλ, Φουκουσίμα) με καταστροφικές συνέπειες για το περιβάλλον και για τον άνθρωπο.

Μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973, το ενδιαφέρον άρχισε να στρέφεται προς την αξιοποίηση των λεγόμενων ήπιων μορφών ενέργειας. Η ενέργεια από τον ήλιο, τον αέρα, τη βιομάζα και άλλες πηγές δεν έχουν τα προβλήματα των άλλων πηγών ενέργειας που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος. Θεωρείται ότι δεν προκαλούν εξαρτήσεις, είναι πρακτικά ανεξάντλητες και ανανεώσιμες και οικολογικά καθαρές. Οι ήπιες μορφές ενέργειας φαίνεται να ικανοποιούν όλες τις απαιτήσεις, ώστε ν' αποτελέσουν τις κύριες πηγές ενέργειας του μέλλοντος. Η μικρή απόδοση είναι το βασικό μειονέκτημα αυτών των πηγών. Παρά τις θεαματικές τεχνολογικές προόδους, οι μετατροπείς της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια εξακολουθούν να έχουν μικρή απόδοση και θα πρέπει να περάσουν αρκετές δεκαετίες σκληρής ερευνητικής προσπάθειας, μέχρις ότου οι πηγές αυτές καταστούν ικανές ν' αντικαταστήσουν σημαντικές ποσότητες άνθρακα και πετρελαίου.

Έχει δημιουργηθεί η εντύπωση ότι οι ήπιες μορφές ενέργειας είναι απολύτως οικολογικά καθαρές. Η εντύπωση είναι αυτή εσφαλμένη. Γενικά, όλες οι μορφές ενέργειας επιδρούν αρνητικά στο περιβάλλον. Για παράδειγμα, η κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελών προκαλεί τη δημιουργία σημαντικών τοξικών αποβλήτων αρσενικού και καδμίου. Αν η κατασκευή τους γενικευθεί, τότε οι χώρες στις οποίες θα κατασκευάζονται θα αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα μόλυνσης του περιβάλλοντος. Επιπλέον, η γενίκευση της άντλησης ενέργειας από τον ήλιο θ' απαιτήσει τη δέσμευση τεράστιων εκτάσεων γης και θα έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ισορροπία του οικολογικού συστήματος εκτεταμένων περιοχών. Το ίδιο ακριβώς θα συμβεί και με τη γενίκευση της χρήσης ανεμογεννητριών για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Όσον αφορά στην ενέργεια από τη βιομάζα, μια αλόγιστη χρήση της μπορεί να προκαλέσει τεράστιες καταστροφές. Η βιομάζα είναι

υπό συνθήκες ανανεώσιμη.

Γενικά, αυτό που θ' απαλύνει τις επιπτώσεις του ενεργειακού προβλήματος είναι η χρήση της λογικής για την αντιμετώπισή του. Η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί το πρώτο μεγάλο βήμα για την ορθή αντιμετώπιση του ενεργειακού προβλήματος. Τα οφέλη από την εξοικονόμηση ενέργειας θα είναι αμέσως ορατά. Για παράδειγμα, μπορούμε να φωτίζουμε εξίσου καλά τους χώρους μας καταναλώνοντας μόνο το ένα τρίτο της ενέργειας που ξοδεύουμε σήμερα, αρκεί ν' αντικαταστήσουμε στα σπίτια μας και στους δρόμους τους λαμπτήρες με λαμπτήρες υψηλής απόδοσης. Αυτή η πράξη θ' αποφέρει την εξοικονόμηση μεγάλων ποσών ενέργειας.

Συγκεκριμένα στα κτίρια, που είναι και το αντικείμενο μελέτης αυτής της διπλωματικής, μόνο το 20% εξοικονομούν ενέργεια. Ένα κτίριο καταναλώνει ενέργεια για την κάλυψη ηλεκτρικών φορτίων, την θέρμανση και ψύξη χώρων και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια αλλά και η υποκατάσταση συμβατικών πηγών ενέργειας με ανανεώσιμες οδηγεί σε μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος, οικονομικά οφέλη για τους χρήστες των κτιρίων μέσω της μείωσης κατανάλωσης συμβατικών καυσίμων. Σύμφωνα με εκτιμήσεις και τα υπάρχοντα στοιχεία της ΕΕ είναι δυνατή η εξοικονόμηση ενέργειας στα δημόσια και εμπορικά κτίρια της Ελλάδας σε ποσοστά που κυμαίνονται από 10% έως 50%.

Η χρήση ηλιακής ενέργειας αποτελεί έναν από τους βασικότερους στόχους της επιστημονικής έρευνας για την δημιουργία τέτοιων συστημάτων. Το βασικό της μειονέκτημα είναι ότι αποτελεί διακοπτόμενη πηγή ενέργειας αλλά τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος με την ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, τα οποία εκτός από μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα, αποδίδουν την ενέργεια τους με κάποια χρονική καθυστέρηση. Το βασικό αντικείμενο μελέτης αυτής της διπλωματικής εργασίας, τα υλικά αλλαγής φάσης (PCM) διαθέτουν αυτήν ακριβώς την σημαντική ικανότητα και για αυτό τον λόγο είναι αντικείμενο περαιτέρω έρευνας.

Κεφάλαιο 2

Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας [1- 4]

Στην θερμοδυναμική , η θερμότητα ορίζεται ως η ενέργεια που διασχίζει τα όρια ενός συστήματος όταν αυτή η μεταφορά της ενέργειας συμβαίνει εξαιτίας μίας διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντός του. Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος δηλώνει ότι η θερμότητα ρέει πάντα προς το ψυχρότερο μέσο. Ωστόσο η θερμοδυναμική δεν δείχνει , πως αυτή η μεταφερόμενη θερμότητα εξαρτάται από την διαφορά της θερμοκρασίας ή πόσο γρήγορη και έντονη αυτή η μη αναστρέψιμη διαδικασία είναι. Η επιστήμη της μεταφοράς θερμότητας διευκρινίζει τους νόμους που διέπουν αυτή την διαδικασία.

Υπάρχουν τρεις τρόποι για την μεταφορά θερμότητας :

- Αγωγή
- Συναγωγή
- Ακτινοβολία

2.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Αγωγή είναι η μεταφορά ενέργειας από τα πιο ενεργά σωματίδια μίας ουσίας προς τα γειτονικά λιγότερο ενεργά σωματίδια λόγω των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Η αγωγή μπορεί να συμβεί στα στερεά στα υγρά ή στα αέρια. Στα αέρια και στα υγρά , η αγωγή οφείλεται στις συγκρούσεις και στην διάχυση μεταξύ των μορίων κατά την τυχαία κίνησή τους. Στα στερεά , οφείλεται στο συνδυασμό των ταλαντώσεων των μορίων σε μία δομή πλέγματος και της μεταφοράς ενέργειας από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Εάν σε ένα μέσο υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας , η θερμότητα θα ρέει από την περιοχή υψηλότερης θερμοκρασίας στην περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας. Ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα δια αγωγής (q_k) είναι ανάλογος με την παράγωγο της θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο επί την επιφάνεια μέσα από την οποία μεταδίδεται η θερμότητα.

$$q_k = A * dT/dx \quad (2.1.1)$$

Στην παραπάνω σχέση το $T(x)$ είναι η τοπική θερμοκρασία και x είναι η απόσταση στην διεύθυνση που μεταδίδεται η θερμότητα. Ο ρυθμός με τον οποίο μεταδίδεται η θερμότητα εξαρτάται από την θερμική αγωγιμότητα , που είναι μία φυσική ιδιότητα του μέσου. Για αγωγή μέσο ενός ομογενούς μέσου , ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι:

$$q_k = - k * A * dT/dx \quad (2.1.2)$$

Το σύμβολο « - » είναι συνέπεια του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου, που απαιτεί η θερμότητα να ρέει από την υψηλότερη στην χαμηλότερη θερμοκρασία.

Δηλαδή η παράγωγος της θερμοκρασίας θα είναι αρνητική αν η θερμοκρασία ελαττώνεται όταν η τιμές του x αυξάνονται. Έτσι πρέπει να βάλουμε « - » αν θερμότητα μεταφέρεται προς τα θετικά του x στο δεξιό μέλος της εξίσωσης. Η παραπάνω εξίσωση ορίζει την θερμική αγωγιμότητα και είναι ο νόμος του Fourier για την αγωγή. Η θερμική αγωγιμότητα (k) είναι μια ιδιότητα του υλικού που δείχνει την ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται στην μονάδα του χρόνου κατά μήκος της μονάδας επιφάνειας όταν η παράγωγος της θερμοκρασίας είναι συνεχής. Στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) ,η επιφάνεια μετράτε σε τετραγωνικά μέτρα (m^2), η θερμοκρασία σε Kelvin (K) , η απόσταση x σε μέτρα (m) και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας σε Watt (W). Έτσι οι μονάδες της θερμικής αγωγιμότητας είναι W/mK . Στο Βρετανικό σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως στις Η.Π.Α η επιφάνεια μετράτε σε τετραγωνικά πόδια (ft^2) , η απόσταση σε πόδια (ft) , η θερμοκρασία σε βαθμούς Fahrenheit ($^{\circ}F$), και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας σε Btu/hr . Έτσι το k έχει μονάδες $Btu/hr \cdot ft \cdot ^{\circ}F$. Ο νόμος του Fourier ορίζει την θερμική αγωγιμότητα με την σχέση:

$$K \equiv (qk / A) / \left| dT/dx \right|$$

Πάραυτα στους υπολογισμούς γενικά χρησιμοποιούμε πειραματικά μετρημένες τιμές της θερμικής αγωγιμότητας, αν και για τα αέρια σε μέτριες θερμοκρασίες η θεωρία της κινητικής των αερίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη των πειραματικών δεδομένων επαρκώς. Ο παρακάτω πίνακας παραθέτει μερικές τυπικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας κάποιων υλικών. Από ότι φαίνεται οι ικανότεροι αγωγοί θερμότητας είναι τα μέταλλα και οι χαμηλότερες τιμές του k εμφανίζονται στα αέρια, ενώ στο ενδιάμεσο βρίσκονται τα κράματα μετάλλων και τα υγρά.

2.1.1.Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα Αέρια/Υγρά/Στερεά

Αέρια:

Ο μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα αέρια μπορεί να εξηγηθεί σε μοριακό επίπεδο , μέσο της κινητικής θεωρίας των αερίων. Η κινητική ενέργεια ενός μορίου σχετίζεται με την θερμοκρασία του. Τα μόρια σε μία περιοχή υψηλής θερμοκρασίας έχουν υψηλότερες ταχύτητες από αυτά που βρίσκονται σε μία περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας. Καθώς τα μόρια βρίσκονται σε συνεχή τυχαία κίνηση , συγκρούονται μεταξύ τους και ανταλλάσσουν ορμή και ενέργεια. Όταν ένα μόριο κινηθεί από μία περιοχή υψηλής θερμοκρασίας ,σε μία περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας μεταφέρει κινητική ενέργεια. Καθώς συγκρούεται με τα μόρια χαμηλής ταχύτητας , δίνει κάποιο μέρος της ενέργειάς του, αυξάνοντας έτσι την ενέργεια των μορίων χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου. Με αυτόν τον τρόπο θερμότητα μεταφέρεται από τις περιοχές υψηλής θερμοκρασίας στις αντίστοιχες χαμηλής μέσο της μοριακής κίνησης. Σε συμφωνία με τα παραπάνω, όσο πιο μεγάλη ταχύτητα έχουν τα μόρια τόσο πιο γρήγορα θα γίνεται και η μεταφορά θερμότητας. Συνεπώς , η ιδιότητα που ονομάσαμε θερμική αγωγιμότητα πρέπει να εξαρτάτε από την θερμοκρασία του αερίου. Σε λογικές θερμοκρασίες η απόσταση μεταξύ των μορίων ενός αερίου είναι πολύ μεγάλη συγκρινόμενη με το μέγεθος των μορίων ,

επομένως η θερμική αγωγιμότητα των αερίων μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη της πίεσης.

Υγρά:

Ο βασικός μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στα υγρά είναι ποιοτικά παρόμοιος με τον αντίστοιχο των αερίων. Ωστόσο η μοριακή κατάσταση στα υγρά είναι πιο δύσκολο να εξηγηθεί. Για τα περισσότερα υγρά η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται με αυξανόμενη την θερμοκρασία εν τούτοις το νερό είναι μια αξιοσημείωτη εξαίρεση. Ακόμη η θερμική αγωγιμότητα είναι ανεξάρτητη της πίεσης στα υγρά εκτός από τις περιοχές κοντά στο κρίσιμο σημείο. Τέλος σαν γενικός κανόνας, η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται με αυξανόμενο το μοριακό βάρος των υγρών.

Στερεά:

Σύμφωνα με τις υπάρχουσες θεωρίες, τα στερεά υλικά αποτελούνται από ελεύθερα ηλεκτρόνια και άτομα σε περιοδική κρυσταλλική δομή. Λόγω αυτού η μεταφορά θερμότητας μπορεί να γίνει με δύο μηχανισμούς:

- Κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων
- Ταλάντωση του κρυσταλλικού πλέγματος.

Αυτά τα δύο φαινόμενα είναι προσθετικά, γενικότερα όμως η μετάδοση θερμότητας μέσω των ηλεκτρονίων είναι πιο αποτελεσματική. Εφόσον τα ηλεκτρόνια μεταφέρουν ηλεκτρικό φορτίο με ένα τρόπο παρόμοιο με αυτόν με τον οποίο μεταφέρουν θερμότητα από περιοχές υψηλής θερμοκρασίας σε περιοχές χαμηλής θερμοκρασίας, οι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού είναι συνήθως και καλοί αγωγοί θερμότητας ενώ οι μονωτές του ηλεκτρικού ρεύματος είναι κακοί αγωγοί της θερμότητας. Στα μη μεταλλικά στερεά υπάρχει πολύ μικρή ως και καθόλου μεταφορά ηλεκτρονίων και συνεπώς η αγωγιμότητα καθορίζεται από την ταλάντωση του κρυσταλλικού πλέγματος, σαν συνέπεια αυτά τα υλικά έχουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τα μέταλλα.

2.2.Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Συναγωγή είναι ο τρόπος μεταφοράς της ενέργειας μεταξύ μίας στερεάς επιφάνειας και του γειτονικού υγρού ή αέριου που βρίσκεται σε κίνηση, και περιλαμβάνει τη συνδυασμένη επίδραση της αγωγής και της κίνησης του ρευστού. Όσο πιο γρήγορη είναι η κίνηση του ρευστού, τόσο μεγαλύτερη είναι η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Όταν δεν υπάρχει μεγάλη κίνηση ρευστού, η μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του στερεού και του γειτονικού ρευστού γίνεται αποκλειστικά με αγωγή. Όταν υπάρχει μεγάλη κίνηση ρευστού, ενισχύεται η μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του στερεού και του γειτονικού ρευστού, αλλά κάνει και πιο πολύπλοκο τον προσδιορισμό των ρυθμών μεταφοράς θερμότητας. Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή αποτελείται οπότε από δύο μηχανισμούς που εκτελούνται ταυτόχρονα:

- μεταφορά ενέργειας εξαιτίας της μοριακής κίνησης (αγωγή)
- μεταφορά ενέργειας λόγω των μακροσκοπικών κινήσεων των μορίων του ρευστού

Η κίνηση του ρευστού είναι αποτέλεσμα ομάδων μορίων του ρευστού που κινούνται λόγω μίας εξωτερικής δύναμης. Αυτή η δύναμη είτε υπάρχει λόγω διαφοράς πυκνότητας όπως συμβαίνει στην ελεύθερη συναγωγή ,είτε λόγω διαφοράς πίεσης που δημιουργείται από μία αντλία ή έναν ανεμιστήρα ,είτε από συνδυασμό των δύο παραπάνω.

Η ταχύτητα του ρευστού στην επιφάνεια είναι μηδέν λόγω τυρβωδών δυνάμεων και αυξάνει προς τα πάνω ως U_{∞} .Αφού το ρευστό είναι ακίνητο στην επιφάνεια σε εκείνο το σημείο η μεταφορά θερμότητας γίνεται μόνο με αγωγή. Εάν γνωρίζαμε την διάφορα της θερμοκρασίας και την θερμική αγωγιμότητα σε εκείνο το σημείο θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε την θερμοροή από την παρακάτω εξίσωση.

$$q_c = -k_{\text{fluid}} * A * dT/dx_{(y=0)}$$

(2.2.1)

Εν τούτοις η θερμοκρασιακή διαφορά στην επιφάνεια εξαρτάται από τον ρυθμό με τον οποίο οι μακροσκοπικές και η μικροσκοπικές κινήσεις των μορίων του ρευστού μεταφέρουν θερμότητα μακριά από την επιφάνεια. Συνεπώς η θερμοκρασιακή διαφορά στην επιφάνεια της πλάκας εξαρτάται από την ροή του ρευστού , και συγκεκριμένα από την ταχύτητα U_{∞} . Ο μηχανισμός είναι παρόμοιος και για την ελεύθερη συναγωγή. Η ειδοποιός διαφορά βρίσκεται στην ταχύτητα. Στην εξαναγκασμένη συναγωγή μακριά από την επιφάνεια συναλλαγής η ταχύτητα πλησιάζει την ταχύτητα της ελεύθερης ροής U_{∞} , ενώ στην ελεύθερη συναγωγή η ταχύτητα στην αρχή αυξάνει με αυξανόμενη την απόσταση από την επιφάνεια συναλλαγής και μετά από κάποια τιμή αρχίζει και μειώνεται. Αυτό συμβαίνει διότι το ιξώδες μειώνεται πολύ γρήγορα αυξάνοντας την απόσταση από την επιφάνεια , ενώ η πυκνότητα πολύ πιο αργά. Τελικά όμως και η δύναμη της άωσης μειώνεται καθώς η πυκνότητα του ρευστού πλησιάζει αυτή του ρευστού που δεν έχει θερμοανθεί.

Αυτή η αλληλεπίδραση των δυνάμεων οδηγεί την ταχύτητα του ρευστού σε ένα μέγιστο σημείο και μετά στο μηδέν , μακριά από την θερμαινόμενη πλάκα. Τα προφίλ της θερμοκρασίας και στις δύο περιπτώσεις είναι παρεμφερή και η μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια γίνεται με αγωγή. Τα παραπάνω δείχνουν πως η συναγωγή εξαρτάται από την πυκνότητα, το ιξώδες και την ταχύτητα του ρευστού καθώς και από της θερμικές του ιδιότητες (θερμική αγωγιμότητα , ειδική θερμότητα). Αν και στην εξαναγκασμένη συναγωγή η ταχύτητα προσδίδεται στο σύστημα από μία αντλία ή έναν ανεμιστήρα και μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα , στην ελεύθερη συναγωγή η ταχύτητα εξαρτάται από την διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην επιφάνεια και στο ρευστό , τον συντελεστή θερμικής διαστολής του ρευστού (που καθορίζει την μεταβολή της πυκνότητας ανά μονάδα θερμοκρασιακής διαφοράς) και την δύναμη κίνησης (για συστήματα στην Γη η δύναμη της βαρύτητας).

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μεταξύ μίας επιφάνειας και

ενός ρευστού που ρέει παράλληλα προς την επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση :

$$q_c = h_{\text{μεσο}} * A * \Delta T \quad (2.2.2)$$

Όπου:

q_c = Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή , Watt (ή Btu/hr)

A =Επιφάνεια συναλλαγής , m^2 (ή ft^2)

ΔT =Θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της επιφάνειας της πλάκας θερμοκρασίας

T_s και του ρευστού θερμοκρασίας T_∞ (μακριά από την επιφάνεια) , K (ή oF)

$h_{\text{μεσο}}$ =Μέσος συντελεστής συναγωγής στην επιφάνεια A , W/m^2K ή $(Btu/hr * oF * ft^2)$

Η παραπάνω εξίσωση προτάθηκε αρχικά από τον Βρετανό επιστήμονα Isaac Newton το 1701. Ο ι μηχανικοί χρησιμοποιούσαν αυτή την έκφραση για πολλά χρόνια, αν και περισσότερο είναι ορισμός του h_c παρά νόμος της συναγωγής. Η εκτίμηση του συντελεστή συναγωγής είναι δύσκολη γιατί η συναγωγή είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο. Η τιμή του μέσου συντελεστή συναγωγής σε ένα σύστημα εξαρτάται από την γεωμετρία της επιφάνειας ,την ταχύτητα και της θερμικές ιδιότητες του ρευστού και συχνά ακόμα και από την θερμοκρασιακή διαφορά ΔT . Δεδομένου ότι αυτές οι τιμές δεν παραμένουν σταθερές κατά μήκος μίας επιφάνειας , ο συντελεστής συναγωγής μπορεί και αυτός να διαφέρει από σημείο σε σημείο. Για αυτό τον λόγο διαχωρίζουμε τον συντελεστή συναγωγής στον τοπικό συντελεστή και τον μέσο συντελεστή. Έτσι έχουμε για τον τοπικό συντελεστή h_c :

$$dq_c = h_c * dT(T_s - T_\infty) \quad (2.2.3)$$

Ενώ για τον μέσο συντελεστή $h_{\text{μεσο}}$:

$$h_{\text{μεσο}} = (1/A) * \iint h_c dA \quad (2.2.4)$$

2.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Ακτινοβολία είναι η ενέργεια που εκπέμπει η ύλη με την μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ή φωτονίων) λόγω των μεταβολών στην ηλεκτρονική διαμόρφωση των ατόμων ή των μορίων. Σε αντίθεση με την αγωγή και την συναγωγή, η μεταφορά ενέργειας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη υλικού μέσου. Στην πραγματικότητα , η μεταφορά ενέργειας με ακτινοβολία είναι γρηγορότερη (ίση με την ταχύτητα του φωτός) και δεν υφίσταται απώλειες στο κενό. Στη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας ενδιαφέρει η θερμική ακτινοβολία , η οποία αποτελεί τη μορφή ενέργειας που εκπέμπουν τα σώματα λόγω της θερμοκρασίας τους. Διαφέρει από τις άλλες μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όπως ακτίνες- X , οι ακτίνες- γ , τα μικροκύματα , τα ραδιοκύματα και τα τηλεοπτικά κύματα ,τα

οποία δεν σχετίζονται με την θερμοκρασία. Όλα τα σώματα σε θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία είναι ένα ογκομετρικό φαινόμενο και όλα τα στερεά, τα υγρά και τα αέρια εκπέμπουν, απορροφούν, ή μεταδίδουν ακτινοβολία σε διαφορετικό βαθμό. Ωστόσο, η ακτινοβολία θεωρείται συνήθως ως επιφανειακό φαινόμενο για τα στερεά που είναι αδιαφανή στη θερμική ακτινοβολία όπως τα μέταλλα, το ξύλο και τα πετρώματα, αφού η ακτινοβολία που εκπέμπουν οι εσωτερικές περιοχές αυτών των υλικών δεν φτάνει ποτέ στην επιφάνεια, και η προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω σε τέτοια σώματα απορροφάται συνήθως σε λίγα μόνο μικρά από την επιφάνεια. Η ποσότητα της ενέργειας που διαφεύγει από μία επιφάνεια σαν ακτινοβολία εξαρτάται από την απόλυτη θερμοκρασία και την φύση της επιφάνειας.

Ένας ιδανικός εκπομπός ακτινοβολίας, εκπέμπει θερμότητα από την επιφάνεια του με ρυθμό που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{emit,max} = \sigma * A * T^4 \quad (2.3.1)$$

όπου:

$Q_{emit,max}$ = ρυθμός που εκπέμπεται θερμότητα σε Watt

A = επιφάνεια σε m^2

T = Θερμοκρασία στην επιφάνεια σε K

σ = σταθερά «Stefan-Boltzman», με τιμή $5.67 * 10^{-8} W/m^2 * K^4$

Η ιδανική επιφάνεια που εκπέμπει ακτινοβολία με το μέγιστο αυτό ρυθμό ονομάζεται μέλαν (μαύρο) σώμα, και η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα τέτοιο σώμα ονομάζεται ακτινοβολία του μέλανος σώματος. Η ακτινοβολία που εκπέμπουν όλες οι πραγματικές επιφάνειες είναι μικρότερη από εκείνη του μέλανος σώματος στην ίδια θερμοκρασία, και εκφράζεται ως:

$$Q_{emit,max} = \epsilon * \sigma * A * T^4 \quad (2.3.2)$$

Κεφάλαιο 3

Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας [5-7]

3.1 Εισαγωγή

Σε κάθε ενεργειακό σύστημα, δηλαδή σε κάθε σύστημα που παράγει μια μορφή ενέργειας, το μεγαλύτερο πρόβλημα που καλούμαστε ως μηχανικοί να αντιμετωπίσουμε, είναι η διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας σύμφωνα με το απαιτούμενο φορτίο, ώστε να μην καθίσταται ενεργειακά ασύμφορο το σύστημά μας. Στα διάφορα ενεργειακά συστήματα είναι δυνατόν να παρατηρηθούν τα εξής:

- Εποχιακή διακύμανση των ενεργειακών αναγκών
- Διακύμανση κατά την παραγωγή ενέργειας
- Διαφορά στην ποσότητα παραγόμενης και ζητούμενης ενέργειας

Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτή η ανάγκη ύπαρξης ενός τρόπου ρύθμισης των παραπάνω ενεργειακών ασυμβατοτήτων του ενεργειακού συστήματος. Σε αυτό το σημείο, εμφανίζεται η ενεργειακή αποθήκη που θα εξομαλύνει τις διακυμάνσεις τόσο της παραγόμενης ενέργειας όσο και του απαιτούμενου φορτίου. Η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας σε ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας είναι οποιαδήποτε εγκατάσταση, συνήθως υποκείμενη σε ανεξάρτητο έλεγχο, η οποία δύναται να αποθηκεύσει ενέργεια, που παράγεται στο κυρίως ενεργειακό σύστημα, να τη διατηρήσει και να την αποδώσει στο σύστημα όταν αυτό είναι απαραίτητο. Με τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μειώνεται η κατανάλωση σε ενέργεια και αυξάνεται η απόδοση του όλου συστήματος.

Ένας πλήρης κύκλος αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνει τις εξής καταστάσεις:

- φόρτιση της «αποθήκης»
- διατήρηση ενέργειας
- αποφόρτιση

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

1. Αύξηση της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος παραγωγής ενέργειας στο οποίο υφίστανται, με την αποθήκευση ενέργειας που παράγεται σε περιόδους απαίτησης χαμηλού φορτίου και τη χρήση της σε περιόδους ενεργειακής αιχμής, οπότε το σύστημα για την κάλυψη της επιπλέον απαιτούμενης ενέργειας ενεργοποιεί μικρότερες μονάδες που φορτίζονται και αποδίδουν πλήρως.
2. Ενδυναμώνουν την καλύτερη λειτουργία των συστημάτων συμπαραγωγής ενέργειας, αφού με την αποθήκευση της ενέργειας τα συστήματα δε χρειάζεται να ενεργοποιούνται σύμφωνα με τις μεταβαλλόμενες ανάγκες του φορτίου
3. Μεταφέρουν την παραγωγή ενέργειας από τις περιόδους υψηλής ζήτησης σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, όπου το κόστος παραγωγής είναι πολύ μικρότερο.
4. Αυξάνουν την αξιοπιστία του συστήματος παραγωγής ενέργειας, αφού βοηθούν στην παραγωγή σταθερής ποσότητας ενέργειας συνολικά από το σύστημα, χωρίς επικίνδυνες διακυμάνσεις.
5. Μειώνεται το κόστος της ενέργειας, αφού μειώνεται η κατανάλωσή της και το κόστος παραγωγής της
6. Μειώνεται η ενεργειακή κατανάλωση καθώς βελτιώνεται η διαχείριση της ενέργειας σύμφωνα με τις ανάγκες
7. Αυξάνεται η προσαρμοστικότητα του συστήματος στις εκάστοτε ανάγκες
8. Μειώνεται το αρχικό κόστος και το κόστος συντήρησης του συστήματος παραγωγής της ενέργειας, αφού μειώνεται το μέγεθος του εγκατεστημένου εξοπλισμού, αφού ο απαιτούμενος εξοπλισμός δεν υπολογίζεται με βάση την κάλυψη του μέγιστου φορτίου αιχμής αλλά ενός μέσου φορτίου και τη χρήση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας
9. Μειώνεται η κατανάλωση των φυσικών καυσίμων, αφού μειώνονται οι ενεργειακές ανάγκες και επομένως μειώνονται οι ρυπογόνες εκπομπές

3.2 Μέθοδοι αποθήκευσης Ενέργειας [5-7]

Οι μορφές με τις οποίες η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί είναι η μηχανική, η θερμική, η χημική, η βιολογική και η μαγνητική

I. Μηχανική αποθήκευση της ενέργειας

Η μηχανική αποθήκευση της ενέργειας περιλαμβάνει την αποθήκευση αυτής:

- σαν κινητική ενέργεια ευθύγραμμης ή περιστρεφόμενης κίνησης
- σαν δυναμική ενέργεια υπερυψωμένων σωμάτων ή ελαστικών υλικών
- σαν ενέργεια αερίων υπό πίεση

Οι βασικές μέθοδοι μηχανικής αποθήκευσης της ενέργειας είναι

1. η υδροαποθήκευση
2. το σύστημα συμπιεσμένου αέρα
3. οι περιστρεφόμενοι τροχοί (σφόνδυλοι)

II. Χημική αποθήκευση της ενέργειας

Η χημική αποθήκευση της ενέργειας περιλαμβάνει την αποθήκευση ενέργειας σε μία ή περισσότερες χημικές ενώσεις που εκλύουν ή απορροφούν ενέργεια όταν αντιδρούν μεταξύ τους για να σχηματίσουν νέες χημικές ενώσεις.

III. Ηλεκτροχημική αποθήκευση

Η πιο γνωστή συσκευή χημικής αποθήκευσης είναι η μπαταρία. Στη συσκευή αυτή η ενέργεια με τη μορφή της ηλεκτρικής ενέργειας, κατά την αποθήκευσή της προκαλεί χημικές αντιδράσεις, οι οποίες κατά την αντίστροφη πορεία τους αποδίδουν την αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια.

IV. Θερμοχημική αποθήκευση

Μερικά συστήματα χημικής αποθήκευσης ενέργειας φορτίζονται και αποφορτίζονται θερμικά. Πολλές χημικές αντιδράσεις είναι αμφίδρομες, ενδόθερμες, όταν πραγματοποιούνται προς τη μια κατεύθυνση, οπότε απορροφούν θερμότητα και την αποθηκεύουν –αύξηση της θερμοκρασίας του συστήματος- και εξώθερμες, όταν πραγματοποιούνται κατά την αντίστροφη κατεύθυνση –όταν πέσει η θερμοκρασία του συστήματος- οπότε και απελευθερώνουν την αποθηκευμένη θερμότητα.

V. Φωτοχημική αποθήκευση

Στην κατηγορία της χημικής αποθήκευσης εντάσσεται και η φωτοχημική αποθήκευση. Σε αυτού του είδους την αποθήκευση η ηλιακή ενέργεια-φως κατά την πρόσπτωσή της σε μια ένωση A οδηγεί σε μια φωτοχημική αντίδραση και την

παραγωγή μιας ένωσης Β. Η ένωση Β, κατά την αντίστροφη πορεία της αντίδρασης, απελευθερώνει ενέργεια παράγει ξανά την ένωση Α.

VI. Αποθήκευση ενέργειας με την μορφή καυσίμου (Υδρογονοαποθήκευση)

Στη χημική αποθήκευση της ενέργειας μπορεί να ενταχθεί και η αποθήκευση της ενέργειας με τη μορφή ενός καυσίμου. Μια τέτοια μέθοδος αποθήκευσης είναι η υδρογονοαποθήκευση, δηλαδή η αποθήκευση ενέργειας μέσω του υδρογόνου. Το υδρογόνο σήμερα έχει πολύ ελκυστικές ιδιότητες ως μέσο αποθήκευσης του ηλεκτρισμού. Η ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα μάζας του υδρογόνου ανέρχεται σε 116300 kJ/kg, ποσό κατά πολύ μεγαλύτερο από αυτό του υγρού μεθανίου που ανέρχεται σε 46250 kJ/kg. Όμως, η ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου του υδρογόνου είναι πολύ μικρή, γεγονός που απαιτεί μεγάλο όγκο αποθήκευσης. Το υδρογόνο, παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα στο ρόλο του ενεργειακού μεταφορέα. Μπορεί να αποθηκευτεί σχετικά εύκολα, να μεταφερθεί οικονομικά και να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές. Ένα σημαντικό μειονέκτημα του υδρογόνου είναι ότι δε βρίσκεται σε ελεύθερη μορφή στη φύση.

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σαν πεπιεσμένο αέριο ή υγρό ή σε ένα χημικό μίγμα.

VII. Βιολογική αποθήκευση ενέργειας

Στη βιολογική αποθήκευση ενέργειας, η ενέργεια αποθηκεύεται σε χημική μορφή μέσω βιολογικών διεργασιών. Θεωρείται πως η μέθοδος αυτή είναι σημαντική για τη μακροχρόνια αποθήκευση. Αυτή τη στιγμή η απόδοση των βιολογικών διεργασιών για αποθήκευση ενέργειας είναι της τάξης του 1%, ποσοστό πολύ μικρό που δεν αφήνει περιθώρια εκμετάλλευσης.

VIII. Μαγνητική αποθήκευση ενέργειας

Στη μαγνητική αποθήκευση της ενέργειας, η ενέργεια αποθηκεύεται σε κάποιο μαγνητικό πεδίο όπως σε ένα μεγάλο ηλεκτρομαγνήτη. Ένα αναπτυσσόμενο σχέδιο σε αυτού του είδους την αποθήκευση αφορά στα υπεραγώγιμα υλικά. Σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν, μερικά υλικά εμφανίζουν σχεδόν μηδενική ηλεκτρική αντίσταση και επομένως μεγάλης έντασης ηλεκτρικά ρεύματα είναι δυνατόν να διέλθουν μέσα από αυτά τα υλικά σχεδόν χωρίς απώλειες. Επειδή, όμως σε αυτό το σενάριο η αποθήκευση γίνεται σε συνεχές ρεύμα, υπάρχουν κάποιες απώλειες κατά τη μετατροπή του ρεύματος αυτού σε εναλλασσόμενο. Επιπλέον, ένα ποσό της ενέργειας θα καταναλώνεται για την παραγωγή και διατήρηση αυτών των χαμηλών θερμοκρασιών. Για αυτού του είδους τα συστήματα αναμένονται βαθμοί απόδοσης της τάξης του 80%-90%.

IX. Θερμική αποθήκευση ενέργειας

Τέλος, στη θερμική αποθήκευση ενέργειας, η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε μια ουσία με την αύξηση ή τη μείωση της θερμοκρασίας της (με τη μορφή αισθητής θερμότητας) ή με την αλλαγή της φάσης της (με τη μορφή της αισθητής

θερμότητας). Παραδείγματα θερμικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι η αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας για νυχτερινή θέρμανση, η αποθήκευση της καλοκαιρινής θερμότητας για τη χρήση της το χειμώνα, η αποθήκευση του χειμωνιάτικου πάγου για τον καλοκαιρινό κλιματισμό. Ένα άλλο είδος συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας χρησιμοποιεί ηλεκτρικούς θερμαντές για την παραγωγή θερμότητας τη νύχτα, που το κοστολόγιο της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρότερο και την αποθηκεύει στη δομική μάζα των υλικών του κτιρίου ή σε υλικά του εδάφους ή ακόμη σε κεραμικά υλικά που βρίσκονται σε καλά μονωμένες δεξαμενές, για την ημερήσια απόδοσή της. Με παρόμοιο τρόπο στα συστήματα αποθήκευσης ψύξης γίνεται νυχτερινή παραγωγή πάγου, όταν δηλαδή δεν απαιτείται και αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί για τον κλιματισμό χώρων την επόμενη μέρα όταν αυτό απαιτηθεί.

Στις μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας μέσω αεριοστρόβιλων, τα συστήματα αποθήκευσης ψύξης χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στην ψύξη του αέρα περιβάλλοντος πριν εισέλθει στο συμπιεστή κυρίως κατά τους θερινούς μήνες που πέφτει η απόδοση του συστήματος. Παρατηρούμε, λοιπόν, από τις εφαρμογές των συστημάτων αυτών ότι διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο στη βελτίωση της απόδοσης των ενεργειακών συστημάτων στα οποία υφίστανται καθώς εξομαλύνουν τις διαφορές ανάμεσα στην παραγωγή και τη ζήτηση του φορτίου. Στα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας θα αναφερθούμε διεξοδικά παρακάτω.

Κεφάλαιο 4

4. Θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας [5-7]

4.1 Εισαγωγή

Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας θεωρούνται σαν μια από τις πιο προηγμένες τεχνολογίες σε θέματα ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια έχει εκδηλωθεί μεγάλο ενδιαφέρον, για αυτά τα συστήματα αποθήκευσης. Όπως γίνεται αντιληπτό, η θερμική αποθήκευση της ενέργειας κατέχει τον βασικό ρόλο στην εξοικονόμηση της ενέργειας. Καθώς βαδίζουμε σταθερά σε μια ενεργειακή κρίση, τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αναμένονται να είναι μια πολύ ελκυστική επιλογή σε βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές, καθώς θα οδηγούν μεταξύ των άλλων σε αύξηση της απόδοσης του ενεργειακού συστήματος και σε περιβαλλοντικά οφέλη.

Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν μια μέθοδο για την ουσιαστική μείωση του ηλεκτρικού φορτίου μειώνοντας τα φορτία αιχμής. Ακόμη,

καθιστούν ευκολότερη μια σωστή πρόβλεψη της λειτουργίας του ενεργειακού συστήματος, αφού αποσβένουν τις αποκλίσεις ανάμεσα στην παραγωγή και τη ζήτηση του ενεργειακού φορτίου. Επομένως, οδηγούν σε μια αποδοτικότερη χρήση των συστημάτων ενέργειας στα οποία υφίστανται. Για τους λόγους αυτούς, οι ερευνητικές δραστηριότητες σε αυτόν τον τομέα συνεχίζονται με ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον σε διάφορα ερευνητικά κέντρα, σε πολλές χώρες του κόσμου.

Υπάρχουν δύο κυρίως τύποι θερμικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που αποθηκεύουν τη θερμική ενέργεια με τη μορφή της αισθητής θερμότητας και τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που αποθηκεύουν τη θερμική ενέργεια με τη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας. Η επιλογή του εκάστοτε συστήματος εξαρτάται από τη διάρκεια της αποθήκευσης, την οικονομική του βιωσιμότητα και από διάφορες λειτουργικές παραμέτρους, δηλαδή κατά πόσο ταιριάζει το επιλεγμένο σύστημα στο ενεργειακό σύστημα που υπάγεται. Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, η πλειοψηφία των οποίων αφορά στη θέρμανση και στην ψύξη. Τα αποθηκευτικά αυτά συστήματα αποτελούν ένα σύνδεσμο και μια προσωρινή αποθήκη μεταξύ της θερμικής πηγής και του χρήστη αυτής της θερμικής ενέργειας. Ένας βασικός παράγοντας που καθορίζει την αποδοτική λειτουργία ενός συστήματος αποθήκευσης είναι η ημερήσια διακύμανση του φορτίου, γιατί από αυτήν καθορίζεται η φόρτιση και η εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης. Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας υποβάλλονται σε ελέγχους πριν από τη χρήση τους. Η ASHRAE έχει θεσπίσει ένα σύνολο κανόνων και δοκιμασιών στις οποίες μπορούμε να υποβάλλουμε τα συστήματά μας ώστε να ελέγχουμε αν είναι αποδοτική η χρήση τους.

4.2 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας

Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας (θέρμανσης και ψύξης) με τη μορφή της αισθητής θερμότητας πραγματοποιείται με την αύξηση ή τη μείωση της θερμοκρασίας ενός υλικού, χωρίς να αλλάζει η φάση στην οποία βρίσκεται. Έτσι, για ένα υλικό που μεταβαίνει από μια θερμοκρασία T_1 σε μια θερμοκρασία T_2 , η θερμική ενέργεια που συναλλασσόμαστε (είτε προσδίδουμε είτε παίρνουμε από το υλικό) είναι :

$$\Delta Q = m \cdot \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = V \cdot \int_{T_1}^{T_2} (C_p \cdot \rho) dT$$

Όπου:

m : η μάζα του υλικού σε kg

C_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα, υπό σταθερή πίεση, του υλικού σε J/KgK

V : ο όγκος του υλικού σε m³

dT : η διαφορά θερμοκρασίας σε βαθμούς K

Όπως σημειώσαμε και ανωτέρω, το υλικό αυτό δε θα αλλάζει φάση σε όλο το

θερμοκρασιακό εύρος της διαδικασίας. Η ποσότητα ΔQ αποτελεί, τελικά, την ποσότητα ενέργειας που αποθηκεύουμε στο σύστημα. Αν και οι τιμές της πυκνότητας ρ και της ειδικής θερμοχωρητικότητας C_p , οι οποίες καθορίζουν τη συμπεριφορά των υλικών αυτών, μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, οι μέσες τιμές αυτών ικανοποιούν τη σχέση $\Delta Q = C_p \cdot \Delta T$, ανά μονάδα μάζας. Ένας ακόμη βασικός παράγοντας που χαρακτηρίζει αυτά τα υλικά είναι ο ρυθμός με τον οποίο μπορούν να αποθηκεύσουν ή να εκλύσουν θερμότητα. Η πυκνότητα ενός υλικού, ρ , είναι το μέγεθος που μας δείχνει πόση μάζα καταλαμβάνει το υλικό ανά μονάδα όγκου (kg/m^3) και η ειδική θερμοχωρητικότητα αυτού, C_p (J/KgK), είναι το μέγεθος που μας δείχνει πόση ενέργεια απαιτείται για να αυξήσουμε τη θερμοκρασία ενός kg του υλικού κατά έναν βαθμό Kelvin, υπό σταθερή πίεση. Για να συγκρίνουμε κάποια υλικά η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο ίσως να είναι πιο χρήσιμη. Το μέγεθος αυτό, C_v ($\text{J}/\text{m}^3\text{K}$), μας δείχνει πόση ενέργεια απαιτείται για την ανύψωση της θερμοκρασίας ενός m^3 ενός υλικού, κατά ένα βαθμό Kelvin, υπό σταθερό όγκο.

Από τους παραπάνω ορισμούς διαφαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού τόσο μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας μπορεί να αποθηκεύσει. Για αυτό το λόγο το μέγεθος αυτό αποτελεί βασικό κριτήριο για την ικανότητα ενός υλικού να αποθηκεύει αισθητή θερμότητα.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τις ιδιότητες διαφόρων χρησιμοποιούμενων υλικών ως μέσα θερμικής αποθήκευσης, στους 20°C .

Πίνακας 1 Ιδιότητες υλικών θερμικής αποθήκευσης

Υλικό	ρ (kg/m^3)	C_p (J/KgK)	C_v ($\text{MJ}/\text{m}^3\text{K}$)
Πηλός	1458	879	1, 28
Τούβλο	1800	837	1, 51
Αμμόπετρα	2200	712	1, 57
Ξύλο	700	2390	1, 67
Σκυρόδεμα	2000	880	1, 76
Αλουμίνιο	2710	837	2, 27
Σίδηρο	7900	452	3, 57
Ατσάλι	7840	465	3, 68
Πετρώματα υπεδάφους	2050	1840	3, 77
Μαγνητίτης	5177	752	3, 89
Νερό	988	4182	4, 17

Για να είναι κατάλληλα τα υλικά για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής (αποθήκευση με τη μορφή αισθητής θερμότητας) πρέπει να έχουν:

- υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα
- υψηλή θερμική διάχυση, δηλαδή υψηλό ρυθμό απελευθέρωσης ή
- απορρόφησης της θερμότητας
- υψηλό ειδικό βάρος
- να είναι δυνατή η χρησιμοποίησή τους και σαν θερμικά και σαν ψυκτικά μέσα
- να έχουν θερμική και γεωμετρική σταθερότητα
- να μην είναι εύφλεκτα, διαβρωτικά ή τοξικά
- να έχουν σχετικά χαμηλό κόστος
- να έχουν ικανοποιητική αντοχή
- να λειτουργούν σε ευρύ φάσμα εφαρμογών

4.2.1 Στερεά υλικά [8]

Τα στερεά υλικά, όπως πέτρες, χαλίκια, τούβλα, κεραμικά στερεά, τσιμέντο, έχουν το πλεονέκτημα της υψηλής τιμής στην ειδική θερμοχωρητικότητα (όχι υψηλότερης από του νερού). Συνήθεις εφαρμογές των υλικών αυτών είναι στην πλήρωση της θερμικής κλίνης στερεών (rockbed), στους τοίχους θερμικής αποθήκευσης, σαν δομικά υλικά του κελύφους των κτιρίων, στην μακράς διάρκειας υπόγεια αποθήκευση (με υλικά του εδάφους, όπως πετρώματα). Στα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας δύο μεγέθη παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο :η θερμοχωρητικότητα των υλικών, που αναφέρεται στην ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας σε αυτά και η θερμοπερατότητα του εκάστοτε κτιρίου, κτίσματος κλπ. η οποία χαρακτηρίζει συνολικά την ικανότητα του κτιρίου να αποθηκεύει ενέργεια σε σχέση με τις θερμικές απώλειες.

Θερμοπερατότητα Κτιρίου

Η θερμοπερατότητα καθορίζει την ποσότητα θερμότητας που μεταδίδεται από τη μία πλευρά του υλικού στην άλλη, όταν και από τις δύο πλευρές το υλικό έρχεται σε επαφή με τον αέρα. Δηλαδή η θερμοπερατότητα λαμβάνει υπόψη τη θερμοδιαφυγή του υλικού και τη θερμική μετάβαση και από τις δύο πλευρές του.

Θερμοχωρητικότητα

Το μέγεθος που διαδραματίζει τον σπουδαιότερο ρόλο στη θερμική συμπεριφορά ενός υλικού, είναι η θερμοχωρητικότητά του. Η θερμοχωρητικότητα ενός υλικού (σε J/oC) καθορίζει την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε αυτό. Αντίστοιχα, η ειδική θερμοχωρητικότητα ενός υλικού (J/kgοC) καθορίζει την ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα μάζας υλικού, που μπορεί να αποθηκευτεί σε αυτό. Επομένως στην θερμική αποθήκευση ενέργειας, τα μεγέθη αυτά είναι μείζονος σημασίας.

4.2.2 Υγρά υλικά

Νερό

Από τα διάφορα υγρά υλικά (αλλά και από τα στερεά υλικά) το νερό κυριαρχεί για θερμοκρασίες κάτω των 100°C, αφού έχει την υψηλότερη θερμοχωρητικότητα 4,18 kJ/kgK, χαμηλή πυκνότητα, πολύ χαμηλή τιμή, είναι ευρέως διαθέσιμο και μπορεί εύκολα να αντληθεί και να μεταφερθεί, μεταφέροντας έτσι και την περιεχόμενη σε αυτό ενέργεια. (Το νερό παραμένει οικονομικά ανταγωνιστικό και σε υψηλότερες θερμοκρασίες, έως 357°C, παρόλη την ανάγκη για συμπίεσή του.) Ακόμη σαν υγρό επιτρέπει καλούς ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας. Όπως, προαναφέραμε το νερό κυριαρχεί μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιούνται ως αποθηκευτικά μέσα θερμικής ενέργειας με τη μορφή της αισθητής θερμότητας. Το νερό, λόγω των θερμικών του ιδιοτήτων αλλά και εξαιτίας της ευκολίας στη διαχείρισή του, φαίνεται να είναι ένα εξαιρετικό μέσο για την αποθήκευση της θερμικής ενέργειας, ειδικά σε εφαρμογές με χαμηλές θερμοκρασίες αποθήκευσης. (Το νερό μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια και με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας- πάγος, για ψυκτικές εφαρμογές)

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του νερού είναι:

- Η μεγάλη δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου, χάρη στη μεγάλη ειδική θερμοχωρητικότητά του
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί συγχρόνως και σαν ρευστό που θα μεταφέρει τη θερμική ενέργεια αλλά και σαν αποθηκευτικό μέσο
- Έχει ευρεία περιοχή λειτουργίας από 0-100°C, που μπορεί να διευρυνθεί και προς τα κάτω, με ειδικά πρόσθετα που αποτρέπουν την στερεοποίησή του και προς τα πάνω, με συμπίεσή του για την αποφυγή της εξάτμισής του.
- Η πολύ οικονομική προμήθειά του και η εύκολη εύρεσή του

Έλαια

Έλαια, για ένα εύρος θερμοκρασιών -10 έως 320 ° C, και τηγμένα άλατα και μέταλλα χρησιμοποιούνται επίσης συχνά σε διάφορες εφαρμογές. Όμως, τα έλαια εμφανίζουν μικρότερη θερμοχωρητικότητα από το νερό, περίπου 2.3 kJ/kgK και έχουν την τάση σε υψηλές θερμοκρασίες να διασπών και να αναδιαμορφώνουν τα πηκτικά προϊόντα τους. Εμφανίζουν, λοιπόν, μια αστάθεια χημική. Τα τηγμένα άλατα εμφανίζουν μια θερμοχωρητικότητα περίπου 1.5 kJ/kgK και χρησιμοποιούνται για αποθήκευση σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα μειονεκτήματά τους είναι η εμφάνιση του φαινομένου της στερεοποίησης σε θερμοκρασίες κάτω από 150°C και του φαινομένου της διάβρωσης. Τα τηγμένα μέταλλα (όπως η υγρή σόδα) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ασυμπίεστη κατάσταση για θερμοκρασίες αποθήκευσης πάνω από 760 °C με μια μέση θερμοχωρητικότητα της τάξης του 1.3 kJ/kg K με κάποια προβλήματα διαχείρισης.

4.2.3 Άλλα υλικά

Για υψηλής θερμοκρασίας αποθήκευση ο σίδηρος και τα οξειδία του σιδήρου έχουν θερμικές ιδιότητες συγκρίσιμες με του νερού ανά μονάδα όγκου της αποθήκευσης. Το κόστος των υλικών αυτών μετριάζεται για μικρές σφαιρικές γεωμετρίες.

Ακόμη, εφόσον ο σίδηρος και τα οξειδιά του έχουν παρόμοιες θερμικές ιδιότητες, μια οξείδωση του σιδήρου από τον αέρα σε υψηλές θερμοκρασίες δεν θα επηρεάσει την απόδοση του συστήματος. Σε αρκετές εφαρμογές χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός υγρών και στερεών υλικών για τη βελτίωση της θερμικής διαστρωμάτωσης των στερεών υλικών και της μείωσης της ποσότητας των υγρών αντίστοιχα. Κυρίως για την αποθήκευση της θερμότητας σε κτιριακές εφαρμογές, χρησιμοποιούμε σαν αποθηκευτικά μέσα το νερό ή και κάποιο άλλο υγρό, σε υγρές θερμικές αποθήκες υπέργειες ή υπόγειες, τα χαλίκια για θερμικές κλίνες στερεών και το έδαφος, για τη διεποχιακή αποθήκευση. Στις υγρές θερμικές αποθήκες, το πιο συχνό αποθηκευτικό μέσο είναι το νερό. Όμως, ορισμένες φορές χρησιμοποιούνται και διαλύματα ουσιών στο νερό που επιτυγχάνουν υψηλές τιμές θερμοχωρητικότητας, όπως το διάλυμα silical-water. Το υγρό αποθηκευτικό μέσο μπορεί να θερμαίνεται είτε από την ηλιακή ενέργεια είτε από κάποια θερμική αντίσταση είτε από κάποιο σύστημα θέρμανσης με καύσιμο.

4.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας (PCM)

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας βασίζεται στην ιδιότητα των υλικών που αλλάζουν φάση (Phase Change Materials, PCM) να απορροφούν ή να απελευθερώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας (λανθάνουσα θερμότητα) κατά την ισοθερμοκρασιακή αλλαγή φάσης στην οποία βρίσκονται. Έτσι, η εξάτμιση, η τήξη, και η αλλαγή στην κρυσταλλική κατάσταση στερεών που, για παράδειγμα, περιέχουν νερό στους κρυστάλλους τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Κατά αυτόν τον τρόπο ένα υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αποθήκη θερμότητας όταν το περίσσειμα της θερμικής ενέργειας διοχετευθεί σε αυτό έτσι ώστε να τηχθεί και το τήγμα να διατηρηθεί χωρίς απώλειες. Όταν απαιτηθεί αυτή η θερμότητα, θα ανακτηθεί από το τήγμα σε ποσότητα ίση με τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης, οπότε το τήγμα θα πήξει. Αυτό είναι δυνατό να επαναλαμβάνεται συνέχεια.

Για παράδειγμα, η αποθηκευμένη θερμότητα ενός υλικού που μεταβαίνει από μία θερμοκρασία T_1 σε μια υψηλότερη θερμοκρασία T_2 , αν συμβαίνει και αλλαγή φάσης αυτού σε μία ενδιάμεση θερμοκρασία T^* είναι το άθροισμα της αισθητής θερμότητας για τη μετάβαση της στερεάς φάσης του υλικού από τη θερμοκρασία T_1 στη θερμοκρασία T^* και της λανθάνουσας θερμότητας στη θερμοκρασία τήξης T^* και της αισθητής θερμότητας για τη μετάβαση της υγρής φάσης από θερμοκρασία T^* σε T_2 :

$$Q_s = m \cdot \left[(T^* - T_1) \cdot C_s + f_s + (T_2 - T^*) \cdot C_l \right]$$

όπου, m , η μάζα του υλικού, C_s , C_l , είναι οι ειδικές θερμοχωρητικότητες της στερεάς και της υγρής φάσης αυτού αντίστοιχα και, f_s , είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του υλικού.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με υλικά που αλλάζουν φάση είναι η υψηλή πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας ανά μονάδα μάζας σε σχέση με τα συστήματα αποθήκευσης με αισθητή θερμότητα και το μικρό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του συστήματος, αφού η διεργασία αλλαγής φάσης γίνεται σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Επίσης, δεν υπάρχει βαθμιαία μείωση στην θερμοκρασία καθώς το υλικό αποφορτίζεται. Γενικά είναι δυνατές οι ακόλουθες μετατροπές στην κατάσταση ενός υλικού, κατά φθίνουσα σειρά εμπλεκόμενου ποσού λανθάνουσας θερμότητας:

- Από στερεό σε αέριο
- Από υγρό σε αέριο
- Από στερεό σε υγρό

Οι πρώτες δύο μορφές αλλαγής φάσης δε χρησιμοποιούνται καθώς το βασικό τους πρόβλημα είναι ο σχηματισμός αερίου και κατά συνέπεια η σημαντική μεταβολή όγκου η οποία κάνει περισσότερο πολύπλοκη τη λειτουργία του συστήματος (δοχεία υπό πίεση κλπ.) Για αυτό η πιο συνηθισμένη διεργασία είναι η τήξη και η πήξη του μέσου αποθήκευσης. Τα PCMs διατίθενται σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και θερμοτήτων αλλαγής φάσης. Σε πραγματικά συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας η αλλαγή της φάσης του υλικού δε γίνεται σε απόλυτα σταθερή θερμοκρασία αφού τα συστήματα αυτά δε βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία. Η μεταβολή αυτή της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα εκτός από τη λανθάνουσα θερμότητα να αποθηκεύεται στο υλικό ακόμη ένα ποσό ενέργειας με τη μορφή της αισθητής θερμότητας.

Κεφάλαιο 5

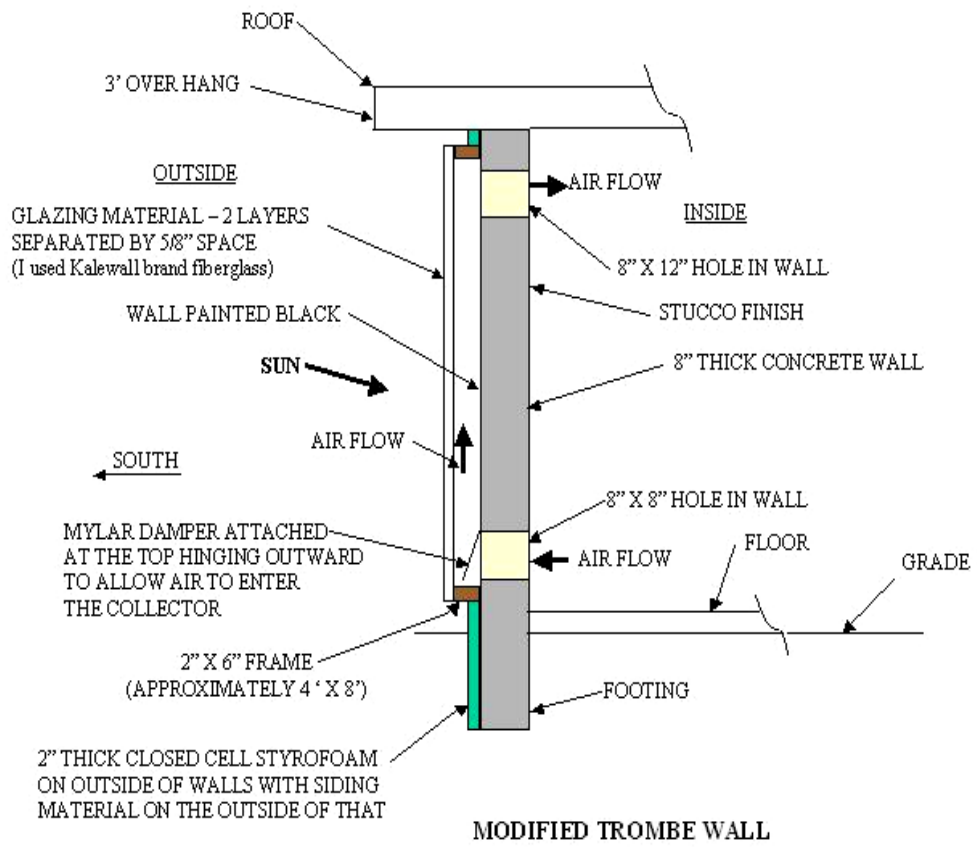
Ενεργητικά και Παθητικά Συστήματα [9,10]

Για την θέρμανση και την ψύξη ενός χώρου με την χρήση της ηλιακής ενέργειας, η τελευταία χρειάζεται να συλλεχθεί, να αποθηκευτεί και να διανεμηθεί κατάλληλα στο χώρο. Στα ενεργητικά συστήματα θέρμανσης- ψύξης, η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται χρησιμοποιώντας κάποιου είδους συλλέκτες, για παράδειγμα δεξαμενές νερού. Νερό αποθηκευμένο σε πλαστικό, σε fiberglass, το οποίο χρησιμοποιείται ως μονωτικό υλικό, είναι κατασκευασμένο από άμμο και ανόργανα συστατικά και συνήθως υποκαθιστά με ασφάλεια τον ασβέστη, ή σε ατσάλινες δεξαμενές που είναι ‘glass-lined’ αποτελεί το τυπικό μέσο θερμικής αποθήκευσης σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού, το οποίο διαχωρίζεται από το υπόλοιπο κτίριο με μόνωση. Η ηλιακή ενέργεια που αποθηκεύεται στην μονάδα αποθήκευσης μπορεί να βρίσκεται σε μορφή αισθητής ή και λανθάνουσας θερμότητας και η ενέργεια διανέμεται στο χώρο χρησιμοποιώντας ηλεκτρικές βάνες, ανεμιστήρες ή άλλα μέσα.

Από την άλλη στα παθητικά συστήματα θέρμανσης-ψύξης, η συλλογή, αποθήκευση και διανομή της ενέργειας γίνεται με φυσικά μέσα και γενικότερα, δεν χρη-

σιμοποιείται καθόλου μηχανική ή ηλεκτρική ισχύς ή ηλεκτρονικός έλεγχος. Σε αυτά τα συστήματα, στοιχεία του κτιρίου όπως οι τοίχοι, η οροφή, τα παράθυρα επιλέγονται και τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να συμμετέχουν στην συλλογή, αποθήκευση, μεταφορά και διανομή της θερμικής ενέργειας. Τόσο τα στοιχεία του κτιρίου, όπως είναι τα κατασκευαστικά του υλικά (πέτρες, τούβλα τσιμέντο, νερό, μόνωση και άλλα) και οι διάφορες θερμικές διεργασίες όπως η θερμική ακτινοβολία, η φυσικά και η εξαναγκασμένη συναγωγή, η αγωγή, η εξάτμιση και άλλα, συνδυάζονται ποικιλοτρόπως ανάλογα με τις ιδιαίτερες ανάγκες του κάθε κτιρίου, οι οποίες εξαρτώνται και πάλι από το κλίμα της περιοχής και το σκοπό κατασκευής του. Τα κατασκευαστικά υλικά, δηλαδή τα τούβλα, οι πέτρες, το τσιμέντο, το pcu και άλλα, βοηθούν στην αποθήκευση σεβαστών ποσοτήτων ενέργειας και στην χρονική καθυστέρηση και μείωση της έντασης του κύματος θερμότητας. Κατά την διάρκεια της ημέρας, η θερμότητα αποθηκεύεται σε αυτά τα υλικά και αποδίδεται κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν είναι πιο απαραίτητη.

Τα συστήματα αποθήκευσης για παθητικής μορφής θερμότητα περιλαμβάνουν το άμεσο και το έμμεσο κέρδος. Στο άμεσο κέρδος, η θερμότητα λαμβάνεται μέσω ενός παραθύρου, ενός τοίχου ή ενός γυαλιού με νότιο προσανατολισμό, μέσω του πατώματος ή και μέσω αντικειμένων λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι, η περιοχή του κτιρίου που θερμαίνεται τείνει να υπερθερμανθεί. Επιπλέον οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις είναι συνήθως υψηλότερες από αυτές που δίνουν την αίσθηση της θερμικής άνεσης στον άνθρωπο. Μία αποτελεσματική μέθοδος για την μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων είναι η εισαγωγή ενός τοίχου αποθήκευσης θερμότητας ανάμεσα στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία και στο κτίριο. Αυτό αποτελεί το έμμεσο κέρδος. Παθητικά συστήματα έμμεσου κέρδους είναι για παράδειγμα ο τοίχος Trombe .



Εικόνα 5.1:Τοίχος Trombe [11]

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Κεφάλαιο 6

6. Εισαγωγή [12,13]

Είναι γεγονός ότι τα οφέλη της κτιριακής μοντελοποίησης και θερμικής ανάλυσης δε θα μπορούσαν να υφίστανται χωρίς τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Οι περισσότερες εφαρμογές προσομοίωσης εμπεριέχουν μεθοδολογίες συνήθεις με γνωστή συμπεριφορά και διαδικασία επίλυσης αλλά και διαφορετικό τρόπο προσέγγισης του αποτελέσματος. Τα πιο διαδεδομένα εργαλεία υπολογισμών χρησιμοποιούν κυρίως μια από τις παρακάτω μεθόδους :

1. μεθόδους με συνάρτηση απόκρισης (response function method)
2. αριθμητικές μεθόδους πεπερασμένων διαφορών (numerical finite difference method)
3. αριθμητικές μεθόδους πεπερασμένων όγκων (finite volume method).

Η πρώτη κατηγορία των υπολογιστικών εργαλείων που στηρίζεται στη μέθοδο απόκρισης, ενδείκνυται για την επίλυση συστημάτων γραμμικών διαφορικών εξισώσεων με χρήση χρονικώς αμετάβλητων παραμέτρων με ισχύουσα τάση την κατά το δυνατόν κατάργηση της αλληλεξάρτησης των συστημάτων των εξισώσεων.

Όσον αφορά τη δεύτερη κατηγορία, οι αριθμητικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την επίλυση χρονικώς μεταβαλλόμενων, μη γραμμικών συστημάτων εξισώσεων χωρίς την υπολογιστική διευκόλυνση της απόζευξής τους.

Κεφάλαιο 7

Μέθοδος συνάρτησης απόκρισης – Response function method [1]

7.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος συνάρτησης απόκρισης αποτελείται από δύο βασικές υποκατηγορίες, την συνάρτηση απόκρισης στο πεδίο του χρόνου και την απόκριση στο πεδίο συχνότητας με βάση την αγωγή για πεπερασμένο χρονικό διάστημα.

Έστω ένα ομογενές ιστροπικό στοιχείο με πάχος ορισμένο στο διάστημα $0 < x < 1$, για το οποίο ισχύουν οι εξισώσεις της μεταβολής της θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας συναρτήσει της απόστασης:

$$\frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} = -\frac{1}{k} q(x,t) \quad (7.1)$$

$$\frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = -\rho C \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} \quad (7.2)$$

Όπου t ο χρόνος, $\theta(x,t)$ η θερμοκρασία και $q(x,t)$ η ροή θερμότητας. Ο συνδυασμός αυτών των δύο εξισώσεων δίνει την εξίσωση Fourier, τη βασική μερική διαφορική εξίσωση μετάδοσης θερμότητας με a : το συντελεστή διάχυσης

$$\frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} \quad (7.3)$$

Μια προσέγγιση για τη λύση των παραπάνω εξισώσεων σε αναλυτικό επίπεδο, περιλαμβάνει χρήση μετασχηματισμών Laplace και αποτελείται από τα εξής χαρακτηριστικά στάδια:

- Μετασχηματισμός της δοθείσας εξίσωσης στο πεδίο του χρόνου σε δευτερεύουσα εξίσωση με πεδίο φανταστικό χώρο.
- Εν συνεχεία, επίλυση της προκύπτουσας εξίσωσης με καθαρά αλγεβρικές μεθόδους-τεχνάσματα.
- Τελικά, αντίστροφος μετασχηματισμός του αποτελέσματος του τελευταίου βήματος οδηγεί στην εύρεση της λύσης στο πεδίο του χρόνου.

Αυτοί οι μετασχηματισμοί αποτελούν και το βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου, αφού πολλές συνήθεις διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε καθαρά αλγεβρικές και οι μερικές διαφορικές εξισώσεις σε συνήθεις διαφορικές.

Στην εφαρμογή της μεθόδου, στο πρώτο βήμα, οι μετασχηματισμοί Laplace ανακαλούνται από πίνακες αλλά ο μετασχηματισμός για τη θερμοκρασία δίνεται από την σχέση:

$$L[\theta(x,t)] = \partial(x,p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} \theta(x,t) dt \quad (7.4)$$

όπου p ένας μιγαδικός αριθμός του οποίου το πραγματικό μέρος είναι θετικό και ικανά μεγάλο έτσι ώστε να προξενήσει τη σύγκλιση της μεθόδου. Στην εν λόγω περίπτωση δύο είναι τα βασικά θεωρήματα των μετασχηματισμών Laplace, τα ακόλουθα:

$$L\left[\frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t}\right] = pL[\theta(x,t)] - \theta(x,0)$$

$$L\left[\frac{\partial^n \theta(x,t)}{\partial x^n}\right] = \frac{\partial^n L[\theta(x,t)]}{\partial x^n} \quad (7.5)$$

Εφαρμόζοντας αυτές τις σχέσεις στις εξισώσεις (7.1), (7.2), (7.3) θα παραχθούν οι δευτερεύουσες εξισώσεις που θα δώσουν τον μετασχηματισμό Laplace $\theta(x,p)$:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \theta(x, p)}{\partial x} &= -\frac{1}{k} q(x, p) \\ \frac{\partial q(x, p)}{\partial x} &= -\rho C p \theta(x, p) + \rho C \theta(x, 0) \\ \frac{\partial^2 \theta(x, p)}{\partial x^2} &= \frac{p}{a} \theta(x, 0) - \frac{1}{\alpha} \theta(x, 0)\end{aligned}\quad (7.7)$$

Προχωρώντας στα επόμενα βήματα, εφόσον η $\theta(x,p)$ υπάρχει διαθέσιμη στους πίνακες των μετασχηματισμών Laplace, η λύση της $\theta(x,t)$ μπορεί να προσδιοριστεί αμέσως. Στην αντίθετη περίπτωση εφαρμόζεται αντίστροφος μετασχηματισμός

$$\theta(x, t) = L^{-1}[\theta(x, p)] = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} e^{pt} \theta(x, p) dp \quad (7.8)$$

με γ αριθμό τέτοιο ώστε όλες οι ιδιομορφίες της συνάρτησης $\theta(x,p)$ να βρίσκονται αριστερά της γραμμής $(\gamma-i\infty, \gamma+i\infty)$.

Η λύση των δευτερευουσών εξισώσεων προκύπτει από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{aligned}\theta(x, p) &= \cosh\left[(p/\alpha)^{1/2} x\right] \theta(x, 0) - \frac{\sinh\left[(p/\alpha)^{1/2} x\right] q(0, p)}{k(p/\alpha)^{1/2}} \\ q(x, p) &= -k(p/\alpha)^{1/2} \sinh\left[(p/\alpha)^{1/2} x\right] \theta(0, p) + \cosh\left[(p/\alpha)^{1/2} x\right] q(0, p)\end{aligned}\quad (7.9)$$

Η πινακοποιημένη μορφή των εξισώσεων της θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας:

$$\begin{bmatrix} \theta(l, p) \\ q(l, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}(p) & m_{12}(p) \\ m_{21}(p) & m_{22}(p) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta(0, p) \\ q(0, p) \end{bmatrix} = M \quad (7.10)$$

Ο πίνακας M καλείται μεταβατικός και για τα στοιχεία του –συναρτήσεις μεταφοράς– ισχύει:

$$\begin{aligned} m_{11}(p) &= m_{22}(p) = \cosh\left[(p/\alpha)^{1/2} l\right] \\ m_{12}(p) &= -\sinh\left[\frac{(p/\alpha)^{1/2} l}{k(p/\alpha)^{1/2}}\right] \\ m_{21}(p) &= -k(p/\alpha)^{1/2} \sinh\left[(p/\alpha)^{1/2} l\right] \end{aligned} \quad (7.11)$$

Η ορίζουσα του είναι:

$$m_{11}m_{22} - m_{12}m_{21} = l \quad (7.12)$$

Εάν η κατασκευή προς μελέτη είναι σύνθετη με πληθώρα κατασκευαστικών στοιχείων σε άμεση επαφή, όπου $0 < x < L$, εφαρμόζοντας τεχνικές από τη θεωρία των πινάκων η σχέση (1.13) θα λάβει την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \theta(L, p) \\ q(L, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(p) & B(p) \\ C(p) & D(p) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta(0, p) \\ q(0, p) \end{bmatrix} \quad (7.13)$$

Τα στοιχεία $A(p)$, $B(p)$, $C(p)$, $D(p)$ αποτελούν τον συνολικό μεταβατικό πίνακα και οι τιμές τους εξαρτώνται τόσο από τις ιδιότητες του κάθε κατασκευαστικού παράγοντα, όσο και από τη σειρά με την οποία συνδυάζονται οι μεταβατικοί πίνακες που αντιστοιχούν σε αυτούς τους παράγοντες.

Συμβολίζοντας τα κατασκευαστικά στοιχεία με ε_i ($i=1 \div n$) και τον αντίστοιχο πίνακα με M_i , ο συνολικός μεταβατικός πίνακας M από την εξωτερική επιφάνεια προς την εσωτερική ($0 < x < L$) θα είναι:

$$\begin{bmatrix} A(p) & B(p) \\ C(p) & D(p) \end{bmatrix} = M_{\varepsilon_1} \times M_{\varepsilon_2} \times M_{\varepsilon_3} \times M_{\varepsilon_4} \dots \times M_{\varepsilon_{n-1}} \times M_{\varepsilon_n} \quad (7.14)$$

με $A(p) \neq D(p)$ και $m_{11} = m_{22}$.

Είναι σύνηθες η σχέση (7.14) να μετασχηματίζεται έτσι ώστε να συνδέει τη ροή της εξωτερικής και εσωτερικής επιφάνειας με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες και αποτελεί τη βασική σχέση των μεθοδολογιών, δηλαδή:

$$\begin{bmatrix} q(0, p) \\ q(L, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{D(p)}{B(p)} & -\frac{1}{B(p)} \\ \frac{1}{B(p)} & -\frac{A(p)}{B(p)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta(0, p) \\ \theta(L, p) \end{bmatrix} \quad (7.15)$$

7.2 Απόκριση στο πεδίο του χρόνου [1,15]

Η μέθοδος απόκριση στο πεδίο του χρόνου ή απλά μέθοδος απόκρισης, τυγχάνει ευρείας εφαρμογής σε σύγκριση με την έτερη, την απόκριση συχνότητας. Πρόκειται για μια μεθοδολογία που απαιτεί σύστημα εξισώσεων γραμμικό και αμετάβλητο, αλλά είναι ικανή να χειριστεί τόσο περιοδικές όσο και μη περιοδικές δυναμοσειρές θερμικής ροής και θερμοκρασίας.

Βάση της μεθοδολογίας αποτελεί ο συσχετισμός της απόκρισης του συστήματος με μια προεπιλεγμένη μονάδα διέγερσης (π.χ. ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία ξηρής σφαίρας) μέσω της χρήσης προκαθορισμένων οριακών συνθηκών, τέτοιων που αναμένονται στην εφαρμογή. Καλούμε ως συνάρτηση μονάδας διέγερσης την συνάρτηση που λαμβάνει αρχική τιμή τη μονάδα και εν συνεχεία μηδενικά (π.χ. 1,0,0,0,0...). Η απόκριση ενός γραμμικού, αμετάβλητου συστήματος σε σχέση με τη συνάρτηση μονάδας διέγερσης, ορίζεται ως συνάρτηση απόκρισης της μονάδας διέγερσης (unit response function) URF και οι όροι της αντίστοιχης δυναμοσειράς, παράγοντες απόκρισης (response factors). Είναι σαφές ότι ο αριθμός των συναρτήσεων απόκρισης που διέπουν ένα σύστημα εξαρτάται άμεσα όχι μόνο από το πλήθος των συναρτήσεων διέγερσης –δηλαδή των περιβαλλοντικών δεδομένων και των επιλεγμένων κατασκευαστικών στοιχείων, αλλά και από το πλήθος των αποκρίσεων που ενδιαφέρουν (ψυκτικά και θερμικά φορτία, θερμοκρασία εσωτερικού χώρου κτλ).

Η επίλυση της μεθόδου αρχικά προβλέπει τον ορισμό των συναρτήσεων απόκρισης της μονάδας διέγερσης (URFs) με τρόπο που αναφέρθηκε προηγουμένως και εν συνεχεία περιλαμβάνει τρία ευδιάκριτα στάδια.

Στο πρώτο στάδιο, μέσω τριγωνικής ή τετραγωνικής σύγκλισης, επιλύονται οι συναρτήσεις μονάδας διέγερσης στην ισοδύναμη δυναμοσειρά.

Ακολούθως, οι προκύπτουσες διεγέρσεις συνδυάζονται με τις συναρτήσεις απόκρισης μονάδας, έτσι ώστε να προκύψει η απόκριση του συστήματος. Ο συγκεκριμένος των παραπάνω στοιχείων επιτυγχάνεται με την εφαρμογή του θεωρήματος της συνέλιξης (convolution), το οποίο δηλώνει ότι: Η απόκριση ενός γραμμικού και αμετάβλητου συστήματος δίνεται από το άθροισμα των παραγώγων του συνδυασμού συναρτήσεων απόκρισης-διέγερσης και τη διέγερση αυτή καθ' αυτή, προσαρμόζοντας κατάλληλα το χρόνο [1]. Δηλαδή:

$$R(t)_i = \sum_{n=0}^{\infty} RF(n\Delta t)E(t - n\Delta t)_i \quad (7.16)$$

Όπου

$E(t)$: η συνάρτηση μονάδας διέγερσης i

$R(t)$: η απόκριση του συστήματος για την εν λόγω διέγερση i

$RF(n\Delta t)$: οι παράγοντες απόκρισης της δυναμοσειράς της URF

t : ο χρόνος

n : ακέραιος αριθμός

Δt : το χρονικό βήμα της URF.

Το τρίτο βήμα της μεθόδου, αφού εφαρμοστεί η σχέση (7.16) για τις μελετώμενες παραμέτρους και τις διεγέρσεις, περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της ολικής απόκρισης του συστήματος μέσω του θεωρήματος superimposition.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συναρτήσεις απόκρισης μονάδας διέγερσης URFs χρειάζεται να καθοριστούν μία φορά στην αρχή της μεθόδου. Αυτό συμβαίνει επειδή εξαρτώνται εξ' ολοκλήρου από τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά που επέλεξε ο μελετητής, αλλά και τις υποθέσεις για χρονική μη μεταβλητότητα που θεωρήθηκε ότι χαρακτηρίζουν το σύστημα και δηλώθηκαν a priori. Στο γεγονός αυτό αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου συγκριτικά με τις πιο γενικευμένες αριθμητικές. Χαρακτηριστικά, για την επίλυση ενός ζητήματος αντίστοιχου με την εύρεση των URFs, για κάθε χρονικό βήμα απαιτούνται εκ νέου υπολογισμοί, αυξάνοντας σημαντικά τις προς επίλυση εξισώσεις.

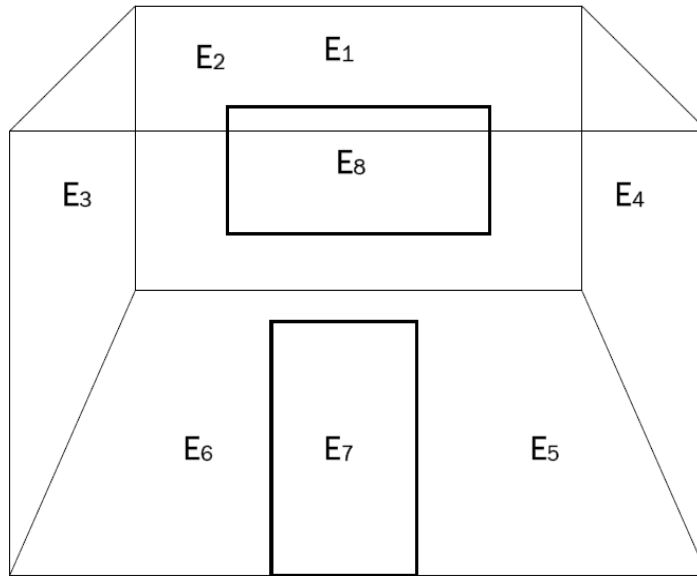
Τελικά, στην εφαρμογή της μεθόδου απόκρισης διακρίνονται δύο χαρακτηριστικά στάδια. Στο πρώτο στάδιο, προσδιορίζονται οι παράγοντες απόκρισης κάθε ζώνης του συστήματος προς μελέτη. Αυτό επιτυγχάνεται με μια αλληλουχία βημάτων μεταξύ διεγέρσεων και αποκρίσεων. Τα προφίλ των θερμικών φορτίων που προέκυψαν σε σχέση με μια θερμοκρασία αναφοράς καθορίζουν τις απαιτήσεις αερισμού και τα χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων και στο δεύτερο βήμα της μεθόδου επιλέγεται η στρατηγική λειτουργίας που θα εφαρμοστεί.

Ενεργειακή ισορροπία ζώνης

Σύνθετες ή πολυεπίπεδες κατασκευές είναι απαραίτητο να χωριστούν σε ιδεατά τμήματα συνδεδεμένα μεταξύ τους με όμοια χαρακτηριστικά, όπως κοινά ανοίγματα αερισμού και συνάμα θερμικές ροές. Αυτά τα τμήματα ορίζονται ως ζώνες της κατασκευής και για κάθε μία από αυτές απαιτούνται ενεργειακοί υπολογισμοί. Λόγω των πλείστων θερμικών ροών που αλληλεπιδρούν, για να υπολογιστεί η συνολική απόκριση για κάθε μονάδα διέγερσης της ζώνης, θεωρούμε ενιαίο το πεδίο ενέργειας. Εν γένει, χωρίζουμε τη ζώνη σε περιοχές στις οποίες εφαρμόζουμε τις εξισώσεις διατήρησης ενέργειας, με τρόπο τέτοιο ώστε να συνδέονται μεταξύ τους χωρικά και χρονικά. Η επίλυση αυτού του συνόλου εξισώσεων υπό την επίδραση μίας μονάδας διέγερσης σε κάθε κύκλο υπολογισμών, παρέχει την αντίστοιχη συνάρτηση απόκρισης διέγερσης της μονάδας. Ο συγκερασμός των λύσεων κάθε κύκλου, δηλαδή όλων των μονάδων διέγερσης, δίνει τη συνολική απόκριση της ζώνης.

Λεπτομερώς, έστω μία απλή κατασκευή που αποτελείται από μία ζώνη με τα εξής χαρακτηριστικά: έξι αδιαφανή πολυεπίπεδα τμήματα –τοιχοί-, ένα παράθυρο

και μία θύρα και ένα όγκο ρευστού που αντιπροσωπεύει τον πλήρως αναμεμειγμένο αέρα εντός της ζώνης (εικόνα 1-1).



- E1: επιφάνεια οπίσθιου τοίχου
- E2: επιφάνεια οροφής
- E3: επιφάνεια αριστερού τοίχου
- E4: επιφάνεια δεξιού τοίχου
- E5: επιφάνεια δαπέδου
- E6: επιφάνεια εμπρόσθιου τοίχου
- E7: επιφάνεια θύρας
- E8: επιφάνεια παραθύρου

Εικόνα 1- 1 Σχηματική απεικόνιση ζώνης για ενεργειακό ισολογισμό

Για τις παραπάνω επιφάνειες θεωρούνται δύο θερμοκρασίες, η εσωτερική θ_{Ei} και η εξωτερική θ_{Ee} και κάθε μία από τις E2 – E5 συνορεύουν με γειτονικές ζώνες γνωστών θερμοκρασιών $\theta_{Γκ}$ με $\kappa=2-5$. Για τις επιφάνειες E2 και E8, λόγω της μικρής συνεισφοράς τους στη θερμική αποθήκευση και τη μεγάλη θερμική αγωγιμότητα που εμφανίζουν θεωρούνται μία επιφάνεια E1 και E6 με ενιαία εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία.

Από την ενεργειακή ισορροπία του συστήματος προκύπτει η σχέση:

$$q_C(t) + q_{LR}(t) + q_K(t) + q_{SR}(t) + q_{\Delta}(t) = 0 \quad (7.17)$$

Όπου:

q_C : η θερμική συναγωγή [W/m²]

$q_{LR}(t)$: η ακτινοβολία μακρού κύματος [W/m²]

$q_K(t)$: η θερμική αγωγή [W/m²]

$q_{SR}(t)$: η ακτινοβολία βραχέος κύματος [W/m²]

$q_{\Delta}(t)$: ποσό θερμότητας από διάφορες πηγές (φωτισμός, συσκευές, άνθρωποι) [W/m²]

t: ο χρόνος

Για τις εσωτερικές επιφάνειες οι συνιστώσες της σχέσης (7.17) είναι αναλυτικά:

Η θερμική ροή λόγω συναγωγής προκύπτει από την σχέση:

$$q_C^i(t) = h_{CE} [\theta_{Ej}(t) - \theta_E(t)] \quad (7.18)$$

Όπου

h_{CE} : ο χρονικά αμετάβλητος ή μέσος συντελεστής συναγωγιμότητας [W/m^2C°]

$\theta_{Ej}(t)$: η θερμοκρασία της γειτονικής επιφάνειας [$^\circ C$]

$\theta_E(t)$: η θερμοκρασία της επιφάνειας που μελετάται [$^\circ C$]

Η θερμική ροή λόγω ακτινοβολίας μακρού κύματος:

$$q_{LR}^i(t) = \sum_{j=1}^N \{h_{LR(Ej,E)} [\theta_{Ej}(t) - \theta_E(t)]\} \quad (7.19)$$

$h_{LR(EjE)}$: τ γραμμικός συντελεστής μετάδοσης λόγω ακτινοβολίας, μεταξύ των επιφανειών Ej και E [W/m^2C°]

N : ο αριθμός των επιφανειών που επικοινωνούν θερμικά στο σύνολο.

Η θερμική ροή λόγω αγωγής εξαρτάται τόσο από το ιστορικό των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και των θερμικών ροών όσο και από τα φυσικά χαρακτηριστικά των κατασκευαστικών υλικών. Είναι:

$$q_K^i(t) = - \sum_{m=0}^{\infty} \theta_E^i(t - m\Delta t) Z(m\Delta t) + \sum_{m=0}^{\infty} \theta_E^e(t - m\Delta t) Y(m\Delta t) \quad (7.20)$$

Όπου

m : φυσικός αριθμός, αθροιστής

Δt : το χρονικό βήμα [s]

θ_E^i : η εσωτερική θερμοκρασία της επιφάνειας [$^\circ C$]

θ_E^e : η εξωτερική θερμοκρασία της επιφάνειας [$^\circ C$]

Z : οι παράγοντες απόκρισης της URF της εσωτερικής επιφάνειας λόγω θερμοκρασιακής διέγερσης της εσωτερικής επιφάνειας [W/m^2C°]

T : οι παράγοντες απόκρισης της URF της εσωτερικής επιφάνειας λόγω θερμοκρασιακής διέγερσης της εξωτερικής επιφάνειας [W/m^2C°]

Για τις εξωτερικές επιφάνειες, οι σχέσεις συναγωγής και ακτινοβολίας συνδυάζονται για να παράξουν μία συνολική. Με αυτό τον τρόπο υποσκελίζεται η άγνοια των θερμοκρασιών των γειτονικών ζωνών.

$$q_C^e(t) + q_{LR}^e(t) = h_{TE} [\theta_{E_j}(t) - \theta_E(t)] \quad (7.21)$$

h_{TE} : ο συνδυασμένος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας για συναγωγή και ακτινοβολία [W/m^2C°]

Ομοίως με προηγουμένως, η θερμική ροή λόγω αγωγής

$$q_K^i(t) = \sum_{m=0}^{\infty} \theta_E^e(t - m\Delta t) X(m\Delta t) - \sum_{m=0}^{\infty} \theta_E^i(t - m\Delta t) Y(m\Delta t) \quad (7.22)$$

Φ : οι παράγοντες απόκρισης της URF της εξωτερικής επιφάνειας λόγω θερμοκρασιακής διέγερσης της εξωτερικής επιφάνειας [W/m^2C°]

T : οι παράγοντες απόκρισης της URF της εξωτερικής επιφάνειας λόγω θερμοκρασιακής διέγερσης της εσωτερικής επιφάνειας [W/m^2C°]

Η θερμική ροή λόγω φωτισμού, συσκευών και ανθρώπινου δυναμικού, προσδιορίζεται μέσω προσεγγιστικών συντελεστών αγωγιμότητας που διατίθενται πινακοποιημένοι .

Η ακτινοβολία βραχέος κύματος μερικώς θα απορροφηθεί από τα δομικά υλικά και μερικώς θα ανακλαστεί. Αυτό το θερμικό ποσό εν τέλει θα μεταδοθεί μέσω αγωγής στο εσωτερικό του κτηρίου.

Αντικαθιστώντας όσα προαναφέρθηκαν στην αρχική σχέση ενεργειακής ισορροπίας και διατηρώντας το διαχωρισμό εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών, θα συντεθούν δύο νέες εξισώσεις ισορροπίας ενέργειας:

$$\begin{aligned} & - \left(h_{CE} + \sum_{j=1}^N h_{LR(E_j, E)} + Z(0) \right) \theta_E^i(t) + Y(0) \theta_E^e(t) + \sum_{j=1}^N h_{LR(E_j, E)} \theta_{E_j}(t) = \\ & = -h_{CE} \theta_E(t) - q_{\Delta}(t) - q_{SR}(t) + \sum_{m=1}^{\infty} \theta_E^i(t - m\Delta t) Z(m\Delta t) - \sum_{m=1}^{\infty} \theta_E^e(t - m\Delta t) Y(m\Delta t) \end{aligned} \quad (7.23)$$

Εξωτερικές επιφάνειες

$$\begin{aligned}
 & - [h_{TE} + X(0)]\theta_E^e(t) - Y(0)\theta_E^i(t) = \\
 & = -h_{TE}\theta_E(t) - q_\Delta(t) - q_{SR}(t) - \sum_{m=1}^{\infty} \theta_E^e(t - m\Delta t)X(m\Delta t) + \sum_{m=1}^{\infty} \theta_E^i(t - m\Delta t)Y(m\Delta t)
 \end{aligned}
 \tag{7.24}$$

Η εφαρμογή των δύο εξισώσεων θερμικής ισορροπίας για τις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες του μελετώμενου συστήματος θα αποδώσει ένα σύστημα εξισώσεων. Η πινακοποιημένη μορφή του συστήματος αυτού θα ήταν ως εξής: $A X \theta = B$

Ο πίνακας A, μη ομογενής, έχει ως στοιχεία τη μελλοντική δυναμοσειρά των συντελεστών μετάδοσης των όρων της θερμοκρασίας, όπως αναγράφονται στα αριστερά μέλη των εξισώσεων (1.28), (1.29). Ο πίνακας στήλη B περιέχει τους όρους των δεξιών μελών των εξισώσεων, οι οποίοι είναι εξαρτημένοι από την επιλεγμένη διέγερση και το θερμοκρασιακό ιστορικό των επιφανειών. Στο διάνυσμα θ παριστά τις μελλοντικές τιμές των θερμοκρασιών των επιφανειών. Αντιστρέφοντας τον πίνακα A και εισάγοντας νέες τιμές για κάθε χρονικό βήμα μόνο στον πίνακα B, η εξίσωση θα δώσει τη θερμοκρασιακή απόκριση. $\theta = A^{-1} X B$

Η προκύπτουσα απόκριση θα τροφοδοτηθεί στην εξίσωση διατήρησης ενέργειας εφαρμοσμένη στον όγκο του αέρα εντός του χώρου, έτσι ώστε να ληφθούν οι URFs για θέρμανση και ψύξη. Η εξίσωση είναι της μορφής:

$$\sum_{j=1}^N E_j h_{CE_j} [\theta_{E_j}(t) - \theta_E(t)] + \frac{\rho CV}{\Delta t} [\theta_E(t) - \theta_E(t - \Delta t)] + q_P(t) + q_L(t) + q_I(t)$$

Όπου (7.25)

E: η επιφάνεια [m²]

Δt : το χρονικό βήμα [s]

C: η ειδική θερμότητα του αέρα [J/kgC]

V: ο όγκος του εσωτερικού αέρα [m³]

q_P : η θερμική απαίτηση των εγκαταστάσεων για να διατηρηθεί η θερμοκρασία στην τιμή σημείου σχεδίασης [W]

q_L : το θερμικό κέρδος λόγω φωτισμού εξοπλισμού κ.α. [W]

q_I : το κέρδος λόγω φιλτραρίσματος του αέρα και των κοινών ροών μεταξύ ζωνών [W].

Ομοίως και στο παράδειγμα που προαναφέρθηκε, ορίζουμε τους πίνακες A, θ, B και επιλύουμε την εξίσωση $\theta = A^{-1} X B$. Σε κάθε χρονικό βήμα, οι τιμές του πίνακα B διορθώνονται με βάση τις θερμοκρασίες που προέκυψαν από το προηγούμενο βήμα, επιτρέποντας τον υπολογισμό των αποκρίσεων των θερμοκρασιών για τις επιφάνειες, υπό οποιοδήποτε καθεστώς διέγερσης. Έτσι, διατηρώντας την εσωτερική θερμοκρασία της ζώνης σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία αναφοράς καθώς και τον αντίστροφο πίνακα A-1, υπολογίζουμε την απόκριση με μία διέγερση σε ισχύ (1,0,0,0,..) και τις υπόλοιπες μηδενικές (0,0,0,0,..) για χρόνο t=0. Οι προκύπτουσες τιμές του πίνακα B για το χρονικό βήμα t=0 θα χρησιμοποιηθούν για να προσδιοριστούν οι επικρατούσες θερμοκρασίες για το ακόλουθο χρονικό βήμα t=1 και ούτω ο καθ' εξής. Η διαδικασία σταματά όταν ο λόγος των διαδοχικών όρων στην αντίστοιχη δυναμοσειρά της θερμοκρασίας της επιφάνειας καταστεί σταθερός και αποτέλεσμα αυτής η URF της επιφάνειας για την ισχύουσα όμως διέγερση. Η συνολική URF της επιφάνειας παράγεται μετά από επανάληψη της διαδικασίας με εναλλαγή της διέγερσης που βρίσκεται σε ισχύ.

7.3 Απόκριση στο πεδίο συχνότητας

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μεθόδου απόκρισης συχνότητας ή αλλιώς αρμονικής μεθόδου, είναι η υπόθεση ότι τα καιρικά δεδομένα μπορούν να παρασταθούν ως μια σειρά περιοδικών κύκλων. Έτσι η επιρροή του καιρού μπορεί να ενσωματωθεί στους υπολογισμούς με τη μορφή σταθερού όρου συνοδευόμενου από πλήθος αρμονικών ημιτονοειδούς κύματος με εν γένει αυξανόμενη συχνότητα και μειούμενο πλάτος. Η υποδιαίρεση της δυναμοσειράς του καιρού σε συνιστώσες κυμαινόμενων ημιτονοειδών για μέσες συνθήκες επιτυγχάνεται μέσω απεικόνισης με σειρές Fourier. Πρόκειται για τη διαδικασία μέσω της οποίας μια συνεχής συνάρτηση F(t) μπορεί να προσεγγιστεί με μια σειρά από ημιτονοειδείς και συνημιτονοειδείς συναρτήσεις, δηλαδή:

$$F(t) = a_0 + \sum_{m=1}^k a_m \sin\left(\frac{2\pi m t}{L}\right) + \sum_{m=1}^k b_m \cos\left(\frac{2\pi m t}{L}\right) \quad (7.26)$$

1/L: η βασική συχνότητα [Hz]

Κάθε επιλεγμένη αρμονική μπορεί να επεξεργαστεί ξεχωριστά και να εισαχθούν οι κατάλληλοι για την συχνότητά της θερμοκοί παράγοντες απόκρισης. Ο μαθηματικός προσδιορισμός των αποκρίσεων θα προκύψει από την εξίσωση (7.13), με αρχική οριακή συνθήκη ορισμένη εξ αρχής ως ημιτονοειδές κύμα. Εν συνεχεία, εφαρμόζεται η αρχή superimposition έτσι ώστε από την άθροιση των επί μέρους αρμονικών να ληφθεί η ολική απόκριση του συστήματος.

Για λόγους διευκόλυνσης, η συχνότητα της βασικής αρμονικής είναι συχνά εικοσιτέσσερις ώρες, με τις υπολείπουσες αρμονικές να έχουν μειούμενες συνήθως των δώδεκα, έξι, τριών και μιάμισης ώρας. Οι παράγοντες απόκρισης που αποτελούν το ζητούμενο, μπορούν να προσδιοριστούν ως συναρτήσεις αρμονικής συχνότητας και να εφαρμοστούν στους συγκεκριμένους όρους της αντίστοιχης αρμονικής των

καιρικών συνθηκών. Η μέθοδος δύναται να αντιμετωπίσει την πλειοψηφία των ενδοκτηριακών μεταφορών ενέργειας, αλλά αξίζει να σημειωθεί ότι η προσέγγιση μερικών θα είναι φτωχή.

Ομοίως με την ομόρριζη μέθοδο απόκρισης, η εισαγωγή του θεωρήματος superimposition που οδηγεί στην απόζευξη πεδίων άρρηκτα συνδεδεμένων, αποτελεί διττό στοιχείο. Διευκολύνει στην ολοκλήρωση της μεθόδου και τη λήψη αποτελέσματος με τη σκιά όμως της προαναφερθείσας προσέγγισης.

Συγκεντρωτικά, η μέθοδος έγκειται στην εκτίμηση των ροών θερμότητας του κελύφους υπό την υπόθεση σταθερών εσωτερικών θερμοκρασιών. Οι θερμοκρασίες εξωτερικού αέρα συνδυασμένες με την ακτινοβολία μικρού κύματος, παράγουν έναν κοινό όρο, την θερμοκρασία ηλίου-αέρος. Στο παρελθόν, τα εσωτερικά φορτία λόγω ακτινοβολίας θεωρούνταν ταυτόχρονες ροές. Μια τέτοιου είδους υπόθεση, αγνοεί την αλληλεπίδραση των φορτίων με τη θερμική ικανότητα του φακέλου. Πλέον, η ακρίβεια της μεθόδου σε σχέση με τη μοντελοποίηση των εσωτερικών επιφανειών έχει αυξηθεί αφού λαμβάνεται υπόψη η έντονη εξάρτηση των προειρημένων συνιστωσών όσον αφορά τη ροή της ακτινοβολίας και της συναγωγής εντός του κελύφους.

7.4 Μεθοδολογίες βασισμένες στην υπολογιστική μέθοδο της απόκρισης.[13,14]

7.4.1 Μέθοδος Συνάρτησης Μεταφοράς - TFM

Η εν λόγω μέθοδος εφαρμόζει μια σειρά σταθμισμένων παραγόντων, των συντελεστών αγωγής συνάρτησης μεταφοράς (CTF), στις εξωτερικές αδιαφανείς επιφάνειες και στις θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ ηλίου-αέρα και χώρου. Στόχος αυτού του σταδίου είναι ο προσδιορισμός του θερμικού κέρδους προσμετρώντας όμως και τη θερμική αδράνεια των επιφανειών. Το ηλιακό θερμικό κέρδος διαμέσου υαλοπινάκων όπως και τα κέρδη λόγω εξοπλισμού και ανθρώπινου δυναμικού υπολογίζονται άμεσα για το φορτίο της τρέχουσας ώρας.

Στο δεύτερο στάδιο της μεθόδου εφαρμόζονται συγγενείς σταθμισμένοι συντελεστές, οι συντελεστές συνάρτησης μεταφοράς δωματίου (RTF), στα θερμικά κέρδη και τα ψυκτικά φορτία των συνιστωσών με ακτινοβολούνται τμήματα. Ομοίως με το πρώτο στάδιο, οι συντελεστές στοχεύουν στο να ληφθεί υπόψη το καθόλα σημαντικό φαινόμενο της θερμικής αποθήκευσης στη μετατροπή του θερμικού κέρδους σε ψυκτικό φορτίο. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για εύλογο αριθμό παρελθοντικών ωρών αλλά και της τρέχουσας. Οι συντελεστές RTF εξαρτώνται από τη γεωμετρία του χώρου, τη διάταξη και τη μάζα των χαρακτηριστικών, με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι εμφανής η διαφορετικότητα του φαινομένου θερμικής αποθήκευσης για το κάθε τμήμα με διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά.

Οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται στην TFM επιδιώκουν στο συσχετισμό μιας συνάρτησης εξόδου για συγκεκριμένο χρόνο με την τιμή οδηγών συναρτήσεων σε αυτό το χρόνο και μια περίοδο που έπεται. Οι CTF δεν είναι άλλοι από τους παράγοντες απόκρισης λόγω θερμικής αγωγής τοίχων και οροφών της μεθόδου απόκρισης και οι RTF οι παράγοντες για την προσέγγιση των ψυκτικών φορτίων.

Τέλος, ενώ η TFM είναι επιστημονικά εμπειριστατωμένη και τεχνικά πλήρης για την εκτίμηση των ψυκτικών φορτίων, αξίζει να σημειωθεί ότι κατά διάρκεια των υπολογισμών μεγάλο πλήθος προηγηθεισών ωρών θεωρείται ίσου φορτίου με της τρέχουσας ώρας.

7.4.2 Μέθοδος Ισοδύναμης Θερμοκρασιακής Διαφοράς - TETD Method

Για την εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας θεσπίζονται οι συντελεστές TETD. Από τη χρήση της τεχνικής της απόκρισης εκτιμάται η απόκριση μιας σειράς συναρμογών τοίχων και οροφών με βάση τις οποίες προσδιορίζονται οι TETD, ως συνάρτηση των θερμοκρασιών ηλίου-αέρος και των επικρατουςών θερμοκρασιών στο χώρο. Οι συνιστώσες που συμβάλλουν στο θερμικό κέρδος του χώρου συνυπολογίζονται με συνδεδεμένους συντελεστές TETD και τα αποτελέσματα προστίθενται στα θερμικά κέρδη των εσωτερικών στοιχείων. Έτσι προκύπτει ο ολικός στιγμιαίος ρυθμός θερμικού κέρδους του χώρου. Σε αυτό το σημείο καλείται η τεχνική εξαγωγής χρονικού μέσου όρου Time Averaging για τη μετατροπή του θερμικού κέρδους σε ψυκτικό φορτίο. Η υλοποίησή της έγκειται στην εξαγωγή του μέσου όρου των φορτίων των θερμικών κερδών των ακτινοβολούντων τμημάτων για την τρέχουσα ώρα και για μια κατάλληλη περίοδο επερχόμενων ωρών. Η τεχνική TETD αποτελεί χρήσιμο εργαλείο στην ποσοτικοποίηση της θερμικής αποθήκευσης αλλά αυτό το προσόν αυξάνει την πολυπλοκότητά της. Μειονέκτημά της η υποκειμενικότητα της επιλογής κατάλληλης περιόδου για την εξαγωγή του μέσου όρου που επαφίεται στην εμπειρία του χρήστη όπως και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

7.4.3 Μέθοδος Θερμοκρασιακής Διαφοράς Ψυκτικού Φορτίου - CLTD

Αυτή η απλουστευμένη τεχνική μπορεί να χαρακτηριστεί ως η επικρατέστερη διαδικασία για την εκτίμηση των θερμικών κερδών και των ψυκτικών φορτίων. Αποτελεί στην ουσία την σύμπραξη των δύο προρρηθέντων μεθόδων και διαφέρει στο ότι υπολογίζει αμεσότερα το ψυκτικό φορτίο. Στην εξέλιξη της μεθόδου, δεδομένα από την εφαρμογή της TFM για αντιπροσωπευτική ομάδα συνιστωσών χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή συντελεστών CLTD. Αυτοί οι συντελεστές εντάσσονται στους άμεσους, ενός βήματος υπολογισμούς των φορτίων ψύξης των θερμικών κερδών λόγω αγωγής διαμέσου τοίχων, οροφών και υαλοπινάκων. Στο δεύτερο στάδιο, αναπτύχθηκε έτερη ομάδα συντελεστών, των CLF, για όμοιους υπολογισμούς του ηλιακού θερμικού φορτίου μέσω υαλοπινάκων και φορτίων λόγω εσωτερικών πηγών. Τελευταία εισήχθη βελτιωμένος συντελεστής για το ηλιακό θερμικό φορτίο μέσω υαλοπινάκων, ο SCL, ο οποίος αυξάνει την ακρίβεια της μεθόδου εισάγοντας περισσότερες παραμέτρους που επηρεάζουν.

Και οι τρεις ομάδες συντελεστών που αναφέρονται στην CLTD μέθοδο εμπιρεύουν τόσο το φαινόμενο της χρονικής υστέρησης στο θερμικό κέρδος λόγω αγωγής των αδιαφανών επιφανειών, όσο και στη μετατροπή του θερμικού κέρδους λόγω ακτινοβολίας σε ψυκτικό φορτίο, που οφείλεται στη θερμική αποθήκευση.

Η μέθοδος είναι εξαιρετικά δημοφιλής, αφού επιτρέπει τον υπολογισμό των φορτίων άνευ υπολογιστή, παρέχει αποτελέσματα συνεπή με αυτά της TFM και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο επικύρωσης των εκτιμήσεων.

Κεφάλαιο 8

Μέθοδος χρονικών σειρών ακτινοβολίας και αγωγής (RTS/CTS) [14]

Η μέθοδος χρονικών σειρών είναι μια απλουστευμένη μέθοδος που πραγματοποιεί σχεδιαστικούς υπολογισμούς ψυκτικών φορτίων που προέρχονται από την μέθοδο θερμικής ισορροπίας (heat balance method). Αντικαθιστά αποτελεσματικά όλες τις άλλες απλοποιημένες μεθόδους, όπως την μέθοδο συνάρτησης μεταφοράς (TFM), Μέθοδος Θερμοκρασιακής Διαφοράς Ψυκτικού Φορτίου (CLTD) κ.α. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε έτσι ώστε να μην να είναι ακριβής, αφού υπολογίζει την συνεισφορά κάθε στοιχείου στο συνολικό φορτίο ψύξης, αλλά δεν απαιτεί επαναληπτικούς και χρονοβόρους υπολογισμούς. Επίσης βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η δυνατότητα που δίνεται στον χρήστη να ελέγχει και να τροποποιεί τους διάφορους συντελεστές επιτρέποντας του να συγκρίνει και την επίδρασή τους στο αποτέλεσμα. Αυτά τα χαρακτηριστικά της RTS μεθόδου διευκολύνουν την εφαρμογή τεχνικής κρίσης κατά τον υπολογισμό ψυκτικού φορτίου.

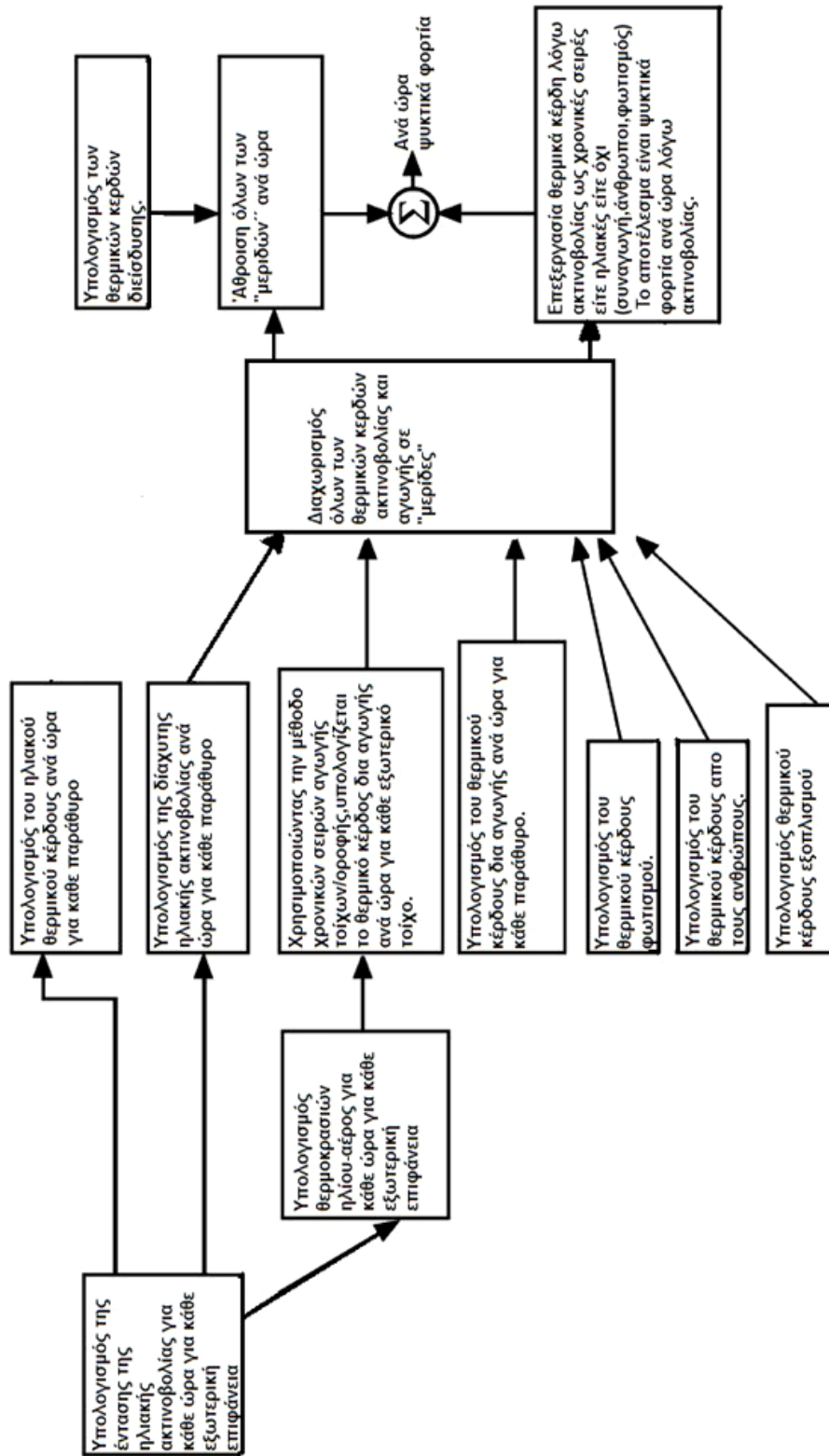
Η μέθοδος RTS είναι κατάλληλη για τον υπολογισμό φορτίων αιχμής αλλά δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για ετήσιες ενεργειακές προσομοιώσεις λόγω των εγγενών περιοριστικών υποθέσεων-παραδοχών της. Παρόλο που είναι απλή στην σύλληψή της, περιλαμβάνει πάρα πολλά υπολογιστικά εργαλεία που την καθιστούν ιδιαίτερα πρακτική για χειρωνακτική χρήση. Βέβαια μπορεί κάλλιστα να εμφωλευτεί σε κάποιο υπολογιστικό φύλλο υπολογιστή.

Τα ψυκτικά φορτία υπολογίζονται με βάση την υπόθεση των σταθερών ανά περίοδο συνθηκών (δηλαδή ο ημερήσιος καιρός, τα θερμικά κέρδη να είναι πανομοιότυπα με εκείνα των προηγούμενων ημερών έτσι ώστε τα θερμικά φορτία να επαναλαμβάνονται ανά 24ωρο σε κυκλική βάση). Επομένως το θερμικό κέρδος για ένα συγκεκριμένο στοιχείο, μια συγκεκριμένη ώρα είναι το ίδιο με πριν 24 ώρες, με πριν 48 ώρες κ.τ.λ.

Η βασική διαδικασία για τον υπολογισμό του ψυκτικού φορτίου κάθε στοιχείου (φώτα, άνθρωποι, τοίχοι, στέγες, παράθυρα, συσκευές κ.τ.λ.) είναι η εξής:

- Υπολογισμός του 24ωρου προφίλ όλων των συνιστωσών θερμικού κέρδους
- Διαχωρισμός των θερμικών κερδών σε "μερίδες" ακτινοβολίας και συναγωγής.
- Εφαρμογή χρονικών σειρών ακτινοβολίας για τον υπολογισμό της χρονικής καθυστέρησης στην μετατροπή της ακτινοβολίας σε ψυκτικά φορτία.
- Άθροιση του θερμικού κέρδους συναγωγής με το χρονικά υστερημένο θερμικό κέρδος λόγω ακτινοβολίας για κάθε ώρα για κάθε στοιχείο.

Το σχήμα 8.1 δίνει μια γενική εικόνα της μεθόδου:



Κεφάλαιο 9

Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών [16,17]

Με βάση τα προαναφερθέντα, οι μέθοδοι απόκρισης εφαρμόζονται σε συστήματα γραμμικά και αμετάβλητα αλλά δύνανται να παράσχουν πληροφορίες για τη θερμική ροή και τη θερμοκρασία σε κάθε σημείο του μοντέλου και μάλιστα με χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις. Στον αντίποδα, οι αριθμητικές μέθοδοι δεν εμπεριέχουν περιορισμούς όσο αφορά τη μορφή των εξισώσεων, αντιμετωπίζουν οποιοδήποτε βαθμό πολυπλοκότητας όμως απαιτούν μεγάλο όγκο υπολογισμών και επιστρέφουν δεδομένα για προκαθορισμένες θέσεις του συστήματος, με ιδιότητες αντιπροσωπευτικές για μικρές ορισμένες περιοχές.

Μια αριθμητική διαδικασία περιλαμβάνει τρία στάδια. Η διακριτοποίηση του συστήματος ακολουθείται από την κατασκευή συστήματος των ενεργειακών εξισώσεων για τους κόμβους. Αυτές μπορεί να είναι η εξίσωση Fourier για την μετάδοση θερμότητας ή οι εξισώσεις Navier-Stokes της ροής των ρευστών. Στο τρίτο βήμα οι εξισώσεις επιλύονται και παρέχουν την κατανομή των μεταβλητών που μελετώνται. Είναι σαφές ότι ο αριθμός των εξισώσεων είναι ανάλογος της πολυπλοκότητας του κτηρίου και των ζητούμενων στοιχείων. Στην πράξη, η μεθοδολογία βασίζεται είτε στην ανάπτυξη των σειρών Taylor, είτε στην εφαρμογή των αρχών διατήρησης σε μικρούς όγκους ελέγχου.

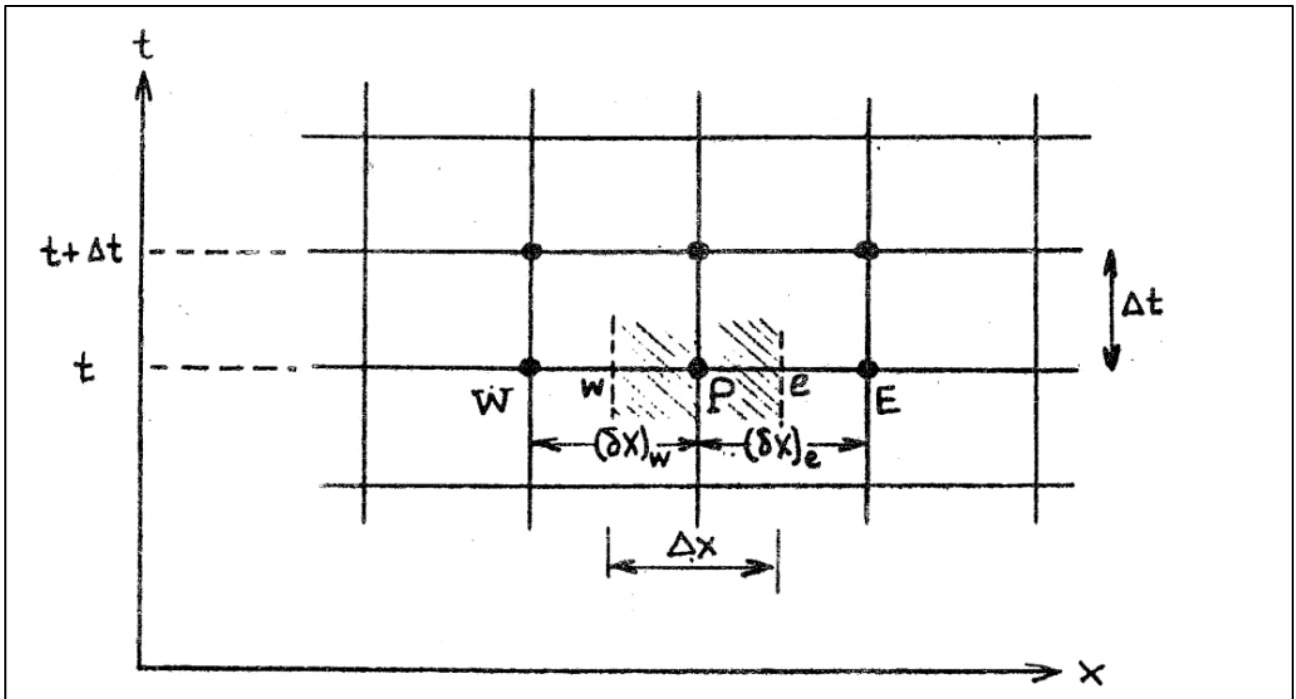
9.1 Μαθηματική θεμελίωση – Διακριτοποίηση διαφορικής εξίσωσης

Η διαφορική εξίσωση που διέπει το φαινόμενο της μεταβατικής μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας είναι η εξής:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (9.1)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία, t και x οι διαστάσεις χρόνου και χώρου αντίστοιχα και ρ, c, k η πυκνότητα, η θερμοχωρητικότητα και η θερμική αγωγιμότητα αντίστοιχα. Για να επιλυθεί η παραπάνω διαφορική εξίσωση θα πρέπει πρώτα να χωρίσουμε το υπό μελέτη χωρίο σε τμήματα (όγκους αναφοράς). Να δημιουργήσουμε δηλαδή το υπολογιστικό πλέγμα στο οποίο θα εφαρμόσουμε τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών.

Το υπολογιστικό πλέγμα δίνεται στο σχήμα 9.1



Σχήμα 9.1 Υπολογιστικό πλέγμα

Το πρόβλημα έγκειται στον υπολογισμό των τιμών της θερμοκρασίας επί των κόμβων του πλέγματος κατά τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$ με γνωστές τις τιμές κατά την προηγούμενη χρονική στιγμή t όπου Δt το χρονικό βήμα.

Έστω T_W^0, T_P^0, T_E^0 οι γνωστές τιμές της θερμοκρασίας επί των κόμβων W,P,E κατά τη χρονική στιγμή t και T_W^1, T_P^1, T_E^1 οι αντίστοιχες θερμοκρασίες κατά τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$. Με την υπόθεση $\rho c = \text{σταθ.}$ ολοκληρώνουμε τη διαφορική εξίσωση στον όγκο αναφοράς που περιβάλλει τον κόμβο P από τη χρονική στιγμή t έως τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$:

$$\rho c \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial T}{\partial t} dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt$$

(9.2)

Για το χωρικό μέλος του ολοκληρώματος του δεξιού μέλους της εξίσωσης (9.2) ισχύει:

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \cong \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w = k_e \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - k_w \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \quad (9.3)$$

Υποθέτοντας γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης x έχουμε:

$$k_e \left(\frac{\overline{\partial T}}{\partial x} \right)_e - k_w \left(\frac{\overline{\partial T}}{\partial x} \right)_w = k_e \frac{T_E - T_P}{(\delta x)_e} - k_w \frac{T_W - T_P}{(\delta x)_w} \quad (9.4)$$

Άρα εισάγοντας τις (9.3) και (9.4) στην (9.2) έχουμε:

$$\rho c \Delta x (T_P^1 - T_P^o) = \int_t^{t+\Delta t} \left[k_e \frac{T_E - T_P}{(\delta x)_e} - k_w \frac{T_W - T_P}{(\delta x)_w} \right] dt \quad (9.5)$$

Γίνονται οι παρακάτω τρεις υποθέσεις για τη μεταβολή της θερμοκρασίας:

T_P σταθερή και ίση με την τιμή T_P^o κατά τη χρονική στιγμή t .

T_P σταθερή και ίση με την τιμή T_P^1 κατά τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$.

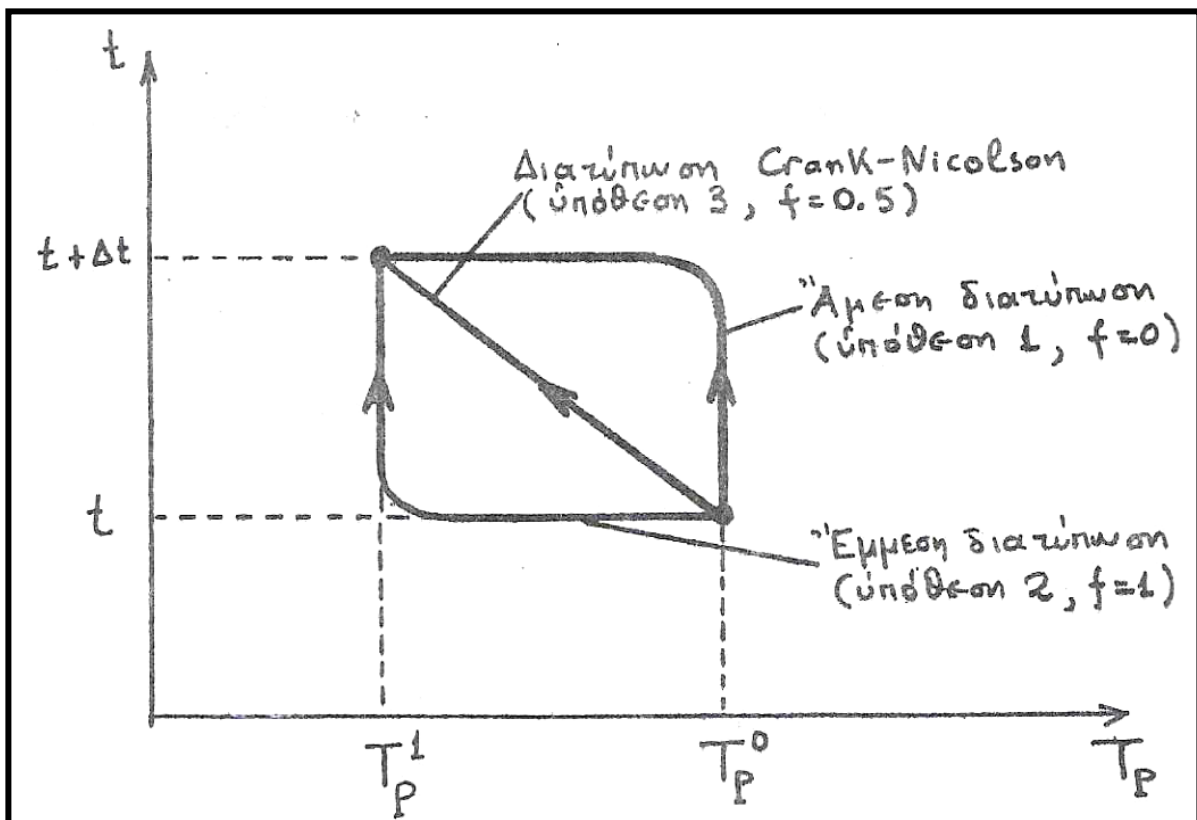
T_P μεταβαλλόμενη γραμμικά ως προς το χρόνο.

Μία έκφραση για τη μεταβολή της $P T$ στο χρόνο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\int_t^{t+\Delta t} T_P dt = [fT_P^1 + (1-f)T_P^0] \Delta t \quad (9.6)$$

όπου ο παράγοντας f παίρνει τιμές από 0 έως 1. Παρατηρούμε ότι οι τρεις παραπάνω υποθέσεις αντιστοιχούν για $f=0, 0.5$ και 1.

Οι τρεις υποθέσεις δίνονται γραφικά στο σχήμα 9.2



Σχήμα 9.2 Τρεις υποθέσεις για τη μεταβολή της θερμοκρασίας στο χρόνο

Αν στη σχέση (9.5) χρησιμοποιήσουμε για τις θερμοκρασίες T_W και T_E την έκφραση της σχέσης (9.6) τότε αυτή παίρνει τη μορφή

$$\rho c \Delta x (T_P^1 - T_P^0) = f \left[k_e \frac{T_E^1 - T_P^1}{(\delta x)_e} - k_w \frac{T_W^1 - T_P^1}{(\delta x)_w} \right] + (1-f) \left[k_e \frac{T_E^0 - T_P^0}{(\delta x)_e} - k_w \frac{T_W^0 - T_P^0}{(\delta x)_w} \right]$$

Παραλείποντας για λόγους απλότητας τον δείκτη 1 από την παραπάνω σχέση και εκτελώντας τις πράξεις καταλήγουμε στην αλγεβρική εξίσωση πεπερασμένων διαφορών που έχει τη μορφή:

$$A_P T_P = A_E \left[f T_E + (1-f) T_E^0 \right] + A_W \left[f T_W + (1-f) T_W^0 \right] + \left[A_P^0 - (1-f) T_W - (1-f) T_E \right] T_P^0 \quad (9.7)$$

όπου:

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e}$$

$$A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w}$$

$$A_P^0 = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t}$$

1η περίπτωση: Άμεση διατύπωση ($f=0$)

Αν στη σχέση (9.7) αντικαταστήσουμε όπου $f=0$ έχουμε

$$A_P T_P = A_E T_E^0 + A_W T_W^0 + \left(A_P^0 - T_W - T_E \right) T_P^0 \quad (9.8)$$

όπου:

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e}$$

$$A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w}$$

$$A_P^0 = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t}$$

Στη σχέση (9.8) παρατηρούμε ότι στο δεξιό μέλος όλοι οι όροι είναι γνωστοί. Άρα για τον υπολογισμό της T_P δεν είναι αναγκαία η επίλυση συστήματος εξισώσεων. Αυτό εξοικονομεί χρόνο κατά τον υπολογισμό όλων των θερμοκρασιών σε κάθε κόμβο του χωρίου μας

Παρατηρούμε όμως ότι ο συντελεστής της T_P^0 , $(A_P^0 - T_W - T_E)$ μπορεί να λάβει αρνητική τιμή κάτι που οδηγεί σε πρόβλημα σύγκλισης δηλαδή η T_P να λάβει αρνητική τιμή. Για να αποφευχθεί αυτή η πιθανότητα θα πρέπει $(A_P^0 - T_W - T_E) > 0$.

Για σταθερή θερμική αγωγιμότητα και ομοιόμορφο πλέγμα η παραπάνω συνθήκη γράφεται

$$\Delta t \prec \frac{\rho c (\Delta x)^2}{2k}$$

Παρατηρούμε ότι πύκνωση του χωρικού πλέγματος για μεγαλύτερη ακρίβεια οδηγεί σε ακόμη μεγαλύτερη μείωση του χρονικού βήματος για να ικανοποιηθεί η παραπάνω συνθήκη, επειδή το χρονικό βήμα είναι στο τετράγωνο. Έτσι ο υπολογιστικός χρόνος που γλιτώνουμε από την απ' ευθείας επίλυση της εξίσωσης (9.8) μπορεί να είναι λιγότερος από το χρόνο που χάνουμε λόγω του πολύ μικρού χρονικού βήματος.

2η περίπτωση: Άμεση διατύπωση ($f=1$)

Αν στη σχέση (9.7) αντικαταστήσουμε όπου $f=1$ έχουμε

$$A_P T_P = A_E T_E + A_W T_W + A_P^0 T_P^0$$

όπου:

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e}$$

$$A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w}$$

$$A_P^0 = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t}$$

$$A_P = A_E + A_W + A_P^0$$

Παρατηρούμε ότι τη χρονική στιγμή $t + \Delta t$ έχουμε τρεις άγνωστες θερμοκρασίες. Άρα για να τις υπολογίσουμε θα πρέπει αν λύσουμε το σύστημα που είναι τρι-

διαγώνιας μορφής. Η επίλυση τέτοιου είδους συστημάτων γίνεται με την υπορουτίνα TDMA (TriDiagonal Matrix Algorithm). Κατά την έμμεση διατύπωση δεν έχουμε περιορισμούς ευστάθειας δηλαδή το χρονικό βήμα Δt μπορεί να ληφθεί όσο μεγάλο θέλουμε εξοικονομώντας έτσι υπολογιστικό χρόνο.

3η περίπτωση: Διατύπωση Crank-Nicholson ($f=0.5$)

Αν στη σχέση (9.7) αντικαταστήσουμε όπου $f = 0.5$ έχουμε

$$A_P T_P = \frac{A_E}{2} (T_E + T_E^0) + \frac{A_W}{2} (T_W + T_W^0) + \left(A_P^0 - \frac{T_E}{2} - \frac{T_W}{2} \right) T_P^0$$

όπου:

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e}$$

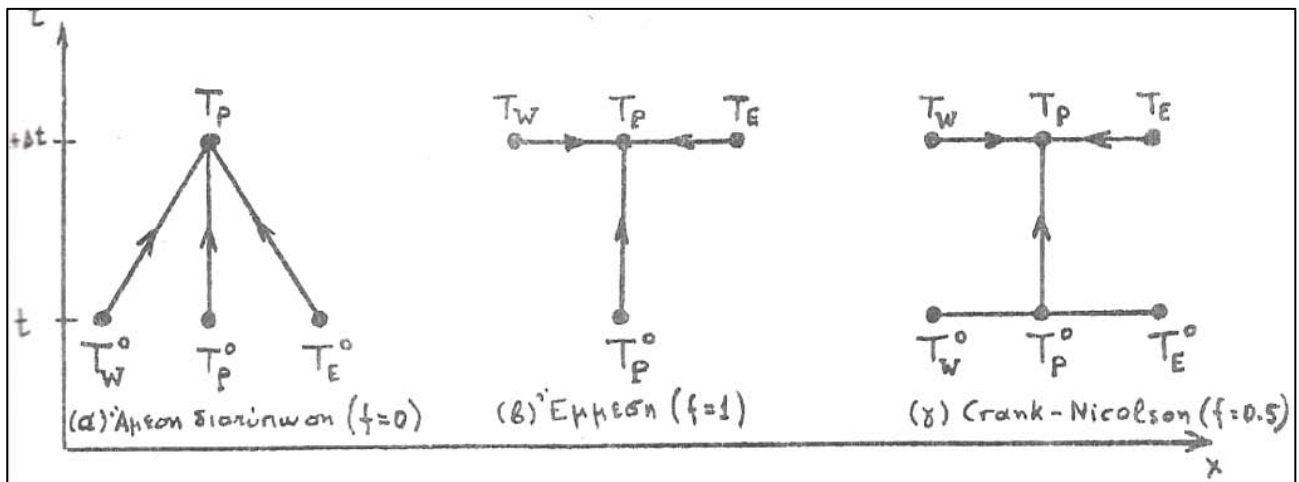
$$A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w}$$

$$A_P^0 = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t}$$

$$A_P = \frac{A_E}{2} + \frac{A_W}{2} + A_P^0$$

Όπως και στην έμμεση διατύπωση έτσι και εδώ χρειάζεται επίλυση τριδιαγωνίου συστήματος. Η μέθοδος Crank-Nicholson αποδεικνύεται ότι αν και δίνει πάντα μαθηματικώς ευσταθή λύση για οποιοδήποτε χρονικό βήμα Δt , φυσικώς η λύση αυτή μπορεί να είναι λανθασμένη. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μας δίνει

μεγαλύτερη ακρίβεια στη χρονική παράγωγο (σφάλμα αποκοπής $(\Delta t)^2$) Παρακάτω δίνεται η σχηματική απόδοση των τριών διατυπώσεων της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών.



Σχήμα 9.3 Σχηματική απόδοση των τριών διατυπώσεων της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών

Στο συγκεκριμένο φαινόμενο που μελετάμε έχουμε πρώτη παράγωγο ως προς το χρόνο άρα μας επαρκεί η τάξη σφάλματος αποκοπής της χρονικής παραγώγου να είναι (Δt) που μας προσφέρουν οι άλλες δύο μέθοδοι. Στην περίπτωση όμως του χώρου έχουμε δεύτερη παράγωγο και έτσι θέλουμε σφάλμα αποκοπής δεύτερης τάξης κάτι που μας προσφέρουν και οι τρεις. Άρα επιλέγουμε την έμμεση μέθοδο για να μην έχουμε προβλήματα ευστάθειας.

9.2 Οριακές συνθήκες

Σε αυτού του είδους τα φαινόμενα παρατηρούνται τριών ειδών οριακές συνθήκες:

- Οριακές συνθήκες Dirichlet
- Οριακές συνθήκες Neumann
- Οριακές συνθήκες συναγωγής

9.2.1 Οριακές συνθήκες Dirichlet

Το συγκεκριμένο είδος οριακών συνθηκών είναι και το πιο απλό. Οι τιμές των θερμοκρασιών στα όρια είναι γνωστές. Δηλαδή:

$$T(x = 0) = T_o$$

$$T(x = L) = T_i$$

Η διακριτοποίηση αυτού του είδους των οριακών συνθηκών είναι απλή. $x = 0$ είναι ο πρώτος κόμβος του πλέγματος και $x = L$ είναι ο τελευταίος. Άρα

$$T_1 = T_o$$

$$T_N = T_i$$

9.2.2 Οριακές συνθήκες Neumann

Το συγκεκριμένο είδος οριακών συνθηκών δίνει την κλίση των θερμοκρασιών στα όρια. Δηλαδή:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q_o$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = q_i$$

Διακριτοποιώντας τις παραπάνω οριακές συνθήκες έχουμε:

$$\frac{T_2 - T_1}{\Delta x} = q_o \Rightarrow T_1 = T_2 - q_o \Delta x$$

$$\frac{T_N - T_{N-1}}{\Delta x} = q_i \Rightarrow T_N = T_{N-1} + q_i \Delta x$$

9.2.3 Οριακές συνθήκες συναγωγής

Το συγκεκριμένο είδος οριακών συνθηκών εξισώνει τις θερμορροές στα όρια του υπό μελέτη χωρίου με την ενέργεια που δίνει διερχόμενο ρευστό θερμοκρασίας T_{f1} και T_{f2} και συναγωγιμότητας h_{f1} και h_{f2} αντίστοιχα. Δηλαδή:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = h_{f1} (T_{f1} - T_1)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = h_{f2} (T_N - T_{f2})$$

Διακριτοποιώντας τις παραπάνω οριακές συνθήκες έχουμε :

$$-k \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} = h_{f1} (T_{f1} - T_1) \Rightarrow \left(1 + \frac{\Delta x h_{f1}}{k} \right) T_1 = T_2 + \left(\frac{\Delta x h_{f1}}{k} \right) T_{f1}$$

$$-k \frac{T_N - T_{N-1}}{\Delta x} = h_{f2} (T_N - T_{f2}) \Rightarrow \left(1 - \frac{\Delta x h_{f2}}{k} \right) T_N = T_{N-1} + \left(\frac{\Delta x h_{f2}}{k} \right) T_{f2}$$

9.3 Επίλυση συστήματος τριδιαγώνιας μορφής [18]

Η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών συνδέει την τιμή της θερμοκρασίας ενός κόμβου i με την τιμή στον προηγούμενο $i-1$ και στον επόμενο $i+1$. Άρα μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i T_{i-1} + d_i$$

για $i=1$ έως $n-1$ και $c_1 = b_n = 0$ (9.3.1)

Διαιρούμε με a_i όλους τους όρους της:

$$T_i = A_i T_{i+1} + B_i T_{i-1} + C_i$$

για $i=1$ έως $n-1$ και $B_1 = A_n = 0$

Συνδυάζοντας την πρώτη ($i=1$) και τη δεύτερη ($i=2$) εξίσωση του συστήματος απαλείφεται η άγνωστη T_1 (όπως κάνουμε και στην απαλοιφή κατά Gauss). Η εξίσωση που προκύπτει μπορεί να συνδυαστεί με την τρίτη ($i=3$) ώστε να απαλειφθεί η άγνωστη T_2 . Με αυτήν τη διαδικασία για κάθε i καταλήγουμε στο παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{aligned} T_1 &= A_1 T_2 + c_1 \\ T_2 &= A_2' T_3 + c_2' \\ T_3 &= A_3' T_4 + c_3' \\ &\dots\dots\dots \\ T_i &= A_i' T_{i+1} + c_i' \\ &\dots\dots\dots \\ T_{n-1} &= A_{n-1}' T_n + c_{n-1}' \\ T_n &= c_n' \end{aligned}$$

όπου οι συντελεστές δίνονται από τις αναδρομικές σχέσεις:

$$A'_i = \frac{A_i}{1 - A'_{i-1} B_i}$$

$$c'_i = \frac{c_i + c'_{i-1} B_i}{1 - A'_{i-1} B_i}$$

$$i=2,3,\dots,n$$

$$A'_1 = A_1$$

$$A'_n = A_n = 0$$

$$c'_1 = c_1$$

Έτσι οι άγνωστες τιμές των θερμοκρασιών υπολογίζονται με πίσω αντικατάσταση.

Η υπορουτίνα TDMA δίνεται στο παράρτημα.

Κεφάλαιο 10

Μέθοδος πεπερασμένων όγκων

10.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων είναι μία ευρέως διαδεδομένη υπολογιστική μέθοδος επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η μέθοδος εφαρμόζεται εύκολα χωρίζοντας αρχικά το πεδίο ορισμού σε πεπερασμένους όγκους αναφοράς, έτσι ώστε κάθε κόμβος του πλέγματος να περιβάλλεται από έναν όγκο αναφοράς. Στη συνέχεια ολοκληρώνεται η μ.δ.ε στον όγκο αναφοράς. Τα ολοκληρώματα υπολογίζονται αναλυτικά υποθέτοντας ότι οι τιμές της άγνωστης εξαρτημένης μεταβλητής είναι σταθερές ή ότι μεταβάλλονται γραμμικά σε κάθε όγκο αναφοράς. Οι αλγεβρικές εξισώσεις που προκύπτουν ονομάζονται εξισώσεις πεπερασμένων όγκων και το σύστημα επιλύεται χρησιμοποιώντας τις απ' ευθείας ή τις επαναληπτικές τεχνικές επίλυσης συστημάτων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων γίνεται εύκολα κατανοητή αφού η μεθοδολογία και γενικότερα ο τρόπος διατύπωσης της μεθόδου συνδέεται άμεσα με τη φυσική του προβλήματος. Είναι λογικό να θεωρούμε ότι οι εξισώσεις πεπερασμένων όγκων ικανοποιούν τις ίδιες φυσικές αρχές και νόμους, (διατήρηση μάζας, ορμής, ενέργειας), με αυτές που ικανοποιούν οι μ.δ.ε από τις οποίες έχουν προκύψει. Μία βασική διαφορά ανάμεσα στις μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών και όγκων είναι ότι στις πεπερασμένες διαφορές η λύση βασίζεται μόνο στις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής στους κόμβους του πλέγματος ενώ στους πεπερασμένους όγκους η λύση βασίζεται όχι μόνο στις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής στους κόμβους αλλά και σε υποθετικές κατανομές ανάμεσα στους κόμβους.

Τέλος σημειώνεται ότι τα δύο υπολογιστικά σχήματα οδηγούν σε αντίστοιχα αποτελέσματα εφόσον η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών διατυπωθεί σωστά, το σχήμα είναι ευσταθές και έχει συνοχή με τη μ.δ.ε.

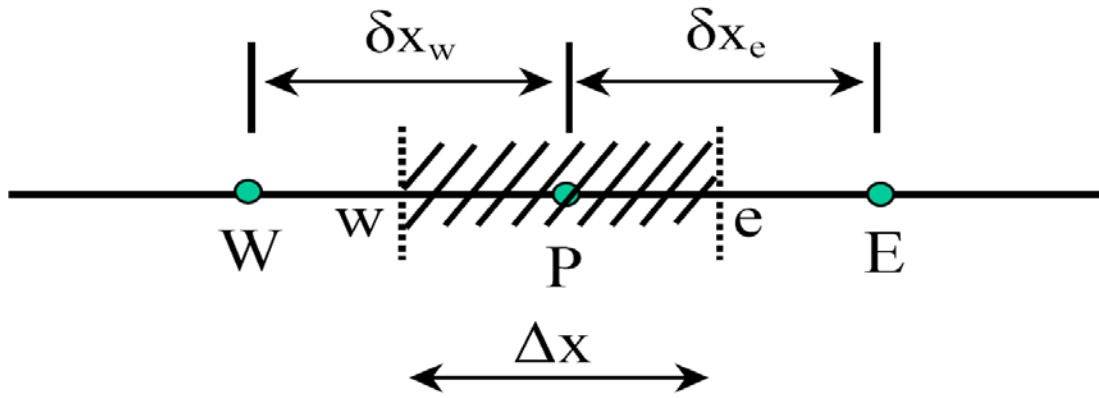
10.2 Ολοκλήρωση σε όγκο αναφοράς

Έστω η μόνιμη μονοδιάστατη εξίσωση θερμότητας με πηγή

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + S = 0$$

(10.2.1)

όπου k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, $T(x)$ η θερμοκρασία και S ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας ανά μονάδα όγκου. Η διατύπωση της μεθόδου ξεκινά ορίζοντας το υπολογιστικό χωρίο επίλυσης του προβλήματος. Το συνεχές πεδίο ορισμού διακριτοποιείται και εστιάζουμε την προσοχή μας σε ένα τυχαίο κόμβο του πλέγματος, έστω στον κόμβο P και στους γειτονικούς κόμβους W και E .



Σχήμα 10.1 Διακριτοποίηση σε μια διάσταση

Στη συνέχεια ορίζουμε τον όγκο ελέγχου γύρω από τον κόμβο P με τις διακεκομμένες γραμμές και τα σημεία w και e βρίσκονται στο αριστερό και δεξί αντίστοιχα μέτωπο του όγκου ελέγχου. Στο Σχήμα 10.1 φαίνεται ότι τα σημεία w και e ορίζονται στο μέσο των διαστημάτων WP και PE, χωρίς όμως αυτή η επιλογή να είναι υποχρεωτική. Θεωρώντας μοναδιαία πάχη στις κατευθύνσεις y και z, αφού το πρόβλημα είναι μονοδιάστατο ο όγκος του όγκου ελέγχου είναι Δx . Η εξίσωση (10.2.1) ολοκληρώνεται στον όγκο ελέγχου και προκύπτει

$$\left(\mathbf{k} \frac{dT}{dx} \right)_e - \left(\mathbf{k} \frac{dT}{dx} \right)_w + \int_w^e S dx = 0. \quad (10.2.2)$$

Στο σημείο αυτό για να προχωρήσουμε απαιτείται να γίνει μια υπόθεση για την θερμοκρασιακή κατανομή γύρω από τα σημεία e και w. Οι δύο απλούστερες υποθέσεις είναι να θεωρήσουμε ότι η θερμοκρασία T είναι σταθερή ή ότι μεταβάλλεται γραμμικά ανάμεσα στα σημεία W, P και E. Επιλέγοντας τη δεύτερη υπόθεση η εξίσωση (10.2.2) ανάγεται στην αλγεβρική πλέον εξίσωση

$$\frac{k_e}{\Delta x_e} (T_E - T_P) - \frac{k_w}{\Delta x_w} (T_P - T_E) + \bar{S} \Delta x = 0 \quad (10.2.3)$$

όπου το \bar{S} είναι η μέση τιμή του S στον όγκο ελέγχου. Για υπολογιστικούς λόγους συνηθίζεται η εξίσωση (10.2.3) να γράφεται στη μορφή

$$\mathbf{a}_P T_P = \mathbf{a}_E T_E + \mathbf{a}_W T_W + \mathbf{b} \quad (10.2.4)$$

Όπου

$$a_E = \frac{k_e}{\delta x_e},$$

$$a_W = \frac{k_w}{\delta x_w},$$

$$a_P = a_E + a_W$$

και

$$b = \bar{S} \Delta x,$$

ή στην πιο βολική μορφή

$$a_P T_P = \sum a_{nb} T_{nb} + b, \tag{10.2.5}$$

όπου ο δείκτης nb σημαίνει κάποιο γειτονικό κόμβο και το άθροισμα ισχύει για όλους τους γειτονικούς κόμβους. Όταν το μέγεθος της εξαρτημένης μεταβλητής στον κόμβο P επηρεάζεται από τα αντίστοιχα μεγέθη στους γειτονικούς κόμβους μέσω των φυσικών μηχανισμών της διάχυσης και της συναγωγής τότε οι συντελεστές της εξίσωσης (10.2.4) πρέπει να έχουν το ίδιο πρόσημο και επίσης

$$a_P = \sum a_{nb}$$

Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις που οι κανόνες αυτοί δεν τηρούνται και αυτό έχει συνήθως σαν συνέπεια αριθμητικά αποτελέσματα που δεν συμφωνούν με τη φυσική του προβλήματος.

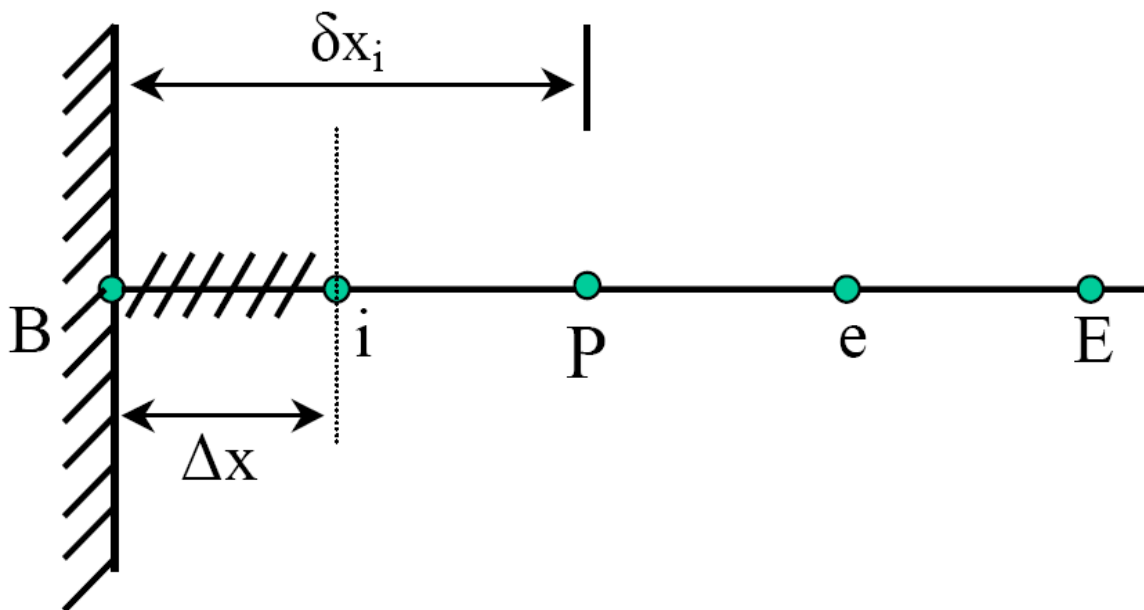
10.3 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που συνοδεύουν τις μ.δ.ε, όπως έχουμε συχνά αναφέρει είναι τύπου Dirichlet ή τύπου Neumann, ή μικτού τύπου. Όταν είναι τύπου Dirichlet οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής στους οριακούς κόμβους του υπολογιστικού

πλέγματος είναι γνωστές. Αντίθετα στις άλλες δύο περιπτώσεις είναι απαραίτητο να διατυπωθούν εξισώσεις πεπερασμένων όγκων για τους συνοριακούς κόμβους που θα λυθούν μαζί με τις υπόλοιπες εξισώσεις των εσωτερικών κόμβων. Η μεθοδολογία παρουσιάζεται με ένα παράδειγμα όπου εξετάζεται η μόνιμη μονοδιάστατη εξίσωση θερμότητας (10.2.1) με συνοριακή συνθήκη μικτού τύπου στο όριο $x=0$

$$q = -k \frac{dT}{dx} = h(T_{\infty} - T_B), \quad (10.3.1)$$

όπου και οι θερμοκρασίες T_{∞} και T_B του περιβάλλοντος και του συνοριακού σημείου B ($x=0$) αντίστοιχα. Η διακριτοποίηση στο σημείο B φαίνεται στο Σχήμα 10.2.



Σχήμα 10.2. Διακριτοποίηση οριακού κόμβου σε μια διάσταση

Παρατηρούμε ότι τώρα ο συνοριακός κόμβος B δεν περιβάλλεται από τον αντίστοιχο όγκο ελέγχου. Η εξίσωση (10.2.1) ολοκληρώνεται στον συνοριακό όγκο ελέγχου και προκύπτει ότι

$$\left(k \frac{dT}{dx} \right)_i - \left(k \frac{dT}{dx} \right)_B + \int_B^i S dx = 0. \quad (10.3.2)$$

Εφαρμόζοντας στην εξίσωση (10.3.2) τον νόμο Fourier και την οριακή συνθήκη (10.3.1) έχουμε ότι

$$\frac{k_i}{\delta x_i} (T_i - T_P) + h(T_B - T_{\infty}) + \bar{S} \Delta x = 0 \quad (10.3.3)$$

Η εξίσωση (10.3.3) γράφεται στη μορφή

$$\mathbf{a}_B \mathbf{T}_B = \mathbf{a}_I \mathbf{T}_I + \mathbf{b}, \quad (10.3.4)$$

Όπου

$$\mathbf{a}_I = \frac{\mathbf{k}_i}{\delta \mathbf{x}_i},$$

$$\mathbf{a}_B = \mathbf{a}_I + \mathbf{h}$$

και

$$\mathbf{b} = \bar{S} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{h} \mathbf{T}_\infty.$$

Λύνοντας την εξίσωση (10.3.4) μαζί με τις εξισώσεις πεπερασμένων όγκων για τους εσωτερικούς κόμβους οδηγούμαστε στον υπολογισμό των θερμοκρασιών.

Κεφάλαιο 11

Λογισμικά προσομοίωσης

11.1 Εισαγωγή [14,19-21]

Τα επικουρικά λογισμικά για τις κτηριακές κατασκευές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα αρχιτεκτονικά εργαλεία που στοχεύουν κυρίως στο σχεδιασμό και την χωροταξική διαμόρφωση και σε αυτά που πραγματοποιούν προσομοιώσεις της θερμικής τους συμπεριφοράς. Αυτή η δεύτερη κατηγορία δίνει και τη δυνατότητα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των υπό μελέτη συστημάτων. Τα υπολογιστικά εργαλεία δύναται να προβλέψουν θερμικά κέρδη, ροές αερισμού, φωτισμού, κόστη λειτουργίας αλλά και να υλοποιήσουν διαγνωστική αυτοματισμών και διαστασιολογήσεις κλιματιστικών στοιχείων.

Η διαδικασία επιλογής λογισμικού προσομοίωσης είναι τόσο περίπλοκη όσο και σημαντική. Κάθε εργαλείο είναι ιδανικό για την εκτέλεση συγκεκριμένων εργασιών και κανένα δεν είναι άριστο αυτόνομα. Η ορθότερη αντιμετώπιση είναι η παράλληλη χρήση λογισμικών, όχι μόνο για την εξάλειψη αδυναμιών, αλλά και για την επικύρωση των αποτελεσμάτων. Στις περιπτώσεις όπου το κόστος αγοράς και ο βαθμός δυσκολίας των εφαρμογών είναι απαγορευτικά, τα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται είναι τα εξής:

- Η εφαρμογή να περιλαμβάνει όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία από τα επιθυμητά. Να παρέχει δηλαδή στο χρήστη τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει πληθώρα κατασκευαστικών σεναρίων.
- Να φέρει πιστοποιήσεις για την ακρίβεια των υπολογισμών. Ειδικά λογισμικά εμπεριέχουν αναλυτικές λύσεις εμπειριστατωμένης διαδικασίας που διευκολύνουν την σύγκριση των εργαλείων προσομοίωσης ή ελέγχουν την ορθότητα της επιλογής.
- Να είναι διαδεδομένη στον επαγγελματικό κλάδο με αποτέλεσμα διαθεσιμότητα μεγάλου όγκου πληροφοριών και προοπτικές βελτίωσης.
- Τα κόστη αγοράς, ενημερώσεων του λογισμικού και τεχνικών οδηγιών αλλά και οι απαιτήσεις σε υπολογιστική δύναμη να αιτιώνται από τις ανάγκες.
- Η εμπειρία του χειριστή και το κατά πόσο είναι εύχρηστη η εφαρμογή είναι παράγοντες που πρέπει να συνυπολογιστούν για την τελική επιλογή.

11.2 Αναφορά στις δημοφιλέστερες εφαρμογές.

11.2.1 TRNSYS [23]

Το TRNSYS είναι ένα ολοκληρωμένο και επεκτάσιμο περιβάλλον προσομοίωσης για την προσομοίωση μεταβαλλόμενων συστημάτων στο χρόνο, συμπεριλαμβανομένων και των πολυζωνικών κτιρίων (multi-zone buildings). Είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται παγκοσμίως από μηχανικούς και ερευνητές για την αξιολόγηση των νέων ενεργειακών συστημάτων για διάφορες χρήσεις, από ένα απλό σύστημα ψύξης μέχρι και τον σχεδιασμό και την προσομοίωση κτιρίων και του εξοπλισμού

τους , συμπεριλαμβανομένων στρατηγικών ελέγχου , συμπεριφορά των κατοίκων και συστήματα εναλλακτικών πηγών ενέργειας και συνδυασμό τους . Η μεγάλη επιτυχία του TRNSYS είναι το ότι ο πηγαίος κώδικας , δηλαδή ο πυρήνας του προγράμματος , καθώς και ο κώδικας των διαφόρων μοντέλων που περιλαμβάνει το TRNSYS δίνονται στο χρήστη , ο οποίος μπορεί να τροποποιήσει κατάλληλα έτσι ώστε να εξυπηρετούνται καλύτερα οι δικές του ανάγκες .

Επίσης , λόγω της αρχιτεκτονικής του προγράμματος , η οποία είναι βασισμένη σε αρχεία DLL , υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής νέων μοντέλων που μπορεί να κατασκευάσει ο ίδιος ο χρήστης χρησιμοποιώντας κοινές γλώσσες προγραμματισμού (C,C++,PASCAL,FORTRAN κ.α.). Παράλληλα , το TRNSYS μπορεί να συνδεθεί εύκολα με πολλές άλλες εφαρμογές για επεξεργασία πριν , μετά ή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (π.χ.Microsoft Excel , Matlab κ.λ.π.) . Οι εφαρμογές που περιλαμβάνονται στο TRNSYS είναι η ακόλουθες :

- Ηλιακά συστήματα
- Συστήματα ψύξης-θέρμανσης
- Συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- Συμπαράγωγή ,Κυψέλες καυσίμου
- Και οτιδήποτε απαιτεί δυναμική προσομοίωση

Πρέπει εδώ να σημειώσουμε ότι οι εφαρμογές στο TRNSYS δημιουργούνται ενώνοντας γραφικά τα στοιχεία (components) στο στούντιο προσομοίωσης (Simulation Studio) .Κάθε τύπος στοιχείου περιγράφεται από ένα μαθηματικό μοντέλο στη μηχανή προσομοίωσης του TRNSYS τα οποία συνδέονται με το στούντιο προσομοίωσης μέσω των <<αιτήσεων>> (Proformas) .Η Proforma λειτουργεί σαν ένα <<μαύρο κουτί>> περιγραφής ενός στοιχείου που περιέχει τα εισαγόμενα και εξαγόμενα μεγέθη (inputs-outputs) ,τις μεταβλητές και τα λοιπά .Τα στοιχεία αυτά αναφέρονται ως types .

11.2.2 DOE-2 [22]

Το DOE-2 είναι ένα ευρέως διαδεδομένο, ελεύθερης διάθεσης πρόγραμμα με στόχο την ενεργειακή ανάλυση και την πρόβλεψη της ενεργειακής κατανάλωσης και του κόστους κτηριακών εγκαταστάσεων. Εισάγοντας δεδομένα όπως η διάταξη των χώρων, τα κατασκευαστικά στοιχεία, τα προγράμματα λειτουργίας κλιματισμού, φωτισμού, μηχανημάτων και ανθρώπων, η εφαρμογή παράγει ωριαίες προσομοιώσεις της θερμικής συμπεριφοράς του κελύφους. Η βασική έκδοση απαιτεί γνωστικό υπόβαθρο και εμπειρία αφού εκτελείται σε λειτουργικό DOS, ενώ υπάρχει διαθέσιμη έκδοση με βοηθητικούς οδηγούς και γραφικές απεικονίσεις (e-Quest). Ο πηγαίος κώδικας της εφαρμογής, ελεγμένος για την εγκυρότητα των υπολογισμών, έχει ενσωματωθεί σε υπολογιστικές σουίτες, όπως π.χ. στο COMBINE, περιβαλλοντικό, αναπτυξιακό πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

11.2.3 BLAST [24]

Ομοίως με προηγούμενα, το BLAST (Building Load Analysis and System Thermodynamics) είναι ένα σετ προγραμμάτων για την πρόβλεψη της ενεργειακής κατανάλωσης ψύξης-θέρμανσης και ανάλυσης του κόστους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της ενεργειακής επίδοσης κτηρίων με σχεδιαστικές επιλογές οποιουδήποτε τύπου και μεγέθους. Επιπρόσθετα με την εκτέλεση ωριαίων υπολογισμών μέγιστου φορτίου της ημέρας σχεδίασης (peak load design day), το BLAST εκτιμά και την ετήσια ενεργειακή απόδοση της κατασκευής, απαραίτητη για την τελική επιλογή των ηλιακών συστημάτων και τον καθορισμό των συμφερούσών στρατηγικών.

11.2.4 Energy Plus [25]

Το λογισμικό Energy Plus είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης κατανάλωσης ενέργειας για τη μοντελοποίηση θέρμανσης κτιρίων, ψύξης, φωτισμού, αερισμού, και άλλων ροών ενέργειας και έχει αναπτυχθεί από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ. Αν και βασίζεται στα πιο δημοφιλή χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες των BLAST και DOE-2, περιλαμβάνει πολλές καινοτόμες δυνατότητες προσομοίωσης, όπως είναι τα βήματα με χρόνο λιγότερο από μία ώρα. Το λογισμικό ενεργειακής ανάλυσης και προσομοίωσης κτιρίων Energy Plus αποτελεί ένα εξαιρετικά ευέλικτο και προσαρμοστικό λογισμικό ανοιχτού κώδικα, το οποίο παρέχεται χωρίς χρέωση. Η λειτουργία του απαιτεί την φυσική περιγραφή του υπό μελέτη κτιρίου μέσω σχεδιαστικού λογισμικού CAD, στην παρούσα εργασία έχει γίνει στο Google Sketch Up, την εισαγωγή των κατασκευαστικών του δεδομένων, το διαχωρισμό του σε θερμικές ζώνες, την αναλυτική εισαγωγή των εσωτερικών κερδών, την εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων, την ενσωμάτωση των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, κλπ. Το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού σε ωριαία βάση, των θερμικών και ψυκτικών φορτίων του κτιρίου, της ενεργειακής κατανάλωσης των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, τον υπολογισμό των θερμοκρασιών των θερμικών ζωνών καθώς και των επιφανειακών εσωτερικών και εξωτερικών θερμοκρασιών των δομικών στοιχείων, κλπ

11.2.5 ECOTECT [26]

Το ECOTECT είναι ένα πρόγραμμα που μπορεί να κάνει ανάλυση ηλιασμού και τεχνητού φωτισμού, μελέτη θερμικής άνεσης και αναγκών σε θέρμανση και ψύξη, ακουστική μελέτη και υπολογισμό κόστους. Η χρήση του ξεκινά από τα πρώτα στάδια της αρχιτεκτονικής μελέτης με απλά μοντέλα και εξελίσσεται μαζί της. Είναι κατάλληλο κυρίως για αρχιτέκτονες. Προσφέρει τρισδιάστατο περιβάλλον σχεδίασης και είναι φιλικό προς το χρήστη. Από τους χρήστες του απαιτείται εξοικείωση με προγράμματα CAD και με τις βασικές έννοιες του βιοκλιματικού σχεδιασμού. Η

εισαγωγή στοιχείων στο πρόγραμμα μπορεί να γίνει με ένα δισδιάστατο σχέδιο dwg ή απευθείας με τα σχεδιαστικά εργαλεία του ecotect. Εισάγονται επίσης αρχεία 3ds και dxf. Το πρόγραμμα διαθέτει βάσεις δεδομένων όπως για μετεωρολογικά στοιχεία ή για πρότυπα προγράμματα χρήσης ενός κτιρίου, ενώ επιτρέπει και την τροποποίησή τους ή τη δημιουργία καινούργιων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον και για άλλες μελέτες. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποδίδονται με πολλούς τρόπους, όπως με γραφήματα, τρισδιάστατα μοντέλα, ή πίνακες δεδομένων, τα οποία μπορούν να εξαχθούν σε μορφή εικόνας, wmf, πινάκων excel κα. Το μοντέλο που έχουμε δημιουργήσει, μαζί με όλες τις πληροφορίες του (μετεωρολογικά δεδομένα, υλικά, πηγές φωτισμού) μπορεί επίσης να εξαχθεί σε άλλα προγράμματα για πιο εξειδικευμένη μελέτη, όπως RADIANCE, VRML, AutocadDXF, EnergyPlus, ESP-r, ASCII Modfiles, XML

11.2.6 TAS [27]

Το TAS είναι ένα πακέτο εφαρμογών που μέσω της μοντελοποίησης εκτελεί δυναμική θερμική προσομοίωση του κτηριακού κελύφους. Εκτιμά την ενεργειακή κατανάλωση, τις εκπομπές CO₂, τα κόστη λόγω χρήσης και το αν ικανοποιούνται οι συνθήκες θερμικής άνεσης. Υλοποιεί τη μέθοδο παράγοντα απόκρισης για τα κατασκευαστικά στοιχεία του κελύφους, για χρονικά διαστήματα ημερών, εβδομάδων και μηνών, απαιτώντας λιγότερο υπολογιστικό χρόνο από τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών με αποτελέσματα εφάμιλλης ακρίβειας. Ένα από τα πλεονεκτήματα της δυναμικής προσομοίωσης του TAS είναι η δυνατότητα αντιμετώπισης παθητικών ηλιακών συστημάτων, σε συνδυασμό με τους υπολογισμούς θερμικών κερδών και κλιματισμού. Ακόμα, συμπεριλαμβάνει υπολογισμούς σκίασης, αναγνωρίζει διαδρομές της ηλιακής ακτινοβολίας διαμέσου των εσωτερικών χώρων αλλά και της διάχυτης ακτινοβολίας που δύναται να προσθέσουν έως 2K στις προβλεπόμενες εσωτερικές θερμοκρασίες. Με βάση τα ωριαία καιρικά δεδομένα που περιλαμβάνουν τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασία εξωτερικού αέρα, διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου, η εφαρμογή επιλύει εξισώσεις ενεργειακής ισορροπίας και διατήρησης των ροών του αέρα για ωριαία χρονικά βήματα. Για τον φυσικό αερισμό συγκεκριμένα, στις ροές του αέρα συνυπολογίζονται οι παραχθείσες από τον άνεμο αλλά και από τη θερμοκρασιακή διαφορά ροές, ανάλογα με τις –αναφερθείσες σε προηγούμενο κεφάλαιο– στρατηγικές που διαφαίνονται κατά τη μοντελοποίηση. Μέσω της εισαγωγής προγραμμάτων λειτουργίας για τα ανοίγματα, δίνεται δυνατότητα εφαρμογής της στρατηγικής νυχτερινού αερισμού, σημαντική για τις βιοκλιματικές κατασκευές.

11.2.7 ESP-r [28]

Πρόγραμμα προσομοίωσης που υπολογίζει την ενέργεια που καταναλώνεται από ένα κτίριο και την ποιότητα του εσωτερικού του περιβάλλοντος. Βοηθά στην εύρεση της βέλτιστης σχέσης ανάμεσα στη γεωμετρία ενός κτιρίου, το κελύφος του,

την κίνηση του αέρα, τις εγκαταστάσεις του και τα συστήματα ελέγχου. Περιλαμβάνει βάσεις δεδομένων στις οποίες καταχωρούνται οι πληροφορίες, προσομοιωτή και εργαλεία μέτρησης της απόδοσης σε διάφορους τομείς.

Εξάγοντας δεδομένα στο Radiance, μπορεί να γίνει και μελέτη φωτισμού. Χρησιμοποιείται κυρίως στην έρευνα και λιγότερο από μελετητές. Οι χρήστες του είναι μηχανολόγοι και ερευνητές, και, σπανιότερα, αρχιτέκτονες και σύμβουλοι σε ενεργειακά θέματα. Διανέμεται δωρεάν και ανήκει στην κατηγορία GNU (ανοιχτού κώδικα). Πιθανόν να προταθεί από το ΥΠΕΧΩΔΕ για προσομοίωση κτιρίων άνω των 1000μ² σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή οδηγία 2002/91/EK

Η γεωμετρία του κτιρίου ορίζεται είτε με προγράμματα CAD είτε με εισαγωγή στοιχείων στο ίδιο το πρόγραμμα. Είναι συμβατό με το AutoCAD και το Ecotect για εισαγωγή δεδομένων. Οι ιδιότητες των υλικών και τα λειτουργικών προγραμμάτων επιλέγονται πρώτα από βάσεις δεδομένων του ESP-r και στη συνέχεια συνδέονται από το χρήστη με επιφάνειες και με λειτουργικές ζώνες του κτιρίου αντίστοιχα. Πιο σύνθετα μοντέλα, όπως στοιχεία του κελύφους με μεταβαλλόμενες ιδιότητες θερμομόνωσης ή σκίασης και φωτοτοβολταϊκά στοιχεία ενσωματωμένα στην πρόσοψη μπορούν να υπολογιστούν, όπως επίσης και τα δίκτυα Θέρμανσης - Ψύξης - Αερισμού και τα ηλεκτρικά συστήματα.

Η απόδοση του κτιρίου σε διαφορετικούς τομείς αναπαριστάται σε σύνθετα γραφήματα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η αξιολόγηση των επιλογών ενός σεναρίου ταυτόχρονα σε θέματα όπως η κατανάλωση ηλεκτρισμού, η ροή του αέρα, η λειτουργία συστημάτων ΑΠΕ και η απόδοση των εγκαταστάσεων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης με το ESP-r εξάγονται σε αρκετά άλλα προγράμματα ανάλυσης αλλά και σε προγράμματα γραφικών. Το μοντέλο εξάγεται και στο Radiance για φωτορεαλισμό και μελέτη φωτισμού.

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ ΜΗ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Κεφάλαιο 12 Ηλεκτρικό Κυκλωματικό ανάλογο [29,30]

12.1 Εισαγωγή

Αφορά την μοντελοποίηση μηχανισμών διάδοσης θερμότητας με μη γραμμικά ισοδύναμα συγκεντρωμένα ηλεκτρικά κυκλωματικά ανάλογα

Σε σχέση με την αντιμετώπιση του προβλήματος της μονοδιάστατης εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας σε μη σταθεροποιημένες καταστάσεις, σε αντιδιαστολή με τη διάδοση θερμότητας σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, έχουν διατυπωθεί πολλές μεθοδολογίες. Η ανάλυση του προβλήματος διάδοσης της θερμότητας σε συνάρτηση των σταθερών ή των μεταβλητών οριακών συνθηκών και των νόμων που διέπουν τους μηχανισμούς ροής θερμότητας (αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία) βασίζεται στην υπάρχουσα γνώση επίλυσης πρωτοβάθμιων ή πολυβάθμιων διαφορικών εξισώσεων.

Σε πολλές όμως περιπτώσεις, στην πράξη, οι αναλυτικές μέθοδοι δεν προσφέρονται για την αντιμετώπιση του πολύπλοκου προβλήματος της θερμικής ανάλυσης των κτιρίων. Έτσι, εκτός από την αναλυτική λύση υπάρχει η δυνατότητα ανάπτυξης μοντέλων προσομοίωσης της μεταβατικής μεταφοράς θερμότητας με ηλεκτρικά ανάλογα κυκλώματα. Οι δυναμικοί εν εξελίξει του χρόνου μηχανισμοί μετάδοσης της θερμότητας και οι νόμοι που ισχύουν για τα ανωτέρω μεταβατικά φυσικά φαινόμενα, μπορεί να προσομοιωθούν με μη γραμμικά ισοδύναμα συγκεντρωμένα θερμικά κυκλωματικά μοντέλα. Η ανάλυση αυτών, βασίζεται στις αναλογίες και στις ισοδυναμίες μεταξύ ηλεκτρικών και θερμικών κυκλωμάτων. Ως εκ τούτου, το όλο πρόβλημα διαμορφώνεται κυρίως από τις σχέσεις και τους νόμους που περιγράφουν τη διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος στα ηλεκτρικά κυκλώματα

Οι βασικές μέθοδοι επίλυσης των ηλεκτρικών ανάλογων κυκλωμάτων, με μεγαλύτερη έμφαση στη μέθοδο των κόμβων. Η ανάγκη της χρησιμοποίησης των ηλεκτρικών ανάλογων κυκλωμάτων με τη βοήθεια του H/Y, έναντι των αναλυτικών μεθοδολογιών βασίζεται στα ακόλουθα:

- Οι μηχανισμοί διάδοσης θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία καθιστούν αδύνατη την αναλυτική επίλυση, λόγω των μη γραμμικοτήτων των συντελεστών θερμικής μετάβασης που ενσωματώνουν Τα ηλεκτρικά ανάλογα κυκλώματα μπορούν να αντιμετωπίσουν και να δώσουν λύση στις μη γραμμικότητες που υπεισέρχονται στο πρόβλημα της μετάδοσης θερμότητας στα κτίρια με προοδευτική ρύθμιση των παραμέτρων των μη γραμμικών στοιχείων (διαδοχικές επαναληπτικά προσεγγίσεις σύγκλισης) .
- Τα ηλεκτρικά ανάλογα κυκλώματα είναι ευέλικτα και ακριβή για την προσομοίωση της λειτουργίας περίπλοκων συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης και συστημάτων ελέγχου εξαερισμού με συνεχόμενη ή διακοπτόμενη λειτουργία.

- Τα φυσικά κυκλωματικά ανάλογα επιτρέπουν επίσης, με εύκολο και συστηματικό τρόπο, την κατάστρωση και επίλυση του προβλήματος της μονοδιάστατης μεταβατικής μεταφοράς της θερμότητας (φυσικό ανάλογο). Για αυτόν το λόγο, η προσομοίωση των φυσικών φαινομένων της διάδοσης θερμότητας με ηλεκτρικά ανάλογα κυκλώματα υιοθετείται εκτεταμένα από τους διάφορους ερευνητές, ακόμη και όταν η επίλυση επιχειρείται με αναλυτικό τρόπο.

Ακολουθώντας, παρουσιάζονται αναλυτικά οι συσχετίσεις που χρησιμεύουν στον προσδιορισμό και στην εκτίμηση της θερμικής συμπεριφοράς των κτιρίων στην κατάσταση ισορροπίας (steady-state analysis) με τα ηλεκτρικά ανάλογα κυκλώματα

Στα γραμμικά ηλεκτρικά κυκλώματα η σχέση μεταξύ του ρεύματος I και της διαφοράς δυναμικού ΔV εξαρτάται από την ηλεκτρική αντίσταση R και περιγράφεται από το νόμο του Ohm:

$$I = \Delta V / R \quad (12.1.1)$$

όπου ΔV (Volt, V) είναι η διαφορά δυναμικού στα άκρα μιας αντίστασης R (Ohm, Ω) που διαρρέεται από ρεύμα I (Ampere, A). Ως εκ τούτου, η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος I μεταξύ δύο σημείων με διαφορά δυναμικού ΔV και με ηλεκτρική αντίσταση R είναι ανάλογη του λόγου $\Delta V / R$.

Ομοίως, από τη σχέση (12.1.1) προκύπτει ότι η ηλεκτρική αντίσταση R ορίζεται ως το πηλίκο $\Delta V / I$ της διαφοράς δυναμικού (αίτιο) προς την ένταση ροής του ηλεκτρικού ρεύματος (αποτέλεσμα).

Επομένως, ισχύει:

$$R = \Delta V / I \quad (12.1.2)$$

Σε αντιστοιχία με τις τάσεις V και τα ρεύματα I στα γραμμικά θερμικά κυκλώματα (ηλεκτρικά ανάλογα) οι ποσότητες που ενδιαφέρουν είναι οι θερμοκρασίες T ($^{\circ}\text{C}$) και οι ροές θερμότητας Q (W). Στα θερμικά κυκλώματα οι τάσεις των κόμβων V εκφράζουν θερμοκρασίες T , ενώ τα ρεύματα I των κλάδων εκφράζουν ροές θερμότητας Q . Δηλαδή, στην περίπτωση προβλημάτων μετάδοσης θερμότητας το αίτιο που προκαλεί τη ροή θερμότητας Q είναι η διαφορά της θερμοκρασίας ΔT μεταξύ των δύο σημείων θερμικής ανισοτροπίας.

Το πηλίκο $\Delta T / Q$ των δύο αυτών μεγεθών έχει τη φυσική έννοια της θερμικής αντίστασης R (K/W). Άρα, ισχύει $R = \Delta T / Q$

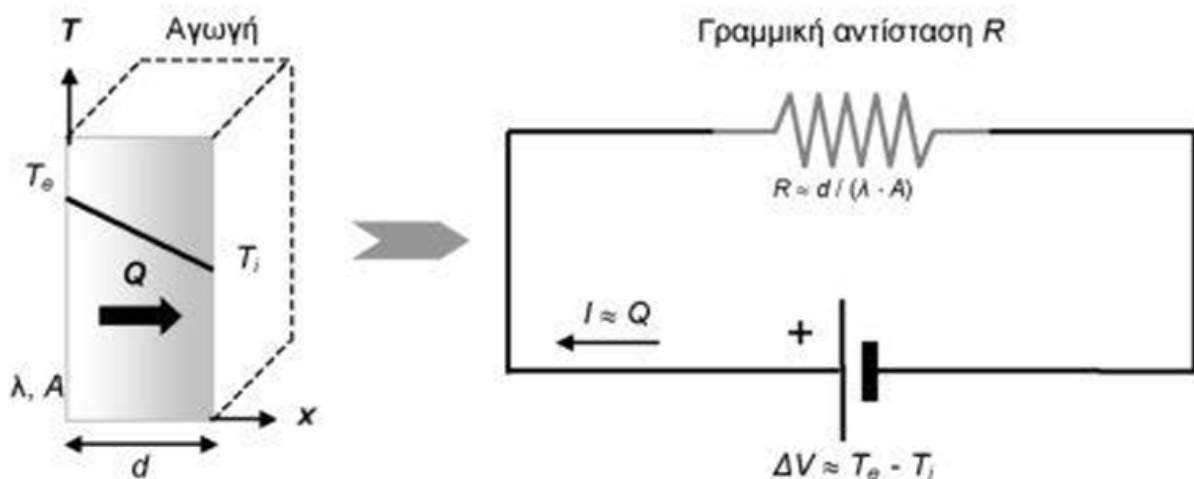
12.2. Προσομοίωση αγωγής

Η τιμή της γραμμικής θερμικής αντίστασης R προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$R = d / (\lambda * A) \quad (12.2.1)$$

Ως εκ τούτου, η ροή θερμότητας Q (W) που αντιστοιχεί σε θερμοκρασιακή κλίση $\Delta T = T_o - T_i$ μπορεί να υπολογιστεί και να μοντελοποιηθεί με το ανάλογο ηλεκτρικό κύκλωμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 12.1 και περιλαμβάνει μια γραμμική ηλεκτρική αντίσταση με τιμή $R = d / (\lambda * A)$ (K/W).

Το ηλεκτρικό ρεύμα I που διαρρέει τη γραμμική αντίσταση εκφράζει τη θερμική ροή δια μέσου του υλικού μέσου και η διαφορά δυναμικού στα άκρα της οποίας συνδέεται μια πηγή τάσης με τιμή ΔV περιγράφει τη θερμοκρασιακή διαφορά. Η μελέτη προβλημάτων που ενέχουν αποκλειστικά μηχανισμό μετάδοσης της θερμότητας με αγωγή απαιτεί την εφαρμογή της γραμμικής ανάλυσης. Δηλαδή, η σχέση μεταξύ του ρεύματος και της διαφοράς δυναμικού (τάση), στον κλάδο του γραμμικού κυκλώματος (γραμμική αντίσταση), υπακούει στο νόμο του *Ohm*.



Σχήμα 12.1. Προσομοίωση του μηχανισμού της αγωγής με γραμμική αντίσταση R ανάλογο ηλεκτρικού κυκλώματος.

12.3. Προσομοίωση συναγωγής

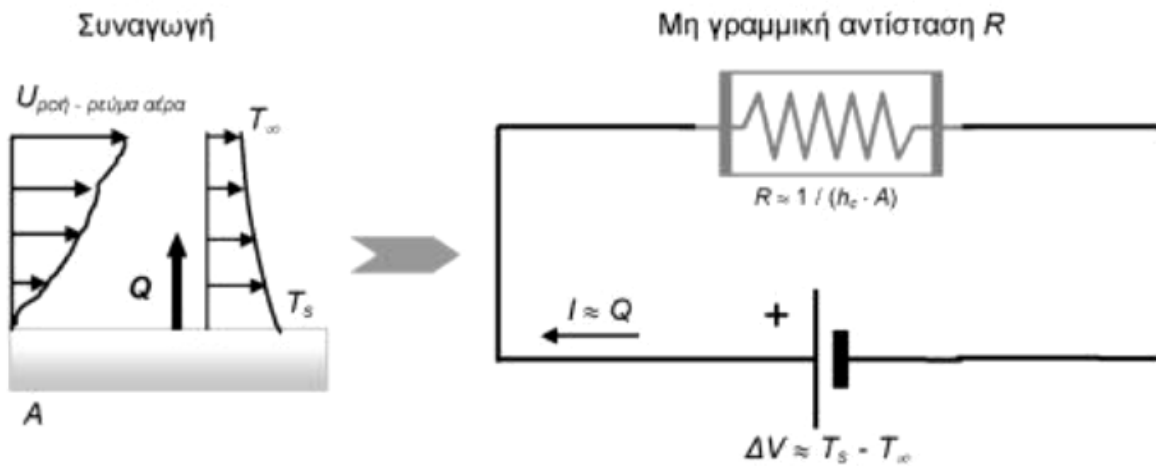
Η τιμή της μη γραμμικής θερμικής αντίστασης R προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$R = 1 / (h_c * A) \quad (12.3.1)$$

Έτσι, η ροή θερμότητας Q (W) που αντιστοιχεί σε θερμοκρασιακή κλίση $\Delta T = T_s - T_{\infty}$, ($^{\circ}\text{C}$) μπορεί να υπολογιστεί και να μοντελοποιηθεί με το ηλεκτρικό κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 12.2 και περιλαμβάνει μια μη γραμμική ηλεκτρική αντίσταση με τιμή $R = 1 / (h_c * A)$ (K/W).

Το ηλεκτρικό ρεύμα I που διαρρέει τη μη γραμμική αντίσταση εκφράζει τη θερμική ροή δια μέσου της λεπτής στρώσης αέρα (ανάμεσα στην επιφάνεια και στο κινούμενο ρευστό σε επαφή με την επιφάνεια) και η διαφορά δυναμικού στα άκρα της οποίας συνδέεται μια πηγή τάσης με τιμή ΔV περιγράφει τη θερμοκρασιακή διαφορά. Εξυπακούεται ότι η επίλυση προβλημάτων που ενέχουν συναγωγή απαιτεί τη χρησιμοποίηση μη γραμμικής ανάλυσης. Οι σχέσεις μεταξύ του ρεύματος και των

τάσεων, στο βρόχο του μη γραμμικού κυκλώματος (μη γραμμική αντίσταση), δεν υπακούουν στο νόμο του *Ohm* .



Σχήμα 12.2 Προσομοίωση του μηχανισμού της συναγωγής με μη γραμμική αντίσταση R ανάλογου ηλεκτρικού κυκλώματος.

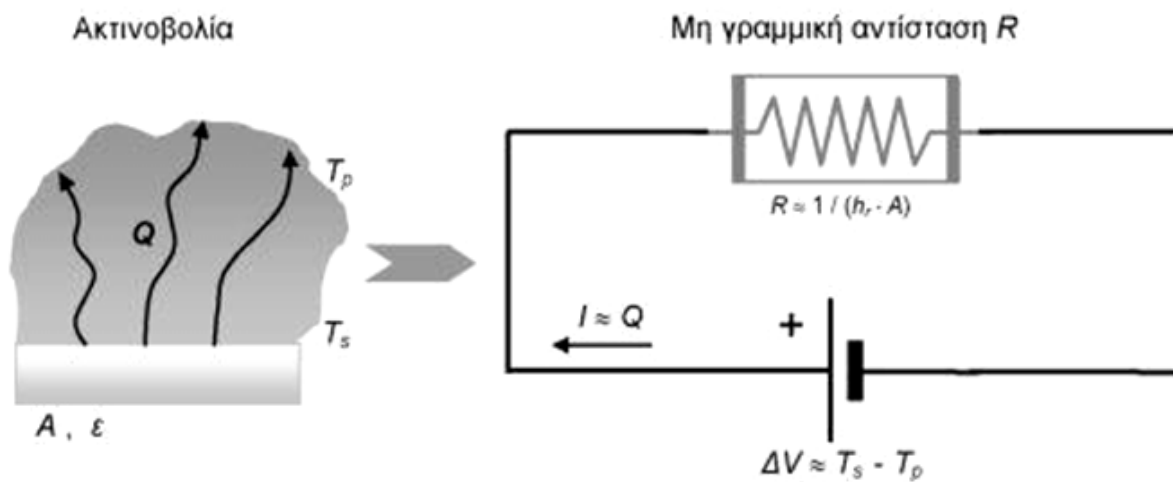
12.4 Προσομοίωση ακτινοβολίας

Η τιμή της μη γραμμικής θερμικής αντίστασης R προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$R = 1 / (h_c \cdot A) \quad (12.4.1)$$

Έτσι, η ροή θερμότητας Q (W) που αντιστοιχεί σε θερμοκρασιακή κλίση $\Delta T = T_s - T_p$ ($^{\circ}\text{C}$) μπορεί να υπολογιστεί και να μοντελοποιηθεί με το ηλεκτρικό κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 12.3 και περιλαμβάνει μια μη γραμμική ηλεκτρική αντίσταση με $R = 1 / (h_c \cdot A)$ (K/W)

Το ηλεκτρικό ρεύμα I που διαρρέει τη μη γραμμική αντίσταση εκφράζει τη θερμική ροή δια μέσου ενός σώματος με ένα άλλο (μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων) και η διαφορά δυναμικού στα άκρα της οποίας συνδέεται μια πηγή τάσης με τιμή Δv περιγράφει τη θερμοκρασιακή διαφορά. Εξυπακούεται ότι η επίλυση προβλημάτων που ενέχουν ακτινοβολία απαιτεί τη χρησιμοποίηση μη γραμμικής ανάλυσης. Οι σχέσεις μεταξύ του ρεύματος και των τάσεων, στο βρόχο του μη γραμμικού κυκλώματος (μη γραμμική αντίσταση), δεν υπακούουν στο νόμο του *Ohm*.



Σχήμα 12.3 Προσομοίωση του μηχανισμού της ακτινοβολίας με μη γραμμική αντίσταση A ανάλογου ηλεκτρικού κυκλώματος.

Κεφάλαιο 13

Τεχνητή νοημοσύνη [31,32]

Ο όρος τεχνητή νοημοσύνη (*Artificial Intelligence*) αναφέρεται στον κλάδο της επιστήμης υπολογιστών ο οποίος ασχολείται με τη σχεδίαση και την υλοποίηση υπολογιστικών συστημάτων που μιμούνται στοιχεία της ανθρώπινης συμπεριφοράς τα οποία υπονοούν έστω και στοιχειώδη ευφυΐα: μάθηση, προσαρμοστικότητα, εξαγωγή συμπερασμάτων, κατανόηση από συμφραζόμενα, επίλυση προβλημάτων κλπ. Ο Τζον Μακάρθι όρισε τον τομέα αυτόν ως «επιστήμη και μεθοδολογία της δημιουργίας νοούντων μηχανών».

Η ΤΝ αποτελεί σημείο τομής μεταξύ πολλών πεδίων όπως της επιστήμης υπολογιστών, της ψυχολογίας, της φιλοσοφίας, της νευρολογίας, της γλωσσολογίας και της επιστήμης μηχανικών, με στόχο τη σύνθεση ευφυούς συμπεριφοράς, με στοιχεία συλλογιστικής, μάθησης και προσαρμογής στο περιβάλλον, ενώ συνήθως εφαρμόζεται σε μηχανές ή υπολογιστές ειδικής κατασκευής. Διαιρείται στη συμβολική τεχνητή νοημοσύνη, η οποία επιχειρεί να εξομοιώσει την ανθρώπινη νοημοσύνη *αλγοριθμικά* χρησιμοποιώντας σύμβολα και λογικούς κανόνες *υψηλού επιπέδου*, και στην υποσυμβολική τεχνητή νοημοσύνη, η οποία προσπαθεί να αναπαράγει την ανθρώπινη ευφυΐα χρησιμοποιώντας *στοιχειώδη αριθμητικά μοντέλα* που συνθέτουν επαγωγικά νοήμονες συμπεριφορές με τη διαδοχική αυτό-οργάνωση απλούστερων δομικών συστατικών («συμπεριφορική τεχνητή νοημοσύνη»), προσομοιώνουν πραγματικές βιολογικές διαδικασίες όπως η εξέλιξη των ειδών και η λειτουργία του εγκεφάλου («υπολογιστική νοημοσύνη»), ή αποτελούν εφαρμογή στατιστικών μεθοδολογιών σε προβλήματα ΤΝ.

Η διάκριση σε συμβολικές και υποσυμβολικές προσεγγίσεις αφορά τον χαρακτήρα των χρησιμοποιούμενων εργαλείων, ενώ δεν είναι σπάνια η σύζευξη πολλαπλών προσεγγίσεων (διαφορετικών συμβολικών, υποσυμβολικών, ή ακόμα συμβολικών και υποσυμβολικών μεθόδων) κατά την προσπάθεια αντιμετώπισης ενός προβλήματος. Με βάση τον επιθυμητό επιστημονικό στόχο η ΤΝ κατηγοριοποιείται σε άλλου τύπου ευρείς τομείς, όπως επίλυση προβλημάτων, μηχανική μάθηση, ανακάλυψη γνώσης, συστήματα γνώσης κλπ. Επίσης υπάρχει επικάλυψη με συναφή επιστημονικά πεδία όπως η μηχανική όραση, η επεξεργασία φυσικής γλώσσας, η ρομποτική κλπ.

Η λογοτεχνία και ο κινηματογράφος επιστημονικής φαντασίας από τη δεκαετία του 1920 μέχρι σήμερα έχουν δώσει στο ευρύ κοινό την αίσθηση ότι η ΤΝ αφορά την προσπάθεια κατασκευής μηχανικών ανδροειδών ή αυτοσυνείδητων προγραμματιών υπολογιστή (*ισχυρή ΤΝ*), επηρεάζοντας μάλιστα ακόμα και τους πρώτους ερευνητές του τομέα. Στην πραγματικότητα οι περισσότεροι επιστήμονες της τεχνητής νοημοσύνης προσπαθούν να κατασκευάσουν λογισμικό ή πλήρεις μηχανές οι οποίες να επιλύουν με αποδεκτά αποτελέσματα ρεαλιστικά υπολογιστικά προβλήματα οποιουδήποτε τύπου (*ασθενής ΤΝ*), αν και πολλοί πιστεύουν ότι η εξομοίωση ή η προσομοίωση της πραγματικής ευφυΐας, η ισχυρή ΤΝ, πρέπει να είναι ο τελικός στόχος.

Η συμβατική τεχνητή νοημοσύνη εμπλέκει μεθόδους μηχανικής μάθησης (machine learning), που χαρακτηρίζονται από αυστηρούς μαθηματικούς αλγόριθμους και στατιστικές μεθόδους ανάλυσης. Διακρίνεται σε:

Έμπειρα ή Εξειδικευμένα συστήματα (Expert systems). Εφαρμόζουν προγραμματισμένες ρουτίνες λογικής, σχεδιασμένες αποκλειστικά για μία συγκεκριμένη εργασία, προκειμένου να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα. Για το σκοπό αυτό, διεξάγεται επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων γνωστών πληροφοριών.

Λογική κατά περίπτωση (Case based reasoning). Η επίλυση ενός προβλήματος βασίζεται στην προηγούμενη επίλυση παρόμοιων προβλημάτων.

Μπαϋεσιανά δίκτυα (Bayesian networks). Βασίζονται στη στατιστική ανάλυση για τη λήψη αποφάσεων.

Συμπεριφορική τεχνητή νοημοσύνη (Behavior based AI). Μέθοδος τεμαχισμού της λογικής διαδικασίας και στη συνέχεια χειροκίνητης οικοδόμησης του αποτελέσματος.

Η υπολογιστική τεχνητή νοημοσύνη βασίζεται στη μάθηση μέσω επαναληπτικών διαδικασιών (ρύθμιση παραμέτρων). Η μάθηση βασίζεται σε εμπειρικά δεδομένα και σε μη-συμβολικές μεθόδους. Διακρίνεται σε:

Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial neural networks) με πολύ ισχυρές δυνατότητες αναγνώρισης προτύπων (pattern recognition). Προσομοιάζουν τη λειτουργία των νευρώνων των έμβιων όντων.

Συστήματα Ασαφούς λογικής (Fuzzy logic systems). Αποτελούν τεχνικές λήψης απόφασης κάτω από αβεβαιότητα. Βασίζονται στην ύπαρξη μη-αυστηρά διαχωρισμένων καταστάσεων, των οποίων η βαρύτητα λαμβάνεται υπόψη κατά περίπτωση. Υπάρχουν ήδη πολλές εφαρμογές των τεχνικών αυτών.

Εξελικτική υπολογιστική (Evolutionary computation). Η ανάπτυξή τους προέκυψε από τη μελέτη των έμβιων οργανισμών και αφορούν σε έννοιες όπως του πληθυσμού, της μετάλλαξης και της φυσικής επιλογής (επιβίωση του πιο προσαρμοσμένου) για την ακριβέστερη επίλυση ενός προβλήματος. Οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να διακριθούν περαιτέρω σε εξελικτικούς αλγόριθμους (evolutionary algorithms) και σε νοημοσύνης σμήνους (swarm intelligence), όπως πχ οι αλγόριθμοι που προσομοιάζουν τη συμπεριφορά μίας κοινωνίας μυρμηγκιών.

Κεφάλαιο 14

Ασαφής λογική (Fuzzy logic) [33,34]

Η θεωρία της ασαφούς λογικής (fuzzy logic) διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον καθηγητή L.A. Zadeh το 1965. Δέκα χρόνια αργότερα άρχισε να προκαλεί το ενδιαφέρον των επιστημόνων και σταδιακά αναγνωρίστηκε ευρέως από την επιστημονική κοινότητα, έχοντας ως κύρια εφαρμογή τον έλεγχο συστημάτων. Οι κύριοι λόγοι που συνέβαλαν στην αποδοχή των ασαφών συστημάτων ελέγχου σχετίζονταν με την ευκολία του σχεδιασμού τους και την απλότητα τους, καθώς και με την ιδιότητα τους να ελέγχουν πολύπλοκες και συνεχώς μεταβαλλόμενες διαδικασίες.

Η βασική διαφορά των ασαφών μοντέλων από τα κλασικά εντοπίζεται στις πληροφορίες που επεξεργάζονται. Τα κλασικά μοντέλα αποφεύγουν να χρησιμοποιούν ακαθόριστες, ανακριβείς και αβέβαιες πληροφορίες, καθώς κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε λήψη εσφαλμένων αποφάσεων. Αντίθετα, τα ασαφή μοντέλα, τα οποία δεν απαιτούν ακριβή αριθμητικά δεδομένα των μεταβλητών ελέγχου και των παραμέτρων του συστήματος, μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτού του είδους τις πληροφορίες. Οι ελεγκτές που είναι σχεδιασμένοι με βάση την ασαφή λογική έχουν την έμφυτη ιδιότητα να χειρίζονται ασαφή στοιχεία και στοιχεία με θόρυβο. Βασίζονται στην ανθρώπινη ικανότητα να αντιλαμβάνεται την συμπεριφορά του συστήματος με ποιοτικούς κανόνες. Μέσω ενός συνόλου απλών *λεκτικών κανόνων* (*linguistic rules*), η ασαφής λογική μπορεί να μοντελοποιήσει τη γνώση και την εμπειρία ενός πεπειραμένου χρήστη. Έτσι διαμορφώνεται ένα *σύστημα βασισμένο στη γνώση* (*knowledge based system*) το οποίο οδηγεί σε απλούστερα μοντέλα που είναι πιο εύχρηστα και πιο κοντά στη ανθρώπινη λογική. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εφικτός ο έλεγχος συστημάτων ακόμα και σε συνθήκες λειτουργίας στις οποίες οι κλασικές μέθοδοι ελέγχου αποτυγχάνουν.

Σύστημα fuzzy control για θερμική και οπτική άνεση στα κτίρια.

Ενέργεια ρέει συνεχώς μέσα από τα κτίρια και το κέλυφος του κτιρίου παίζει το ρόλο της διεπαφής ανάμεσα στο εσωτερικό και στο εξωτερικό διάστημα. Οι ιδιότητες του κελύφους ενός κτιρίου, ιδιαίτερα των διαφανών τμημάτων του, έχουν σημαντική επιρροή στην αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των δύο χώρων [1]. Η ηλιακή ακτινοβολία και η εξωτερική θερμοκρασία είναι απαραίτητοι παράγοντες που επηρεάζουν τις οπτικές και θερμικές συνθήκες ενός κτιρίου μέσω θερμικών κερδών / ζημιών και του εισερχόμενου φωτός. Ο στόχος κατασκευής ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων επιτυγχάνεται με την αποτελεσματική χρήση των φυσικών ενεργειακών πόρων, στην περίπτωση μας την θερμότητα και το φως. Λόγω του γεγονότος ότι το ποσό της διαθέσιμης ενέργειας ποικίλλει ανάλογα την ώρα, το κέλυφος του κτιρίου απαιτεί κάποιου είδους ρύθμιση η οποία πρέπει να εκτελείται αυτόματα και να είναι κατάλληλα ρυθμισμένη προκειμένου να δίνει καλά αποτελέσματα. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας επιτρέπει την αυτόματη ενεργό απόκριση του κελύφους του κτιρίου στις ευμετάβλητες εξωτερικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα είναι η αύξηση της θετικής συνεισφοράς της ηλιακής ακτινοβολίας (θερμότητα, φως) σε ένα κτίριο.

Η πρόοδος στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης έχει δείξει ότι η χρήση των "έξυπνων τεχνικών" για την αυτοματοποίηση του κελύφους ενός κτιρίου μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και μπορεί επίσης να διατηρήσει εσωτερικές συνθήκες διαβίωσης σε βέλτιστο επίπεδο. Αν και το πεδίο εφαρμογής της τεχνητής νοημοσύνης -αυτοματισμού στα κτίρια είναι ακόμη σε αρχική φάση, πολλές μελέτες που έχουν διενεργηθεί τα τελευταία χρόνια. Στις περισσότερες από αυτές τις μελέτες, το επίκεντρο ήταν στη διαμόρφωση των αλγορίθμων για την καθοδήγηση της εξωτερικών συσκευών σκίασης σύμφωνα με τις απαιτήσεις των χρηστών για εξοικονόμηση ενέργειας και εσωτερική άνεση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ελεγκτές ασαφούς λογικής (fuzzy logic) χρησιμοποιήθηκαν λόγω της ευελιξίας τους. Αυτοί οι ελεγκτές στην βασική αρχιτεκτονική τους αποτελούνται από δύο βρόχους ελέγχου, μια ρύθμιση του φωτισμού και η άλλη της θερμότητας. Η ίδια βασική σύνθεση χρησιμοποιείται και στην συγκεκριμένη εφαρμογή που περιγράφεται στο παρόν έγγραφο. Οι κυριότερες διαφορές μεταξύ των παραδειγμάτων που περιγράφονται στη βιβλιογραφία εμφανίζονται κυρίως στον τρόπο που λειτουργεί ο ελεγκτής όταν οι θερμικές συνθήκες και οι συνθήκες φωτισμού έρχονται σε αντίθεση. Παρατηρούνται δύο βασικές προσεγγίσεις: η μια εναρμονίζει τους βρόχους ελέγχου του φωτισμού και θερμότητας ενώ ο άλλος μόνο εναλλάσσεται μεταξύ τους.

Κεφάλαιο 15

Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

15.1 Εισαγωγή [35,36]

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks) είναι μια σχετικά νέα ιδέα στο χώρο των υπολογιστών η οποία βασίστηκε σε έρευνες μοντελοποίησης της δομής και της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου. Η ιδέα προϋπήρχε από την δεκαετία του '40 αλλά ήταν οι σχετικά πρόσφατες (δεκαετία του '80) εξελίξεις στο λογισμικό και στο υλικό των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών οι οποίες καθιέρωσαν τις αρχές μελέτης και υλοποίησης και, γενικότερα την έρευνα στο χώρο των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.

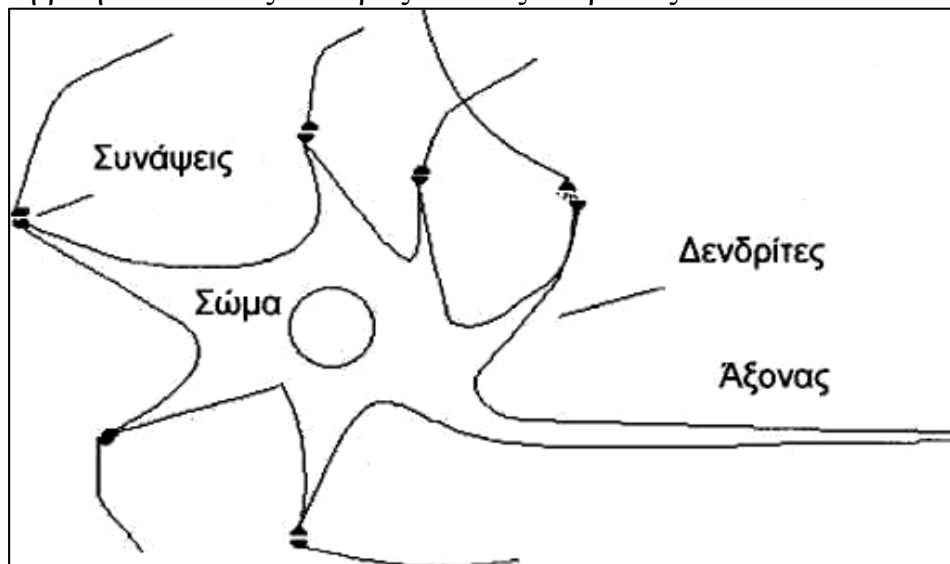
Είναι γνωστό ότι οι συμβατικοί Η/Υ υπερτερούν των ανθρώπων στην ταχύτητα των πράξεων. Από την άλλη μεριά οι Η/Υ εμφανίζονται να είναι ακατάλληλοι για την επεξεργασία δεδομένων τα οποία δεν είναι ακριβή, δεν είναι πλήρη ή έχουν «θόρυβο». Αυτήν την εικόνα κατάφερε να την αλλάξει, εν μέρει, η έρευνα στο χώρο των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, η οποία κατάφερε να πραγματοποιήσει δύσκολες εργασίες, που η πραγματοποίησή τους μέχρι τότε αποτελούσε μοναδικό προνόμιο του ανθρώπου.

Οι συμβατικοί Η/Υ χρειάζονταν μία βήμα-βήμα λύση ενός προβλήματος και τον προγραμματισμό τους με μία σειρά εντολών την οποία πρέπει να ακολουθήσουν για να λύσουν το πρόβλημα. Αντιθέτως, τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα δεν χρειάζονται μία συγκεκριμένη περιγραφή της λύσης του προβλήματος, αλλά ο χρήστης επιτρέπει στο Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο να εκπαιδευτεί και να προσαρμοστεί κατά τη διάρκεια μιας περιόδου εκπαίδευσης.

Η εκπαίδευση συνήθως περιλαμβάνει ένα σύνολο δεδομένων με καθορισμένη δομή, το οποίο αποτελεί το υλικό εκπαίδευσης του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου. Δεδομένου ενός ικανοποιητικού πλήθους δεδομένων το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο μπορεί να μάθει τις βασικές αρχές της λύσης και να χρησιμοποιηθεί αργότερα στην λύση παρόμοιων αλλά νέων προβλημάτων.

15.2. Μοντέλο βιολογικού Νευρώνα [37]

Η ικανότητα του ανθρώπου να σκέφτεται, να θυμάται και να επιλύει προβλήματα εντοπίζεται στον εγκέφαλο του. Όπως είναι γνωστό από τη Βιολογία, η δομική μονάδα του εγκεφάλου είναι ο *νευρώνας*. Ένας τυπικός *βιολογικός νευρώνας* (Σχήμα 15.2.1) αποτελείται από το σώμα που αποτελεί τον πυρήνα του, τους δενδρίτες μέσω των οποίων λαμβάνει σήματα από γειτονικούς νευρώνες (σημεία εισόδου) και τον *άξονα* που είναι η έξοδος του νευρώνα και το μέσο σύνδεσης του με άλλους νευρώνες. Σε κάθε δενδρίτη υπάρχει ένα απειροελάχιστο κενό που ονομάζεται *σύναψη*. Οι *συνάψεις* μέσω χημικών διαδικασιών επιταχύνουν ή επιβραδύνουν τη ροή ηλεκτρικών φορτίων προς το σώμα του νευρώνα. Η ικανότητα μάθησης και μνήμης που παρουσιάζει ο εγκέφαλος οφείλεται στην ικανότητα των συνάψεων να μεταβάλουν την αγωγιμότητα τους. Τα ηλεκτρικά σήματα που εισέρχονται στο σώμα μέσω των δενδριτών συνδυάζονται και αν το αποτέλεσμα ξεπερνά κάποια τιμή κατωφλίου το σήμα διαδίδεται με τη βοήθεια του άξονα προς άλλους νευρώνες .



Σχήμα 15.2.1 Αναπαράσταση βιολογικού νευρώνα.

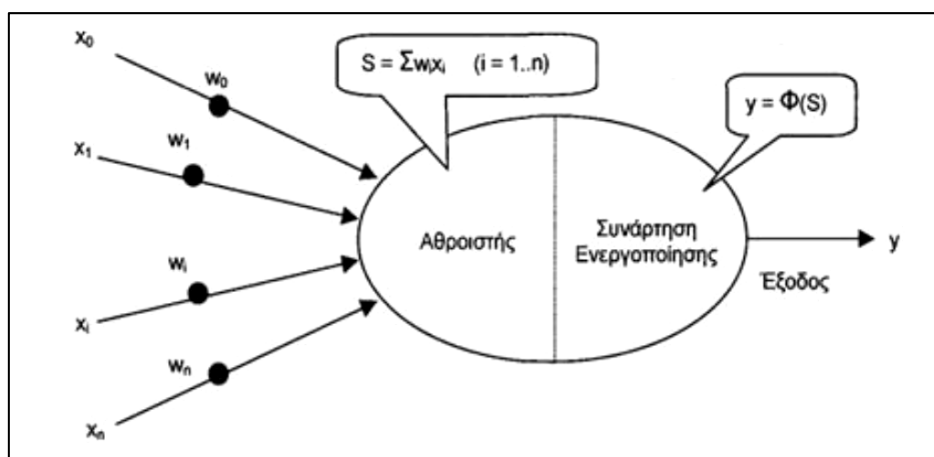
Ο εγκέφαλος ενός νεογέννητου ανθρώπου αποτελείται από 100 δισεκατομμύρια περίπου νευρώνες κάθε ένας από τους οποίους συνδέεται με περίπου 1000 άλλους νευρώνες. Αυτό πραγματοποιείται μέσω του άξονα κάθε νευρώνα στον οποίο καταλήγουν ισάριθμοι δενδρίτες άλλων νευρώνων. Δεδομένου ότι κάθε τέτοια σύνδεση περιλαμβάνει και μία σύναψη, προκύπτει ότι υπάρχουν περίπου 100 τρισεκατομμύρια συνάψεις οι οποίες και επηρεάζουν την λειτουργία του εγκεφάλου. Είναι προφα-

νές ότι κάθε προσπάθεια να αντιγραφεί η δομή και η λειτουργία του εγκεφάλου σε τέτοια κλίμακα είναι αδύνατη. Στην πραγματικότητα, τα μοντέλα τα οποία κατασκευάζονται περιλαμβάνουν μερικές χιλιάδες τεχνητούς νευρώνες, έχουν το πολύ ένα εκατομμύριο τεχνητές συνάψεις και παρουσιάζουν πολύ περιορισμένη λειτουργικότητα.

Αν και ο χρόνος απόκρισης των βιολογικών νευρώνων είναι της τάξης των χιλιοστών του δευτερολέπτου (msec), εντούτοις ο εγκέφαλος είναι σε θέση να λαμβάνει πολύπλοκες αποφάσεις, εκπληκτικά γρήγορα. Κατά μία άποψη, αυτό οφείλεται στο ότι η υπολογιστική ικανότητα του εγκεφάλου και η πληροφορία που περιέχει, είναι διαμοιρασμένα σε όλο του τον όγκο. Πρόκειται δηλαδή για ένα παράλληλο και κατανεμημένο υπολογιστικό σύστημα. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι και το κυριότερο κίνητρο πίσω από την επιθυμία να μοντελοποιηθεί ο ανθρώπινος εγκέφαλος με τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

15.3 Μοντέλο τεχνητού νευρώνα [37]

Ο τεχνητός νευρώνας (artificial neuron) είναι ένα υπολογιστικό μοντέλο τα μέρη του οποίου αντιστοιχίζονται άμεσα με αυτά του βιολογικού νευρώνα. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 15.3.1, ένας τεχνητός νευρώνας δέχεται κάποια σήματα εισόδου $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ τα οποία, σε αντίθεση με τους ηλεκτρικούς παλμούς του εγκεφάλου, αντιστοιχούν σε συνεχείς μεταβλητές. Κάθε σήμα εισόδου μεταβάλλεται από μια τιμή βάρους w_i (weight) ο ρόλος της οποίας είναι αντίστοιχος της σύναψης του βιολογικού εγκεφάλου. Η τιμή βάρους μπορεί να είναι θετική ή αρνητική, σε αντιστοιχία με την επιταχυντική ή επιβραδυντική λειτουργία της σύναψης. Το σώμα του τεχνητού νευρώνα χωρίζεται σε δύο μέρη, τον αθροιστή (sum) ο οποίος προσθέτει τα επηρεασμένα από τα βάρη σήματα εισόδου και παράγει την ποσότητα S , και τη συνάρτηση ενεργοποίησης ή κατωφλίου (activation ή threshold function), ένα μη γραμμικό φίλτρο το οποίο διαμορφώνει την τελική τιμή του σήματος εξόδου y , σε συνάρτηση της ποσότητας S .



Σχήμα 15.3.1 Μοντέλο τεχνητού νευρώνα

Υπάρχουν τρεις τυπικές περιπτώσεις για τη συνάρτηση ενεργοποίησης:

Η βηματική (step) ή κατωφλίου συνάρτηση Σχήμα 15.3.2(α), η οποία δίνει στην έξοδο αποτέλεσμα (συνήθως 1) μόνο αν η τιμή που υπολογίζει ο αθροιστής είναι μεγαλύτερη ή ίση με το μηδέν και εκφράζεται από τη σχέση :

$$\phi(v) = \begin{cases} 1, v \geq 0 \\ 0, v < 0 \end{cases}$$

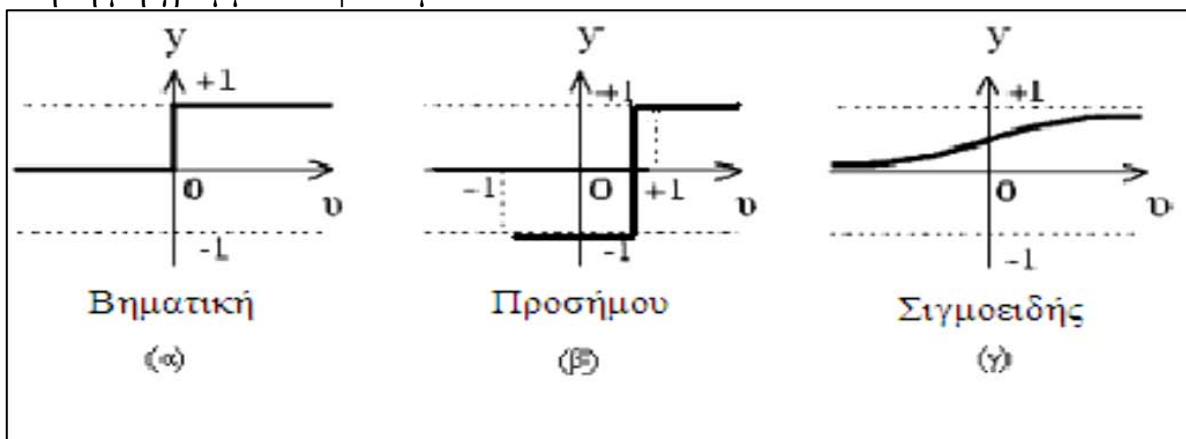
Η συνάρτηση πρόσημου (sign) Σχήμα 15.3.2(β) η οποία δίνει στην έξοδο αρνητική (ή θετική) πληροφορία αν η τιμή που υπολογίζει ο αθροιστής είναι μικρότερη (ή μεγαλύτερη) από μία τιμή κατωφλίου T . Εκφράζεται από τη σχέση:

$$\phi(v) = \begin{cases} 1, v \geq T \\ -1, v < T \end{cases}$$

Η σιγμοειδής (sigmoid) συνάρτηση η οποία εκφράζεται από τη γενική σχέση:

$$\phi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)}$$

όπου a είναι ένας συντελεστής ρύθμισης της ταχύτητας μετάβασης μεταξύ των δύο ασυμπτωτικών τιμών. Η σιγμοειδής συνάρτηση Σχήμα 3.3.2(γ) είναι σημαντική γιατί παρέχει μη γραμμικότητα στο νευρώνα, κάτι που είναι απαραίτητο στη μοντελοποίηση μη γραμμικών φαινομένων.

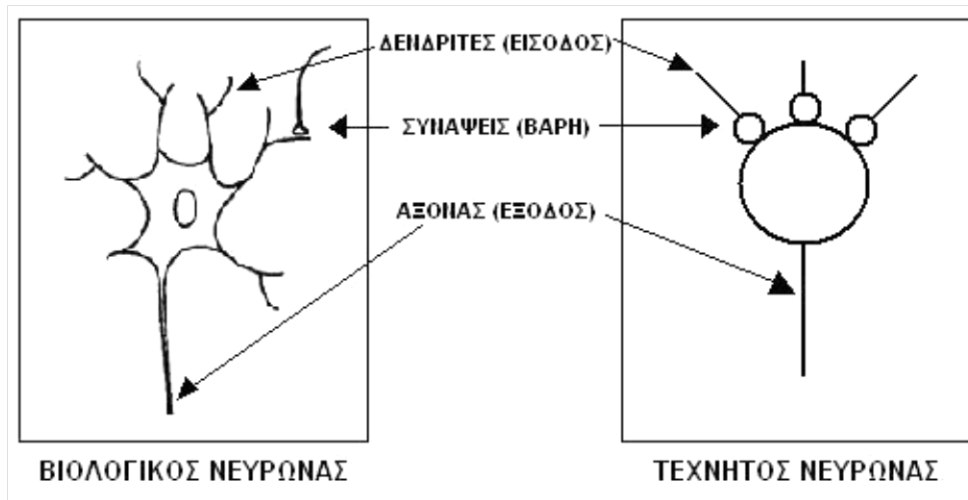


Σχήμα 15.3.2 Γραφικές παραστάσεις συναρτήσεων ενεργοποίησης.

Οι τεχνητοί νευρώνες δίνουν τη δυνατότητα υλοποίησης απλών αλγεβρικών συναρτήσεων, όπως επίσης και λογικών συναρτήσεων AND, OR και NOT. Για παράδειγμα, στην υλοποίηση του NOT χρησιμοποιείται σαν συνάρτηση ενεργοποίησης η βηματική συνάρτηση με κατώφλι T = -0,5. Οι τιμές εισόδου μπορούν να κυμαίνονται από 0 (ψευδές) έως 1 (αληθές). Αν η είσοδος του νευρώνα είναι 0 τότε πολλαπλασιαζόμενη με το βάρος w = -1 δίνει S = 0. Η τιμή αυτή ξεπερνά το κατώφλι του -0.5 οπότε στην έξοδο παράγεται 1. Στην περίπτωση που η τιμή εισόδου είναι 1 τότε S =

1, τιμή που βρίσκεται κάτω του κατωφλίου -0.5 , με αποτέλεσμα να παράγεται στην έξοδο 0.

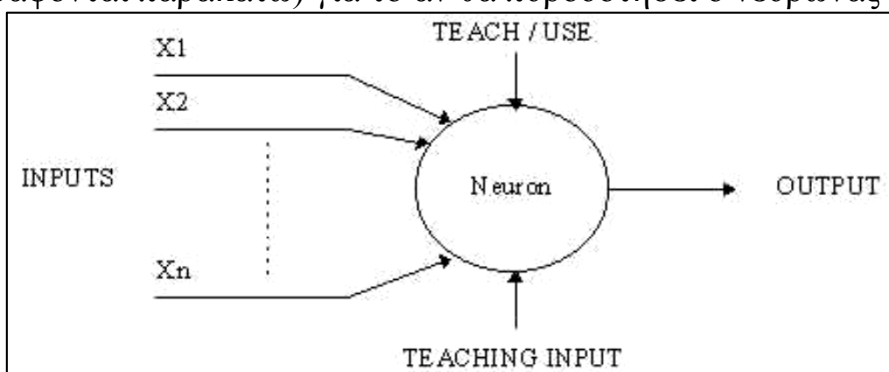
Τέλος, στο σχήμα 15.3.3 μπορούμε να παρατηρήσουμε τις αντιστοιχίες του φυσικού (βιολογικού) με τον τεχνητό νευρώνα βλέποντας την πανομοιότυπη δομή αλλά και λειτουργία τους.



Σχήμα 15.3.3 Αντιστοιχία φυσικού-τεχνητού νευρώνα

15.3.1. Ένας απλός νευρώνας

Ο νευρώνας έχει δύο καταστάσεις λειτουργίας: την κατάσταση εκπαίδευσης και την κατάσταση χρήσης. Στην κατάσταση εκπαίδευσης δίνονται δεδομένα που έχουν την μορφή παραδειγμάτων στον νευρώνα ώστε να εκπαιδευτεί να πυροδοτήσει ή όχι για τις παραπάνω εισόδους. Στην κατάσταση λειτουργίας αφού έχει εκπαιδευτεί το νευρωνικό δίκτυο, όταν έχουμε είσοδο γνωστή στον νευρώνα τότε το νευρωνικό δίκτυο εξάγει σαν έξοδο αυτήν την έξοδο που είχε εκπαιδευτεί να εξάγει από το σύνολο δεδομένων με το οποίο είχε εκπαιδευτεί. Σε περίπτωση όπου η είσοδος δεν είναι γνωστή από την εκπαίδευση χρησιμοποιούνται οι κανόνες πυροδότησης (οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω) για το αν θα πυροδοτήσει ο νευρώνας ή όχι.



Σχήμα 15.3.4 Ένας απλός νευρώνα

15.3.2. Κανόνες πυροδότησης [38]

Ο κανόνας πυροδότησης είναι μεγάλης σημασίας για τα νευρωνικά δίκτυα γιατί εξασφαλίζουν μεγάλη ευελιξία στην λειτουργία του νευρωνικού δικτύου. Με τον κανόνα πυροδότησης καθορίζεται το πως ένας νευρώνας πυροδοτεί για κάθε είσοδο που δέχεται και είναι άγνωστη σε αυτό από την εκπαίδευση που ήδη έχει δεχτεί. Σχετίζεται με όλες τις πιθανές εισόδους και όχι μόνο με αυτές που ο νευρώνας εκπαιδεύτηκε.

Ένας κανόνας πυροδότησης μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας την *τεχνική απόστασης Hamming*. Ο κανόνας είναι ο εξής:

Δεδομένου μίας συλλογής από δεδομένα εκπαίδευσης για έναν κόμβο κάποια από αυτά το πυροδοτούν (όταν η τιμή εξόδου είναι 1) και κάποια από αυτά αναστέλλουν την πυροδότηση (όταν η τιμή εξόδου είναι 0). Στην συνέχεια το δείγμα που δεν περιλαμβάνεται στην παραπάνω συλλογή (βρίσκεται σε απροσδιόριστη κατάσταση) προκαλεί το κόμβο να πυροδοτήσει αν έχει περισσότερα κοινά στοιχεία με το «κοντινότερο» δείγμα εκπαίδευσης με έξοδο 1 ή αναστέλλει την λειτουργία του αν έχει περισσότερα κοινά στοιχεία σε σύγκριση με το «κοντινότερο» δείγμα εκπαίδευσης με έξοδο 0. Αν υπάρχει ισορροπία τότε το δείγμα παραμένει στην ίδια απροσδιόριστη κατάσταση.

Για παράδειγμα, ένας νευρώνας με 3 εισόδους είναι εκπαιδευμένο να δίνει έξοδο 1 όταν οι εισοδοι (X1, X2 και X3) είναι 111 ή 101 και η έξοδος είναι 0 όταν οι εισοδοι είναι 000 ή 001. Έτσι πριν εφαρμοστεί ο κανόνας πυροδότησης ο πίνακας αληθείας είναι:

1	X	0	0	0	0	1	1	1	1
2	X	0	0	1	1	0	0	1	1
3	X	0	1	0	1	0	1	0	1
UT	O	0	0	0/1	0/1	0/1	1	0/1	1

Ας πάρουμε για παράδειγμα τον τρόπο όπου οι κανόνες πυροδότησης θα εφαρμοζόντουσαν για το δείγμα 010. Διαφέρει από το δείγμα 000 σε ένα στοιχείο, από το δείγμα 001 σε 2 στοιχεία, από το δείγμα 101 σε 3 στοιχεία και από το δείγμα 111 σε 2 στοιχεία. Παρόλα αυτά το πιο κοντινό δείγμα με τις λιγότερες διαφοροποιήσεις είναι το 000 που έχει ως έξοδο του 0. Σύμφωνα λοιπόν με τον κανόνα πυροδότησης που περιγράφηκε παραπάνω το δείγμα 010 το οποίο βρισκόταν σε απροσδιόριστη κατάσταση τώρα ορίζεται έτσι ώστε να μην πυροδοτήσει. Από την άλλη πλευρά το δείγμα 011 ισαπέχει και έχει ίδιο αριθμό διαφοροποιήσεων από δύο δείγματα εκπαίδευσης που έχουν διαφορετικές εξόδους και γι' αυτό μένει σε απροσδιόριστη κατάσταση.

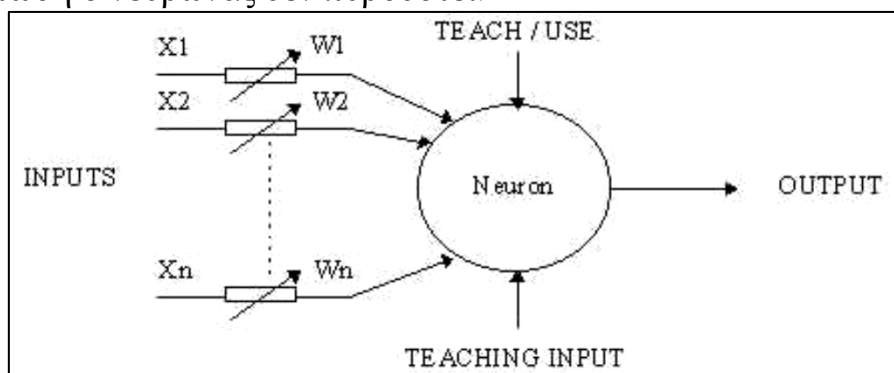
Εφαρμόζοντας σε όλα τα δείγματα του πίνακα τον κανόνα πυροδότησης ο πίνακας που θα προκύψει είναι:

1	X	0	0	0	0	1	1	1	1
2	X	0	0	1	1	0	0	1	1
3	X	0	1	0	1	0	1	0	1
UT	O	0	0	0	0/1	0/1	1	1	1

Οι διαφορές μεταξύ των 2 πινάκων λέγονται *γενικοποίηση του νευρώνα* (generalization of Neuron).

15.3.3. Ένας πιο πολύπλοκος νευρώνας

Το προηγούμενο νευρώνα που περιγράφηκε δεν κάνει κάτι παραπάνω από ότι θα έκανε ένας απλός συμβατικός υπολογιστής. Ένας πιο πολύπλοκος νευρώνας φαίνεται στο σχήμα 15.3.5 παρακάτω και αποτελεί το McCulloch and Pitts μοντέλο (MCP) [28] που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε το 1943 όπως ήδη προαναφέρθηκε στην ιστορική αναδρομή για τα νευρωνικά δίκτυα. Η διαφορά από το προηγούμενο μοντέλο είναι ότι στις εισόδους υπάρχουν και *βάρη* (weights) το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα να επηρεάζεται η έξοδος και από τα βάρη αυτά. Το βάρος μιας εισόδου είναι ένα νούμερο το οποίο μπορεί να αλλάζει κατά την διάρκεια της λειτουργίας του νευρωνικού δικτύου και όταν πολλαπλασιάζεται με την είσοδο τότε μας δίνει την *ζυγισμένη είσοδο* (weighted-input). Στην συνέχεια οι ζυγισμένες εισοδοί προστίθενται και αν υπερβαίνουν μια τιμή *κατωφλιού* (threshold) ο νευρώνας πυροδοτεί. Σε αντίθετη περίπτωση ο νευρώνας δεν πυροδοτεί.



INPUT Σχήμα 15.3.5 Ένας νευρώνας MCP τύπου

Σε μαθηματική έκφραση ο νευρώνας πυροδοτεί, αν και μόνο αν:

$$X_1W_1 + X_2W_2 + X_3W_3 + \dots > T$$

X_1 - X_n : εισοδοί νευρωνικού δικτύου,

W_1 - W_n : τα βάρη για κάθε είσοδο

T: η τιμή του κατωφλιού (threshold)

Το αποτέλεσμα της πρόσθεσης των ζυγισμένων εισόδων και το κατώφλι κάνουν τον νευρώνα πολύ ευέλικτο στην λειτουργία του και στην εξαγωγή αποτελεσμάτων. Οι MCP νευρώνες έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται σε διάφορες καταστάσεις και προβλήματα που τους τίθενται προς λύση αλλάζοντας τα βάρη και την τιμή του κατωφλιού. Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι με σκοπό την εκπαίδευση των νευρώνων ώστε να αντεπεξέρχονται σε διάφορες καταστάσεις και προβλήματα. Οι πιο γνωστοί είναι ο κανόνας του δέλτα (delta-rule) και ο αλγόριθμος της οπισθοδρόμησης διασποράς λαθών (back-error-propagation) και θα περιγραφούν εκτενέστερα σε παρακάτω κεφάλαια. Ο πρώτος χρησιμοποιείται σε νευρωνικά δίκτυα εμπρόσθιας τροφοδοσίας (feed-forward) και ο δεύτερος σε νευρωνικά δίκτυα ανάδρασης (feedback)

15.4 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα [39]

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks) ή πιο απλά ΤΝΔ, είναι συστήματα επεξεργασίας δεδομένων που αποτελούνται από ένα πλήθος τεχνητών νευρώνων οργανωμένων σε δομές παρόμοιες με αυτές του ανθρώπινου εγκεφάλου. Συνήθως οι τεχνητοί νευρώνες είναι οργανωμένοι σε μία σειρά από στρώματα ή επίπεδα (layers). Το πρώτο από αυτά τα επίπεδα ονομάζεται επίπεδο εισόδου (input layer) και χρησιμοποιείται για την εισαγωγή δεδομένων. Τα στοιχεία του δηλαδή δεν είναι ουσιαστικά νευρώνες, γιατί δεν εκτελούν κάποιο υπολογισμό (δεν έχουν βάρη εισόδου ούτε συναρτήσεις ενεργοποίησης). Στη συνέχεια, μπορούν να υπάρχουν, προαιρετικά, ένα ή περισσότερα ενδιάμεσα ή κρυφά επίπεδα (hidden layers). Τέλος ακολουθεί ένα επίπεδο εξόδου (output layer).

Μπορούμε να πούμε αλλιώς ότι ένα νευρωνικό δίκτυο είναι ένας συμπαγής παράλληλος κατανεμημένος επεξεργαστής που έχει τη φυσική κλίση να αποθηκεύει εμπειριστατωμένη γνώση και να την κάνει διαθέσιμη για χρήση. Αλλιώς ένα νευρωνικό δίκτυο είναι ένα ισχυρό εργαλείο διαμόρφωσης στοιχείων που είναι σε θέση να συλλάβει και να αντιπροσωπεύσει τις σύνθετες σχέσεις εισόδου/εξόδου. Το κίνητρο για την ανάπτυξη της τεχνολογίας νευρωνικών δικτύων προήλθε από την επιθυμία να αναπτυχθεί ένα τεχνητό σύστημα που θα μπορούσε να εκτελέσει "ευφυείς" στόχους παρόμοιους με εκείνους που εκτελεί ο ανθρώπινος εγκέφαλος. Τα νευρωνικά δίκτυα παρουσιάζουν κοινά στοιχεία με τον ανθρώπινο εγκέφαλο τα οποία είναι:

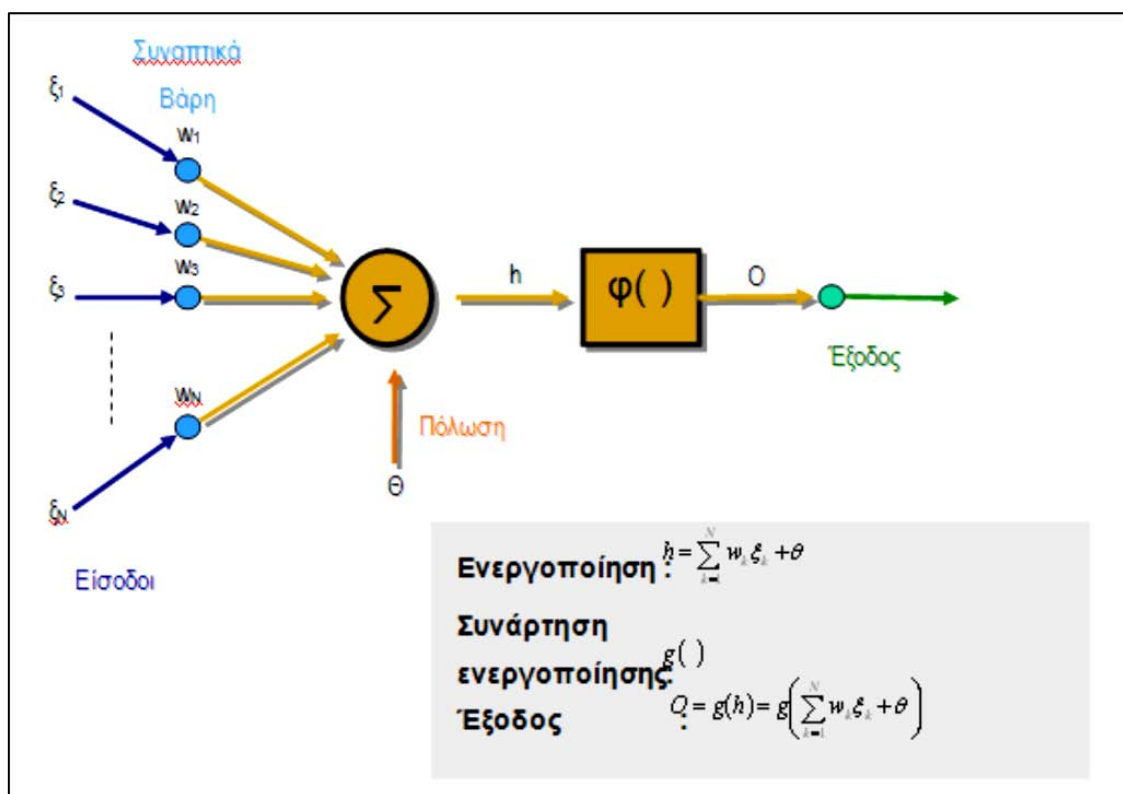
Τα νευρωνικά δίκτυα και ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποκτούν τη γνώση μέσω της εκμάθησης.

Η γνώση ενός νευρωνικού δικτύου αποθηκεύεται μέσα στις δυνάμεις σύνδεσης των νευρώνων γνωστές ως συναπτικά βάρη (w).

Το πιο κοινό νευρωνικό πρότυπο δικτύων είναι το πολυστρωματικό perceptron (MLP-Multi Layer Perceptron). Αυτός ο τύπος νευρωνικού δικτύου είναι γνωστός ως εποπτευμένο δίκτυο επειδή απαιτεί μια επιθυμητή έξοδο προκειμένου να μάθει. Ο στόχος αυτού του τύπου δικτύου είναι να δημιουργηθεί ένα πρότυπο που να χαρτογραφεί σωστά την είσοδο στην έξοδο χρησιμοποιώντας τα ιστορικά στοιχεία έτσι ώσ-

τε το πρότυπο να μπορεί έπειτα να χρησιμοποιηθεί για να παραγάγει την έξοδο όταν αυτή είναι άγνωστη. Ο γενικός τρόπος λειτουργίας του ΤΝΔ φαίνεται στο Σχήμα 15.4.1.

Οι νευρώνες των διαφόρων στρωμάτων μπορεί να είναι πλήρως ή μερικώς συνδεδεμένοι. *Πλήρως συνδεδεμένοι (fully connected)* είναι εκείνοι οι οποίοι συνδέονται με όλους τους νευρώνες του επόμενου επιπέδου. Σε κάθε άλλη περίπτωση οι νευρώνες είναι *μερικώς συνδεδεμένοι (partially connected)*. Όταν δεν υπάρχουν συνδέσεις μεταξύ νευρώνων ενός επιπέδου και νευρώνων προηγούμενου επιπέδου (όταν δηλαδή η ροή πληροφορίας είναι μιας κατεύθυνσης) τα ΤΝΔ χαρακτηρίζονται ως δίκτυα με *απλή τροφοδότηση (feed forward)*. Στην αντίθετη περίπτωση, καθώς και στην περίπτωση συνδέσεων μεταξύ νευρώνων ίδιου επιπέδου, τα ΤΝΔ χαρακτηρίζονται ως δίκτυα με *ανατροφοδότηση (feedback ή recurrent)*.

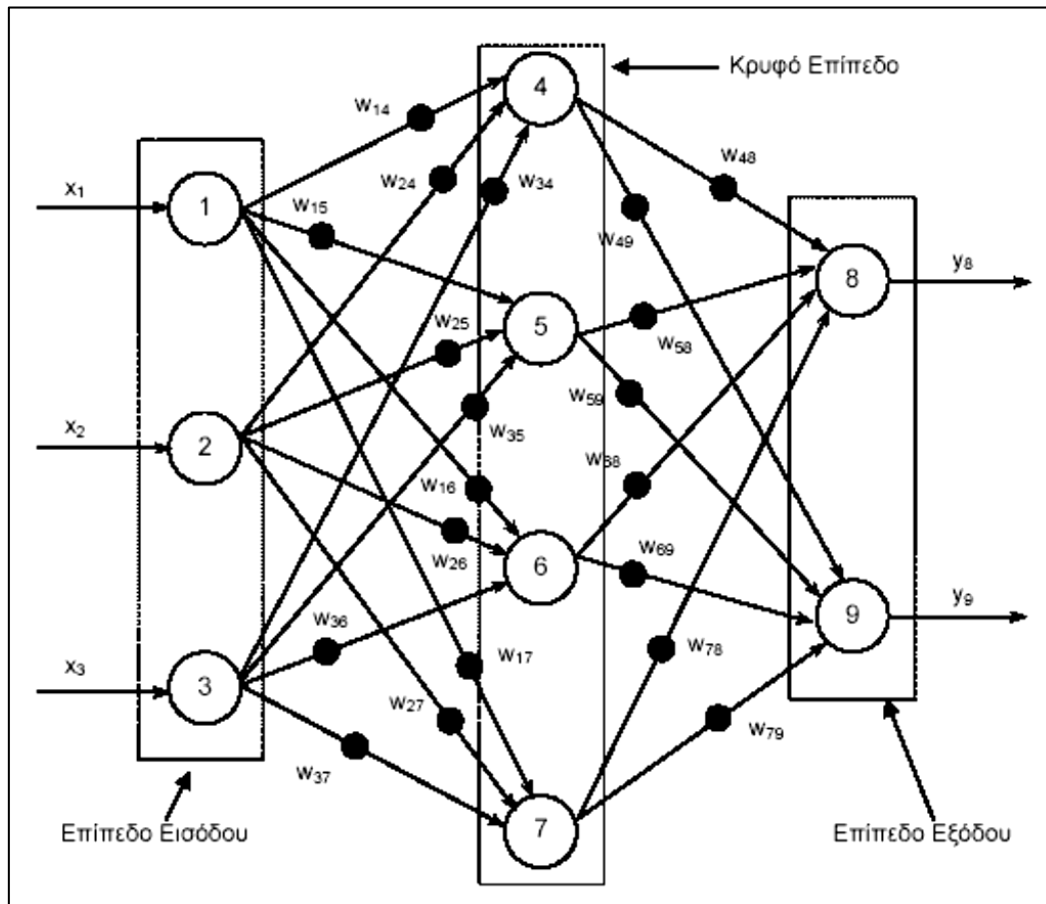


Σχήμα 15.4.1 Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου.

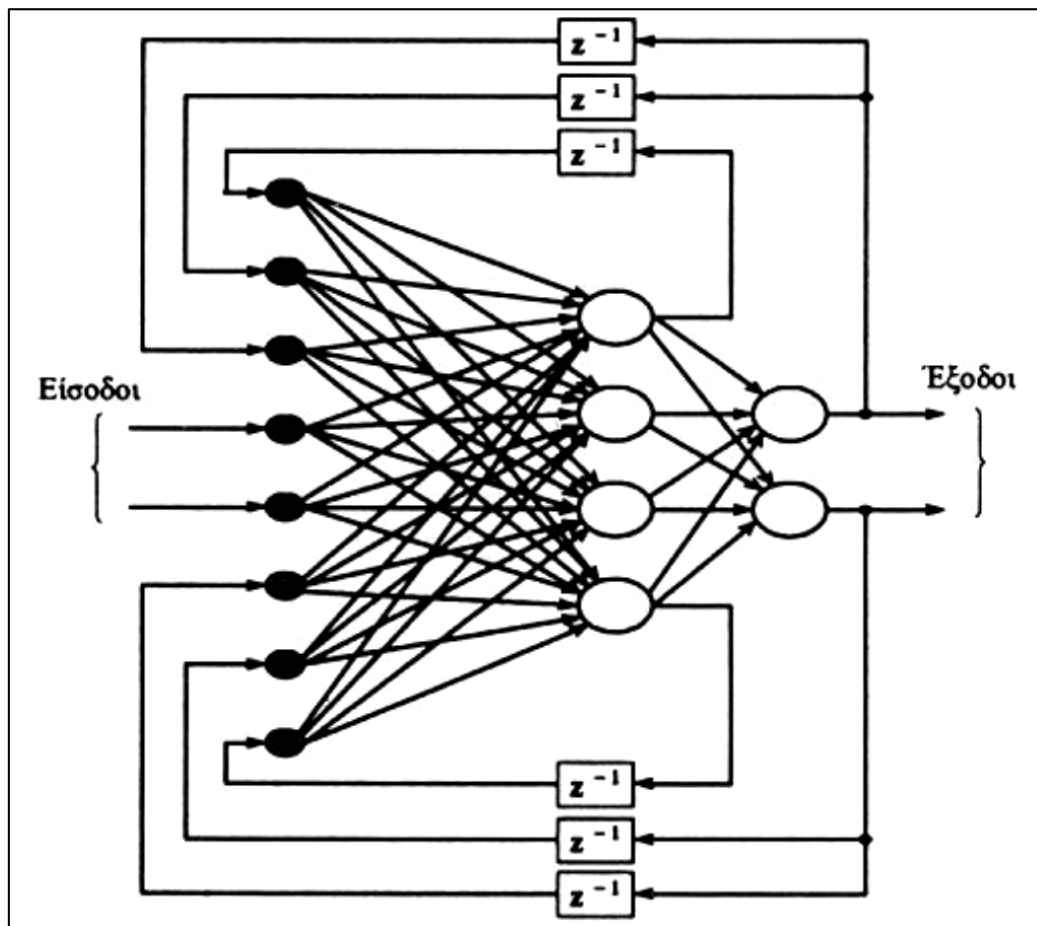
Στο Σχήμα 15.4.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ενός πλήρως διασυνδεδεμένου ΤΝΔ απλής τροφοδότησης. Περιγράφεται στη συνέχεια η συμπεριφορά του νευρώνα 5 κατά τη λειτουργία του δικτύου. Ο νευρώνας 5 δέχεται τρία σήματα εισόδου από τους τρεις νευρώνες (1, 2 και 3) του επιπέδου εισόδου. Τα σήματα αυτά τροποποιούνται από τα βάρη w_{15}, w_{25}, w_{35} και αθροίζονται από τον αθροιστή του νευρώνα 5. Στη συνέχεια, το συνολικό σήμα από τον αθροιστή δέχεται τη δράση της συνάρτησης ενεργοποίησης του νευρώνα 5 και το αποτέλεσμα στέλνεται στους νευρώνες 8 και 9. Η λειτουργία των υπολοίπων νευρώνων είναι παρόμοια. Συνοψίζοντας, το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο στο Σχήμα 15.4.2 δέχεται τα σήματα εισόδου x_1, x_2 και x_3 (διανύσ-

ματα εισόδου) και μετά από εσωτερική επεξεργασία παράγει στην έξοδο τα σήματα y και γ (διανύσματα εξόδου).

Στην περίπτωση νευρωνικών δικτύων με ανατροφοδότηση (Σχήμα 15.4.3), η παραπάνω περιγραφή διαφοροποιείται καθώς ο υπολογισμός των διαφόρων μεγεθών γίνεται σε δύο επαναλαμβανόμενα στάδια. Στο πρώτο στάδιο υπολογίζονται τα μεγέθη που αφορούν συνδέσεις απλής τροφοδότησης και στο δεύτερο γίνονται οι υπολογισμοί για τις συνδέσεις ανατροφοδότησης. Αν και σε ορισμένες περιπτώσεις τα δίκτυα με ανατροφοδότηση είναι πολύ χρήσιμα, στην πλειοψηφία των εφαρμογών νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιούνται δίκτυα απλής τροφοδότησης.



Σχήμα 15.4.2 Πλήρες διασυνδεδεμένο Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο απλής τροφοδότησης.



Σχήμα 15.4.3 Πλήρες διασυνδεδεμένο Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο ανατροφοδότησης

15.5 Σύγκριση Νευρωνικών δικτύων και συμβατών υπολογιστών [40]

Τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούν διαφορετική προσέγγιση σε προβλήματα από τους συμβατούς υπολογιστές. Οι συμβατοί υπολογιστές χρησιμοποιούν αλγοριθμικές προσεγγίσεις με τις οποίες ο υπολογιστής ακολουθεί μια σειρά από εντολές και με το πέρας αυτών λύνει ένα πρόβλημα. Αν τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για την λύση του προβλήματος δεν είναι γνωστά τότε ο υπολογιστής δεν μπορεί να λύσει ο πρόβλημα. Αυτό περιορίζει τους συμβατούς υπολογιστές να λύνουν προβλήματα που ξέρουμε τα βήματα που θα ακολουθηθούν. Αλλά θα ήταν πολύ καλύτερο οι υπολογιστές να μπορούσαν να λύσουν προβλήματα που δεν ξέρουμε τον τρόπο λύσης τους.

Σε αντίθεση τα νευρωνικά δίκτυα κάνουν επεξεργασίες δεδομένων με τον ίδιο τρόπο που γίνονται και στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από μονάδες επεξεργασίας (neurons) ενωμένες μεταξύ τους οι οποίες λειτουργούν παράλληλα με σκοπό την λύση ενός προβλήματος. Τα νευρωνικά δίκτυα μαθαίνουν με παραδείγματα. Δεν μπορούν να προγραμματιστούν για να λύσουν ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Τα παραδείγματα που θα δοθούν στο ANN πρέπει να διαλεχ-

τούν με προσοχή και για να μην χαθεί πολύτιμος χρόνος αλλά και για να μην λειτουργεί το ANN λανθασμένα. Επειδή το ANN βρίσκει μόνο του την λύση για ένα πρόβλημα ο τρόπος λειτουργίας του είναι απρόβλεπτος και αυτό αποτελεί ένα σημαντικό μειονέκτημα.

Από την άλλη πλευρά, οι συμβατικοί υπολογιστές χρησιμοποιούν έναν γνωστικό τρόπο προσέγγισης του προβλήματος προς λύση, και έτσι ο τρόπος με τον οποίο θα λυθεί ένα πρόβλημα πρέπει να είναι γνωστός ώστε να εκφραστεί με εντολές. Αυτές οι εντολές μετατρέπονται σε μια μορφή υψηλού επιπέδου γλώσσας προγραμματισμού και στην συνέχεια σε χαμηλού επιπέδου γλώσσα μηχανής που μπορεί να γίνει κατανοητή από τον υπολογιστή. Αυτές οι μηχανές είναι εντελώς προβλέψιμες. Ότι λάθος και να συμβεί θα είναι καθαρά ή προγραμματιστικό λάθος (software) ή λάθος σχεδίασης και κατασκευής των εξαρτημάτων του υπολογιστή (hardware). Τα νευρωνικά δίκτυα και οι συμβατοί υπολογιστές δεν είναι ανταγωνιστικοί μεταξύ τους αλλά το ένα συμπληρώνει το άλλο. Υπάρχουν προβλήματα που μπορούν να λυθούν από αλγοριθμικούς υπολογιστές και όχι από ANN αλλά ισχύει και το αντίθετο. Υπάρχουν και οι περιπτώσεις όπου για να επιτευχθεί μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα χρησιμοποιούνται και οι δύο προσεγγίσεις (χρήση υπολογιστών για το τρέξιμο προγραμμάτων που είναι υπεύθυνα για την λειτουργία ANN, δηλαδή επίβλεψη του νευρωνικού δικτύου από τον υπολογιστή).

15.6 Βασικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα νευρωνικών δικτύων [37,41]

Υπάρχουν τέσσερα χαρακτηριστικά που είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ). Αυτά είναι:

- Η ικανότητα τους να μαθαίνουν μέσω παραδειγμάτων (learn by example).
- Η δυνατότητα θεώρησης τους ως κατανεμημένη μνήμη (distributed memory) και ως μνήμη συσχέτισης (associative memory).
- Η μεγάλη τους ανοχή σε σφάλματα (fault-tolerant).
- Η ικανότητα τους για αναγνώριση προτύπων (pattern recognition).

Αν και τα ΤΝΔ δεν είναι τα μόνα συστήματα με ικανότητα μάθησης μέσω παραδειγμάτων, εντούτοις διακρίνονται για την ικανότητα τους να οργανώνουν την πληροφορία των δεδομένων εισόδου σε χρήσιμες μορφές. Αυτές οι μορφές αποτελούν στην ουσία ένα μοντέλο που αναπαριστά τη σχέση που ισχύει μεταξύ των δεδομένων εισόδου και εξόδου .

Ο χαρακτηρισμός των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ) ως κατανεμημένη μνήμη, πηγάζει από το ότι η πληροφορία που κωδικοποιούν είναι κατανεμημένη σε όλα τα βάρη της συνδεσμολογίας τους. Για τον ίδιο λόγο τα ΤΝΔ χαρακτηρίζονται και ως μνήμες συσχέτισης. Μια μνήμη συσχέτισης αποθηκεύει πληροφορία συσχετίζοντας αποθηκευμένα δεδομένα μεταξύ τους. Η ανάκληση (recall) της πληροφορίας γίνεται με βάση το περιεχόμενο και όχι τη διεύθυνση, όπως δηλαδή συμβαίνει και με τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Η παραπάνω οργάνωση κάνει ορισμένα είδη ΤΝΔ να είναι πολύ ανεκτικά σε μικροαλλαγές στα σήματα εισόδου, δηλαδή να είναι

σε θέση να παράγουν την σωστή έξοδο ακόμη κι αν τα δεδομένα εισόδου είναι λίγο διαφορετικά ή και ελλιπή.

Τα ΤΝΔ έχουν μεγάλη ανοχή σε δομικά σφάλματα. Αυτό σημαίνει ότι η κακή λειτουργία ή η καταστροφή ενός νευρώνα ή κάποιων συνδέσεων δεν είναι ικανή να διαταράξει σημαντικά την λειτουργία τους καθώς, όπως αναφέρθηκε, η πληροφορία που εσωκλείουν δεν είναι εντοπισμένη σε συγκεκριμένο σημείο αλλά διάχυτη σε όλο το δίκτυο. Γενικά, το μέγεθος του σφάλματος λόγω "δομικών αστοχιών" είναι ανάλογο του ποσοστού των κατεστραμμένων συνδέσεων. Αυτό κάνει τα ΤΝΔ και συγκεκριμένα τις υλοποιήσεις τους σε κύκλωμα, ιδανικά για χρήση σε αυτοματισμούς που θα λειτουργήσουν σε αντίξοες συνθήκες (π.χ. διάστημα, χώρους με ραδιενέργεια, πεδίο μάχης, κλπ).

Τέλος, τα ΤΝΔ έχουν εξαιρετική ικανότητα αναγνώρισης προτύπων καθώς δεν επηρεάζονται από ελλιπή ή/και με θόρυβο δεδομένα. Από τη στιγμή που ένα ΤΝΔ εκπαιδευτεί στο να αναγνωρίζει συνθήκες και καταστάσεις, απαιτείται ένας μόνο κύκλος λειτουργίας τους για να προσδιορίσουν μία συγκεκριμένη κατάσταση .

Άλλα πλεονεκτήματα των Νευρωνικών Δικτύων είναι ότι παρέχουν τις εξής χρήσιμες ιδιότητες :

- Μη-γραμμικότητα. Αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι ένα Νευρωνικό Δίκτυο δομείται από τη σύνδεση νευρώνων, οι οποίοι είναι μη-γραμμικές συσκευές. Η μη-γραμμικότητα είναι πολύ σημαντική ιδιότητα, ιδιαίτερα αν ο φυσικός μηχανισμός για την παραγωγή των σημάτων εισόδου είναι μη-γραμμικός.
- Σχεδιασμό Εισόδου-Εξόδου. Ένα συνηθισμένο παράδειγμα μάθησης που καλείται επιβλεπόμενη μάθηση, εμπλέκει μεταβολή των συναπτικών βαρών του Νευρωνικού Δικτύου, εφαρμόζοντας ένα σύνολο δειγμάτων εξάσκησης ή παραδείγματα έργων. Κάθε παράδειγμα αποτελείται από ένα μοναδικό σήμα εισόδου και την επιθυμητή απόκριση (έξοδο). Η εξάσκηση του δικτύου επαναλαμβάνεται για πολλά παραδείγματα, μέχρι το δίκτυο να φτάσει σε μια σταθερή κατάσταση, όπου πλέον δεν γίνονται αλλαγές στα βάρη. Έτσι το δίκτυο μαθαίνει από τα παραδείγματα, κατασκευάζοντας ένα σχεδιασμό εισόδου-εξόδου για το δεδομένο πρόβλημα.
- Προσαρμοστικότητα. Τα Νευρωνικά Δίκτυα έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν τα βάρη τους στις αλλαγές του περιβάλλοντός τους. Μερικές φορές οι προσαρμογές οδηγούν σε μείωση της απόδοσης του συστήματος, γι' αυτό θα πρέπει να είναι επαρκείς.
- Αποδεικτική Απόκριση. Ένα Νευρωνικό Δίκτυο σχεδιάζεται για να παρέχει πληροφορίες όχι μόνο για το συγκεκριμένο υπόδειγμα που επιλέγεται αλλά και για την εμπιστοσύνη στην απόφαση που παίρνεται. Αυτό βελτιώνει την απόδοση του συστήματος.
- Συναφής Πληροφορία. Η γνώση αναπαριστάνεται από την πολύ δομημένη και ενεργή κατάσταση του Νευρωνικού Δικτύου.
- Αντοχή σε σφάλματα. Ένα νευρωνικό δίκτυο, υλοποιημένο σε hardware φόρμα έχει τη σημαντική ιδιότητα να είναι "ανεκτικό σε σφάλματα" (fault tolerance), με την έννοια ότι η απόδοσή του δεν μειώνεται κάτω από αντίξοες λειτουργικές συνθήκες.

- Υλοποιησιμότητα σε VLSI. Η συμπαγής παράλληλη φύση του Νευρωνικού Δικτύου, κάνει δυνατή την υλοποίηση του σε VLSI τεχνολογία, έτσι ώστε τα νευρωνικά δίκτυα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου.
- Ομοιομορφία Ανάλυσης και Σχεδιασμού. Η έννοια είναι ότι ο ίδιος συμβολισμός χρησιμοποιείται σε όλα τα πεδία που περιέχουν εφαρμογή των νευρωνικών δικτύων. Αυτό το χαρακτηριστικό υποδηλώνεται με διαφορετικούς τρόπους. Οι νευρώνες παριστάνουν ένα συστατικό συνηθισμένο σε όλα τα νευρωνικά δίκτυα. Αυτή η συνήθεια κάνει δυνατό το διαμοιρασμό θεωριών και αλγορίθμων εκμάθησης σε διαφορετικές εφαρμογές των νευρωνικών δικτύων. Επίσης ρυθμιστικά δίκτυα μπορούν να κατασκευαστούν μέσω μιας αμιγούς ολοκλήρωσης από modules.
- Αναλογία με Νευροβιολογία. Ο σχεδιασμός νευρωνικών δικτύων γίνεται σε αναλογία με τον εγκέφαλο. Οι νευροβιολόγοι βλέπουν τα νευρωνικά δίκτυα σαν αντικείμενο έρευνας για την εξήγηση νευροβιολογικών φαινομένων. Ομοίως οι μηχανικοί αντλούν από τη νευροβιολογία νέες ιδέες για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων.

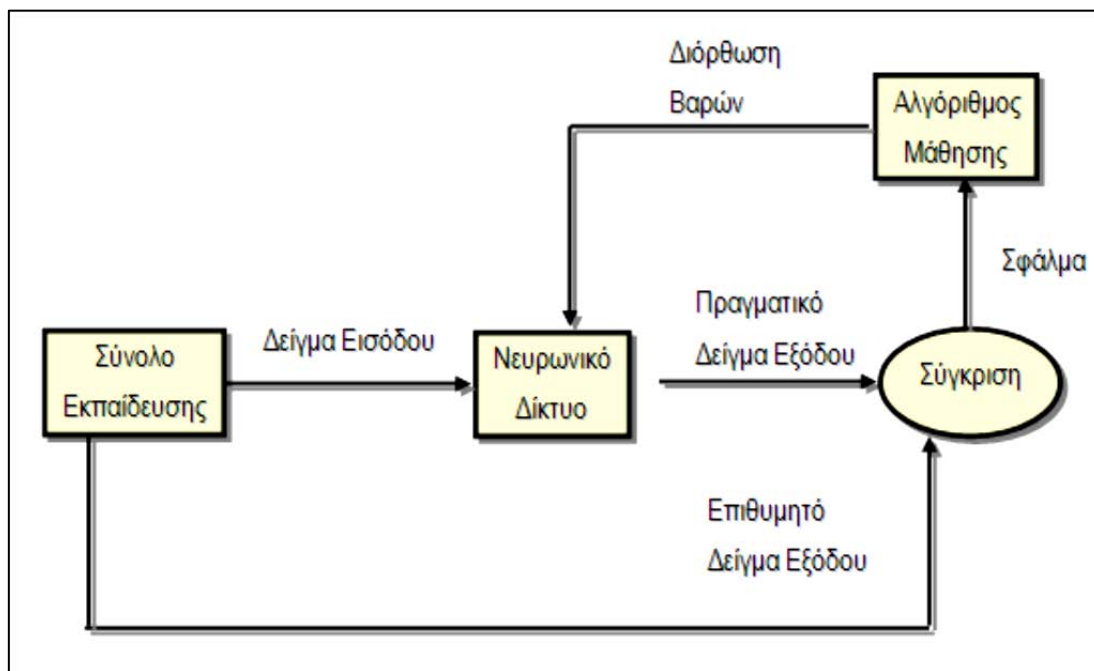
15.7 Μάθηση και ανάκληση [42]

Τα ΤΝΔ πραγματοποιούν δύο βασικές λειτουργίες: τη μάθηση (learning) και την ανάκληση (recall). *Μάθηση (learning)* είναι η διαδικασία τροποποίησης των τιμών των βαρών του δικτύου, ώστε δοθέντος συγκεκριμένου διανύσματος εισόδου να παραχθεί συγκεκριμένο διάνυσμα εξόδου. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται επίσης και *εκπαίδευση (training)* του ΤΝΔ. Η ικανότητά τους στο να μαθαίνουν από παραδείγματα κάνει τα νευρωνικά δίκτυα ένα εξαιρετικά δυνατό προγραμματιστικό εργαλείο όταν οι κύριοι κανόνες δεν είναι επακριβώς ορισμένοι ή όταν υπάρχει ένα ποσοστό ανακρίβειας και διχογνωμίας στα δεδομένα. *Ανάκληση (recall)* είναι η διαδικασία του υπολογισμού ενός διανύσματος εξόδου για συγκεκριμένο διάνυσμα εισόδου και τιμές βαρών.

Ο γενικός τρόπος με τον οποίο γίνεται η τροποποίηση των βαρών ενός ΤΝΔ κατά την εκπαίδευση του, επιτρέπει τη διάκριση τριών ειδών μάθησης στα ΤΝΔ, τη μάθηση υπό επίβλεψη (*supervised learning*), τη *βαθμολογημένη μάθηση (graded learning)* και την *μάθηση χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning)*. Στη *μάθηση υπό επίβλεψη (supervised learning)* στο δίκτυο δίνονται ζευγάρια διανυσμάτων εισόδου - *επιθυμητής εξόδου* (Σχήμα 15.7.1). Το ΤΝΔ, με την τρέχουσα κατάσταση βαρών, παράγει μία έξοδο η οποία αρχικά διαφέρει από την επιθυμητή έξοδο. Αυτή η διαφορά ονομάζεται *σφάλμα (error)* και βάσει αυτής καθώς και ενός αλγορίθμου εκπαίδευσης γίνεται συνήθως η αναπροσαρμογή των βαρών.

Στη *βαθμολογημένη μάθηση (graded learning)* η έξοδος χαρακτηρίζεται ως «καλή» ή «κακή» με βάση μια αριθμητική κλίμακα και τα βάρη αναπροσαρμόζονται με βάση αυτό το χαρακτηρισμό.

Τέλος, στη μάθηση χωρίς επίβλεψη (*unsupervised learning*) η απόκριση του δικτύου βασίζεται στην ικανότητα του να αποδιοργανώνεται με βάση τα διανύσματα εισόδου (π.χ. τα δίκτυα Kohonen τα οποία αναφέρονται σε παρακάτω κεφάλαιο). Αυτή η εσωτερική οργάνωση γίνεται έτσι ώστε σε συγκεκριμένο σύνολο εισόδων να αντιδρά ισχυρά ένας συγκεκριμένος νευρώνας. Τέτοια σύνολα εισόδων, αντιστοιχούν σε έννοιες και χαρακτηριστικά του πραγματικού κόσμου τα οποία το ΤΝΔ καλείται να μάθει.



Σχήμα 15.7.1 Μάθηση υπό επίβλεψη

Στην πράξη, στις περισσότερες εφαρμογές ΤΝΔ χρησιμοποιείται μάθηση υπό επίβλεψη (*supervised learning*), για την οποία υπάρχουν αρκετοί αλγόριθμοι. Στον αλγόριθμο που βασίζεται στον κανόνα Δέλτα (*Delta rule learning*), η διαφορά μεταξύ πραγματικής και επιθυμητής εξόδου ελαχιστοποιείται μέσω μιας διαδικασίας ελαχίστων τετραγώνων. Στον αλγόριθμο *ανάστροφης μετάδοσης λάθους* (*back propagation*) η μεταβολή των βαρών βασίζεται στον υπολογισμό της συνεισφοράς κάθε βάρους στο συνολικό σφάλμα. Στην *ανταγωνιστική μάθηση* (*competitive learning*) οι τεχνητοί νευρώνες συναγωνίζονται, κατά κάποιο τρόπο, μεταξύ τους και μόνο αυτός με τη μεγαλύτερη απόκριση σε δοθείσα είσοδο τροποποιεί τα βάρη του. Στην *τυχαία μάθηση* (*random learning*), οι μεταβολές στα βάρη εισάγονται τυχαία και ανάλογα με το αν η έξοδος βελτιώνεται ή όχι με βάση κάποια προκαθορισμένα από το χρήστη κριτήρια, οι μεταβολές αυτές υιοθετούνται ή απορρίπτονται. Τέλος σημαντική κατηγορία αλγορίθμων που παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι και για αυτό τον λόγο ακολουθεί μια εκτενέστερη παρουσίαση τους.

Κεφάλαιο 16

Γενετικοί αλγόριθμοι [43,44]

16.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία τριάντα χρόνια, παρατηρείται ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη συστημάτων επίλυσης προβλημάτων βασισμένων στις αρχές της Φυσικής Εξέλιξης. Τα συστήματα αυτού του είδους λειτουργούν διατηρώντας έναν πληθυσμό κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων του προβλήματος που προσπαθούμε να επιλύσουμε, και εφαρμόζοντας πάνω σε αυτόν διάφορες διαδικασίες εμπνευσμένες από τη βιολογική εξέλιξη. Έτσι, περνώντας από γενιά σε γενιά, τα συστήματα αυτά δημιουργούν συνεχώς νέους πληθυσμούς πιθανών λύσεων εξελίσσοντάς τους προηγούμενους πληθυσμούς.

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) είναι ένα παράδειγμα τέτοιου συστήματος που μαζί με τον Εξελικτικό Προγραμματισμό (Evolutionary Programming), τις Στρατηγικές Εξέλιξης (Evolution Strategies), τα Συστήματα Ταξινόμησης (Classifier Systems) και το Γενετικό Προγραμματισμό (Genetic Programming) αποτελούν μια κατηγορία συστημάτων επίλυσης προβλημάτων που είναι ευρύτερα γνωστή με τον όρο Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms).

Η πρώτη εμφάνιση των Γενετικών Αλγόριθμων (Γ.Α.) χρονολογείται στις αρχές του 1950, όταν διάφοροι επιστήμονες από το χώρο της βιολογίας αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές στην προσπάθειά τους να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα. Η συστηματική τους ανάπτυξη όμως, που οδήγησε στην μορφή με την οποία είναι γνωστοί σήμερα, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland [Holland 1975] και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan. Η βασική ιδέα που κρύβεται πίσω από τους Γ.Α. είναι η μίμηση των μηχανισμών της βιολογικής εξέλιξης που απαντώνται στη φύση. Ας πάρουμε, για παράδειγμα, τους λαγούς και τον τρόπο που αναπαράγονται και εξελίσσονται από γενιά σε γενιά [Michalewicz. 1996], Έστω ότι αρχίζουμε να παρατηρούμε ένα συγκεκριμένο πληθυσμό από λαγούς σε ένα οικοσύστημα. Όπως είναι φυσικό, κάποιοι από αυτούς θα είναι πιο γρήγοροι και πιο εύστροφοι από άλλους. Αυτοί οι λαγοί έχουν περισσότερες πιθανότητες να επιβιώσουν στο φυσικό τους περιβάλλον (δηλαδή να εξασφαλίζουν τροφή και να ξεφεύγουν από τα διάφορα αρπακτικά που τους καταδιώκουν, όπως για παράδειγμα τις αλεπούδες) από ότι κάποιοι πιο αργοί ή λιγότερο έξυπνοι λαγοί. Φυσικά δεν είναι λίγοι οι αργοί ή λιγότερο έξυπνοι λαγοί που καταφέρνουν να επιβιώσουν εξαιτίας της τύχης ή άλλων παραγόντων. Όλοι αυτοί οι λαγοί, που καταφέρνουν να επιβιώσουν, θα αρχίσουν την παραγωγή της επόμενης γενιάς τους, μιας γενιάς που θα συνδυάζει με διάφορους τρόπους όλα τα χαρακτηριστικά των μελών της προηγούμενης. Έτσι, μερικοί αργοί λαγοί θα αναμειχθούν με κάποιους γρήγορους, κάποιοι γρήγοροι με άλλους γρήγορους, κάποιοι εύστροφοι λαγοί με κάποιους μη εύστροφους και ούτω καθεξής, δημιουργώντας έτσι σταδιακά έναν πληθυσμό που απαρτίζεται από λαγούς που κατά μέσο όρο είναι έξυπνότεροι και ταχύτεροι από τους προγόνους τους. Ευτυχώς όμως, για τη διατήρηση της φυσικής ισορροπίας, και τα αρπακτικά υφίστανται την ίδια διαδικασία εξέλιξης από γενιά σε γενιά, διαφορετικά

οι λαοί θα γίνονταν υπερβολικά γρήγοροι και έξυπνοι για να μπορούν να τους πιάσουν.

Οι Γ.Α. χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο της Φυσικής Γενετικής. Αναφέρονται σε άτομα (individuals) ή γενότυπους (genotypes) μέσα σε ένα πληθυσμό. Κάθε άτομο ή γενότυπος αποτελείται από χρωμοσώματα (chromosomes). Στους Γ.Α. αναφερόμαστε συνήθως σε άτομα με ένα μόνο χρωμόσωμα. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γονίδια (genes) που είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Κάθε γονίδιο επηρεάζει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ατόμου βρίσκονται και σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωματοσώματος που καλούνται loci. Κάθε χαρακτηριστικό γνώρισμα του ατόμου (όπως για παράδειγμα το χρώμα μαλλιών) έχει τη δυνατότητα να εμφανιστεί με διάφορες μορφές, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το αντίστοιχο γονίδιο που το επηρεάζει. Οι διαφορετικές αυτές καταστάσεις που μπορεί να πάρει το γονίδιο καλούνται alleles (τιμές χαρακτηριστικού γνωρίσματος).

Κάθε γενότυπος αναπαριστά μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα. Το «αποκωδικοποιημένο» περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος καλείται φαινότυπος (phenotype) (π.χ. ένας ζωντανός οργανισμός είναι ο φαινότυπος των χρωμοσωμάτων του). Μια διαδικασία εξέλιξης που εφαρμόζεται πάνω σε ένα πληθυσμό αντιστοιχεί σε ένα εκτενές ψάξιμο στο χώρο των πιθανών λύσεων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχημένη έκβαση ενός τέτοιου ψαξίματος αποτελεί η εξισορρόπηση δύο διαδικασιών που είναι προφανώς αντικρουόμενες, της εκμετάλλευσης και διατήρησης των καλύτερων λύσεων, και της όσο το δυνατόν καλύτερης εξερεύνησης όλου του διαστήματος.

Οι Γ.Α. διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων, του προβλήματος που μας ενδιαφέρει, πάνω στον οποίο δουλεύουν, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους αναζήτησης που επεξεργάζονται ένα μόνο σημείο του διαστήματος αναζήτησης. Έτσι ένας Γ.Α. πραγματοποιεί αναζήτηση σε πολλές κατευθύνσεις και υποστηρίζει καταγραφή και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων. Ο πληθυσμός υφίσταται μια προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη. Σε κάθε γενιά, οι σχετικά "καλές" λύσεις αναπαράγονται, ενώ οι σχετικά "κακές" απομακρύνονται. Ο διαχωρισμός και η αποτίμηση των διαφόρων λύσεων γίνεται με την βοήθεια μιας αντικειμενικής συνάρτησης (objective ή fitness function) η οποία παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο εξελίσσεται ο πληθυσμός.

Η δομή ενός απλού Γ.Α. έχει σε γενικές γραμμές ως εξής [Michalewicz, 1996]: Κατά την διάρκεια της γενιάς t , ο Γ.Α. διατηρεί ένα πληθυσμό $P(t)$ από n πιθανές λύσεις (individuals): $P(t) = \{x_1^t \dots x_n^t\}$. Κάθε individual x_i^t αποτιμάται και δίνει ένα μέτρο της καταλληλότητας και ορθότητάς του. Αφού ολοκληρωθεί η αποτίμηση όλων των μελών του πληθυσμού, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός (γενιά $t+1$) που προκύπτει από την επιλογή των πιο κατάλληλων στοιχείων του πληθυσμού της προηγούμενης γενιάς. Μερικά μέλη από τον καινούργιο αυτό πληθυσμό υφίστανται αλλαγές με την βοήθεια των γενετικών διαδικασιών της διασταύρωσης και της μετάλλαξης σχηματίζοντας νέες πιθανές λύσεις. Η διασταύρωση συνδυάζει τα στοιχεία των χρωμοσωμάτων δύο γονέων για να δημιουργήσει δύο νέους απογόνους ανταλ-

λάσσοντας κομμάτια από τους γονείς. Για παράδειγμα, έστω ότι δύο γονείς αναπαριστώνται με χρωματοσώματα πέντε γονιδίων (a_1, b_1, c_1, d_1, e_1) και (a_2, b_2, c_2, d_2, e_2) αντίστοιχα, τότε οι απόγονοι που θα προκύψουν από διασταύρωση με σημείο διασταύρωσης (crossover point) το σημείο 2 είναι οι (a_1, b_1, c_2, d_2, e_2) και (a_2, b_2, c_1, d_1, e_1) Διαισθητικά μπορούμε να πούμε ότι η διασταύρωση εξυπηρετεί την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών πιθανών λύσεων. Η διαδικασία της μετάλλαξης αλλάζει αυθαίρετα ένα ή περισσότερα γονίδια ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος. Πραγματοποιείται με τυχαία αλλαγή γονιδίων με πιθανότητα ίση με το ρυθμό μετάλλαξης (mutation rate). Για παράδειγμα, έστω ότι ένας individual αναπαρίσταται με το διάνυσμα πέντε διαστάσεων (a_1, b_1, c_1, d_1, e_1) τότε ο individual που θα προκύψει με μετάλλαξη στη δεύτερη και στην τέταρτη διάσταση είναι ο ($a_1, b_1^*, c_1, d_1^*, e_1$) Διαισθητικά μπορούμε να πούμε ότι η μετάλλαξη εξυπηρετεί την εισαγωγή νέων πιθανών λύσεων, διαφορετικών από τις υπάρχουσες, στον ήδη υπάρχοντα πληθυσμό.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι ένας Γ.Α. για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα πρέπει να αποτελείται από τα παρακάτω πέντε συστατικά:

1. Μια γενετική αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος.
2. Έναν τρόπο δημιουργίας ενός αρχικού πληθυσμού από πιθανές λύσεις (αρχικοποίηση).
3. Μια αντικειμενική συνάρτηση αξιολόγησης των μελών του πληθυσμού, που παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος.
4. Γενετικούς τελεστές για τη δημιουργία νέων μελών (λύσεων).
5. Τιμές για τις διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο Γ.Α. (μέγεθος πληθυσμού, πιθανότητες εφαρμογής των γενετικών τελεστών, κ.τ.λ.).

16.2 Πλεονεκτήματα των Γενετικών Αλγορίθμων

Μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που έχει η χρήση Γ.Α. για την επίλυση προβλημάτων είναι τα εξής:

1. Μπορούν να επιλύουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα. Ένας από τους σημαντικούς λόγους χρήσης των Γ.Α είναι η μεγάλη τους αποδοτικότητα. Τόσο η θεωρία όσο και η πράξη έχουν δείξει ότι προβλήματα που έχουν πολλές, δύσκολες προσδιορισμένες λύσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα από Γ.Α. Είναι δε αξιοσημείωτο ότι συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακρότατων τους, για τους Γ.Α. δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας.
2. Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Οι Γ.Α. προσφέρουν το σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης τους με προσθετικό τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, μη απαιτώντας την επανασχεδίαση του. Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τον υπάρχοντα κώδικα, χωρίς μεγάλο κόπο. Αυτό συμβαίνει, διότι χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες της διαδικασίας ή

- συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν, δίχως να ενδιαφέρει άμεσα ο ρόλος της μέσα στο σύστημα ή η όλη δομή του συστήματος.
3. Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι. Όπως θα γίνει σαφές στα επόμενα κεφάλαια, οι Γ.Α. δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Σε πολλές εφαρμογές, έχουν αναφερθεί λειτουργίες των Γ.Α. που δεν είναι δανεισμένες από τη φύση ή που έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές, πάντα προ: όφελος τη: απόδοσης. Παραλλαγές στο βασικό σχήμα δεν είναι απλά αναγκαίες, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις επιβάλλονται.
 4. Μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Αν η ισχύς των Γ.Α. είναι μεγάλη, σε μερικές ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων, όπου άλλες μέθοδοι συμβαίνει να έχουν πολύ υψηλή αποδοτικότητα, λόγω εξειδίκευσης, υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός υβριδικού σχήματος Γ.Α. με άλλη μέθοδο. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μεγάλης ευελιξίας των Γ.Α.
 5. Εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο. Το χαρακτηριστικό που τους εξασφαλίζει αυτό το πλεονέκτημα είναι η ελευθερία επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Έτσι, Γ.Α. μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οικονομία, στο σχεδιασμό μηχανών, στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων, στην εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων και σε πολλούς άλλους τομείς.
 6. Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται. Ο κύριος λόγος που καθιστά τις παραδοσιακές μεθόδους δύσκαμπτες και ακατάλληλες για πολλά προβλήματα είναι η απαίτηση τους για ύπαρξη περιορισμών, όπως ύπαρξη παραγώγων, συνέχεια, όχι "θορυβώδεις" συναρτήσεις κ.τ.λ. Τέτοιου είδους ιδιότητες είναι αδιάφορες για τους Γ.Α. πράγμα που τους κάνει κατάλληλους για μεγάλο φάσμα προβλημάτων.
 7. Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας. Η μόνη "επικοινωνία" του Γ.Α. με το περιβάλλον του είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό εγγυάται την επιτυχία του ανεξάρτητα από την σημασία του προβλήματος. Βέβαια, δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν άλτα προβλήματα για του: Γ.Α. Όπου όμως δεν τα καταφέρνουν, η αιτία είναι η φύση του χώρου που ερευνούν και όχι το πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος.
 8. Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού. Οι Γ.Α. σε κάθε τους βήμα επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες πληροφορίας, αφού κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Έχει υπολογιστεί ότι η αναλογία αυτή είναι της τάξεως $O(n^3)$, δηλαδή 10 άτομα αντιπροσωπεύουν περίπου 1000. Είναι, λοιπόν προφανές ότι μπορούν να καλύψουν με αποδοτικό ψάξιμο μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους.

9. Είναι μια μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Ο συνδυασμός αυτός σπάνια συναντάται σε οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Με το τυχαίο ψάξιμο γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου, αλλά δεν γίνεται εκμετάλλευση της πληροφορίας. Αντίθετα, με το hill-climbing γίνεται καλή εκμετάλλευση της πληροφορίας, αλλά όχι καλή εξερεύνηση. Συνήθως τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι ανταγωνιστικά και το επιθυμητό είναι να συνυπάρχουν και τα δύο προς όφελος της όλης διαδικασίας. Οι Γ.Α. επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, πράγμα που τους κάνει ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς.
- 10.Επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση. Οι Γ.Α. μπορούν να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των παράλληλων μηχανών, αφού λόγω της φύσης τους, εύκολα μπορούν να δεχτούν παράλληλη υλοποίηση. Το χαρακτηριστικό αυτό αυξάνει ακόμη περισσότερο την απόδοσή τους, ενώ σπάνια συναντάται σε ανταγωνιστικές μεθόδους

16.3 Βασικά Χαρακτηριστικά Γενετικών Αλγορίθμων

Όπως αναφέρθηκε, οι Γ.Α. πλεονεκτούν αισθητά στη λύση προβλημάτων αναζήτησης και βελτιστοποίησης από τις παραδοσιακές μεθόδους. Αυτό συμβαίνει, διότι διαφέρουν θεμελιωδώς από αυτές. Τα κυριότερα νέα χαρακτηριστικά που τους διαφοροποιούν, αλλά και τους δίνουν υπεροχή, σύμφωνα με τον D. Goldberg [Goldberg, 1989], είναι τα εξής:

- Οι Γ.Α. δουλεύουν με μια κωδικοποίηση του συνόλου τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές και όχι με τις ίδιες τις μεταβλητές.
- Οι Γ.Α. κάνουν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε ένα: Σε πολλές μεθόδους βελτιστοποίησης, η επεξεργασία γίνεται βήμα προς βήμα, πηγαίνοντας προσεκτικά από σημείο σε σημείο του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Αυτό το βήμα προς βήμα ενέχει αρκετούς κινδύνους, κυριότερος από τους οποίους είναι να περιοριστεί η αναζήτηση σε μια περιοχή τοπικού ακρότατου, που δεν είναι ολικό. Οι Γ.Α. εξαλείφουν αυτόν τον κίνδυνο ενεργώντας ταυτόχρονα πάνω σε ένα ευρύ σύνολο σημείων. Έτσι μπορούν να "ανεβαίνουν" πολλούς λόφους (hill-climbing) την ίδια στιγμή, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα να βρουν μια λάθος κορυφή.
- Οι Γ.Α. χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτηση και καμία επιπρόσθετη πληροφορία: Πολλές μέθοδοι αναζήτησης απαιτούν αρκετές βοηθητικές πληροφορίες για τη συνάρτηση που επεξεργάζονται. Τέτοιου είδους πληροφορίες δεν προαπαιτούνται από τους Γ.Α. Το ψάξιμο

τους είναι κατά κάποιο τρόπο "τυφλό". Αξιοποιούν μόνο όση πληροφορία περιέχεται στην αντικειμενική συνάρτηση πράγμα που τους προσδίδει μεγάλη ευελιξία.

- Οι ΓΑ. χρησιμοποιούν πιθανοθεωρητικούς κανόνες μετάβασης και όχι ντετερμινιστικούς: Η χρήση πιθανοτικών κανόνων μετάβασης είναι κυρίαρχο γνώρισμα των Γ.Α., χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η όλη διαδικασία βαδίζει στην τύχη. Δε λαμβάνονται αποφάσεις με το "στρίψιμο ενός νομίσματος". Το στοιχείο της τύχης χρησιμοποιείται ως οδηγός για αναζήτηση σε περιοχές που αναμένεται να δώσουν καλά αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 17

Έμπειρα Συστήματα (Expert Systems) [45-47]

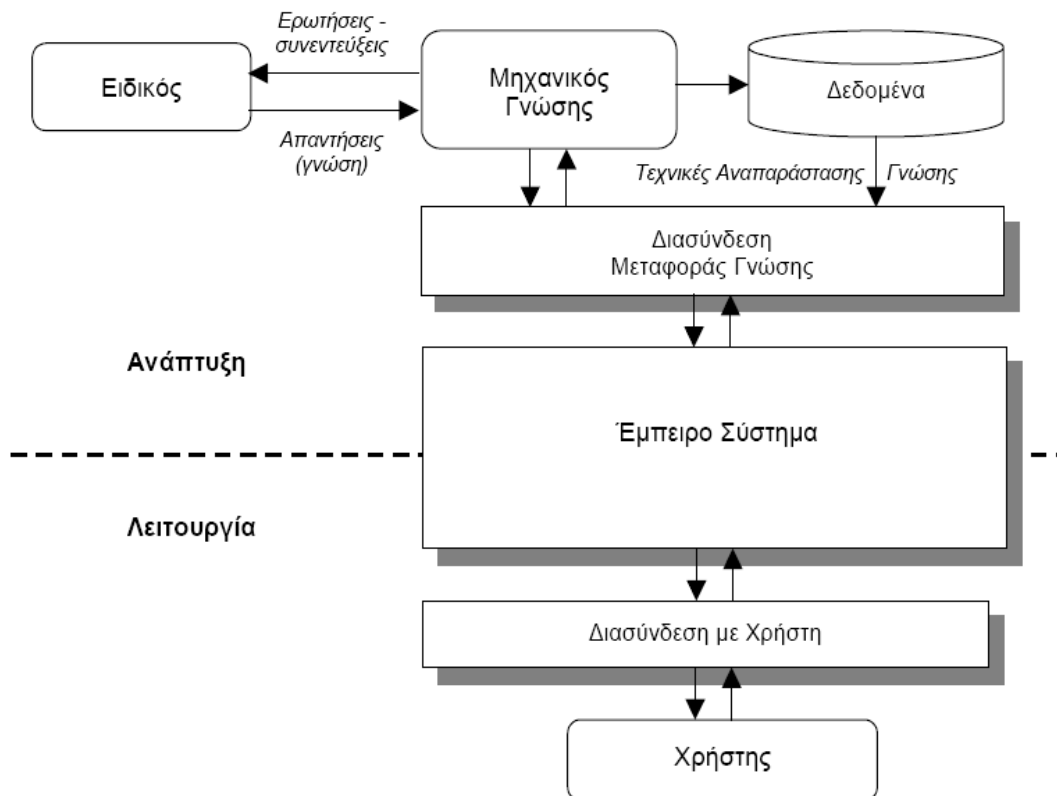
17.1 Εισαγωγή

- Προγράμματα τα οποία:
 - Επιδεικνύουν νοήμονα συμπεριφορά σε συγκεκριμένους τομείς και διαδικασίες, ανάλογη ενός ανθρώπου εμπειρογνώμονα με ειδικότητα στον ίδιο τομέα.
 - Κωδικοποιούν και χειρίζονται τη γνώση και τη συλλογιστική ενός ανθρώπου-ειδικού σε έναν εξειδικευμένο τομέα, με σκοπό την επίλυση προβλημάτων ή την παροχή συμβουλών.
- Απαιτούν εμπειρική γνώση.
 - Δεν είναι μόνο γνώση ή εκπαίδευση πάνω σε ένα συγκεκριμένο τομέα.
 - Περιλαμβάνει εξειδικευμένες ικανότητες που έχουν αποκτηθεί με κόπο και χρόνο.
- Χρησιμοποιούνται με δύο τρόπους:
 - Από κάποιον άνθρωπο μη-ειδικό, για να παρέχει λύσεις σε συγκεκριμένα προβλήματα.
 - Συμβουλευτικά, από έναν άνθρωπο-ειδικό ο οποίος καλείται να πάρει κάποια απόφαση.
- Τυπικές κατηγορίες εφαρμογών:
 - Ερμηνεία δεδομένων (π.χ. ηχητικών ή ηλεκτρομαγνητικών σημάτων)
 - Διάγνωση δυσλειτουργιών (π.χ. βλαβών σε μηχανήματα ή ασθενειών σε ανθρώπους)
 - Δομική ανάλυση σύνθετων αντικειμένων (π.χ. χημικών ενώσεων)
 - Διαμόρφωση σύνθετων αντικειμένων (π.χ. πολύπλοκων υπολογιστικών συστημάτων)

Για την ανάπτυξη ενός έμπειρου συστήματος πρέπει να συνεργαστούν:

Ένας ειδικός του τομέα (domain expert). Είναι κάποιος άνθρωπος εξειδικευμένος σε έναν τομέα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Η γνώση του για τον τομέα αυτό θα μεταφερθεί στο σύστημα. Ένας μηχανικός γνώσης (knowledge engineer) με σκοπό τη λήψη της εμπειρίας(γνώσης) του πρώτου. Είναι ένας επιστήμονας της πληροφορικής, ειδικευμένος σε θέματα ΤΝ και εμπειρών συστημάτων. Με βάση τα αποτελέσματα της συνεργασίας σχεδιάζει το σύστημα και τη δομή της γνώσης και στη συνέχεια το αναπτύσσει. Ο τομέας της ΤΝ που ασχολείται με την ανάπτυξη έμπειρων συστημάτων ονομάζεται τεχνολογία της γνώσης (knowledge engineering).

Ανάπτυξη και Λειτουργία Έμπειρου Συστήματος



Σχήμα 17.1 Αναπαράσταση της διαδικασίας ανάπτυξης και λειτουργίας ενός έμπειρου συστήματος

Χαρακτηριστικά Εμπείρων Συστημάτων

ΕΜΠΕΙΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ
Προσομοιώνουν τον τρόπο επίλυσης ενός προβλήματος	Προσομοιώνουν το ίδιο το πρόβλημα
Παράσταση και χειρισμός γνώσης σε επίπεδο συμβόλων	Παράσταση και χειρισμός δεδομένων σε επίπεδο αριθμητικών υπολογισμών
Χρήση ευριστικών μεθόδων για περιορισμό του χώρου αναζήτησης	Χρήση αλγορίθμων
Χρήση γλωσσών που πλησιάζουν την ανθρώπινη	Χρήση γλωσσών που βρίσκονται πλησιέστερα στον τρόπο λειτουργίας του Η/Υ
Βάση γνώσης (δεδομένα και εξαγωγή συμπερασμάτων)	Βάση δεδομένων - η γνώση ενσωματώνεται στο πρόγραμμα
Ευχέρεια στην επέκταση και αναθεώρηση της γνώσης	Η αναθεώρηση της γνώσης επιβάλλει ευρείας κλίμακας μεταβολές στο πρόγραμμα
Χειρισμός ασαφούς, αβέβαιης και μη-πλήρους γνώσης	Δυσχέρεια στο χειρισμό ασαφούς, αβέβαιης και μη-πλήρους γνώσης
Δυνατότητα μη μονότονης συλλογιστικής	Δυσχέρεια στη χρήση μη μονότονης λογικής
Επεξήγηση του δρόμου συλλογισμού	Ανυπαρξία επεξήγησης

17.2 Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα Έμπειρου Συστήματος σε σχέση με Άνθρωπο-Ειδικό

ΑΝΘΡΩΠΟΣ-ΕΙΔΙΚΟΣ

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Γνώση διαθέσιμη όταν ο ίδιος είναι παρών
 Δυσκολία μεταφοράς-αποτύπωσης γνώσης
 Συναισθηματικές παρορμήσεις
 Η απόδοσή του επηρεάζεται από εξωγενείς παράγοντες
 Υψηλό κόστος
 Υποκειμενικότητα

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Δημιουργικότητα
 Κοινή λογική
 Γνώση των ορίων και δυνατοτήτων τους (μετα-γνώση)
 Εκφραστική και λειτουργική επεξήγηση του τρόπου σκέψης τους
 Ο έλεγχος της γνώσης γίνεται υποσυνείδητα

Αυτονομία στη μάθηση
Απόκριση σε πραγματικό χρόνο

ΕΜΠΕΙΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Απουσία έμπνευσης, Περιορισμένο πεδίο σκέψης
Δυσχέρεια στη μεταφύτευση της κοινής λογικής
Έλλειψη μετα-γνώσης
Μηχανική επεξήγηση του τρόπου λήψης απόφασης
Πρέπει η γνώση να ελέγχεται για ορθότητα, πληρότητα και συνέπεια
Πρέπει να προγραμματιστούν για να μαθαίνουν αυτόματα
Δυσκολία απόκρισης σε πραγματικό χρόνο

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Γνώση πάντα διαθέσιμη.
Ευκολία μεταφοράς-αποτύπωσης γνώσης
Εργάζεται με συνέπεια
Εργάζεται οπουδήποτε
Χαμηλό κόστος λειτουργίας / Υψηλό κόστος ανάπτυξης
Αντικειμενικότητα αν η γνώση προέρχεται από πολλούς ειδικούς.

17.3 Εφαρμογές των Εμπείρων Συστημάτων

- Διάγνωση (diagnosis).
- Διάγνωση βλαβών ενός συστήματος βάσει παρατηρήσεων και μετρήσεων.
- Πρόγνωση (prognosis-prediction).
- Πρόβλεψη πιθανών μελλοντικών επιπτώσεων με βάση δεδομένες καταστάσεις.
- Εκπαίδευση (instruction).
- Κατανόηση, αξιολόγηση και διόρθωση απάντησης μαθητών σε εκπαιδευτικά προβλήματα.
- Παρακολούθηση καταστάσεων (monitoring).
- Σύγκριση παρατηρούμενων παραμέτρων με αναμενόμενες καταστάσεις.
- Επιδιόρθωση λαθών (repair-remedy).
- Ανάπτυξη και εκτέλεση σχεδίων (πλάνων) για τη διαχείριση βλαβών.
- Ερμηνεία (interpretation).
- Περιγραφή αντικειμένων και καταστάσεων βάσει δεδομένων από παρατηρήσεις.
- Διαμόρφωση (configuration).

- Ικανοποίηση απαιτήσεων και περιορισμών για τη συναρμολόγηση εξαρτημάτων.
- Έλεγχος (control).

Έλεγχος της συμπεριφοράς ενός συστήματος. Περιλαμβάνει πολλά από τα παραπάνω. Γνωστά Έμπειρα Συστήματα είναι τα εξής :

➤ DENDRAL

Ταυτοποίηση χημικών ενώσεων μέσω φασματικής ανάλυσης.

Χρήση ευριστικών κανόνων για περιορισμό του χώρου αναζήτησης.

➤ MYCIN

Διάγνωση και θεραπεία της μηνιγγίτιδας και της βακτηριαιμίας.

Χρήση συντελεστή βεβαιότητας για τις λύσεις, λόγω αβεβαιότητας απαντήσεων χρήστη.

➤ PROSPECTOR

Πρόβλεψη της ακριβούς θέσης ορυκτών κοιτασμάτων αξιοποιώντας γεωλογικά δεδομένα.

Χρήση σημασιολογικών δικτύων και δικτύων πιθανοτήτων.

➤ INTERNIST

Διάγνωση παθολογικών περιπτώσεων με πολύ μεγάλο αριθμό εναλλακτικών διαγνώσεων.

Χρήση ευριστικής συλλογιστικής (απαγωγική) για την πιθανότερη διάγνωση.

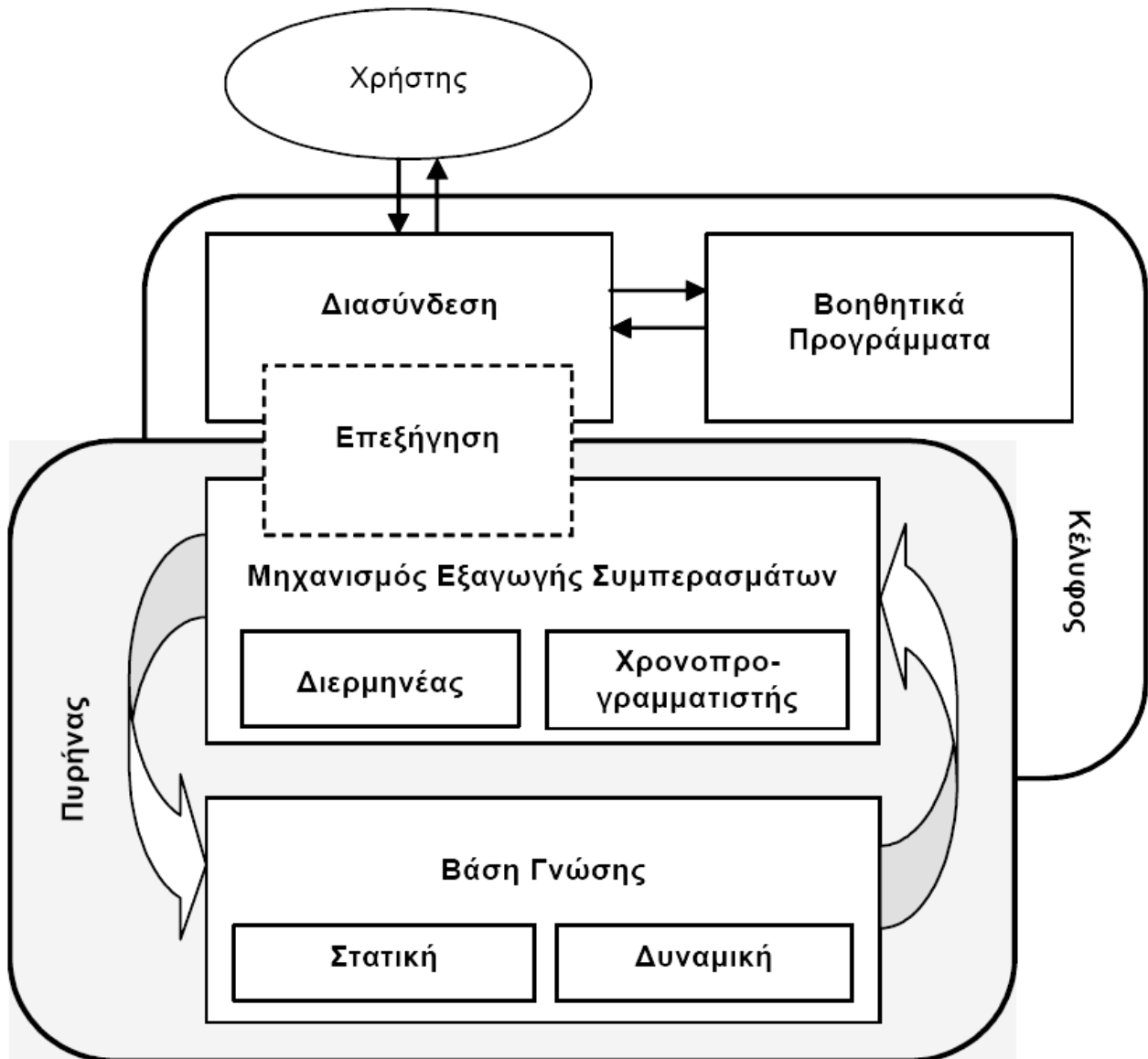
➤ XCON

Διαμόρφωση υπολογιστών DEC, για να ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές του πελάτη.

Αναζήτηση κατάλληλου συνδυασμού και χωρικής διάταξη των εξαρτημάτων, με αποφυγή

των ασυμβατοτήτων λειτουργίας και διασύνδεσης μεταξύ τους.

17.4 Αρχιτεκτονική και διαδικασία ανάπτυξης Εμπείρων Συστημάτων



Αρχιτεκτονική Εμπείρων Συστημάτων

Ο πυρήνας του έμπειρου συστήματος αποτελείται από δύο μέρη:

- Τη βάση γνώσης.
- Το μηχανισμό εξαγωγής συμπερασμάτων.

Ο διαχωρισμός της γνώσης από το μηχανισμό χειρισμού προσφέρει διαφάνεια.

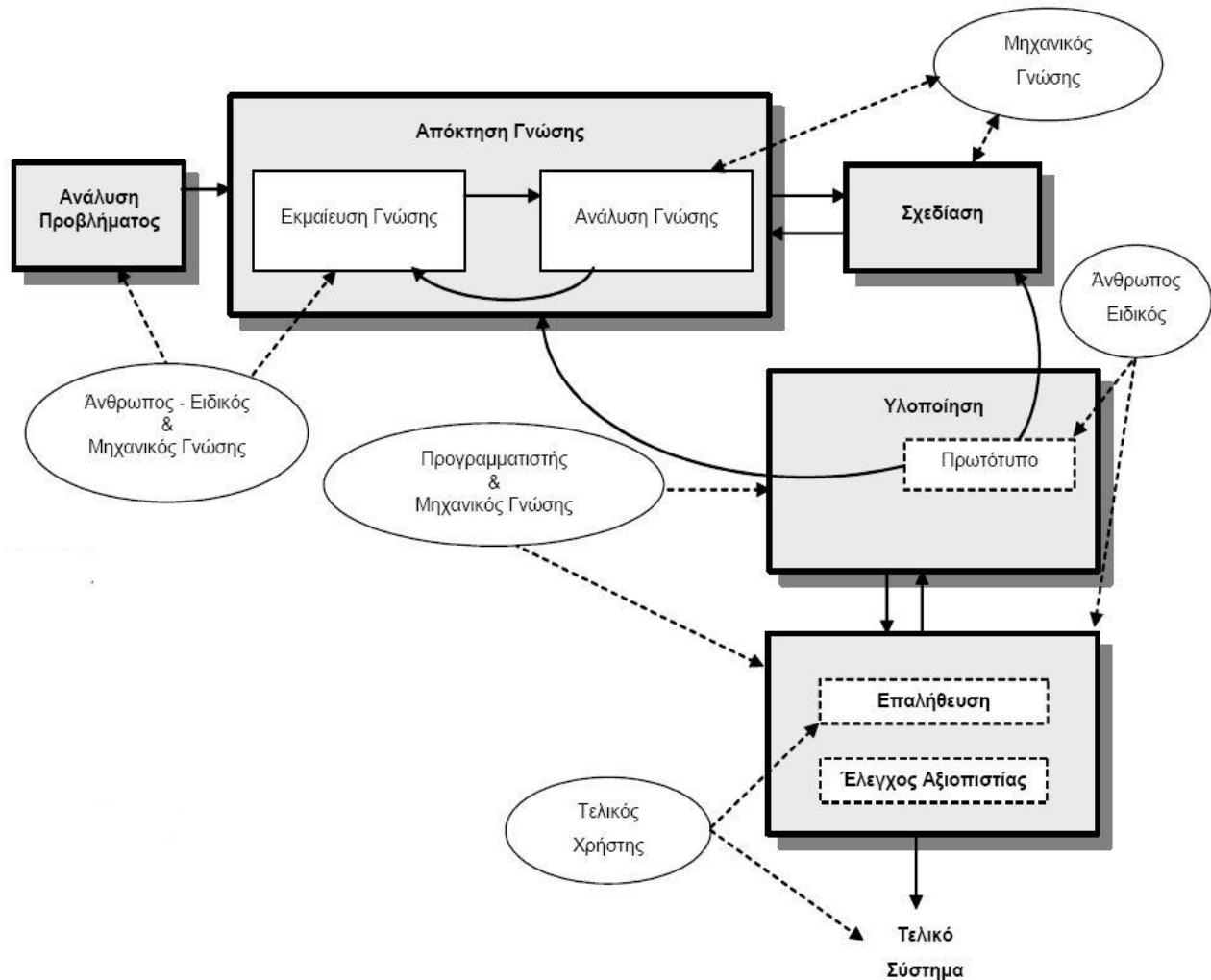
- Με αλλαγή της γνώσης το έμπειρο σύστημα μπορεί να εκτελεί διαφορετικές λειτουργίες.

Κέλυφος εμπείρων συστημάτων (expert system shell):

- Ο συνδυασμός των βοηθητικών προγραμμάτων με το μηχανισμό εξαγωγής συμπερασμάτων.

Διαδικασία Ανάπτυξης Εμπείρων Συστημάτων

1. Ανάλυση του Προβλήματος
2. Απόκτηση της Γνώσης
3. Σχεδίαση
4. Υλοποίηση
5. Επαλήθευση και Έλεγχος Αξιοπιστίας



Ανάλυση Προβλήματος

- Προσδιορίζεται η μορφή της επιθυμητής λύσης του προβλήματος.
- Κυριότερα ζητήματα:
 - I. Είναι το πρόβλημα κατάλληλο για επίλυση από έμπειρο σύστημα ή συμβατικό πρόγραμμα;
 - II. Υπάρχουν έτοιμες μελέτες περιπτώσεων επίλυσης του προβλήματος (case-studies);
 - III. Ποια είναι τα οφέλη από την κατασκευή του έμπειρου συστήματος;

Απόκτηση της Γνώσης (Knowledge Acquisition)

- Εκμαίευση γνώσης (knowledge elicitation)
 - Απαιτεί συνεχή επικοινωνία ανάμεσα στο μηχανικό γνώσης και τον ειδικό.
 - Εκτός από τις κλασσικές μεθόδους, υπάρχουν:
 - Ημι-αυτόματες μέθοδοι: Ο ειδικός εισάγει απευθείας τη γνώση στο σύστημα χρησιμοποιώντας ειδικό λογισμικό (π.χ. TEIRESIAS, OPAL, κλπ)
 - Αυτόματες μέθοδοι: Χρησιμοποιούνται τεχνικές μηχανικής μάθησης.
- Μοντελοποίηση γνώσης (knowledge analysis & modeling)
 - Ανάλυση της γνώσης από το μηχανικό με σκοπό τη δημιουργία ενός μοντέλου της γνώσης.
 - Η αναπαράσταση της γνώσης γίνεται με διάφορες ημιδομημένες μορφές αναπαράστασης.
 - Υπάρχουν μεθοδολογίες που τυποποιούν τη μοντελοποίηση της γνώσης, όπως η KADS

Σχεδίαση

- Προσδιορίζονται:
- Η μορφή της αναπαράστασης της γνώσης.
- Η συλλογιστική που θα χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή συμπερασμάτων.
- Το εργαλείο για την ανάπτυξη του έμπειρου συστήματος.
- Παράγεται η αρχιτεκτονική του συστήματος
- Δεσμεύσεις που λαμβάνονται υπόψη:
 - Απαιτήσεις των χρηστών.
 - Τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί.
 - Το μοντέλο της γνώσης.

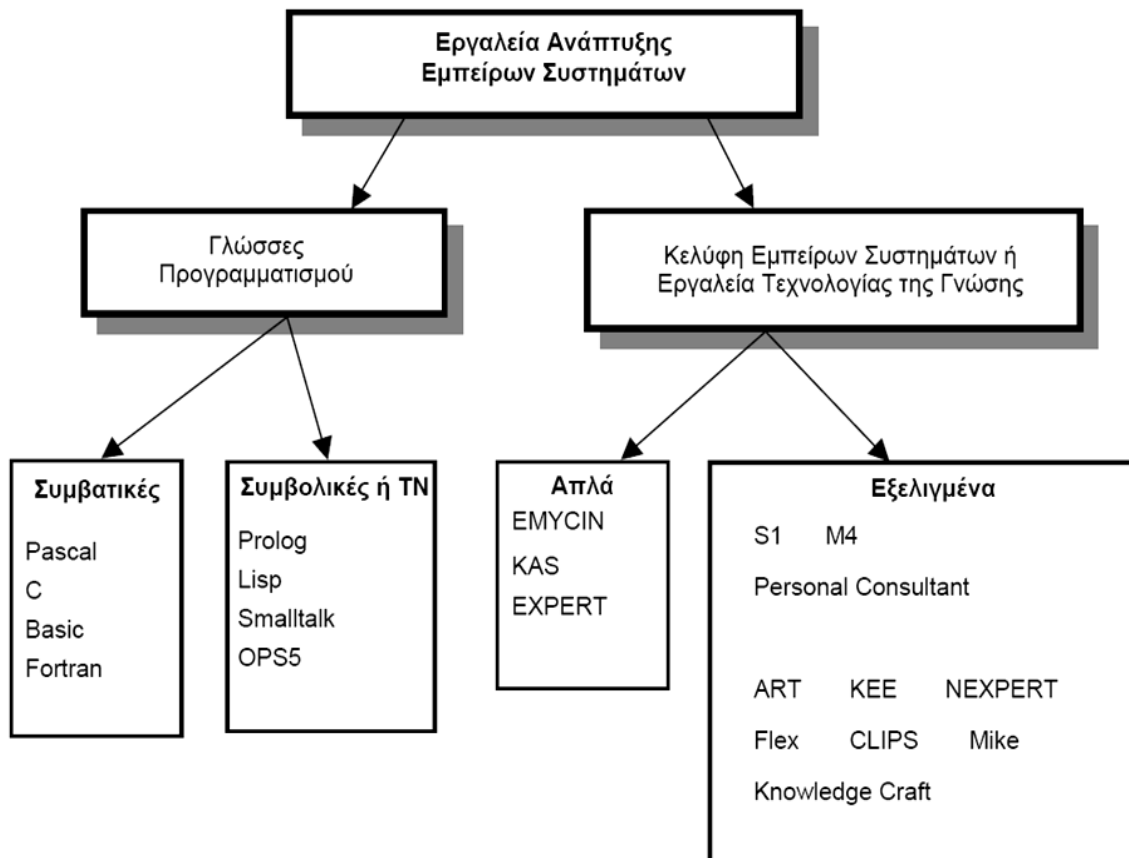
Υλοποίηση

- Κωδικοποιείται το μοντέλο της γνώσης χρησιμοποιώντας εργαλεία ανάπτυξης έμπειρων συστημάτων.
- Αρχικά αναπτύσσεται ένα πρωτότυπο σύστημα επίδειξης:
- Καθοδηγεί στη συνέχεια την ανάπτυξη, ή
- Οδηγεί σε επανασχεδιασμό όταν δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις που τέθηκαν στην αρχή.
- Επαληθεύει τη γνώση που αποκτήθηκε από τον ειδικό και μοντελοποιήθηκε από το μηχανικό γνώσης.

Επαλήθευση και Έλεγχος Αξιοπιστίας

- Έλεγχος της συμβατότητας του συστήματος με τις αρχικές προδιαγραφές.
- Επιβεβαίωση της συνέπειας και πληρότητας της κωδικοποίησης της γνώσης που περιέχεται στο έμπειρο σύστημα. Ο έλεγχος πραγματοποιείται από το μηχανικό της γνώσης με τη βοήθεια εργαλείων (π.χ. CHECK, TEIRESIAS)
- **Έλεγχος αξιοπιστίας (validation)**: Συνίσταται στην επιβεβαίωση της ορθότητας και γενικότητας της γνώσης που περιέχει το έμπειρο σύστημα.
 - Το σύστημα επιλύει ένα σύνολο από υποδειγματικές περιπτώσεις (test cases).
 - Οι λύσεις συγκρίνονται με λύσεις που δόθηκαν από διάφορους ειδικούς του τομέα.
 - Οι υποδειγματικές περιπτώσεις πρέπει να είναι διαφορετικές από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στις προηγούμενες φάσεις ανάπτυξης του συστήματος.

Εργαλεία Ανάπτυξης Εμπείρων Συστημάτων



Κεφάλαιο 18

Ρύθμιση προβλεπτικού μοντέλου [48,49]

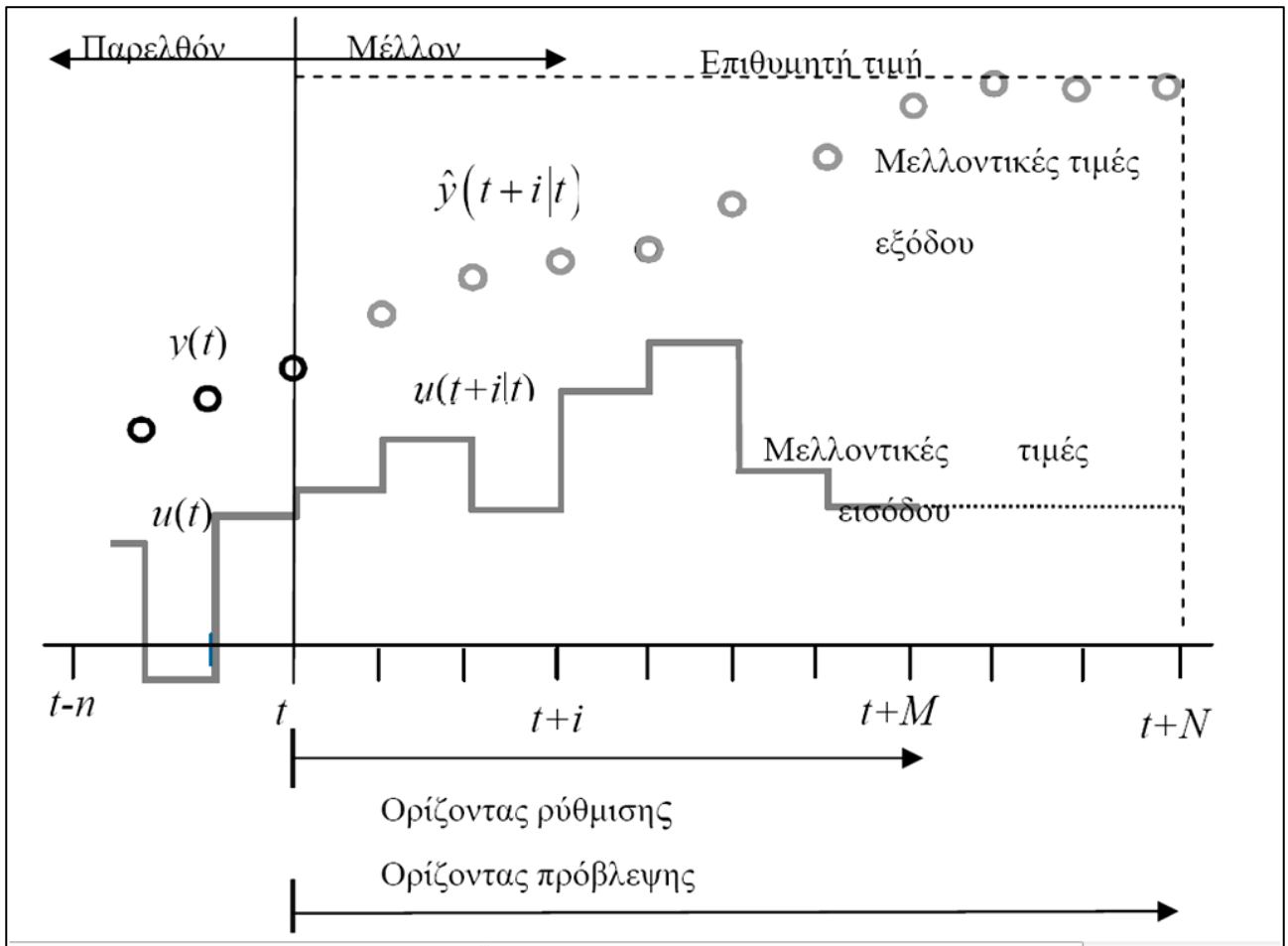
Ο όρος «ρύθμιση προβλεπτικού μοντέλου» (Model Predictive Control, MPC) αναφέρεται σε μια μεγάλη κατηγορία συστημάτων ρύθμισης που πρωτοεμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του εβδομήντα. Έκτοτε, οι μεθοδολογίες MPC έχουν προσελκύσει το έντονο ενδιαφέρον της ακαδημαϊκής κοινότητας, αλλά ταυτόχρονα έχουν τύχει ευρείας αποδοχής και εφαρμογής στη βιομηχανία. Παρά το γεγονός ότι οι πρώτες εφαρμογές τους περιορίζονταν στην βιομηχανία πετρελαίου, σήμερα οι ρυθμιστές προβλεπτικού μοντέλου έχουν επεκταθεί στην χημική βιομηχανία, την αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και την αεροπορική βιομηχανία (Qin & Badgwell, 2000; 2003).

Κοινό σημείο όλων των μεθοδολογιών MPC είναι η χρήση ενός μοντέλου για την πρόβλεψη των μεταβλητών εξόδου της διεργασίας, σε ένα πεπερασμένο μελλοντικό ορίζοντα (ορίζοντα πρόβλεψης). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης που ελαχιστοποιεί μία κατάλληλα επιλεγμένη αντικειμενική συνάρτηση. Μεταβλητές απόφασης αυτού του προβλήματος είναι οι μελλοντικές τιμές των μεταβλητών εκ χειρισμού, σε ένα εν γένει μικρότερο μελλοντικό χρονικό ορίζοντα, τον ορίζοντα ρύθμισης. Εφόσον η βέλτιστη αλληλουχία μελλοντικών ρυθμιστικών κινήσεων προσδιοριστεί, μόνο η πρώτη τιμή εφαρμόζεται τελικά στο σύστημα. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διαμορφώνεται και επιλύεται εκ νέου την επόμενη χρονική στιγμή, αξιοποιώντας όλες τις νεώτερες πληροφορίες για την διεργασία. Το Σχήμα 6.1 αναπαριστά την βασική ιδέα όλων των ρυθμιστών προβλεπτικού μοντέλου που περιγράφηκε προηγουμένως. Οι διαφορετικές μεθοδολογίες MPC που έχουν διαμορφωθεί, συνήθως έγκεινται στο γεγονός ότι εστιάζουν σε συγκεκριμένες κατηγορίες διεργασιών ή σε διαφορετικές διαμορφώσεις της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης.

Η ρύθμιση προβλεπτικού μοντέλου παρουσιάζει μία σειρά από πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων, από τα οποία τα κυριότερα είναι τα εξής:

- η περίπτωση πολυμεταβλητού συστήματος μπορεί να αντιμετωπισθεί με ευκολία
- είναι πολύ χρήσιμη όταν η μελλοντική επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος (π.χ. ρομποτικοί βραχίονες) είναι εκ των προτέρων γνωστή
- είναι μία εξ' ολοκλήρου ανοιχτή μεθοδολογία βασισμένη σε συγκεκριμένες βασικές αρχές γεγονός που επιτρέπει μελλοντικές επεκτάσεις.
- λαμβάνει υπόψη τους νεκρούς χρόνους του συστήματος.
- μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ρύθμιση ενός μεγάλου φάσματος διεργασιών, που παρουσιάζουν είτε σχετικά απλή, είτε ιδιαίτερα πολύπλοκη δυναμική συμπεριφορά, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων με μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις ή αστάθειες.
- είναι ιδιαίτερα ελκυστική για χρήση από προσωπικό με περιορισμένη γνώση προχωρημένης ρύθμισης διότι οι αρχές της είναι απλές και ταυτόχρονα η βαθμονόμηση του ρυθμιστή είναι σχετικά εύκολη.

- ο ρυθμιστής που προκύπτει βασίζεται σε έναν εύκολα εφαρμόσιμο, γραμμικό κανόνα ρύθμισης.
- οι επεκτάσεις που αφορούν την εισαγωγή περιορισμών είναι θεωρητικά απλές και επιτρέπουν την συστηματική εισαγωγή τους κατά την διαδικασία σχεδιασμού



Σχήμα 18.1 Σχηματική αναπαράσταση ρυθμιστή προβλεπτικού μοντέλο

Ωστόσο υπάρχουν, όπως είναι αναμενόμενο και μερικά μειονεκτήματα που αφορούν κυρίως την εφαρμογή τους στην βιομηχανία. Καταρχήν, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός μοντέλου που να αποδίδει την δυναμική της διεργασίας με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ο προσδιορισμός θεμελιωδών εξισώσεων, που να βασίζονται στην φυσική του συστήματος, συχνά δεν είναι εύκολος σε μία βιομηχανική μονάδα και επομένως είναι προτιμότερη η ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων, τα οποία ωστόσο πάντα συνοδεύονται από ένα σφάλμα. Επίσης, παρόλη την πρόοδο των υπολογιστικών συστημάτων, το πρόβλημα της υπολογιστικής ισχύος που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης σε πραγματικό χρόνο είναι υπαρκτό, ιδιαίτερα στην περίπτωση χρήσης μη γραμμικών μοντέλων σε συνδυασμό με περιορισμούς. Εκτός του γεγονότος ότι απαιτείται η εύρεση λύσης που να ικανοποιεί τους περιορισμούς στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών εφαρμογών της μεθόδου, ιδιαίτερη σημασία έχει και η ποιότητα της λύσης για την καλή απόκριση του συστήματος.

ΜΕΡΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Το υπολογιστικό μέρος της παρούσας διπλωματικής διερευνά την θερμική συμπεριφορά ενός χώρου διαστάσεων 10x10x3 m στην περιοχή της Αθήνας (γεωγραφικό πλάτος $\varphi=37,97^\circ$) την περίοδο του καλοκαιριού και την περίοδο του χειμώνα. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην διερεύνηση της επίδρασης που έχει στη θερμική συμπεριφορά του χώρου η διαφοροποίηση κάποιων παραμέτρων του όπως η αρχική του θερμοκρασία, το μηχανικό φορτίο και η θερμοχωρητικότητα. Τέλος αξιοποιώντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές. Για την επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ακρίβειας στους υπολογισμούς οι εσωτερικές θερμοκρασίες του χώρου υπολογίστηκαν με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (έμμεση διατύπωση). Για την πραγμάτωση αυτής της μελέτης συντάχθηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 70.

Κεφάλαιο 19

Υπολογισμός της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτιρίου.

Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για τον χειμώνα την 21 Δεκεμβρίου ενώ για το καλοκαίρι την 21 Ιουλίου. Η διακύμανση της εξωτερικής θερμοκρασίας υπολογίστηκε για τον χειμώνα από την σχέση $T_o(t)=10+7*\cos[2\pi(t-15)/24]$ και για το καλοκαίρι από την σχέση $T_o(t)=27+7*\cos[2\pi(t-15)/24]$. Η τιμή του συντελεστή συναγωγής ανάμεσα στους τοίχους και το περιβάλλον επιλέγεται ίση προς $h_{out}=16 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ενώ ανάμεσα στους τοίχους και τον εσωτερικό χώρο ίση προς $h_{in}=8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. (Οι τιμές αυτές προτείνονται από την *ASHRAE*).

Ακολουθεί η διαστρωμάτωση των εξωτερικών τοίχων και της οροφής. (Το πάτωμα έχει υπολογιστεί ως αδιαβατικό όριο).

Διαστρωμάτωση τοίχων

Η διαστρωμάτωση είναι κοινή για όλους τους τοίχους:

- Σοβάς 10mm
- Οπτοπλινθοδομή 60mm
- Μόνωση: Πλάκες διογκωμένης πολυστερίνης 50mm
- Οπτοπλινθοδομή 60mm
- Σοβάς 10mm

Διαστρωμάτωση οροφής

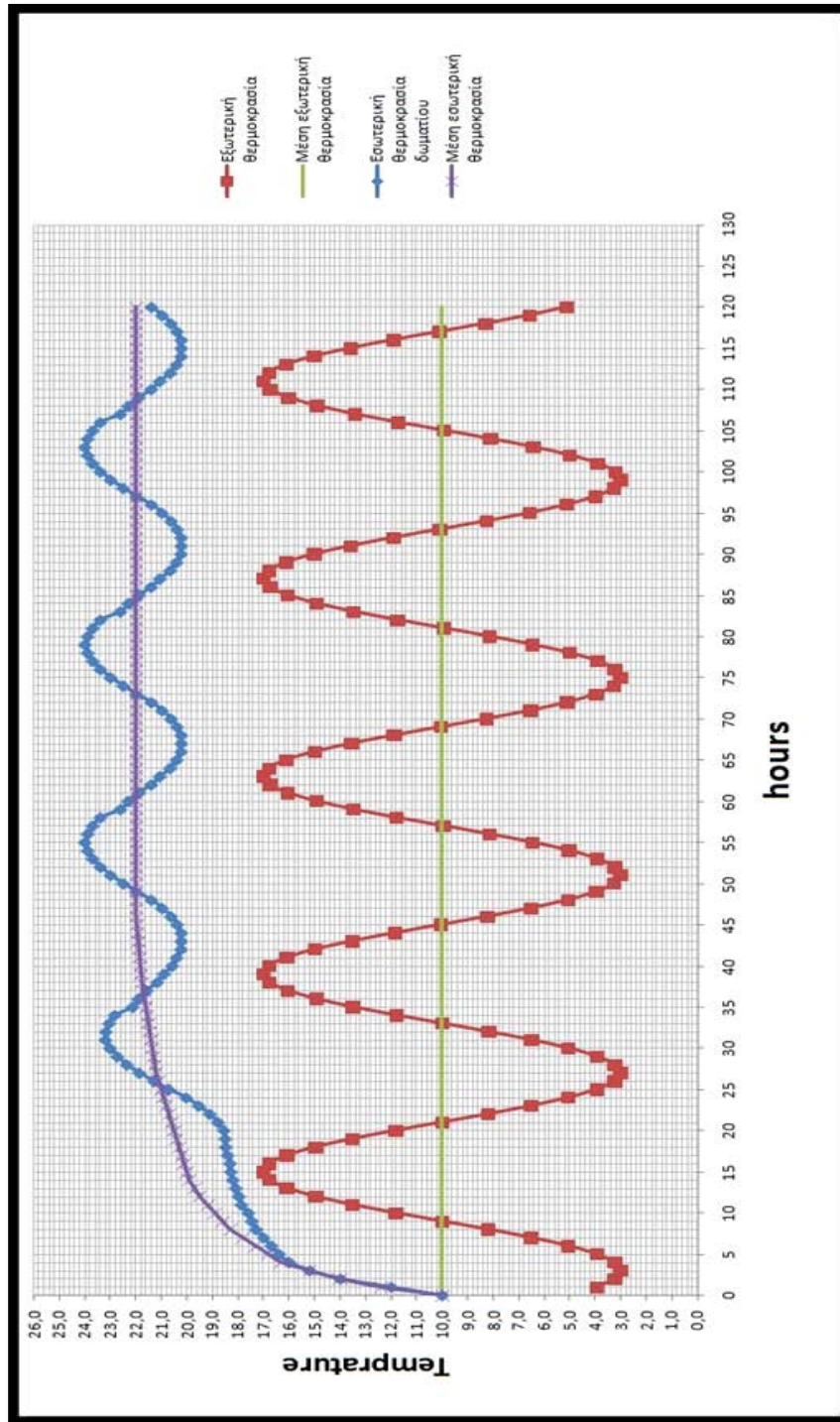
Η διαστρωμάτωση παρουσιάζεται από κάτω προς τα πάνω:

- Σοβάς 20mm
- Μόνωση: πλάκες εξηλασμένης πολυστερίνης 30mm
- Πλάκα σκυροδέματος 100mm

- Πλάκες 50mm Ακολουθούν τα διαγράμματα εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου για χειμώνα και καλοκαίρι

Ακολουθούν τα διαγράμματα της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας για χειμώνα και καλοκαίρι.

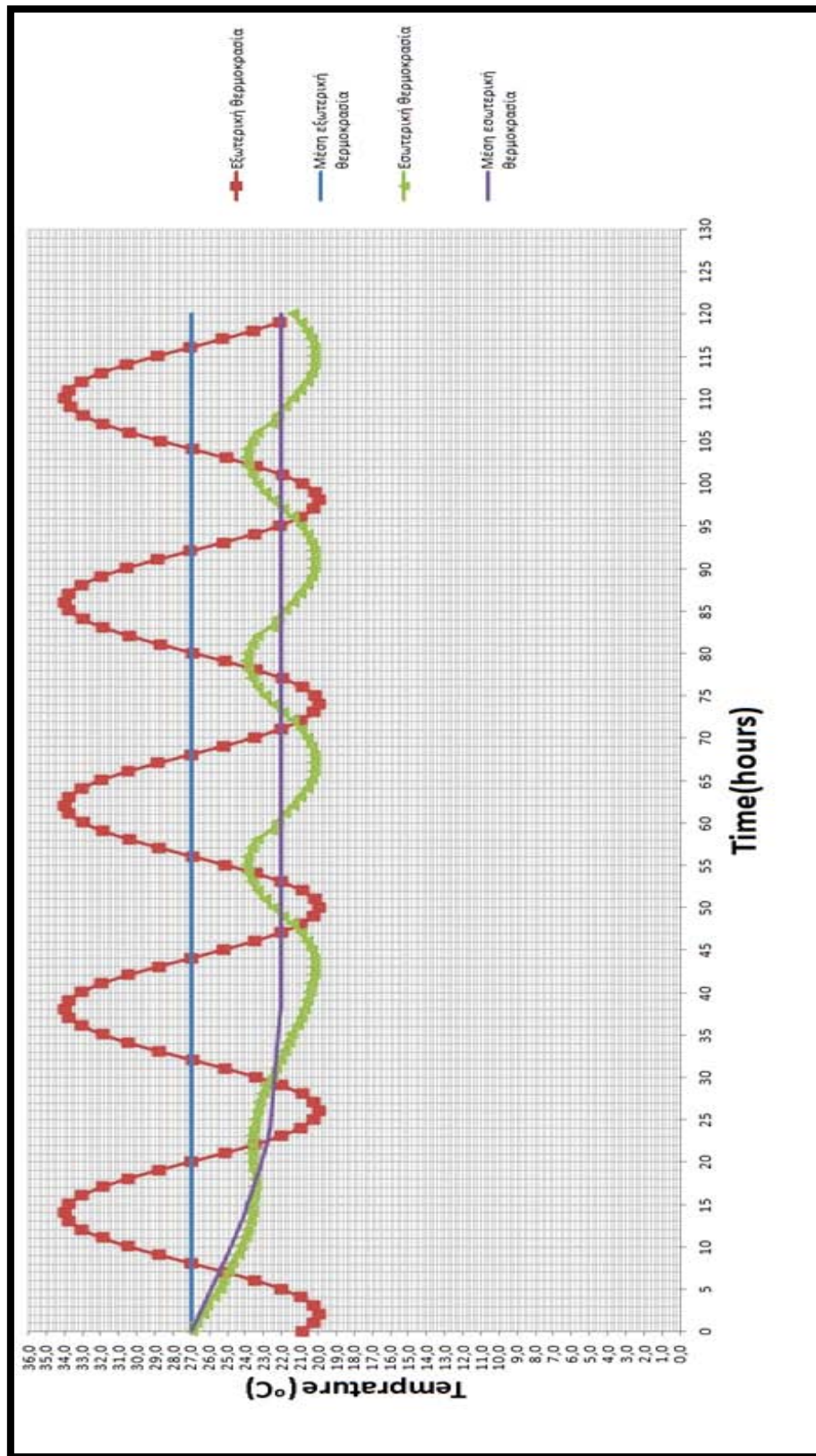
ΧΕΙΜΩΝΑΣ



Διάγραμμα 19.1: Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας την 21 Δεκεμβρίου

Παρατηρώντας το διάγραμμα 19.1 προκύπτουν τρία σημαντικά συμπεράσματα. Πρώτον ότι ενώ η εξωτερική θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 3 και 17 βαθμών κελσίου δηλαδή έχει μια διακύμανση της τάξεως των 14°C, η κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας κυμαίνεται (στην μόνιμη κατάσταση) μεταξύ 20 και 24 βαθμών κελσίου δηλαδή έχει μια διακύμανση της τάξεως των 4°C. Παρατηρούμε λοιπόν ότι οι εξωτερικοί τοίχοι και η οροφή του κτιρίου – το πάτωμα έχει οριστεί ως αδιαβατικό – επιδρούν σημαντικά στο πλάτος της ταλάντωσης μειώνοντας σε ποσοστό 71,4 %. Δεύτερον ότι κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας, από αρχική θερμοκρασία $T_0=10^{\circ}\text{C}$, φτάνει σε μόνιμη κατάσταση σε 47 ώρες. Στην μόνιμη κατάσταση η μέση εσωτερική θερμοκρασία είναι 22°C. Τρίτον παρατηρούμε επίσης ότι υπάρχει μια σημαντική χρονική υστέρηση μεταξύ εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας της τάξεως των 9 ωρών. Αυτό το φαινόμενο είναι ιδιαιτέρως σημαντικό γιατί μεταβιβάζει χρονικά τις μέγιστες θερμοκρασίες σε ώρες της ημέρας που δεν έχουν ηλιοφάνεια.

ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ



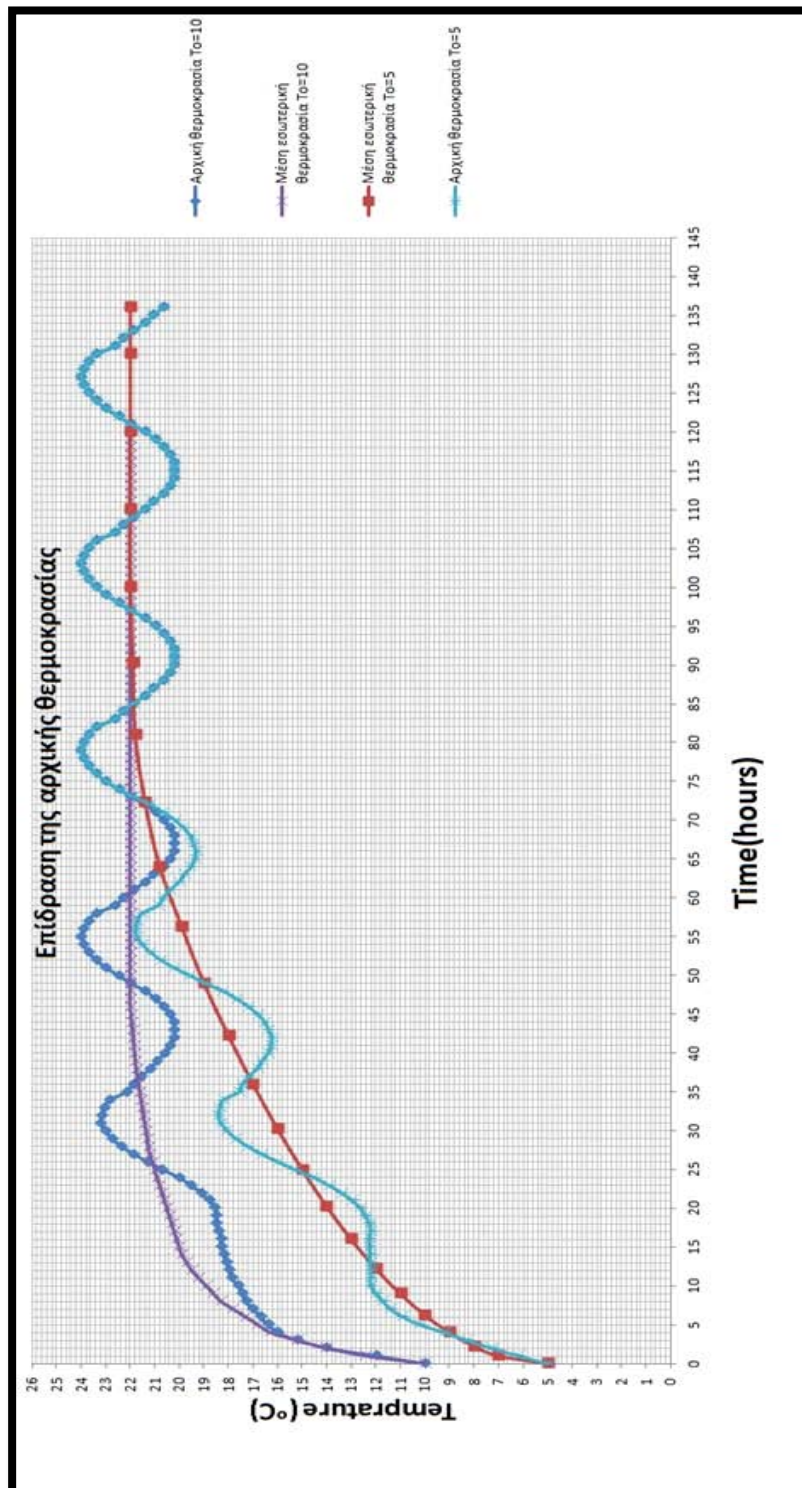
Διάγραμμα 19.2: Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας την 21 Ιουλίου.

Όπως και με το διάγραμμα 19.1, από το διάγραμμα 19.2 προκύπτουν τα ίδια τρία σημαντικά συμπεράσματα. Πρώτον ότι ενώ η εξωτερική θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 20 και 34 βαθμών κελσίου δηλαδή έχει μια διακύμανση της τάξεως των 14°C, η κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας κυμαίνεται (στην μόνιμη κατάσταση) μεταξύ 20 και 24 βαθμών κελσίου δηλαδή έχει μια διακύμανση της τάξεως των 4°C. Παρατηρούμε λοιπόν ότι οι εξωτερικοί τοίχοι και η οροφή του κτιρίου – το πάτωμα έχει οριστεί ως αδιαβατικό – επιδρούν σημαντικά στο πλάτος της ταλάντωσης μειώνοντας σε ποσοστό 71,4 %. Δεύτερον ότι κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας, από αρχική θερμοκρασία $T_0=27^{\circ}\text{C}$, φτάνει σε μόνιμη κατάσταση σε 38 ώρες. Στην μόνιμη κατάσταση η μέση εσωτερική θερμοκρασία είναι 22°C. Τρίτον παρατηρούμε επίσης ότι υπάρχει μια σημαντική χρονική υστέρηση μεταξύ εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας της τάξεως των 8 ωρών.

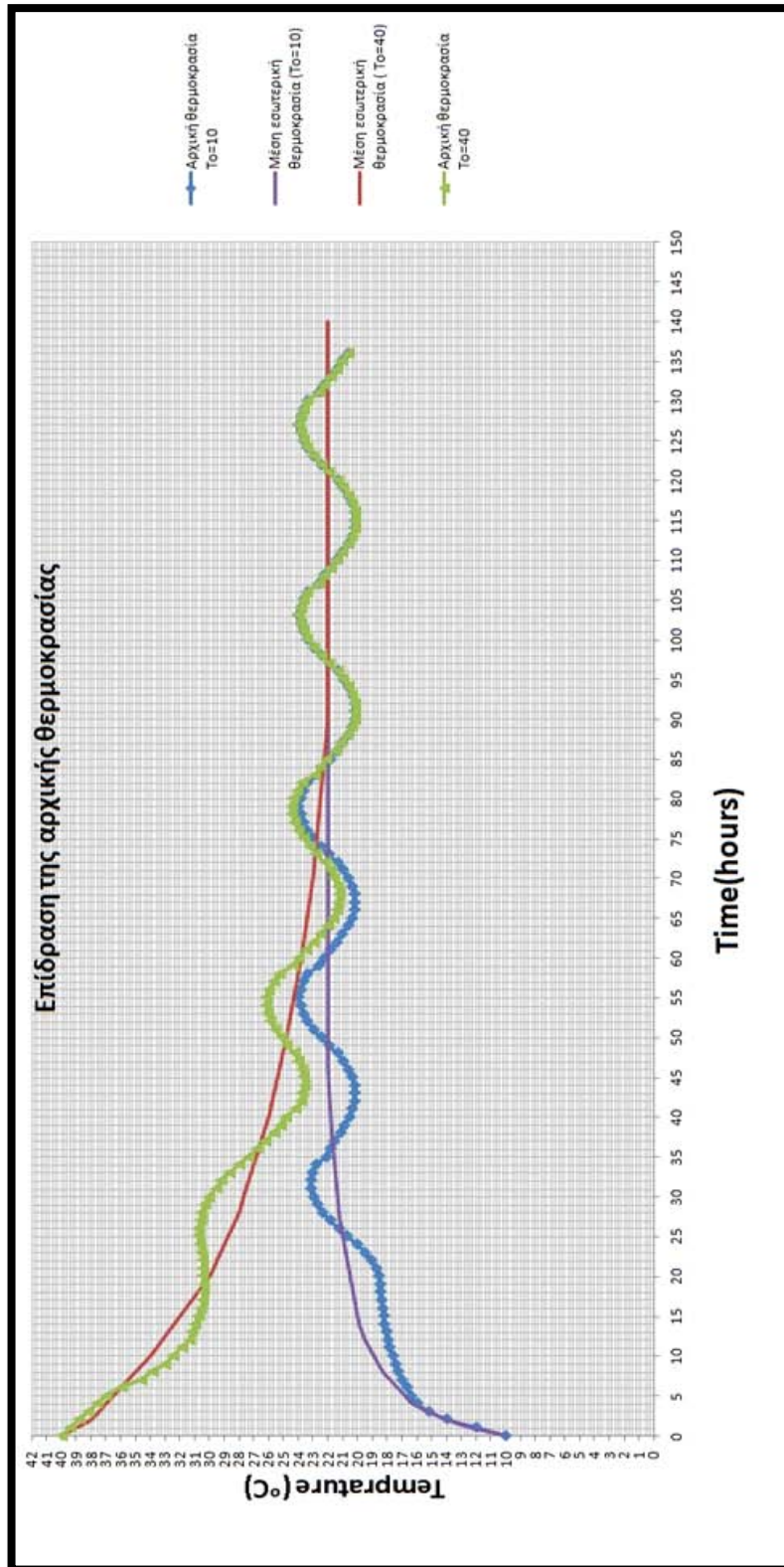
Κεφάλαιο 20

Διερεύνηση της επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας T_0 στην κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας.

ΧΕΙΜΩΝΑΣ



Διάγραμμα 20.1: Συγκριτικό διάγραμμα των κατανομών της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου ξεκινώντας από διαφορετικές αρχικές θερμοκρασίες $T_0=10^{\circ}\text{C}$ και $T_0=5^{\circ}\text{C}$.



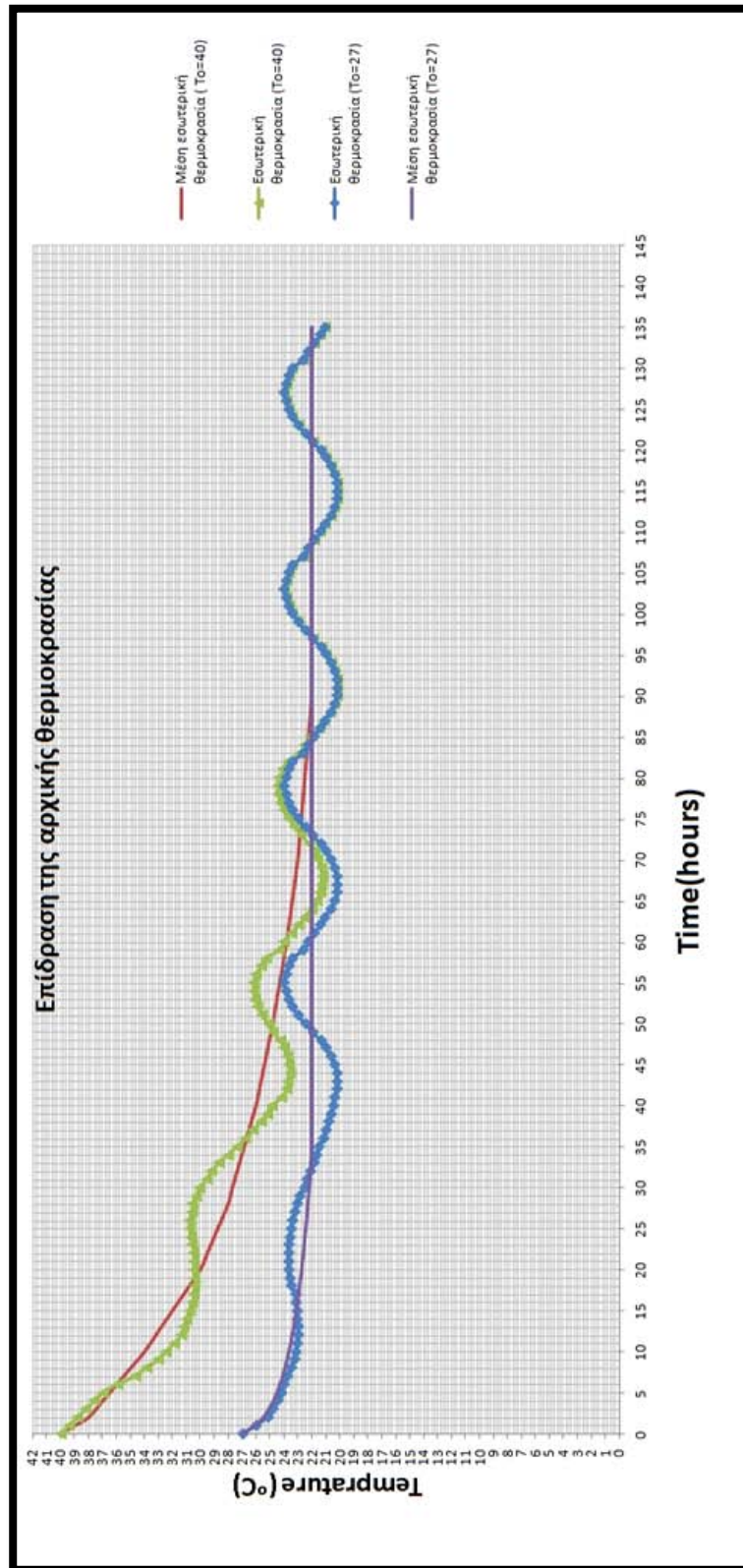
Διάγραμμα 20.2: Συγκριτικό διάγραμμα των κατανομών της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου ξεκινώντας από διαφορετικές αρχικές θερμοκρασίες $T_0=10^\circ\text{C}$ και $T_0=40^\circ\text{C}$

Παρατηρώντας τα διαγράμματα 20.1 και 20.2 γίνεται σαφές ότι διαφοροποιώντας την αρχική εσωτερική θερμοκρασία Το προκύπτει σημαντική διαφοροποίηση στο χρόνο που χρειάζεται για να μονιμοποιηθεί η ταλάντωση της εσωτερικής θερμοκρασίας.

Μειώνοντας την αρχική θερμοκρασία από 10°C σε 5°C παρατηρούμε ότι η καμπύλη από 47 ώρες που χρειαζόταν προκειμένου να φτάσει τους 22°C (μέση τιμή της μόνιμης κατάστασης) τώρα χρειάζεται 91 ώρες.

Από την άλλη αυξάνοντας την αρχική θερμοκρασία από 10°C σε 40°C παρατηρούμε ότι απαιτούνται για την μονιμοποίηση της ταλάντωσης εσωτερικής θερμοκρασίας 92 ώρες.

Γίνεται επομένως πλήρως αντιληπτό ότι μεταβάλλοντας την αρχική εσωτερική θερμοκρασία του χώρου σε κάποιο χρονικό διάστημα θα μονιμοποιηθεί η ταλάντωση με την ίδια περίοδο και πλάτος ανεξαρτήτως αρχικής θερμοκρασίας αλλά το χρονικό διάστημα που θα συμβεί αυτό μεταβάλλεται σημαντικά. Συγκεκριμένα όσο αυξάνει η διαφορά μεταξύ της αρχικής θερμοκρασίας και της μέσης τιμής της θερμοκρασίας κατά την μόνιμη κατάσταση τόσο αυξάνεται και ο χρόνος μονιμοποίησης του συστήματος.



Διάγραμμα 20.3: Συγκριτικό διάγραμμα των κατανομών της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου ξεκινώντας από διαφορετικές αρχικές θερμοκρασίες $T_o=27^{\circ}\text{C}$ και $T_o=40^{\circ}\text{C}$

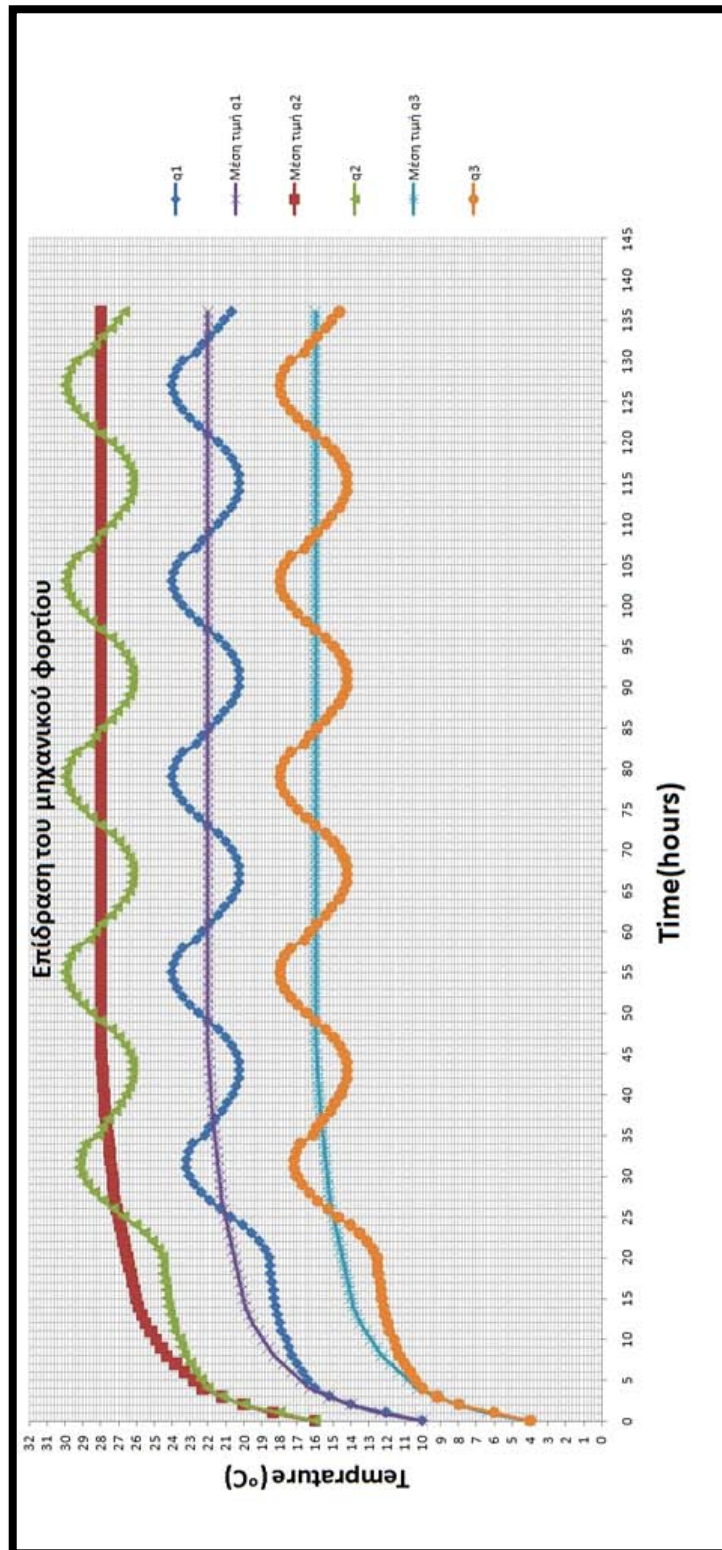
Όπως και στην περίπτωση του χειμώνα ,με τον ίδιο τρόπο και το καλοκαίρι διαφοροποιώντας την αρχική εσωτερική θερμοκρασία Το προκύπτει σημαντική διαφοροποίηση στο χρόνο που χρειάζεται για να μονιμοποιηθεί η ταλάντωση της εσωτερικής θερμοκρασίας.

Αυξάνοντας την αρχική θερμοκρασία από 27 °C σε 40 °C παρατηρούμε ότι ενώ με αρχική θερμοκρασία 27 °C απαιτούνται για την μονιμοποίηση της ταλάντωσης εσωτερικής θερμοκρασίας 34 ώρες όταν ορίσουμε ως αρχική θερμοκρασία τους 40°C πλέον απαιτούνται 92 ώρες επιβεβαιώνοντας ξανά την διαπίστωση ότι όσο αυξάνει η διαφορά μεταξύ της αρχικής θερμοκρασίας και της μέσης τιμής της θερμοκρασίας κατά την μόνιμη κατάσταση τόσο αυξάνεται και ο χρόνος μονιμοποίησης του συστήματος.

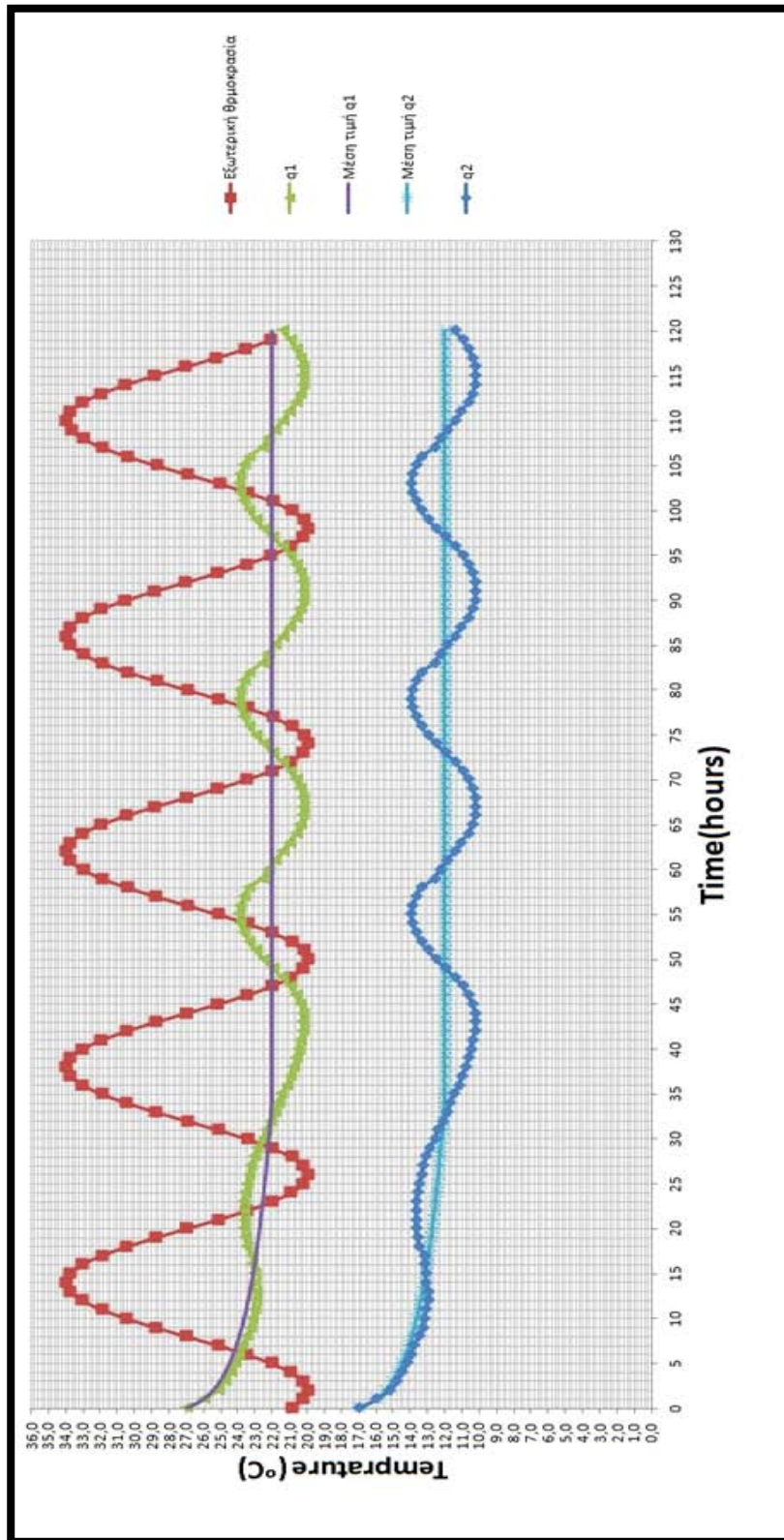
Κεφάλαιο 21

Διερεύνηση της επίδραση του μηχανικού φορτίου στην κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας.

ΧΕΙΜΩΝΑΣ



Διάγραμμα 21.1: Συγκριτικό διάγραμμα της επίδρασης του μηχανικού φορτίου στην κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας
 $q_1=75 \text{ W/m}^2$, $q_2=100 \text{ W/m}^2$, $q_3=50 \text{ W/m}^2$



Διάγραμμα 21.2: Συγκριτικό διάγραμμα της επίδρασης του μηχανικού φορτίου στην κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας $q_1=50\text{W/m}^2$, $q_2=100\text{ W/m}^2$

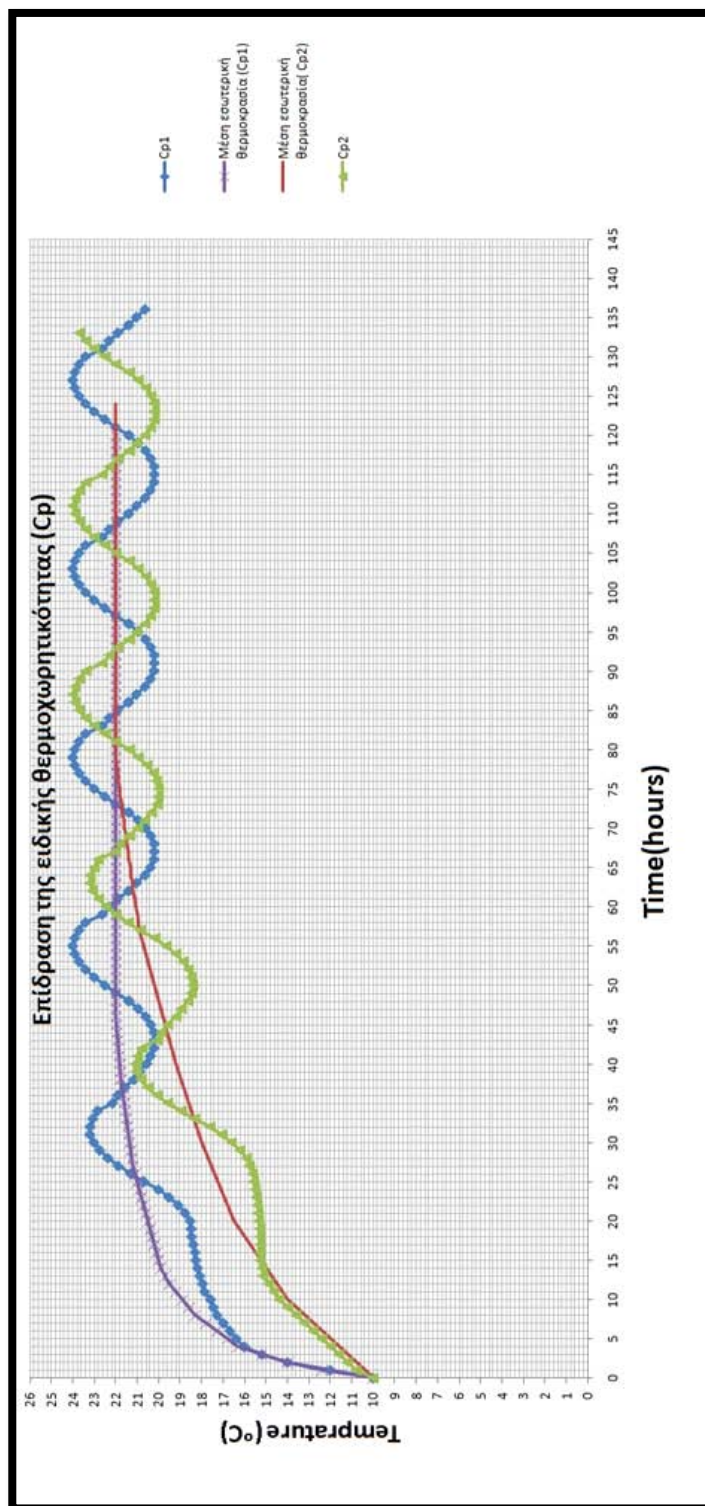
Από τα διαγράμματα 21.1 και 21.2 παρατηρούμε την επίδραση του μηχανικού φορτίου είτε ως θέρμανση (21.1) είτε ως ψύξη (21.2) στην κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας. Μεταβάλλοντας το μηχανικό φορτίο μετατίθεται το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο βρίσκεται η κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας. Το χειμώνα όσο αυξάνεται το μηχανικό φορτίο (+q _ θέρμανση) τόσο μετατίθεται προς τα πάνω και το θερμοκρασιακό εύρος. Αντίστοιχα το καλοκαίρι όσο αυξάνεται το μηχανικό φορτίο (-q _ ψύξη) τόσο μετατίθεται προς τα κάτω και το θερμοκρασιακό εύρος.

Αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι ότι η μεταβολή του μηχανικού φορτίου είτε χειμώνα είτε καλοκαίρι δεν επηρεάζει καθόλου την περίοδο και το πλάτος της ταλάντωσης της εσωτερικής θερμοκρασίας. Επίσης δεν επηρεάζει ούτε την χρονική καθυστέρηση μεταξύ της εξωτερικής και εσωτερικής θερμοκρασίας.

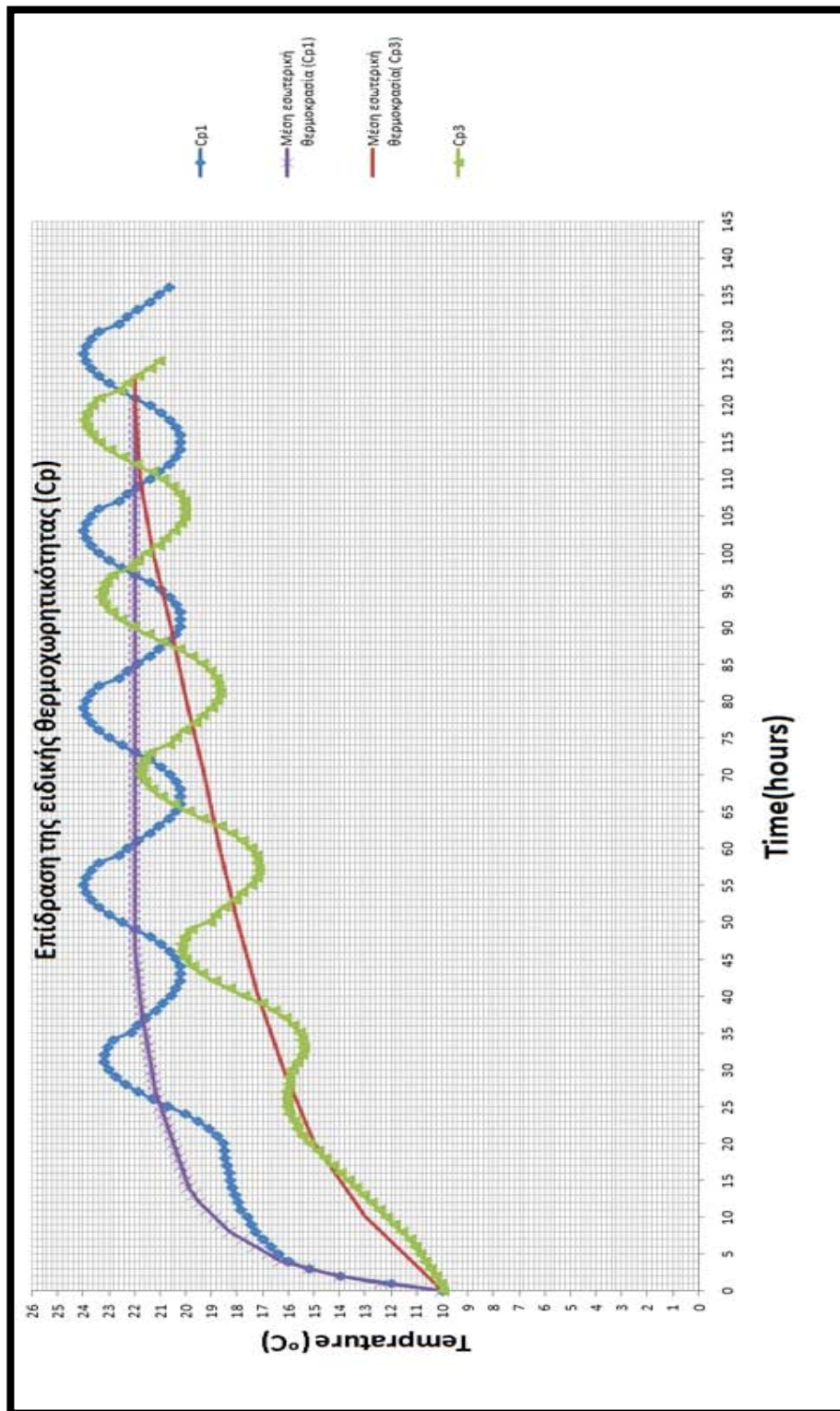
Κεφάλαιο 22

Διερεύνηση της επίδρασης της ειδικής θερμοχωρητικότητας στην κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας

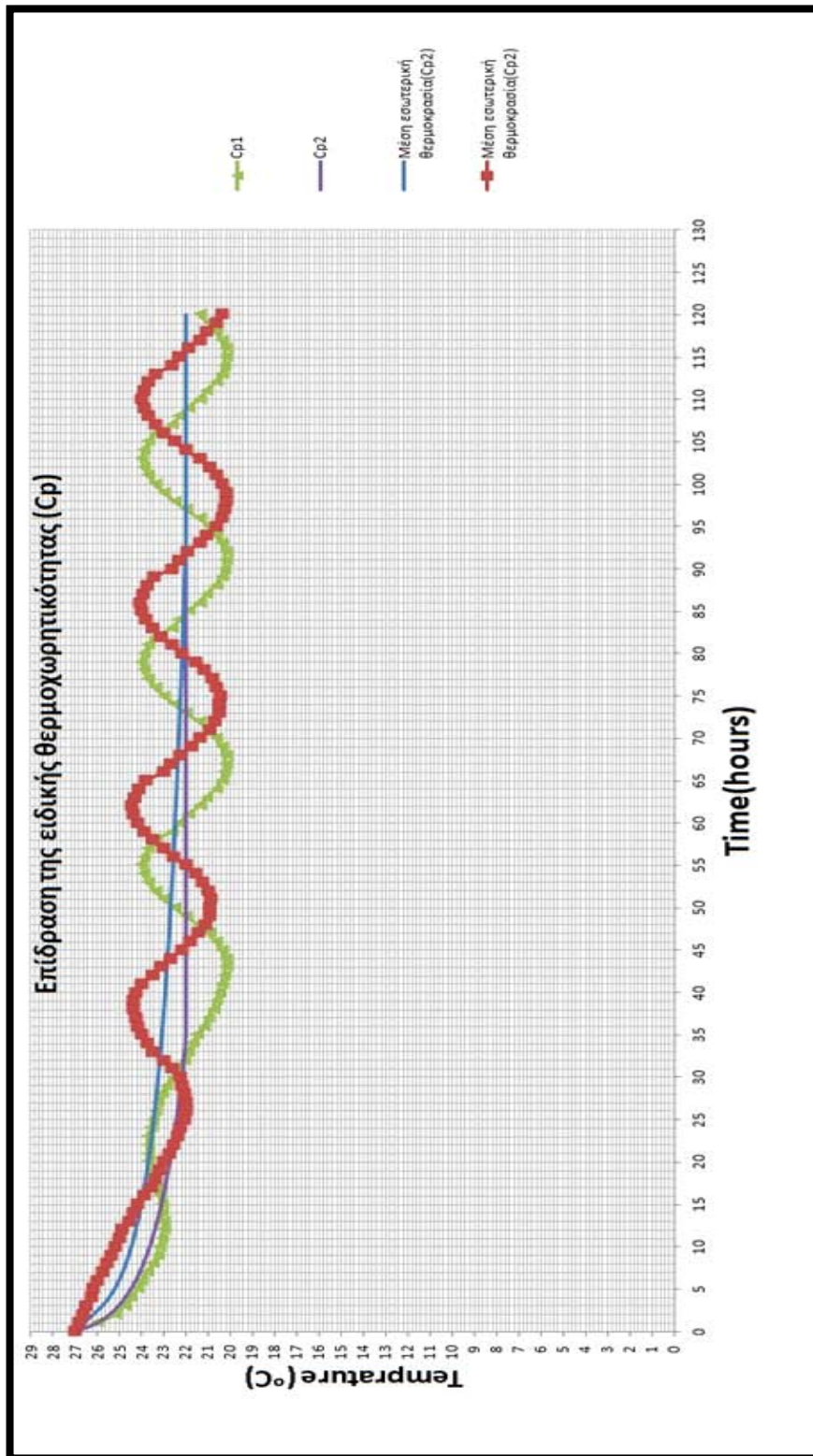
ΧΕΙΜΩΝΑΣ



Διάγραμμα 22.1: Συγκριτικό διάγραμμα της επίδρασης της ειδικής θερμοχωρητικότητας στην κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας



Διάγραμμα 22.2: Συγκριτικό διάγραμμα της επίδρασης της ειδικής θερμοχωρητικότητας στην κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας



Διάγραμμα 22.3: Συγκριτικό διάγραμμα της επίδρασης της ειδικής θερμοχωρητικότητας στην κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας

Μελετώντας τα διαγράμματα (22.1),(22.2),(22.3) γίνεται σαφής η κεφαλαιώδης σημασία της θερμοχωρητικότητας στην θερμική συμπεριφορά κτιρίων. Από τη μια μεριά μετατρέπει τις μεγάλες ημερήσιες εξωτερικές μεταβολές της θερμοκρασίας σε μικρές διακυμάνσεις στο εσωτερικό του χώρου και από την άλλη πραγματοποιεί μία χρονική μετατόπιση των φάσεων, επιβραδύνει δηλαδή την επίδραση της αλλαγής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του τοίχου και κατ' επέκταση και της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου.

Στο διάγραμμα (22.1) βλέπουμε ότι η αύξηση του Cr αυξάνει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την μονιμοποίηση της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας από 47 σε 78 ώρες ενώ προσθέτει και μια χρονική καθυστέρηση της τάξεως των 7 ωρών.

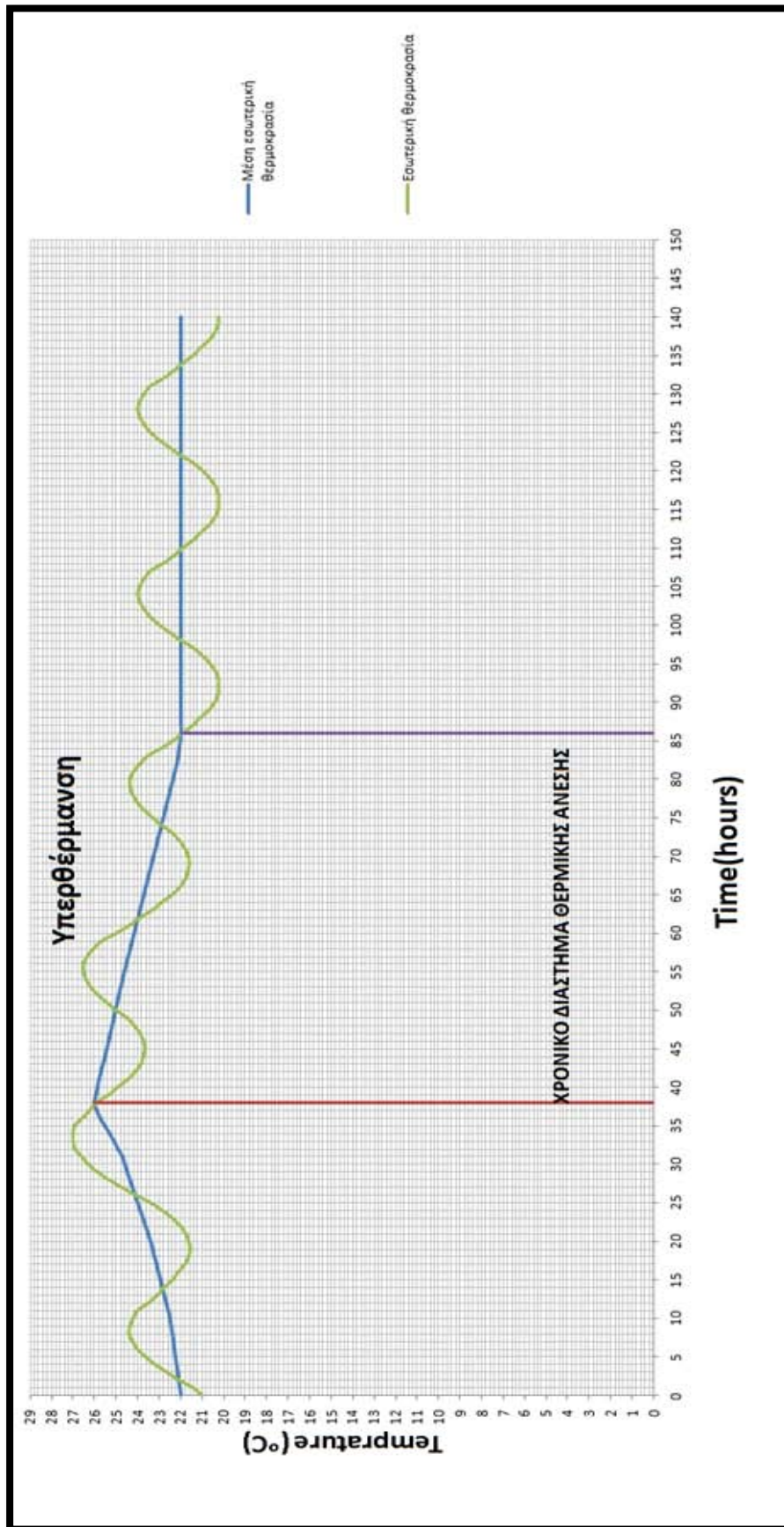
Στο διάγραμμα (22.2) βλέπουμε ότι η αύξηση του Cr αυξάνει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την μονιμοποίηση της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας από 47 σε 113 ώρες ενώ προσθέτει και μια χρονική καθυστέρηση της τάξεως των 15 ωρών

Ομοίως και την περίοδο του καλοκαιριού από το διάγραμμα (22.3) βλέπουμε ότι η αύξηση του Cr αυξάνει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την μονιμοποίηση της κατανομής της εσωτερικής θερμοκρασίας από 38 σε 81 ώρες ενώ προσθέτει και μια χρονική καθυστέρηση της τάξεως των 8 ωρών.

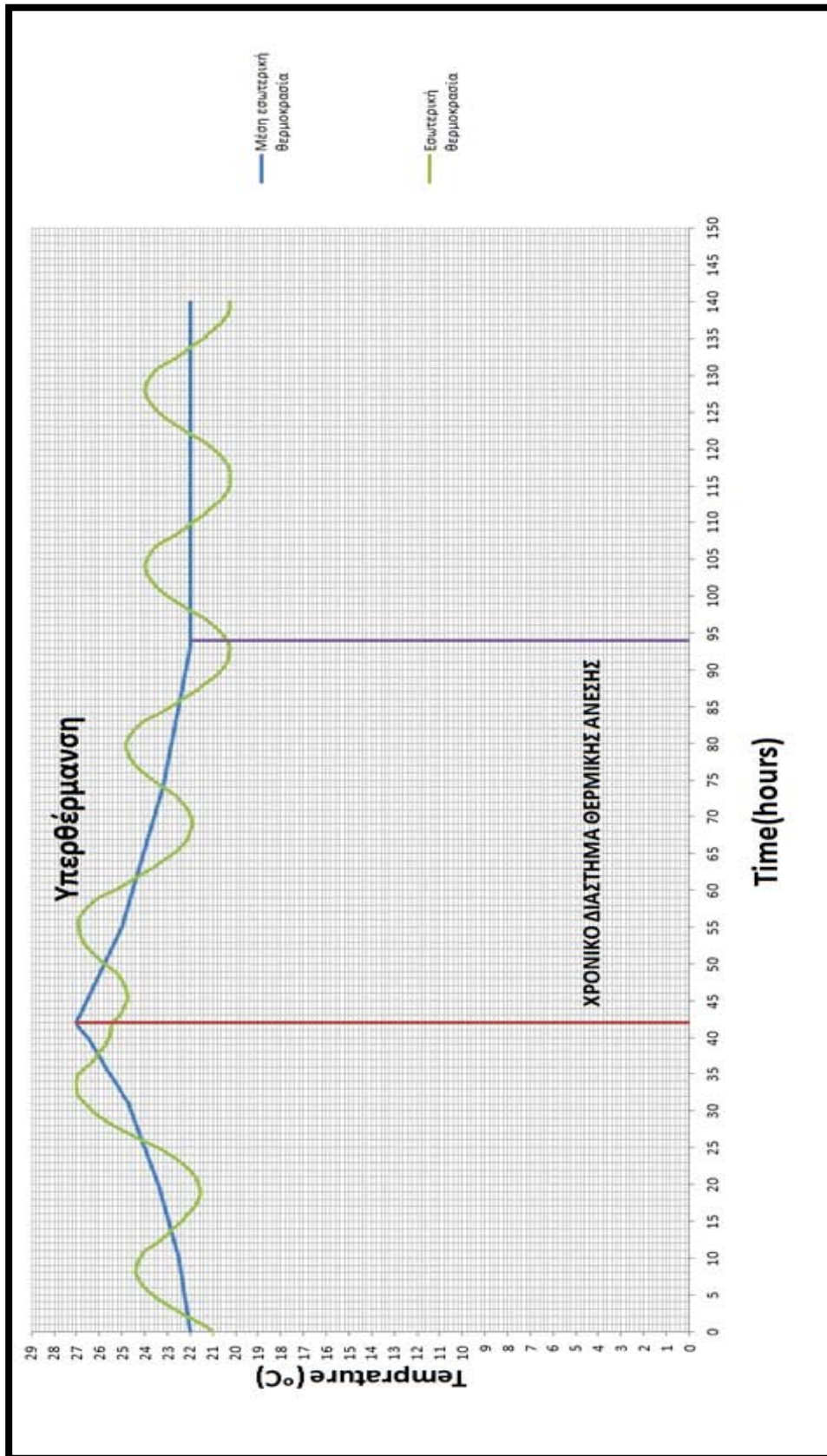
Εφαρμογή

Το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής και συγκεκριμένα η δυνατότητα παραμετροποίησης της ειδικής θερμοχωρητικότητας μπορεί να φανεί ως ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο με πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα σε μια χειμερινή εξοχική κατοικία με διαστάσεις 10x10x3 m, με μέση εσωτερική θερμοκρασία 10°C - χωρίς την επίδραση καμιά μορφής θέρμανση – μπορούμε να υπολογίσουμε το χρόνο που χρειάζεται για να φτάσει σε θερμοκρασίες θερμικής άνεσης ανάλογα με το αν η κατοικία αποτελείται μόνο από εξωτερικούς τοίχους Cr=,εάν έχει εσωτερικούς τοίχους, εάν έχει επίπλωση. Κάνοντας λοιπόν χρήση των διαγραμμάτων (22.1) και (22.2) προκύπτει ότι στην περίπτωση που η κατοικία αποτελείτο μόνο από εξωτερικούς τοίχους τότε θα χρειαζόμασταν χρονικό διάστημα 6 ωρών μέχρι να βρεθούμε σε θερμοκρασίες θερμικής άνεσης (>18°C). Εάν διέθετε και εσωτερικούς τοίχους τότε θα χρειαζόμασταν χρονικό διάστημα 25 ωρών .Ενώ εάν διέθετε και επίπλωση 51 ώρες.

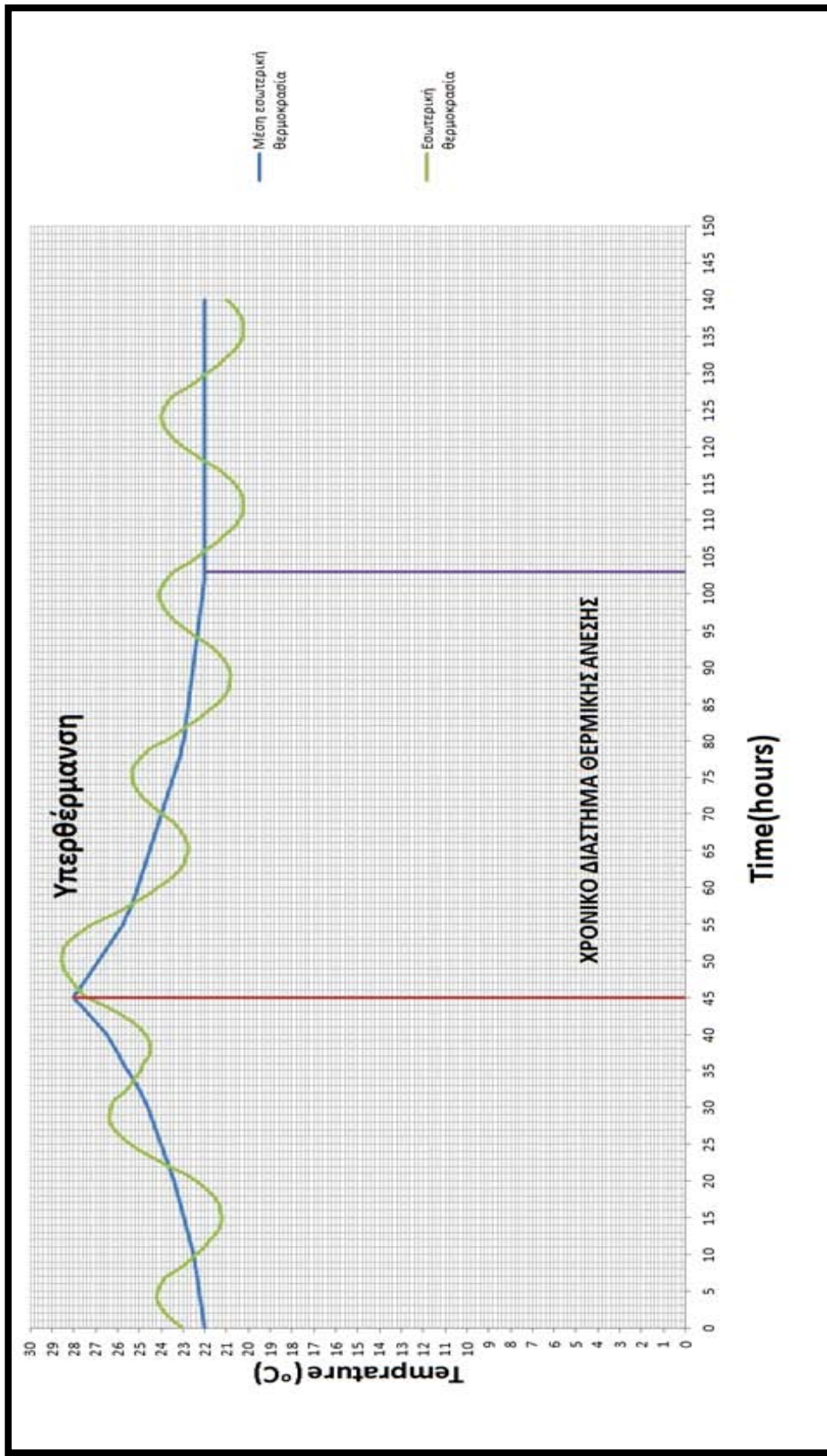
Κεφάλαιο 23 Υπερθέρμανση



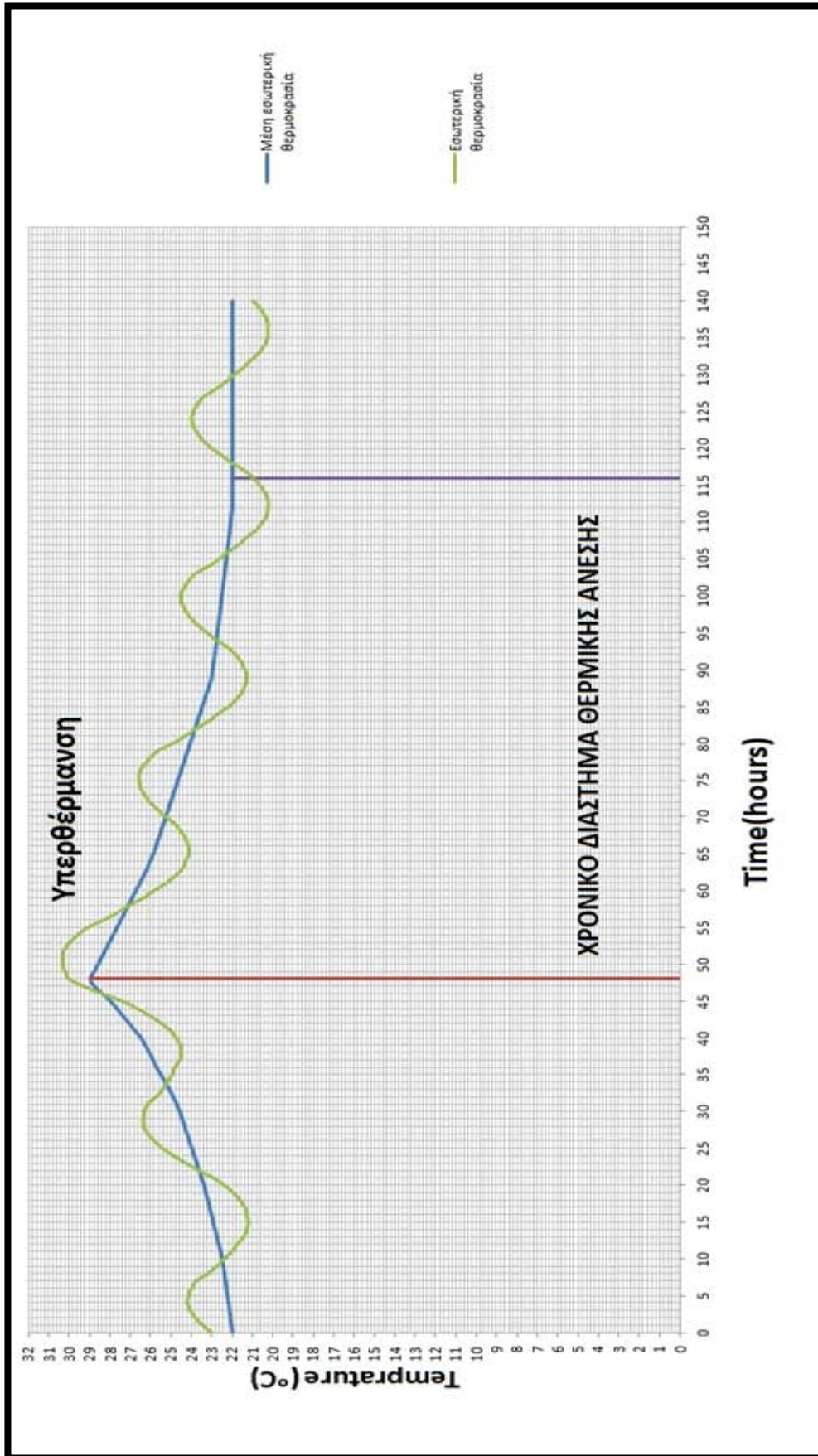
Διάγραμμα 23.1: Υπερθέρμανση στους 26°C



Διάγραμμα 23.2: Υπερθέρμανση στους 27°C

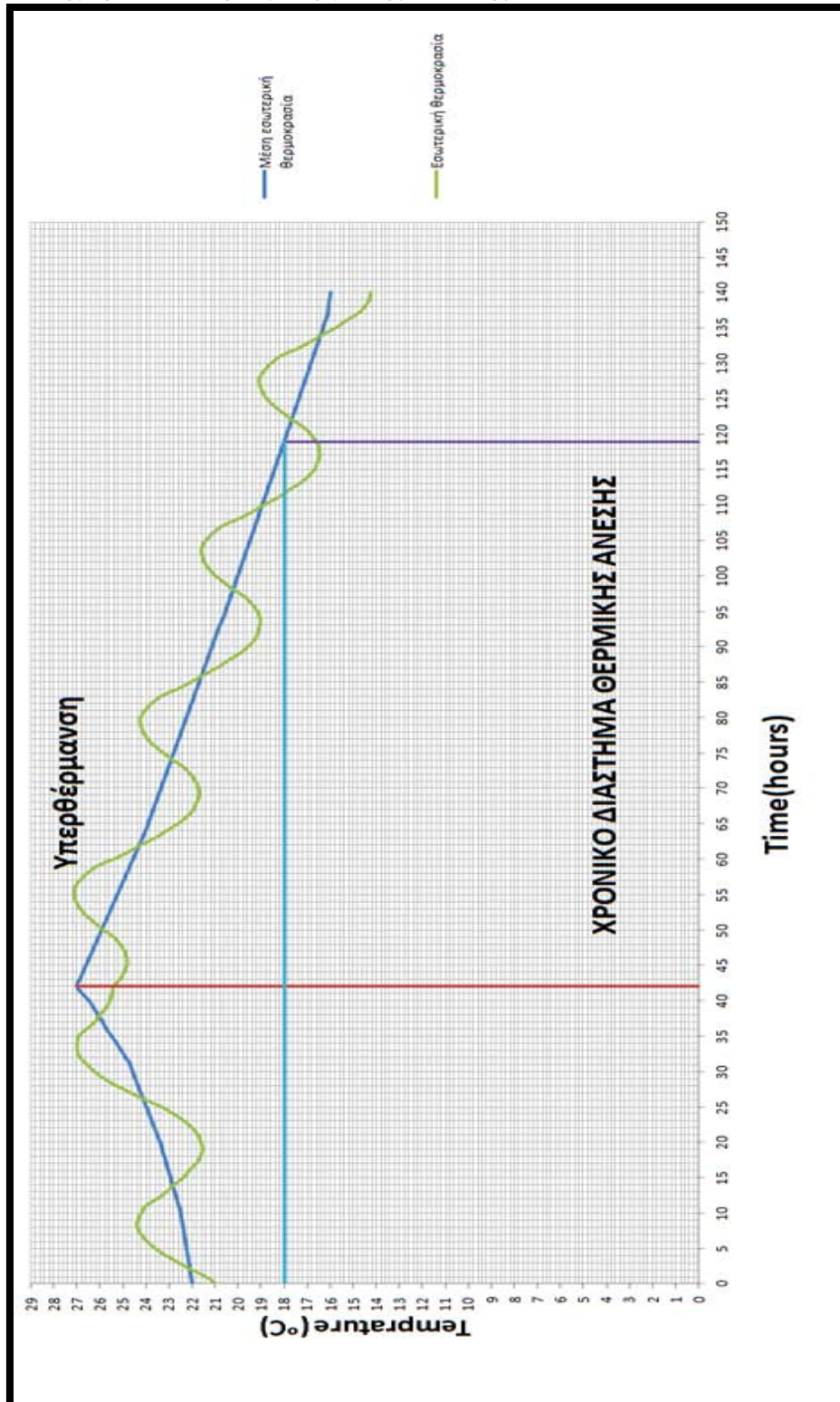


Διάγραμμα 23.3: Υπερθέρμανση στους 28°C

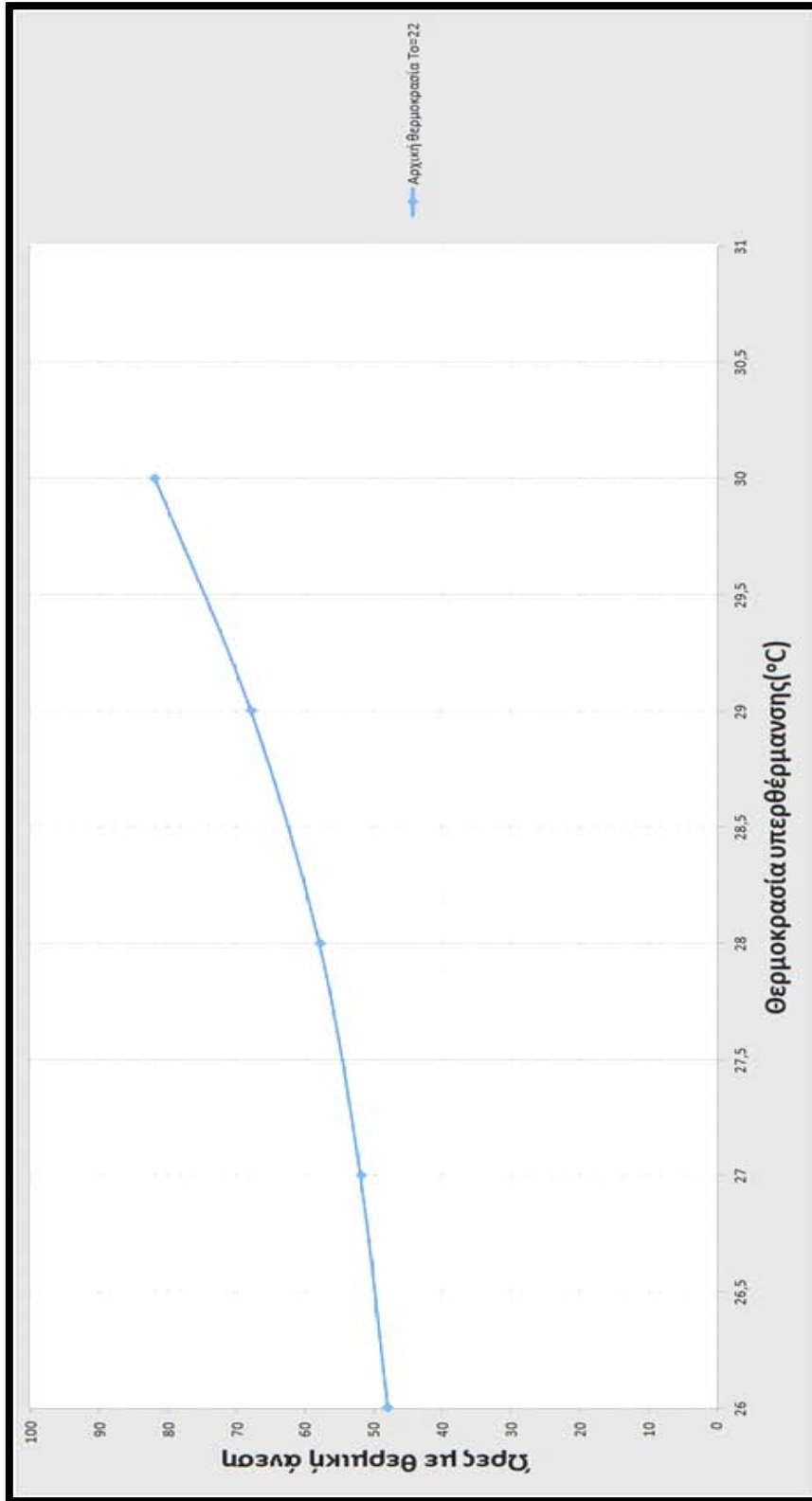


Διάγραμμα 23.4: Υπερθέρμανση στους 29°C

Στα προηγούμενα διαγράμματα οι υπολογισμοί έγιναν έως ότου η θερμοκρασία επανέλθει στην αρχική θερμοκρασία (22°C) ,ακολουθεί ένα διάγραμμα όπου το μηχανικό φορτίο δεν επανέρχεται ποτέ και βλέπουμε το μέγιστο χρονικό διάστημα που επικρατούν στο χώρο συνθήκες θερμικής άνεσης.



Διάγραμμα 23.5: Υπερθέρμανση στους 27°C.



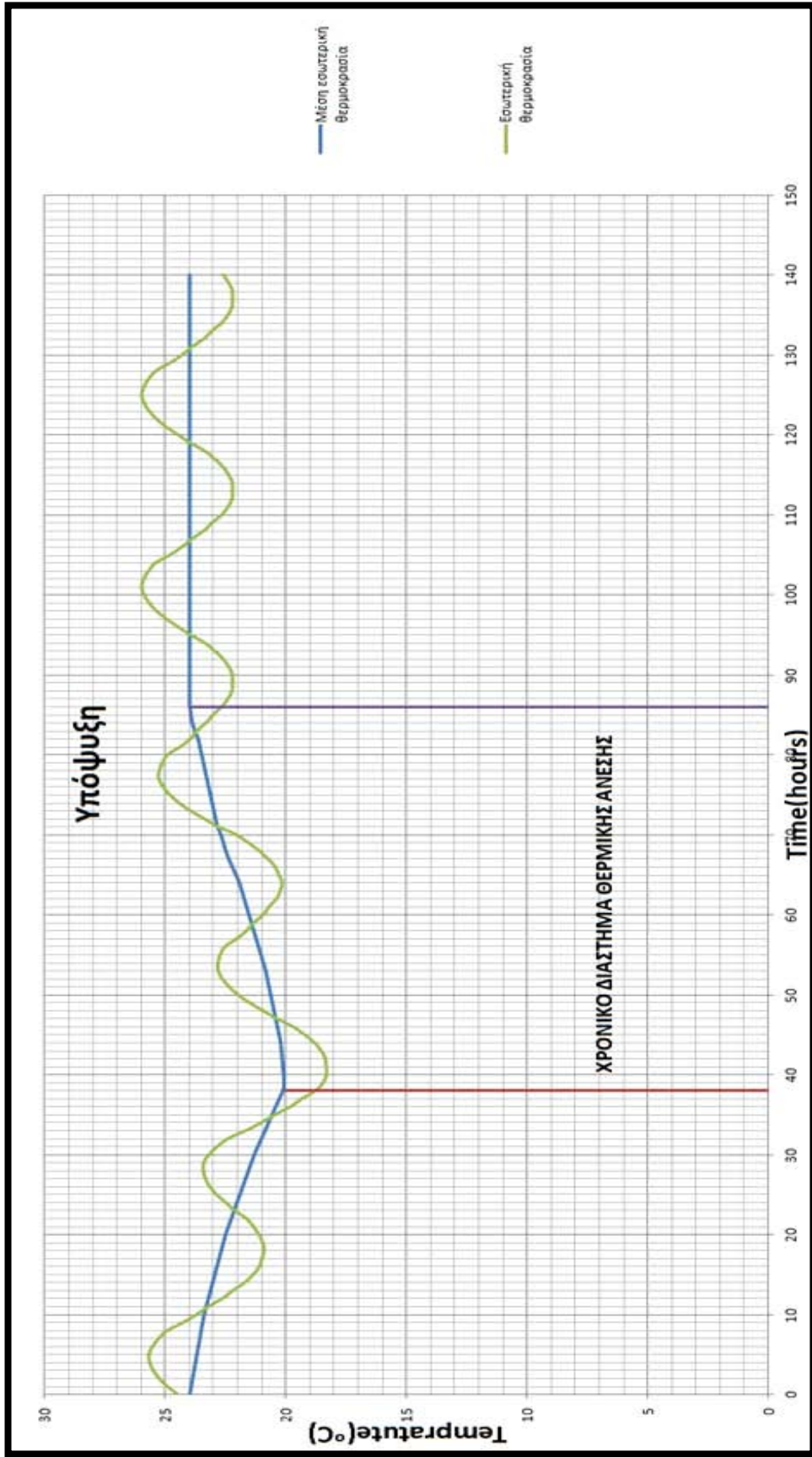
Διάγραμμα 23.6: Επίδραση της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης στο χρονικό διάστημα με θερμική άνεση.

Από τα διαγράμματα που προηγήθηκαν γίνεται εμφανές ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία υπερθέρμανσης τόσο αυξάνεται και το χρονικό διάστημα που η θερμοκρασία κυμαίνεται σε επίπεδα θερμικής άνεσης.

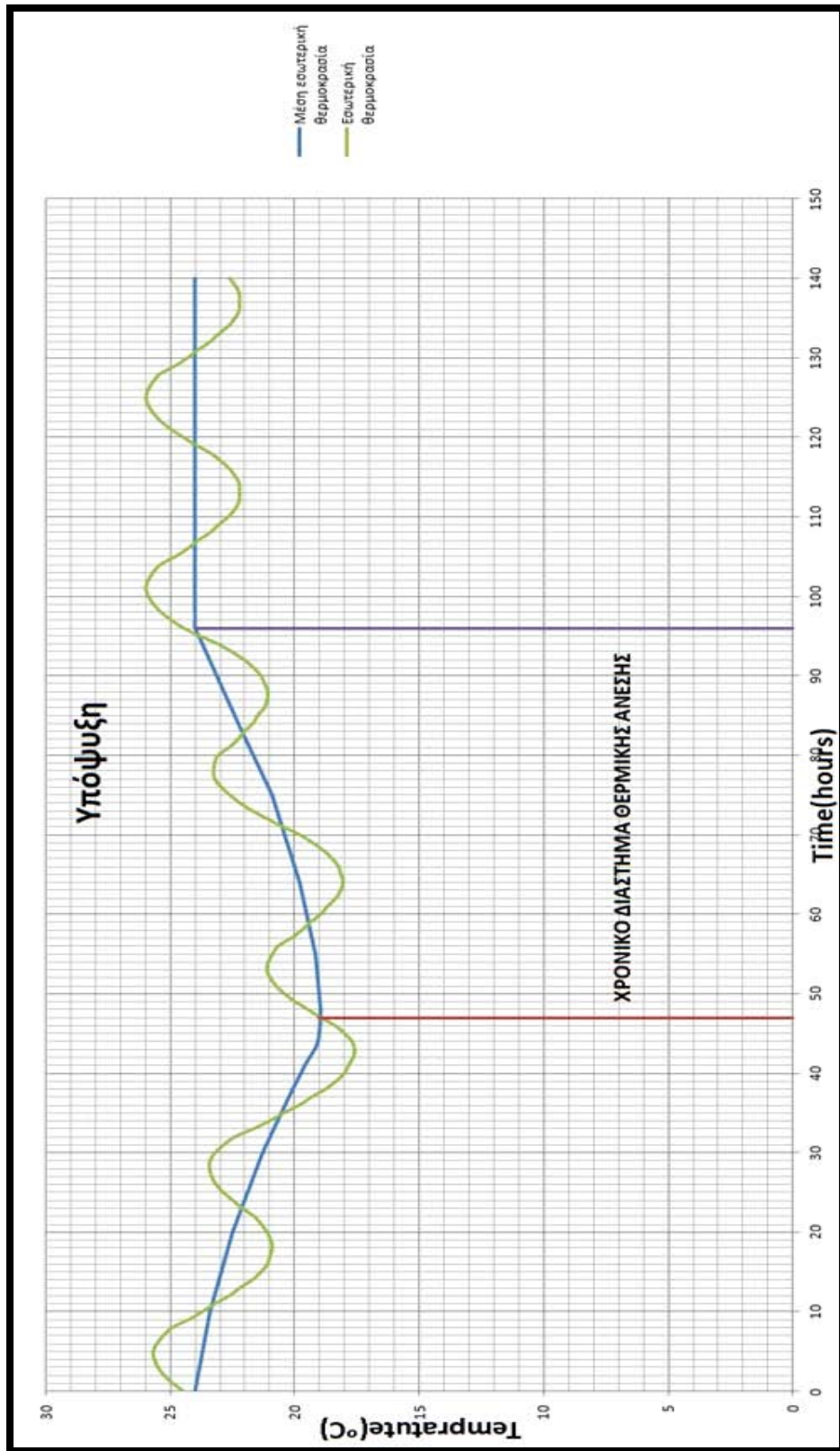
Ενδεικτικά όπως φαίνεται από τα διαγράμματα (23.1)-(23.4) αλλά και από το συγκεντρωτικό (23.5) για αύξηση της θερμοκρασίας από 20 σε 26 °C ακολουθούν 49 ώρες θερμικής άνεσης (Προφανώς έχοντας πλέον μηδενίσει το μηχανικό φορτίο-θέρμανση). Για αύξηση της θερμοκρασίας από 20 σε 27°C ακολουθούν 52 ώρες θερμικής άνεσης. Για αύξηση της θερμοκρασίας από 20 σε 28°C ακολουθούν 58 ώρες θερμικής άνεσης. Τέλος για αύξηση της θερμοκρασίας από 20 σε 28°C ακολουθούν 68 ώρες θερμικής άνεσης.

Κεφάλαιο 24

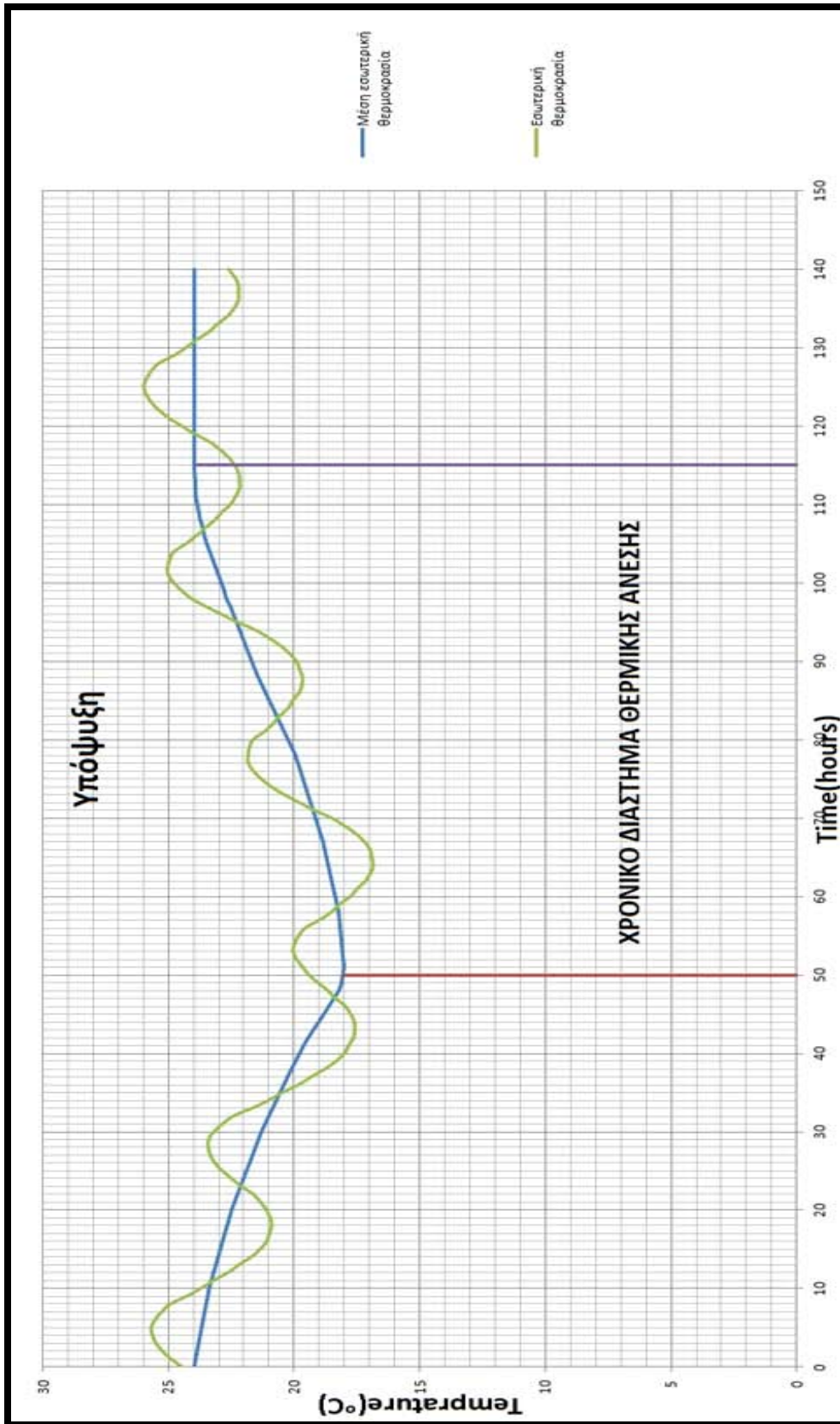
Υπόψυξη



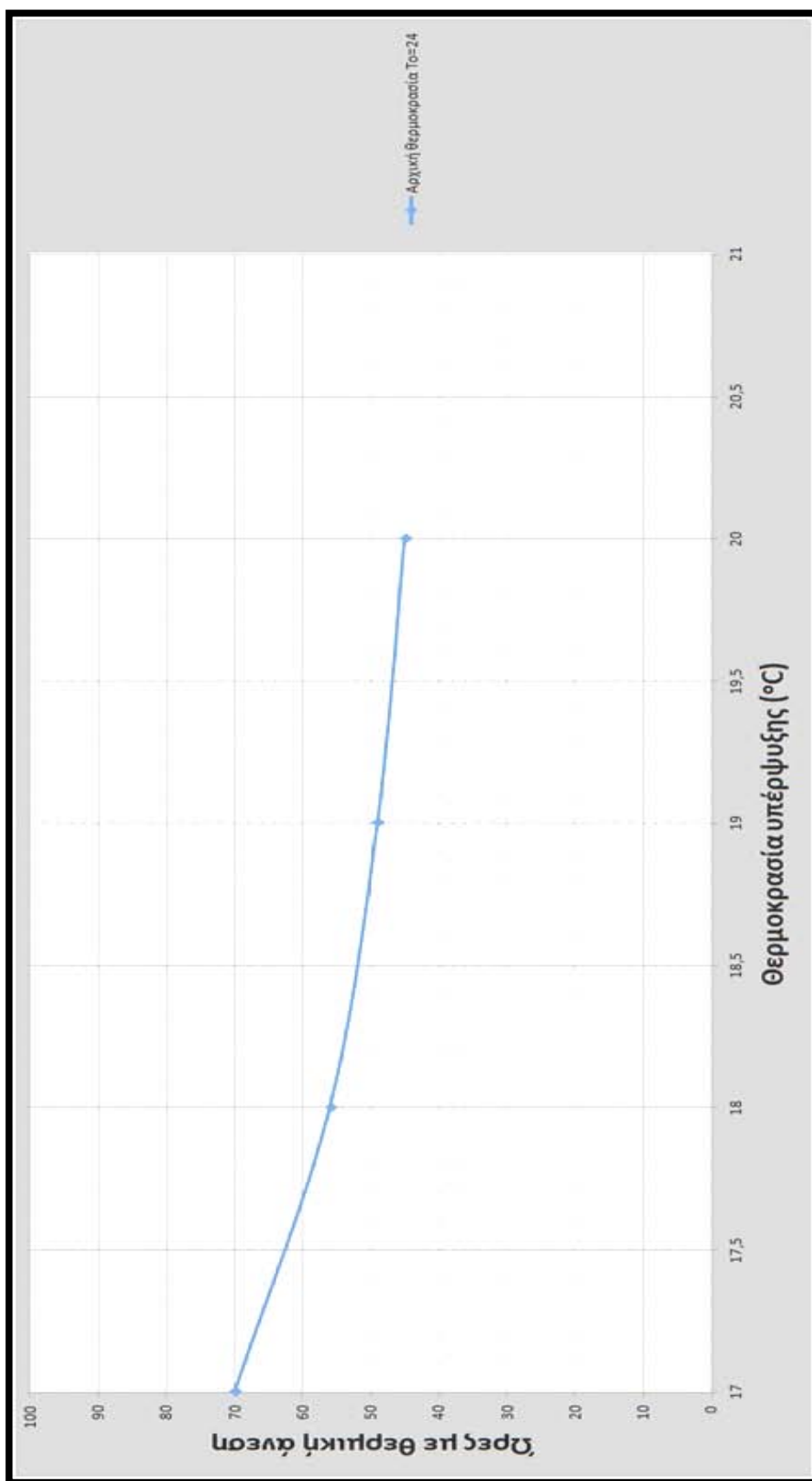
Διάγραμμα 24.1: Υπόψυξη στους 18°C



Διάγραμμα 24.2: Υπόψυξη στους 19°C



Διάγραμμα 24.3: Υπόψυξη στους 18°C



Διάγραμμα 24.4: Επίδραση της θερμοκρασίας υπόψυξης στο χρονικό διάστημα με θερμική άνεση.

Από τα διαγράμματα που προηγήθηκαν γίνεται εμφανές ότι όσο μειώνεται η θερμοκρασία υπόψυξης τόσο αυξάνεται και το χρονικό διάστημα που η θερμοκρασία κυμαίνεται σε επίπεδα θερμικής άνεσης.

Ενδεικτικά όπως φαίνεται από τα διαγράμματα (24.1)-(24.3) αλλά και από το συγκεντρωτικό (24.4) για μείωση της θερμοκρασίας από 24 σε 20 °C ακολουθούν 45 ώρες θερμικής άνεσης (Προφανώς έχοντας πλέον μηδενίσει το μηχανικό φορτίο-ψύξη). Για μείωση της θερμοκρασίας από 24σε 19°C ακολουθούν 49 ώρες θερμικής άνεσης. Για μείωση της θερμοκρασίας από 24 σε 18°C ακολουθούν 56 ώρες θερμικής άνεσης. Τέλος για μείωση της θερμοκρασίας από 24 σε 17°C ακολουθούν 70 ώρες θερμικής άνεσης

Εφαρμογή

Η ανάγκη υπερθέρμανσης ή υπόψυξης ενός χώρου μπορεί να γίνει πραγματικότητα στην περίπτωση που βρισκόμαστε σε έναν χώρο και πληροφορηθούμε μια επικείμενη διακοπή ρεύματος. Κάνοντας χρήση αυτού του εργαλείου μπορούμε να υπολογίσουμε την θερμοκρασία που πρέπει να υπερθερμάνουμε ή να υπερψύξουμε τον χώρο έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα θερμικής άνεσης την περίοδο που πραγματοποιείται η διακοπή. Για παράδειγμα ένα κτίριο διαστάσεων 10x10x3 m , με αρχική θερμοκρασία 22°C εάν υπερθερμανθεί στους 27 °C και στην συνέχεια κοπεί το ρεύμα θα εξασφαλίσει για τους κατοίκους του συνθήκες θερμικής άνεσης για 77 ώρες.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας της βασικής μελέτης σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 70

program kwnstantinos

```
real delta,omega,Rb,z,dx,U,Tin,aa,bb
real Upar,Qw,Qe,Qn,Qs,Qpars,Qparw,Gtu1,Gtu2
real Texwest,Teleast,Texnorth,Textsouth,Textoteriko,Tar,Tarbr
real Texbrwest,Textbreast,Textbrnorth,Textbrsouth,Textoterikobr
real TT,A,B,C,R,E,T,Qp,x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x,Gb,Gd,Gt1,Gt2,Gt3,Tex,Texw,Telexe,
Texs,Texn
real Abr,Bbr,Cbr,Rbr,Ebr
integer Code,N,j,m,k,i,counter1,counter2,wres,hin,hout,dt,meres,counter3,counter4
parameter (maxN = 100)
dimension TT(maxN)
dimension A (maxN),Abr (maxN)
dimension B (maxN),Bbr (maxN)
dimension C (maxN),Cbr (maxN)
dimension R (maxN),Rbr (maxN)
dimension E (maxN),Ebr (maxN)
dimension T (maxN)
dimension Qp(maxN)
dimension x1(12),x2(12),x3(12),x4(12),x5(12),x6(12),x7(12),x(maxN),Tar(13)
dimension Gb(13),Gd(13),Gt1(13),Gt2(13),Gt3(13),Gt1br(13),Gt2br(13)
dimension Tex(13),Texw(13),Telexe(13),Texs(13),Texn(13), Tarbr(13)
dimension Texbr(13),Texbrw(13),Textbre(13),Textbrs(13),Textbrn(13)
```

!ZERO POINT

```
TT=0.0;A=0.0;B=0.0;C=0.0;R=0.0;E=0.0;T=0.0;Qp=0.0;x1=0.0;x2=0.0;x3=0.0;
x4=0.0;x5=0.0;x6=0.0;x7=0.0;x=0.0;Gb=0.0;Gd=0.0;Gt1=0.0;Gt2=0.0;Tex=0.0;
Texw=0.0;Telexe=0.0;Texs=0.0;Texn=0.0;Gt1br=0.0;Gt2br=0.0;Texbr=0.0;
Texbrw=0.0; Textbre=0.0;Textbrs=0.0;Textbrn=0.0
N=96
z=0.19
dx=z/(N-1)
x(1)=0
x(N)=z
hin=8
hout=16
dt=600
s3=3.14/180
fi=37.97*s3
meres=21 !Mhnas Dekembris
```

U=0.85
Upar=2.8
Tin=10
wres=7

open(1,file='pepe.dat')
open(2,file='Gt1_december.dat')
open(3,file='Gt2_december.dat')
open(4,file='Tex.dat')
open(5,file='Texw.dat')
open(6,file='Texs.dat')
open(7,file='Texe.dat')
open(8,file='Texn.dat')
open(9,file='1o_dekalepto.dat')
open(10,file='2o_dekalepto.dat')
open(11,file='3o_dekalepto.dat')
open(12,file='4o_dekalepto.dat')
open(13,file='5o_dekalepto.dat')
open(14,file='6o_dekalepto.dat')
open(15,file='A.dat')
open(16,file='B.dat')
open(17,file='R.dat')
open(18,file='C.dat')
open(19,file='Temp_triang.dat')
open(20,file='Teswteriko.dat')
 !!!bradu
open(21,file='Gt1_december_br.dat')
open(22,file='Gt2_december_br.dat')
open(23,file='Texbr.dat')
open(24,file='Texbrw.dat')
open(25,file='Texbrs.dat')
open(26,file='Texbre.dat')
open(27,file='Texbrn.dat')
open(28,file='1o_dekaleptobr.dat')
open(29,file='2o_dekaleptobr.dat')
open(30,file='3o_dekaleptobr.dat')
open(31,file='4o_dekaleptobr.dat')
open(32,file='5o_dekaleptobr.dat')
open(33,file='6o_dekaleptobr.dat')
open(34,file='Abr.dat')
open(35,file='Bbr.dat')
open(36,file='Rbr.dat')
open(37,file='Cbr.dat')

```

open(38,file='Temp_triangbr.dat')
open(40,file='Tarxiko.dat')
open(41,file='Tarxikobr.dat')

do j=1,12
  read(1,*) x1(j), x2(j), x3(j), x4(j), x5(j), x6(j) ,x7(j)
enddo
do j=1,13
  read(4,*) Tex(j)
  read(5,*) Texw(j)
  read(6,*) Texts(j)
  read(7,*) Texe(j)
  read(8,*) Texn(j)
  read(23,*)Texbr(j)
  read(24,*)Texbrw(j)
  read(25,*)Texbrs(j)
  read(26,*)Texbre(j)
  read(27,*)Texbrn(j)
  read(40,*)Tar(j)
  read(41,*)Tarbr(j)
enddo

```

!!!!!!!!!!!!!!!!AKTINOBOLIA GIA TO NOTIO PARATHYRO!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

do j=1,12
  Gb(j)= x1(j)+x2(j)*sin ((0.9863*meres-x3(j))*s3)
  Gd(j)= x4(j)+x5(j)*sin((0.9863*meres-x6(j))*s3)
  if (Gb(j) .lt. 0) then
    Gb(j)=0
  endif
  if (Gd(j) .lt.0) then
    Gd(j)=0
  endif
!upologismos Rb
delta=23.45*sin(0.9863*(284+meres)*s3)
omega=0.25*(x7(j)-12)*60
aa=-sin(delta*s3)*cos(fi)+cos(delta*s3)*sin(fi)*cos(omega*s3)
bb=sin(delta*s3)*sin(fi)+cos(delta*s3)*cos(fi)*cos(omega*s3)
Rb=aa/bb
!write(*,*) Rb
Gt1(j)=1000*(Gb(j)*Rb+Gd(j)/2+ (Gb(j)+Gd(j))*0.2/2)
if (Gt1(j).lt.0) then
  Gt1(j)=0
endif
enddo

```

```

counter1=j+6
write(2,*)counter1,Gt1(j)
enddo

```

!!!!!!!!!!!!!!AKTINOBOLIA GIA TO DYTIKO PARATHYRO!!!!!!!!!!!!!!

```

do j=1,12
Gb(j)= x1(j)+x2(j)*sin ((0.9863*meres-x3(j))*s3)
Gd(j)= x4(j)+x5(j)*sin((0.9863*meres-x6(j))*s3)
if (Gb(j) .lt. 0) then
  Gb(j)=0
endif
if (Gd(j) .lt.0) then
  Gd(j)=0
endif
!upologismos Rb
delta=23.45*sin(0.9863*(284+meres)*s3)
omega=0.25*(x7(j)-12)*60
aa=cos(delta*s3)*sin(omega*s3)
bb=sin(delta*s3)*sin(fi)+cos(delta*s3)*cos(fi)*cos(omega*s3)
Rb=aa/bb
! write(*,*) Rb
Gt2(j)=1000*(Gb(j)*Rb+Gd(j)/2+ (Gb(j)+Gd(j))*0.2/2)
if (Gt2(j).lt.0) then
  Gt2(j)=0
endif
counter2=j+6
write(3,*)counter2,Gt2(j)
enddo

```

```

Gt1(13)=0
Gt2(13)=0

```

```

do i=1,4
Gtu1=Gt1(1)
Gtu2=Gt2(1)
Texoteriko=Tex(1)

```

```

do j=1,12

```

```

do m=1,N
TT(m)=Tar(j)
  !write(89,*) j,m,TT(m)
enddo

```

```

do k=1,6
!Texwest=Texwest+(Texw(j+1)-Texw(j))/6
!Texnorth=Texnorth+(Texn(j+1)-Texn(j))/6
!Texeast=Texeast+(Texe(j+1)-Texe(j))/6
!Texsouth=Texsouth+(Texs(j+1)-Texs(j))/6
if (j.le.10) then
Gtu1=Gtu1+(Gt1(j+1)-Gt1(j))/6
Gtu2=Gtu2+(Gt2(j+1)-Gt2(j))/6
endif

```

```

Texoteriko=Texoteriko+(Tex(j+1)-Tex(j))/6

```

```

!Qw=U*26*(Texwest-Tin)
!Qn=U*30*(Texnorth-Tin)
!Qe=U*30*(Texeast-Tin)
!Qs=U*24*(Texsouth-Tin)
Qpars=Upar*6*(Texoteriko-Tin)
Qparw=Upar*4*(Texoteriko-Tin)

```

```

A(1)=0
C(N)=0
B(1)=-(hout+1.2/dx+155130*dx/dt)
C(1)=1.2/dx
R(1)=-(hout*TT(1)+155130*dx*TT(1)/dt)
A(N)=(1.2)/dx
B(N)=-(hin+1.2/dx+155130*dx/dt)
!Rn = Rn + diafth/6
R(N)=-(hin*Tin+155130*TT(N)*dx/dt)

!write(88,*) B(1),C(1),R(1),A(N),B(N),R(N)

```

```

do m=2,N-1

```



```

x(m)=(m-1)*dx
if ((m.ge.2) .and. (m.le.(0.01/dx))) then
thcon=1.2
shc=835
den=1860
A(m) = thcon/dx
E(m) = - den*shc*dx*TT(m)/dt
C(m) = thcon/dx
B(m)= -(A(m)+den*shc*dx/dt+C(m))
R(m)= E(m)
!write(88,*) B(m),C(m),R(m),A(m),E(m)
else if ((m.ge.(0.01/dx+0.5)) .and. (m.le.(0.07/dx))) then
thcon=0.653
shc=900
den=1690
A(m) = thcon/dx
E(m) = - den*shc*dx*TT(m)/dt
C(m) = thcon/dx
B(m)= -(A(m)+den*shc*dx/dt+C(m))
R(m)= E(m)
else if ((m.ge.(0.07/dx+0.5)) .and. (m.le.(0.12/dx))) then
thcon=0.04
shc=1210
den=35
A(m) = thcon/dx
E(m) = - den*shc*dx*TT(m)/dt
C(m) = thcon/dx
B(m)= -(A(m)+den*shc*dx/dt+C(m))
R(m)= E(m)
else if ((m.ge.(0.12/dx+0.5)) .and. (m.le.(0.18/dx))) then
thcon=0.653
shc=900
den=169
A(m) = thcon/dx
E(m) = - den*shc*dx*TT(m)/dt
C(m) = thcon/dx
B(m)= -(A(m)+den*shc*dx/dt+C(m))
R(m)= E(m)
else if ((m.ge.(0.18/dx+0.5)) .and. (m.le.(0.19/dx))) then
thcon=1.2
shc=835
den=1860
A(m) = thcon/dx
E(m) = - den*shc*dx*TT(m)/dt

```

```

C(m) = thcon/dx
B(m) = -(A(m)+den*shc*dx/dt+C(m))
R(m) = E(m)
endif
enddo

```

```

call TRIDAG(A,B,C,R,T,maxN,N,Code)

```

```

if (i.eq.1) then
  if ((j.eq.8).and.(k.eq.1)) then
    do m=1,N
      write(9,*) x(m),T(m)
    enddo
  elseif ((j.eq.8).and.(k.eq.2)) then
    do m=1,N
      write(10,*) x(m),T(m)
    enddo
  elseif ((j.eq.8).and.(k.eq.3)) then
    do m=1,N
      write(11,*) x(m),T(m)
    enddo
  elseif ((j.eq.8).and.(k.eq.4)) then
    do m=1,N
      write(12,*) x(m),T(m)
    enddo
  elseif ((j.eq.8).and.(k.eq.5)) then
    do m=1,N
      write(13,*) x(m),T(m)
    enddo
  elseif ((j.eq.8).and.(k.eq.6)) then
    do m=1,N
      write(14,*) x(m),T(m)
    enddo
  endif
endif
endif

```

```

do m=1,N
  !TT(m)=T(m)
  write(15,*)m, A(m) !!!save factors to file
  write(16,*)m, B(m)
  write(17,*)m, R(m)
  write(18,*)m, C(m)

```

```
enddo
```

```
if (i.eq.1) then  
  do m=1,N  
    write(19,*)i,j,k,m,x(m),T(m)  
  enddo
```

```
  Qp(k)=hin*(T(N)-Tin)*100
```

```
  Tin=Tin+((Qp(k))*dt/(250*1204.8))
```

```
  write(88,*) i,j,k,Tin
```

```
endif
```

```
if (i.eq.1.and. k.eq.6) then  
  write(20,*) wres,Tin
```

```
  wres=wres+1
```

```
endif
```

```
enddo
```

```
enddo
```

```
enddo
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!BRADY!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
counter3=1
```

```
counter4=19
```

```
do i=1,4
```

```
  Texoterikobr=Texbr(1)
```

```
    do j=1,12
```

```

do m=1,N
TT(m)=Tarbr(j)
enddo

```

```

do k=1,6

```

```

Texoterikobr=Texoterikobr+(Texbr(j+1)-Texbr(j))/6

```

```

Qbrpars=Upar*6*(Texoterikobr-Tin)
Qbrparw=Upar*4*(Texoterikobr-Tin)

```

```

Abr(1)=0
Cbr(N)=0
Bbr(1)=-(hout+1.2/dx+155130*dx/dt)
Cbr(1)=1.2/dx
Rbr(1)=-(hout*TT(1)+155130*dx*TT(1)/dt)
Abr(N)=(1.2)/dx
Bbr(N)=-(hin+1.2/dx+155130*dx/dt)
!Rn = Rn + diafth/6
R(N)=-(hin*Tin+155130*TT(N)*dx/dt)

```

```

do m=2,N-1
x(m)=(m-1)*dx
if ((m.ge.2) .and. (m.le.(0.01/dx))) then
thcon=1.2
shc=835
den=1860
Abr(m) = thcon/dx
Ebr(m) = - den*shc*dx*TT(m)/dt
Cbr(m) = thcon/dx
Bbr(m)= -(Abr(m)+den*shc*dx/dt+Cbr(m))
Rbr(m)= Ebr(m)
!write(88,*) Bbr(m),Cbr(m),Rbr(m),Abr(m),Ebr(m)
else if ((m.ge.(0.01/dx+0.5)) .and. (m.le.(0.07/dx))) then
thcon=0.653
shc=900
den=1690
Abr(m) = thcon/dx

```

```

Ebr(m) = - den*shc*dx*TT(m)/dt
Cbr(m) = thcon/dx
Bbr(m)= -(Abr(m)+den*shc*dx/dt+Cbr(m))
Rbr(m)= Ebr(m)
else if ((m.ge.(0.07/dx+0.5)) .and. (m.le.(0.12/dx))) then
thcon=0.04
shc=1210
den=35
Abr(m) = thcon/dx
Ebr(m) = - den*shc*dx*TT(m)/dt
Cbr(m) = thcon/dx
Bbr(m)= -(Abr(m)+den*shc*dx/dt+Cbr(m))
Rbr(m)= Ebr(m)
else if ((m.ge.(0.12/dx+0.5)) .and. (m.le.(0.18/dx))) then
thcon=0.653
shc=900
den=169
Abr(m) = thcon/dx
Ebr(m) = - den*shc*dx*TT(m)/dt
Cbr(m) = thcon/dx
Bbr(m)= -(Abr(m)+den*shc*dx/dt+Cbr(m))
Rbr(m)= Ebr(m)
else if ((m.ge.(0.18/dx+0.5)) .and. (m.le.(0.19/dx))) then
thcon=1.2
shc=835
den=1860
Abr(m) = thcon/dx
Ebr(m) = - den*shc*dx*TT(m)/dt
Cbr(m) = thcon/dx
Bbr(m)= -(Abr(m)+den*shc*dx/dt+Cbr(m))
Rbr(m)= Ebr(m)
endif
enddo

```

```

call TRIDAG(Abr,Bbr,Cbr,Rbr,T,maxN,N,Code)

```

```

if (i.eq.4) then
if ((j.eq.8).and.(k.eq.1)) then
do m=1,N
write(28,*) x(m),T(m)

```

```

    enddo
elseif ((j.eq.8).and.(k.eq.2)) then
    do m=1,N
        write(29,*) x(m),T(m)
    enddo
elseif ((j.eq.8).and.(k.eq.3)) then
    do m=1,N
        write(30,*) x(m),T(m)
    enddo
elseif ((j.eq.8).and.(k.eq.4)) then
    do m=1,N
        write(31,*) x(m),T(m)
    enddo
elseif ((j.eq.8).and.(k.eq.5)) then
    do m=1,N
        write(32,*) x(m),T(m)
    enddo
elseif ((j.eq.8).and.(k.eq.6)) then
    do m=1,N
        write(33,*) x(m),T(m)
    enddo
endif
endif

```

```

do m=1,N

```

```

    write(34,*)m, Abr(m)
    write(35,*)m, Bbr(m)
    write(36,*)m, Rbr(m)
    write(37,*)m, Cbr(m)

```

```

enddo

```

```

if (i.eq.4) then
    do m=1,N
        write(38,*)i,j,k,m,x(m),T(m)
    enddo
endif

```

```

Qp(k)=hin*(T(N)-Tin)*100

```

```

Tin=Tin+((Qp(k)+3000)*dt/(300*1204.8))

```

```
if (i.eq.4 .and. k.eq.6) then
  if (j.ge.1 .and. j.le.6) then
    write(20,*) counter3,Tin
    counter3=counter3+1
  else
    write(20,*) counter4,Tin
    ! write(88,*) counter4,Tmo
    counter4=counter4+1
  endif
endif
```

enddo

enddo

enddo

```
close(1)
close(2)
close(3)
close(4)
close(5)
close(6)
close(7)
close(8)
close(9)
close(10)
close(11)
close(12)
close(13)
close(14)
close(15)
close(16)
```

```
close(17)
close(18)
close(19)
close(20)
close(21)
close(22)
close(23)
close(24)
close(25)
close(26)
close(27)
close(28)
close(29)
close(30)
close(31)
close(32)
close(33)
close(34)
close(35)
close(36)
close(37)
close(38)
close(39)
close(40)
close(41)

endprogram
```


Subroutine TRIDAG(A,B,C,R,U,maxN,N,CODE)

```
!*****  
! Solves for a vector U of length N the tridiagonal linear set  
! M U = R, where A, B and C are the three main diagonals of matrix  
! M(N,N), the other terms are 0. R is the right side vector.  
!*****
```

```
REAL    BET,GAM(N),A(N),B(N),C(N),R(N),U(N)  
INTEGER CODE,maxN,N,J
```

```
IF(B(1).EQ.0.) THEN  
  CODE=1  
  RETURN  
ENDIF
```

```
BET=B(1)  
U(1)=R(1)/BET  
DO J=2,N          !Decomposition and forward substitution  
  GAM(J)=C(J-1)/BET  
  BET=B(J)-A(J)*GAM(J)  
  IF(BET.EQ.0.) THEN      !Algorithm fails  
    CODE=2  
    RETURN  
  ENDIF  
  U(J)=(R(J)-A(J)*U(J-1))/BET  
END DO
```

```
DO J=N-1,1,-1          !Back substitution
  U(J)=U(J)-GAM(J+1)*U(J+1)
END DO
!U(1)=U(2)
!U(N)=(R(N)-A(N)*U(N-1))/B(N)
CODE=0
```

```
return
endsubroutine
```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ξενοφών Κακάτσιος Καθηγητής Ε.Μ.Π, Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης, Εκδόσεις Σημειών Αθήνα 2006
- [2] Frank Kreith – Mark S.Bohn, Principles of Heat Transfer fifth edition, PWS Publishing Company
- [3] Hans Dieter Baehr-Karl Stephan, Heat and Mass Transfer, Springer
- [4] Yunus A.Cengel, Heat and Mass Transfer a practical approach, McGraw Hill book company
- [5] B.Zalba-J.MaMarin-Luisa F.Cabeza-H.Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Applied Thermal Engineering 2003
- [6] G.Lane, Solar Heat Storage Latent Heat Material, Vol I-II
- [7] D.M.Rohsenow-J.P.Hartnett-E.N.Ganic, Handbook of Heat Transfer Applications, McGraw Hill Book Company
- [8] Μ.Γαζελά, Διεποχιακή Αποθήκευση Ηλιακής Ενέργειας, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π τμήμα Μηχ. Μηχ.
- [9] Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi, Thermal Energy Storage Laboratory, School Of Energy and Environmental Studies, Faculty of Engineering Science, Devi Ahilya University, India, 2005.
- [10] Χ.Τζιβανίδης, Από τις σημειώσεις του μαθήματος "Θερμική Συμπεριφορά κτιρίων"
- [11] http://www.ecoarchitects.gr/images/FINAL/Pathitika_Hliaka_Systimata.pdf
- [12] Energy Simulation in Building Design
J.A. Clarke, Εκδόσεις Butterworth Heinemann, 2001, ISBN 0 7506 5082 6
- [13] Κ. Αντωνόπουλος Καθηγητής Ε.Μ.Π, Κλιματισμός, Εκδόσεις ΕΜΠ, 2004
- [14] ASHRAE HVAC Fundamentals Handbook 1997
ASHRAE, 1997
- [15] TAS Theory Manual www.edsl.net

- [16] Κίμωνας Α.Αντωνόπουλος ,Υπολογιστικές Μέθοδοι Φαινομένων Μεταφοράς Μέρος Πρώτο,2005
- [17] Γεώργιος Μπεργελές, Υπολογιστική Ρευστομηχανική ,Εκδόσεις Συμείων,2006
- [18] Κ.Χ Γιαννάλκογλου,Ι.Αναγνωστόπουλος, Γ.Μπεργελές ,Αριθμητική Ανάλυση για Μηχανικούς,2003
- [19] Building Simulation: an overview of developments and information sources
S.K. Tianzhen Hong, Chou, T.Y. Bong
- [20] Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. D. B. Crawleya, J. W. Handb, M. Kummertc, B. T. Griffithd, 2008
- [21] Tests for software accreditation and verification.
CIBSE, 2006, ISBN-10: 1-903287-69-3 I
- [22] <http://www.doe2.com/>
- [23] <http://www.trnsys.com/>
- [24]http://www.erd.usace.army.mil/pls/erdcpub/docs/erdc/images/ERDCFactSheet_Product_BLAST.pdf.
- [25] <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>
- [26] <http://usa.autodesk.com>
- [27] <http://edsl.net/main/Software.aspx>
- [28] <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>
- [29] H.Asan,Y.S.Sancaktar, ‘Effects of wall’s thermophysical properties on time lag and decrement factor’, Energy and Buildings 28,1998
- [30]Gilles Fraisse, Christelle Viardot, Olivier Lafabrie, Gilbert Achard, ‘Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy’, Energy and Buildings 34,2002
- [31]A.I. Dounis, C. Caraiscos, Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment -A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009)
- [32] M. Krarti, An overview of artificial intelligence-based methods for building

- energy systems, *Journal of Solar Energy Engineering* 25 (2003)
- [33] D. Kolokotsaa, D. Tsiavosa, G.S. Stavarakakisa, K. Kalaitzakisa, E. Antonidakisb , Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings' occupants thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction, *Energy and Buildings* 33 (2001) 531-543
- [34] Ziva Kristl_, Mitja Kos̃ir, Mateja Trobec Lah, Ales̃ Krainer, Fuzzy control system for thermal and visual comfort in building, *Renewable Energy* 33 (2008) 694–702
- [35] Simon Haikyn, *Neural networks and Comprehensive foundation*, Printice Hall.
- [36] A.Z.EL. Zooghby, C.G. Christodoulou, M. Georgiopoulos, Radial-basis Function Neural Network Algorithm, University of Central Florida.
- [37] Βλαχάβας Ι. ,Κεφάλας Π. ,Βασιλειάδης Ν. ,Τεχνητή Νοημοσύνη ,Εκδόσεις Γαργαπάνη,2002
- [38] Christos Stergiou, Dimitrios Siganos, *Neural networks*, http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_96/journal/vol4/cs11/report.html#References
- [39] <http://www.nd.com/neurosolutions/products/ns/whatisNN.html>
- [40] Aleksander, I. and Morton, H. *An introduction to neural computing*, 2nd edition
- [41] Σταμάτιος Θ.Γεωργόπουλος , Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία , ΣΗΜΜΥ, Χρονοπρογραμματισμός παραγωγής με χρήση Ευφυών τεχνικών ,2001
- [42] Daniel J. Fonseca, Daniel Navarrese. *Artificial Neural Network for job shop simulation* (2002).
- [43] Ευστράτιος Φ. Γεωργόπουλος,Σπυρίδων Δ. Λυκοθανάσης , *Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγόριθμους*,1999
- [44] L.Davis, *Handbook of Genetics Algorithms* , Van Nostrand Reinhold ,1991
- [45] Shu-Hsien Liao , *Expert system methodologies and applications—a decade review from 1995 to 2004* ,Article *Expert Systems with Applications*, Volume 28, Issue 1, January 2005, Pages 93-103
- [46] Jackson, Peter (1998), *Introduction To Expert Systems* (3 ed.), Addison Wesley, p. 2, ISBN 978-0201876864

- [47] Darlington, Keith (2000). The Essence of Expert Systems. Pearson Education. ISBN 0-13-022774-9.
- [48] Michael Nikolaou, Model predictive controllers: A critical synthesis of theory and industrial needs, Advances in Chemical Engineering, Academic Press, 2001, Volume 26, Pages 131-204
- [49] Mayne, D; Rawlings, Rao, Scokaert (2000). "Constrained model predictive control: stability and optimality". Automatica 36: pp.789–814