

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



Διπλωματική Εργασία

Ανάπτυξη Ολοκληρωμένου Συστήματος Αποφάσεων για τη Βελτίωση της Ενεργειακής Συμπεριφοράς Υφιστάμενων Κτιρίων

Βανδουλάκης Γιάννης

Εξιζίδου Παρθένα

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Γρηγορούδης Ευάγγελος, Ρόβας Δημήτριος

Χανιά, 2009

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά του επιβλέποντες καθηγητές κ. Γρηγορούδη Ευάγγελο και κ. Ρόβα Δημήτριο για την πολύτιμη καθοδήγησή τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μας εργασίας.

Βανδουλάκης Γιάννης

Εξιζίδου Παρθένα

Χανιά, 2009

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	3
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	7
2.1 Θεσμικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης	7
2.1.1 Η οδηγία 2002/91/EK (EPBD)	9
2.2 Η πορεία εφαρμογής της ευρωπαϊκής οδηγίας στην Ελλάδα	10
2.2.1 Ο νόμος 3661/2008	10
2.2.1.1 Καθοριστικοί Παράγοντες στην Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων	11
2.3 Η Ενεργειακή Επιθεώρηση	15
2.3.1 Τομείς εκπόνησης Ενεργειακής Επιθεώρησης	16
2.3.1.1 Θερμομόνωση	16
2.3.1.2 Υαλοπίνακες.....	20
2.3.1.3 Συστήματα HVAC.....	22
2.3.1.4 Φωτισμός.....	28
Κεφάλαιο 3 Κτίριο Τεχνικών Υπηρεσιών: Στοιχεία και Μοντελοποίηση.....	33
3.1 Βασικοί τομείς μοντελοποίησης του κτιρίου στο DesignBuilder	33
3.1.1 Γενική καρτέλα μοντελοποίησης (General template)	38
3.1.1.1 Οριοθέτηση της μοντελοποίησης (Scope)	38
3.1.1.2 Κατασκευαστικά Στοιχεία και Υαλοπίνακες (Construction+Glazing data).....	39
3.1.1.3 Εσωτερικά Φορτία (Gains Data).....	40
3.1.1.4 Μοντελοποίηση χρονοδιαγράμματος εργασίας (Timing Model Option) ..	40
3.1.1.5 Συστήματα HVAC.....	40
3.1.1.6 Φυσικός Εξαερισμός (Natural Ventilation)	43
3.1.2 Καρτέλα εισαγωγής στοιχείων της δραστηριότητας των εργαζομένων (Activity Template)	45
3.1.2.1 Πυκνότητα ανθρώπινου δυναμικού στο κτίριο	45
3.1.2.2 Μεταβολικός ρυθμός εργαζομένων.....	46
3.1.2.3 Πίνακας διακοπών	48
3.1.2.4 Περιβαλλοντικός έλεγχος	49
3.1.2.5 Υπολογιστές-Εξοπλισμός Γραφείου (Computers-Office equipment).....	51

3.1.3 Καρτέλα κατασκευαστικών στοιχείων (Construction template)	52
3.1.3.1.Τοιχοποιία	52
3.1.3.2 Οροφή.....	53
3.1.3.3 Δάπεδο	53
3.1.3.4 Θύρες.....	54
3.1.4 Καρτέλα ανοιγμάτων (Openings template)	58
3.1.4.1 Υαλοπίνακες	58
3.1.4.2 Θύρες.....	58
3.1.5 Καρτέλα φωτισμού (Lighting template).....	59
3.1.6 Καρτέλα συστημάτων HVAC (HVAC template).....	61
3.2 Αποτελέσματα	65
Κεφάλαιο 4 Υποστήριξη Αποφάσεων και Διαχείριση Ενέργειας στα Κτίρια.....	75
4.1 Εισαγωγή.....	75
4.1.1 Εναλλακτικές Παρεμβάσεις	75
4.1.2 Κριτήρια	77
4.1.2.1 Ενεργειακά και περιβαλλοντολογικά κριτήρια.....	77
4.1.2.2 Τεχνικά και λειτουργικά κριτήρια.....	77
4.1.2.3 Οικονομικά και χρηματοδοτικά κριτήρια.....	78
4.1.3 Μέθοδοι.....	78
Κεφάλαιο 5 Προτεινόμενη Μεθοδολογία Απόφασης.....	83
5.1 Εισαγωγή.....	83
5.1.1.Μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας.....	84
5.1.2 Κριτήρια αξιολόγησης	89
5.1.3 Μέθοδος αξιολόγησης.....	93
5.1.3.1 Μέθοδος UTA.....	94
5.1.3.2 Περιγραφή της μεθόδου UTASTAR.....	97
Κεφάλαιο 6 Εφαρμογή της μεθόδου UTASTAR.....	101
6.1 Εισαγωγή.....	101
6.1.1 Σύνολο αναφοράς.....	101
6.1.1.1 Κατάταξη συνόλου αναφοράς.....	103

6.1.2. Καθορισμός παραμέτρων UTASTAR.....	104
6.1.3 Διαμόρφωση και επίλυση του προβλήματος	108
6.1.4 Αξιολόγηση συνόλου εναλλακτικών σεναρίων	111
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα.....	119
Βιβλιογραφία.....	121

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1.1:Διαγραμματική απεικόνιση του προσδιορισμού ενεργειακής κατανάλωσης ενός κτιρίου .	6
Σχήμα 1.2:Πρόσοψη του κτιρίου Τεχνικών Υπηρεσιών.....	7
Σχήμα 2.1:Πορεία του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας στο νότιο τμήμα ενός κτιρίου	13
Σχήμα 2.2:Τοίχος Trombe-Εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση.....	13
Σχήμα 2.3:Οι κλιματικές ζώνες της Ελλάδας.....	17
Σχήμα 2.4:Τοποθέτηση εσωτερικής θερμομόνωσης.	18
Σχήμα 2.5:Τοποθέτηση εξωτερικής θερμομόνωσης.....	19
Σχήμα 2.6:Θερμομονωτικό Τούβλο με μόνωση πολυουρεθάνης.	20
Σχήμα 2.7: Θερμομόνωση στον πυρήνα κατακόρυφου στοιχείου.	20
Σχήμα 2.8:Απώλειες θερμότητας μέσω των υαλοπινάκων.	21
Σχήμα 2.9:Ψυκτικό σύστημα οδηγούμενο από ηλεκτρικό κινητήρα	25
Σχήμα 3.1:Πρόσοψη του κτιρίου.....	34
Σχήμα 3.2:Δεύτερος όροφος	34
Σχήμα 3.3:Πρώτος όροφος.....	35
Σχήμα 3.4:Το κτίριο σχεδιασμένο στο Design Builder	35
Σχήμα 3.5:Κάτοψη πρώτου ορόφου	36
Σχήμα 3.6:Κάτοψη δεύτερου ορόφου.....	36
Σχήμα 3.7:General Template	38
Σχήμα 3.8:Θερμαντική ικανότητα του συστήματος HVAC	42
Σχήμα 3.9:Ψυκτική ικανότητα του συστήματος HVAC	43
Σχήμα 3.10:Υπολογισμός της διήθησης του αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον στο εσωτερικό	44
Σχήμα 3.11:Activity Template	46
Σχήμα 3.12:Πρόγραμμα Διακοπών	49
Σχήμα 3.13:Εξωτερική Τοιχοποιία.....	52
Σχήμα 3.14:Εσωτερική Τοιχοποιία.....	53
Σχήμα 3.15:Διαστρωμάτωση Οροφής	53
Σχήμα 3.16:Διαστρωμάτωση Δαπέδου	54
Σχήμα 3.17:Crack Template.....	54
Σχήμα 3.18:Επίδραση της ροής του αέρα στην αγωγιμότητα διαφόρων επιφανειών	57

Σχήμα 3.19:Τιμές U και R.....	58
Σχήμα 3.20:Διάφοροι τύποι φωτιστικών.....	59
Σχήμα 3.21:Απλοποιημένο σύστημα αυτόνομης μονάδας (Unitary single zone)	77
Σχήμα 3.22:Απλοποιημένο σύστημα μεταβλητού όγκου αέρα (VAV)	62
Σχήμα 3.23:Όρια θερμικής άνεσης με χειμερινή ένδυση (ASHRAE 55-2004).....	66
Σχήμα 3.24:Όρια θερμικής άνεσης με θερινή ένδυση (ASHRAE 55-2004).....	67
Σχήμα 3.25:Συνολική κατανάλωση ενέργειας και εκπομπή CO ₂	67
Σχήμα 3.26:Ωρες δυσφορίας σε σχέση με το ποσοστό υγρασίας και λειτουργικής θερμοκρασίας ...	68
Σχήμα 3.27:Σύγκριση εξωτερικής θερμοκρασίας με εσωτερική λειτουργική θερμοκρασία	69
Σχήμα 3.28:Σύγκριση εξωτερικής θερμοκρασίας με εσωτερική λειτουργική θερμοκρασία τον Φε- βρουάριο.....	70
Σχήμα 3.29: Σύγκριση εξωτερικής θερμοκρασίας με εσωτερική λειτουργική θερμοκρασία τον Ιούλιο	70
Σχήμα 3.30:Μοντέλο θερμικής άνεσης του P.O. Fanger	71
Σχήμα 3.31:Σύγκριση συνολικής κατανάλωσης ως προς τις επιλογές θερμοκρασιακού ελέγχου (Α.θερμοκρασία αέρα, Β.λειτουργική θερμοκρασία)	71
Σχήμα 3.32:Πορεία του ηλίου κατά τη διάρκεια ενός έτους.....	72
Σχήμα 4.1:Κατηγορίες κριτηρίων	77
Σχήμα 5.1:Μεθοδολογία έρευνας	83
Σχήμα 5.2:Απομάκρυνση αίθριου.....	85
Σχήμα 5.3:Εφαρμογή τεχνικής φυσικού εξαερισμού κατά τη νύχτα.....	86
Σχήμα 5.4:Τοποθέτηση μόνωσης στην εξωτερική τοιχοποιία	86
Σχήμα 5.5: Τοποθέτηση μόνωσης στην οροφή	87
Σχήμα 5.6:Μονότονη ποσοτική και ποιοτική μεταβλητή	94
Σχήμα 5.7:Μεταβελτιστοποίηση	97
Σχήμα 5.8:Εισαγωγή διπλού σφάλματος.....	98
Σχήμα 6.1:Συνάρτηση αξίας για το κόστος λειτουργίας.....	112
Σχήμα 6.2: Συνάρτηση αξίας για το κόστος εγκατάστασης.....	112
Σχήμα 6.3: Συνάρτηση αξίας για το κριτήριο άνεσης.....	113
Σχήμα 6.4: Συνάρτηση αξίας για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα	113
Σχήμα 6.5:Βάρη κριτηρίων	114

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1.1 Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση διαφόρων τύπων κτιρίων.	4
Πίνακας 2.1 Επίπεδα θερμοκρασιών για επίτευξη θερμικής άνεσης σε διάφορους χώρους ενός κτιρίου	18
Πίνακας 2.2 Εξοικονόμηση ενέργειας/ πετρελαίου σε τυπικό διαμέρισμα από τη χρήση βελτιωμένων υαλοπινάκων σε 4 κλιματικές ζώνες της Ελλάδας	22
Πίνακας 2.3 Απαιτήσεις εξαερισμού για διάφορους χώρους κτιρίων	28
Πίνακας 2.4 Επίπεδα φωτισμού χώρων κτιρίου σύμφωνα με το πρότυπο EN 12464-1	29
Πίνακας 2.5 Αντιστοιχία ισχύος ενεργειακών λαμπτήρων και λαμπτήρων πυρακτώσεως	30
Πίνακας 2.6 Η απόδοση και η μέση ζωή διαφόρων τύπων λαμπτήρων	31
Πίνακας 3.1 Επιμέρους επιφάνειες του κτιρίου	37
Πίνακας 3.2 Μεταβολικός ρυθμός παραγωγής θερμότητας για διάφορες δραστηριότητες	47
Πίνακας 3.3 Θερμοκρασία άνεσης σε σχέση με τη μεταβολική δραστηριότητα και τον τύπο της ένδυσης.....	47
Πίνακας 3.4 Θερμομονωτική ικανότητα ενδυμάτων	48
Πίνακας 3.5 Συνιστώμενα επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας για θερμαινόμενους χώρους το χειμώνα.....	50
Πίνακας 3.6 Συνιστώμενα επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας για κλιματιζόμενους χώρους το καλοκαίρι.....	50
Πίνακας 3.7 Φωτεινότητα και εγκατεστημένα φορτία φωτισμού ανά επιφάνεια	51
Πίνακας 3.8 Ποσοστά μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία και αγωγή για τον εξοπλισμό γραφείου	51
Πίνακας 3.9 Διάφοροι τύποι φωτιστικών	60
Πίνακας 3.10 Υποθετική τιμή του συντελεστή απόδοσης (COP) για διάφορα κλιματιστικά συστήματα	63
Πίνακας 3.11 Αποτελέσματα προσομοίωσης	65
Πίνακας 3.12 Επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασίας-υγρασίας με χειμερινή ένδυση	65
Πίνακας 3.13 Επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασίας-υγρασίας με θερινή ένδυση	66
Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων	87
Πίνακας 5.2 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά δύο	88
Πίνακας 5.3 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά τρεις.....	88
Πίνακας 5.4 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά τέσσερις.....	89

Πίνακας 5.5 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά πέντε	89
Πίνακας 5.6 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά έξι	89
Πίνακας 5.7 Κόστος για την πραγματοποίηση των εναλλακτικών παρεμβάσεων	90
Πίνακας 5.8 Πολυκριτήριο πίνακας: Οι εναλλακτικές παρεμβάσεις	91
Πίνακας 5.9 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά δύο	91
Πίνακας 5.10 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά τρεις	91
Πίνακας 5.11 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά τέσσερις	92
Πίνακας 5.12 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά πέντε	92
Πίνακας 5.13 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά έξι	93
Πίνακας 6.1 Σύνολο αναφοράς	102
Πίνακας 6.2 Κατάταξη συνόλου αναφοράς από τον αποφασίζοντα	103
Πίνακας 6.3 Ελάχιστες και μέγιστες αποδόσεις για κάθε κριτήριο αξιολόγησης	104
Πίνακας 6.4 Ελάχιστες και μέγιστες τιμές των κριτηρίων για τη διαμόρφωση των διαστημάτων... ..	105
Πίνακας 6.5 Διαστήματα κριτηρίων	105
Πίνακας 6.6 Αθροιστικές συναρτήσεις χρησιμότητας κάθε εναλλακτικής συναρτήσει των w_{ij}	107
Πίνακας 6.7 Υπολογισμός των w_{ij}	109
Πίνακας 6.8 Κατάταξη της UTASTAR και του αποφασίζοντα	109
Πίνακας 6.9 Κατάταξη UTASTAR μετά την αναθεώρηση	110
Πίνακας 6.10 Συνολικές αξίες χρησιμότητας για κάθε εναλλακτική παρέμβαση και κατάταξη από την καλύτερη στη χειρότερη.....	114

Περίληψη

Ο κτιριακός τομέας ευθύνεται για το 40% της συνολικής παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Η αναζήτηση λύσεων για τον περιορισμό της υπέρμετρης κατανάλωσης ενέργειας και βελτίωσης των συνθηκών θερμικής άνεσης οδήγησε στην αναθεώρηση του τρόπου κατασκευής και λειτουργίας των κτιρίων. Στην προσπάθεια αυτή απαιτείται ενεργειακή επιθεώρηση για καταγραφή των ενεργειακών αναγκών του υπό μελέτη κτιρίου και εντοπισμός των παρεμβάσεων που μπορούν να πραγματοποιηθούν με σκοπό τη βελτίωση λειτουργικών χαρακτηριστικών. Για αποτίμηση των επιπτώσεων που θα έχουν οι παρεμβάσεις απαιτείται η εκπόνηση ενεργειακών μελετών. Το συνδυαστικά μεγάλο πλήθος τέτοιων μελετών που απαιτούνται-λόγω των πολυάριθμων τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας που υπάρχουν διαθέσιμες-συχνά καθιστούν τέτοιες μελέτες απαγορευτικές. Επιπλέον πολλές από τις μεθοδολογίες υπολογισμού είναι χαμηλής ακρίβειας, οδηγώντας σε προσεγγιστικές εκτιμήσεις και, κατά συνέπεια, σε λάθος αποφάσεις. Τέλος, το μεγάλο πλήθος (πολλές φορές αντικρουόμενων) κριτηρίων τεχνικής, ενεργειακής, οικονομικής και περιβαλλοντολογικής φύσεως καθιστούν το πρόβλημα λήψης αποφάσεων εξαιρετικά πολύπλοκο.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα ολοκληρωμένο εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για την ανακαίνιση υφιστάμενων κτιρίων με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής τους συμπεριφοράς. Με τη βοήθεια του λογισμικού EnergyPlus γίνεται θερμική προσομοίωση των κτιρίων και εξάγονται συμπεράσματα που αφορούν στην κατανάλωση ενέργειας, στη θερμική άνεση, στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε ετήσια βάση για όλες τις υποψήφιες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας. Η μέθοδος UTASTAR χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των εναλλακτικών παρεμβάσεων και την επίλυση του πολυκριτήριου προβλήματος.

Για την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας επιλέχθηκε το κτίριο των Τεχνικών Υπηρεσιών του Πολυτεχνείου Κρήτης το οποίο βρίσκεται στα Χανιά. Αρχικά έγινε συλλογή στοιχείων που αφορούν στην κατασκευή του, στο σύστημα θέρμανσης και κλιματισμού, στο είδος δραστηριότητας των εργαζομένων αλλά και στα κλιματικά δεδομένα της περιοχής. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε θερμικό μοντέλο προσομοιώσεων με χρήση του λογισμικού EnergyPlus και υπολογίστηκαν σε ετήσια βάση θερμοκρασίες, υγρασίες, κτλ. Επιλέχθηκαν 6 μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας (απομάκρυνση αίθριου, αντικατάσταση υαλοπινάκων, βελτίωση σκίασης, εφαρμογή φυσικού εξαερισμού, τοποθέτηση μόνωσης στους τοίχους, τοποθέτηση μόνωσης στην οροφή) που σε συνδυασμό έδωσαν τελικά 64 εφικτές παρεμβάσεις στο κτίριο. Επιλέχθηκαν τέσσερα κριτήρια αξιολόγησης (ετήσιο κόστος λειτουργίας, κόστος εγκατάστασης, ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και ώρες δυσφορίας ετησίως). Ακολούθησε εφαρμογή της μεθόδου UTASTAR για την αξιολόγησή τους.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Στο παρελθόν, τόσο στον κτιριακό τομέα όσο και σε άλλους συναφείς τομείς η ενεργειακή αποδοτικότητα ήταν μία παράμετρος που δεν λαμβάνονταν σοβαρά υπόψη. Μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση έγινε αντιληπτό ότι τα περιορισμένα αποθέματα ενέργειας σε συνδυασμό με τη διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση, οδήγησαν σε αύξηση του κόστους της ενέργειας και δημιούργησαν την ανάγκη για αλλαγές στο σχεδιασμό και την κατασκευή των κτιρίων. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου, και ο περιορισμός των αερίων εκπομπών που το προκαλούν, καθιστά επιτακτική ανάγκη την εφαρμογή ενεργειακά αποτελεσματικών μεθόδων σχεδιασμού σε νέα κτίρια αλλά και την υιοθέτηση μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας σε υφιστάμενα. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από μη φιλικών προς το περιβάλλον υλικών και κατασκευαστικών τεχνικών σε συνδυασμό με τη χρήση ορυκτών πόρων (π.χ. για τη θέρμανση) είναι εξαιρετικά κρίσιμες. Η εκπομπή αερίων όπως το CO₂, τα οποία απορροφούν και κατακρατούν μέρος της θερμότητας που εκπέμπει η επιφάνεια της γης προς το διάστημα με τη μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας, εντείνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου που συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Επιπλέον, φαινόμενα θερμικών νησίδων έχουν οδηγήσει σε τοπική αύξηση της θερμοκρασίας και έχουν συντελέσει στη δραματική αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για τον δροσισμό των κτιρίων κατά την καλοκαιρινή περίοδο.

Ο κτιριακός τομέας ευθύνεται για το 40% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης [1, 2]. Από την ενέργεια που καταναλώνεται στα κτίρια εκτιμάται ότι το 57% χρησιμοποιείται για κάλυψη αναγκών θέρμανσης, το 25% για ζεστό νερό, και το 11% για ηλεκτρική ενέργεια η οποία χρησιμοποιείται πρωτίστως για δροσισμό των χώρων. Η παραγωγή και χρήση ενέργειας ευθύνεται για το 94% των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα [1], με το 45% αυτής να αποδίδεται στον κτιριακό τομέα.

Στην Ελλάδα παρατηρείται αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας στον κτιριακό τομέα με μέσο ρυθμό 1,8% ετησίως [2]. Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πρόσφατης έρευνας που διενεργήθηκε σε διάφορους τύπους κτιρίων στην Ελλάδα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας παρατηρείται πως το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας καταναλώνεται για τη θέρμανση των χώρων. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή απόδοση των συστημάτων θέρμανσης (δεν γίνονται οι απαραίτητοι έλεγχοι και συντήρηση) και επιπλέον σε κατασκευαστικά χαρακτηριστικά όπως η έλλειψη μονωτικού υλικού ή η κακή ποιότητα κατασκευής του κελύφους των κτιρίων. Τέλος τα κλιματιστικά που χρησιμοποιούνται για δροσισμό καταναλώνουν μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας λόγω του χαμηλού συντελεστή απόδοσης τους. Με βάση αυτά τα στοιχεία είναι επιτακτική η ανάγκη λήψης μέτρων για περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης όπως επίσης και η υιοθέτηση μεθοδολογιών με κριτήρια την υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα τόσο σε νέα όσο και σε ήδη υπάρχοντα κτίρια.

Πίνακας 1.1 Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση διαφόρων τύπων κτιρίων [2].

Τύπος Κτιρίου	Δροσισμός kWh/m ²	Θέρμανση kWh/m ²	Φωτισμός kWh/m ²	Συσκευές kWh/m ²	Σύνολο kWh/m ²
Γραφεία	24	95	20	48	187
Εμπορικά	18	74	19	41	152
Σχολεία	2	66	16	8	92
Νοσοκομεία	3	299	52	53	407
Ξενοδοχεία	11	198	24	40	273

Επιπλέον προς αποφυγή περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων λόγω κλιματικών αλλαγών οδηγήθηκαν η διεθνής κοινότητα, η Ευρωπαϊκή Ένωση και κατά συνέπεια η Ελλάδα στην αναζήτηση λύσεων για περιορισμό και καταπολέμηση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Δημιουργήθηκε έτσι μία σειρά κοινοτικών οδηγιών και ένα νομοθετικό πλαίσιο που έχουν ως στόχο τον περιορισμό των εκπομπών, κυρίως στα κτίρια, την εξοικονόμηση ενέργειας και την εγκατάσταση εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

Απαραίτητα προϋπόθεση για την επίτευξη του στόχου είναι η μελέτη των κτιριακών εγκαταστάσεων με σκοπό τον προσδιορισμό των σημαντικότερων παραγόντων υπεύθυνων για την ενεργειακή κατανάλωση. Οι ενεργειακές απαιτήσεις ενός κτιρίου μπορούν να προσδιοριστούν με δύο τρόπους:

- Με τη βοήθεια οργάνων μέτρησης (ενεργειακή επιθεώρηση)
- Με την εκπόνηση ενεργειακών μελετών

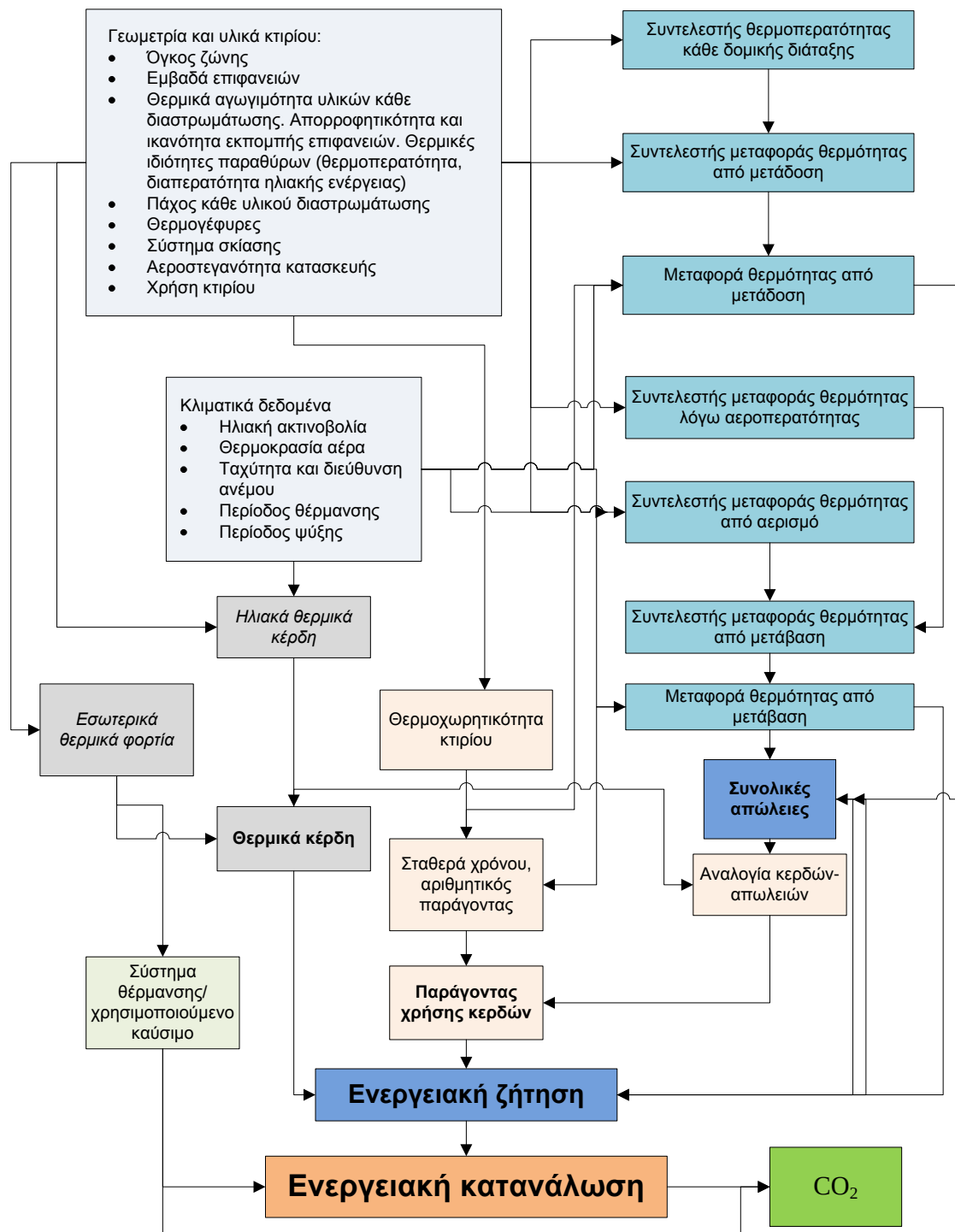
Με την πρώτη μεθοδολογία γίνονται μετρήσεις οι οποίες αποσκοπούν στην καταγραφή των ενεργειακών ροών και τον προσδιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας καθώς και την διεξαγωγή ποσοτικών μετρήσεων. Οι μετρήσεις αυτές αποσκοπούν στην αποτίμηση της αποδοτικότητας των επιμέρους συστημάτων ενός κτιρίου (π.χ. το σύστημα θέρμανσης και κλιματισμού ή το σύστημα σωληνώσεων) αλλά και στην καταγραφή της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται. Ενδεικτικά, μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιούνται είναι οι εξής:

- Παροχές υγρών ή αέριων καυσίμων.
- Ηλεκτρικές μετρήσεις (τάση, ένταση, ισχύς και συντελεστής ισχύος στον ηλεκτρικό πίνακα).
- Θερμοκρασία αέρα ζώνης.
- Θερμοκρασίες επιφανειών (εξωτερική, εσωτερική τοιχοποιία).
- Πιέσεις ρευστών σε σωλήνες.
- Συστάσεις και εκπομπές καυσαερίων στο λεβητοστάσιο (CO₂, CO, O₂, καπνός).
- Σχετική υγρασία στις ζώνες του κτιρίου.
- Εντάσεις φωτισμού.

Για προσδιορισμό ενεργειακών απωλειών επιπροσθέτως γίνονται μετρήσεις του συντελεστή θερμοπερατότητας, μετρήσεις απωλειών αερισμού, και μετρήσεις αεροστεγανότητας. Η συνθετική αξιολόγηση των μετρήσεων μαζί με λογαριασμούς, τιμολόγια ενέργειας (ηλεκτρισμού, καυσίμων), κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του κτιρίου αλλά και κλιματικά δεδομένα της περιοχής είναι σε θέση να σκιαγραφήσουν τις ενεργειακές απαιτήσεις για τη λειτουργία ενός κτιρίου καθώς και την αποτελεσματικότητά του. Σφάλματα στις μετρήσεις, παράλειψη μετρήσεων καθοριστικών παραγόντων, μπορούν να οδηγήσουν σε ανακρίβειες και σε εξαγωγή λάθος συμπερασμάτων.

Η δεύτερη μεθοδολογία προσδιορισμού των ενεργειακών απαιτήσεων ενός κτιρίου είναι η εκπόνηση ενεργειακών μελετών. Η δυσκολία αυτής της προσέγγισης έγκειται στη μοντελοποίηση του κτιρίου. Για να μπορούν να πραγματοποιηθούν τέτοιες μελέτες σε λογικά τεχνικά, χρονικά και οικονομικά πλαίσια είναι απαραίτητο να γίνονται σημαντικές απλοποιητικές παραδοχές. Αυτές όμως οι προσεγγίσεις συχνά οδηγούν σε ανακριβείς εκτιμήσεις, σφάλματα και, κατά συνέπεια, στην εξαγωγή λάθος συμπερασμάτων. Η χρήση υπολογιστικών πακέτων θερμικής προσομοίωσης κτιρίων προσφέρει τη δυνατότητα για λεπτομερή και με σχετική ακρίβεια πρόβλεψη της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου. Σημαντικά λειτουργικά χαρακτηριστικά για τέτοια πακέτα είναι:

- Ύπαρξη σχεδιαστικού περιβάλλοντος ή/και σύνδεση με σχεδιαστικά προγράμματα CAD.
- Εύκολη εισαγωγή δεδομένων.
- Ακριβής αναπαράσταση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου και των μηχανισμών κατανάλωσης ενέργειας.
- Δυνατότητα μελέτης και προσομοίωσης μεθόδων βελτίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου.
- Δυνατότητα προσομοίωσης επεμβάσεων βιοκλιματικής φύσεως όπως τοίχοι Trombe, σκίαστρα, νυχτερινός αερισμός, προσανατολισμός του κτιρίου.
- Προσομοίωση του κτιρίου ανά ώρα, ανά μήνα και εξαγωγή αποτελεσμάτων ενεργειακών κατανalώσεων σε ετήσια βάση.
- Διαχωρισμός του χρόνου σε χειμώνα-καλοκαίρι.
- Πιστοποιημένες μέθοδοι και τεχνικές (ASHRAE).
- Λεπτομερή κλιματικά στοιχεία από μετεωρολογικούς σταθμούς προσαρμοσμένους στην τοποθεσία του κτιρίου.
- Λεπτομερή μοντελοποίηση συστημάτων θέρμανσης και ψύξης.
- Υπολογισμός δεικτών θερμικής άνεσης.
- Αναλυτικά αποτελέσματα ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου και των επιμέρους ζωνών του.



Σχήμα 1.1: Διαγραμματική απεικόνιση του προσδιορισμού ενεργειακής κατανάλωσης ενός κτιρίου

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται για την εισαγωγή σωστών θερμικών χαρακτηριστικών (θερμοπερατότητα, αεροστεγανότητα, κτλ).

Αφού έχει προσδιοριστεί η ενεργειακή συμπεριφορά ενός υφιστάμενου κτιρίου, ιδιαίτερα σύνθετη είναι η διαδικασία απόφασης για την ανακαίνισή του με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Δύο είναι τα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη διαδικασία λήψης απόφασης. Το πρώτο βασίζεται στο γεγονός ότι λόγω της τεχνολογικής ανάπτυξης των τελευταίων δεκαετιών έχουν εισαχθεί πολυάριθμες νέες τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας στην αγορά.

Έτσι, ο αναλυτής πρέπει να λάβει υπόψη του, να κρίνει να συγκρίνει και να επιλέξει εναλλακτικές δράσεις μέσα από ένα σημαντικό εύρος τεχνικών σε σχέση με παλαιότερα. Ο αυξανόμενος αριθμός των δυνητικών παρεμβάσεων δυσκολεύει την διαδικασία. Το δεύτερο πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά τη διαδικασία απόφασης είναι ότι οι επιλεγμένες εναλλακτικές παρεμβάσεις θα πρέπει να αξιολογηθούν βάσει κάποιων κριτηρίων των οποίων η φύση είναι κατά κανόνα αντικρουόμενη. Σε τέτοιου είδους προβλήματα για παράδειγμα ζητείται χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση, στοχεύοντας σε χαμηλότερο λειτουργικό κόστος, με ταυτόχρονη αύξηση της άνεσης του χρήστη και πολλές φορές βελτίωση της αισθητικής του κτιρίου. Πρόκειται λοιπόν για ένα πολυκριτήριο πρόβλημα για το οποίο δεν υπάρχει μία μοναδική βέλτιστη λύση, αλλά ένα εύρος ικανοποιητικών λύσεων που καλύπτουν τους περιορισμούς και τις προτιμήσεις του εκάστοτε αποφασίζοντα.

Είναι μεγάλης σημασίας να διευκρινιστεί ο κεντρικός ρόλος του αποφασίζοντα σε αυτή τη διαδικασία, καθώς αυτός είναι που θα καθορίσει τις αλλαγές που θα πραγματοποιηθούν στο κτίριο. Είναι απαραίτητο οι προτιμήσεις του αποφασίζοντα να συνοψολογίζονται στη μέθοδο αξιολόγησης. Στην παρούσα έρευνα προτιμήθηκε μία πολυκριτήρια μέθοδος για την επίλυση του προβλήματος έναντι ενός μοναδικού οικονομικού κριτηρίου όπως η καθαρά παρούσα αξία ή ο χρόνος απόσβεσης, γιατί αυτά δεν αντικατοπτρίζουν σε καμία περίπτωση τον αποφασίζοντα. Κριτήρια για παράδειγμα όπως καθαρή παρούσα αξία, εσωτερικός βαθμός απόδοσης, ή κόστος εξοικονομούμενης ενέργειας μπορεί να ποσοτικοποιούν την ενεργειακή αποδοτικότητα καθιστώντας την έτσι πιο κατανοητή, όμως προσφέρουν μία μονόπλευρη αντίληψη για ένα τόσο περίπλοκο πρόβλημα όπως αυτό της παρούσας έρευνας.

Για τη μελέτη της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων έγινε η επιλογή χρήσης του λογισμικού DesignBuilder και EnergyPlus. Έγινε εφαρμογή στο Πολυτεχνείο Κρήτης στο κτίριο Τεχνικών Υπηρεσιών το οποίο βρίσκεται στα Χανιά.



Σχήμα 1.2: Πρόσοψη του κτιρίου Τεχνικών Υπηρεσιών

Ένα θερμικό μοντέλο του κτιρίου δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού EnergyPlus. Μετά την ανάλυση των ενεργειακών του απαιτήσεων έγινε η επιλογή των τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας, καθορίστηκαν τα κριτήρια αξιολόγησης και με τη μέθοδο UTASTAR τελικά προτάθηκαν οι καλύτερες λύσεις.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 2, ακολουθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση της Ευρωπαϊκής και Ελληνικής νομοθεσίας που αφορά στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και αποσκοπεί στη μείωση των εκπομπών του CO₂. Η νομοθεσία ουσιαστικά εμπεριέχει τους κανονισμούς και τα επιτρεπτά όρια για τις διάφορες παραμέτρους που αποτελούν πηγές κατανάλωσης ενέργειας και αφορούν στο σχεδιασμό νέων κτιρίων αλλά και στην εφαρμογή τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας για τα υφιστάμενα κτίρια. Επίσης αναλύονται όλα τα συστήματα-τομείς των κτιρίων τα οποία ευθύνονται για την ενεργειακή κατανάλωση. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται ο τρόπος που μοντελοποιήθηκε το κτίριο με τη χρήση του DesignBuilder και η επιλογή των διαφόρων παραμέτρων προσομοίωσης.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται η μεθοδολογία απόφασης που ακολουθήθηκε σε αυτήν την έρευνα. Στο κεφάλαιο 4 γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στα κριτήρια και τις μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί. Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται η προτεινόμενη μεθοδολογία απόφασης, καθορίζονται δηλαδή τα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας για το συγκεκριμένο κτίριο, προσδιορίζονται τα κριτήρια αξιολόγησης, και παρουσιάζεται η μέθοδος αξιολόγησης. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 εφαρμόζεται η επιλεγμένη μέθοδος αξιολόγησης (UTASTAR) η οποία τελικά καταλήγει σε ένα εύρος λύσεων.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Προς αποφυγή περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων λόγω κλιματικών αλλαγών οδηγήθηκαν η διεθνής κοινότητα, η Ευρωπαϊκή Ένωση και κατά συνέπεια η Ελλάδα στην αναζήτηση λύσεων για περιορισμό και καταπολέμηση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Δημιουργήθηκε έτσι μία σειρά κοινοτικών οδηγιών και ένα νομοθετικό πλαίσιο που έχουν ως στόχο τον περιορισμό των εκπομπών, κυρίως στα κτίρια, την εξοικονόμηση ενέργειας και την εγκατάσταση εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

2.1 Θεσμικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Για την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια και την ενεργειακή απόδοση κτιρίων και δομικών προϊόντων η Ευρωπαϊκή Ένωση εξέδωσε μια σειρά οδηγιών που συνοψίζονται παρακάτω:

- Οδηγία 2002/91/EK “για την ενεργειακή απόδοση κτιρίων”.
- Οδηγία 89/106/ΕΟΚ “για την προσέγγιση των νομοθετικών, κανονιστικών και διοικητικών διατάξεων των κρατών μελών όσον αφορά τα προϊόντα του τομέα των δομικών κατασκευών”.
- Οδηγία 2006/32/EK “για την ενεργειακή απόδοση κατά την τελική χρήση και τις ενεργειακές υπηρεσίες”.
- Οδηγία 2005/32/EK “για θέσπιση πλαισίου για τον καθορισμό απαιτήσεων οικολογικού σχεδιασμού όσον αφορά τα προϊόντα που καταναλώνουν ενέργεια”
- COM (2007) 1 Ενεργειακή πολιτική για την Ευρώπη.
- COM (2006) 545 Σχέδιο δράσης για την ενεργειακή αποδοτικότητα: Αξιοποίηση του δυναμικού.

2.1.1 Η οδηγία 2002/91/EK (EPBD)

Η Κοινοτική Οδηγία 2002/91/EK για την ενεργειακή απόδοση κτιρίων θέτει περιορισμούς ενεργειακής κατανάλωσης για τη θέρμανση, ψύξη, φωτισμό και ηλεκτρική χρήση στα κτίρια και επιβάλλει την πιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας τους. Οι λόγοι που οδήγησαν την Ευρωπαϊκή Κοινότητα στη δημιουργία της οδηγίας αφορούν στην ενεργειακή της εξάρτηση από το εξωτερικό, που ενδέχεται να φτάσει έως 70% μέχρι το 2030, και στην κλιματική αλλαγή.

Η Οδηγία 2002/91/EK ενσωματώθηκε στο εθνικό δίκαιο με το Νόμο 3661 “Μέτρα για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων και άλλες διατάξεις” (ΦΕΚ Α΄ 89-19 Μαΐου 2008).

Ως στόχο έχει την βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων μέσα στην ΕΕ, με οικονομικά αποδοτικά μέτρα, και τη σύγκλιση των κτιριακών προτύπων προς αυτά των κρατών-μελών που ήδη έχουν υψηλά επίπεδα απαιτήσεων.

2.2 Η πορεία εφαρμογής της ευρωπαϊκής οδηγίας στην Ελλάδα

Δράσεις για την εναρμόνιση της οδηγίας 2002/91/EK (EPBD):

- Κανονισμός Ορθολογικής Χρήσης και Εξοικονόμησης Ενέργειας-KOXEE
Θεσπίστηκε σύμφωνα με ΚΥΑ των Υπουργείων Εθνικής Οικονομίας, Ανάπτυξης, ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε και ΥΠ.ΕΣ.Δ.Δ.Α, Αρ.21475/4707, ΦΕΚ 880/Β/19.8.1998.
- Ολοκλήρωση σχεδίου ΚΟΧΕΕ (10/2003) από ΚΑΠΕ για το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε
- Σύσταση νέας επιτροπής από το ΥΠ.ΑΝ.(Δ6/Β/7461/21.4.2005) με εκπροσώπους από το ΥΠ.ΑΝ., Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., ΤΕΕ, ΕΛΟΤ, ΚΑΠΕ.
- Νέο όνομα “Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων”-KENAK.
- Προσχέδιο Νόμου (γενικό θεσμικό πλαίσιο για την εφαρμογή της Οδηγίας).
- Σχέδιο υπουργικής απόφασης για μητρώο ενεργειακών επιθεωρητών.
- Σύσταση νέας επιτροπής από το ΤΕΕ.
- ΚΥΑ (ΦΕΚ Β 651/27.04.2007) για την προληπτική συντήρηση κλιματιστικών στα δημόσια κτίρια.
- Καταδίκη της Ελλάδας από το Ευρωπαϊκό Δικαστήριο (1/2008) λόγω της μη εναρμόνισης της νομοθεσίας της βάσει της Ευρωπαϊκής Οδηγίας.
- Νέα Ανάθεση από το ΥΠ.ΑΝ. στο ΚΑΠΕ, σύσταση νέας επιτροπής (3/2008).
- Κατάθεση Σχεδίου Νόμου “Μέτρα για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης κτιρίων και άλλες διατάξεις” από το ΥΠ.ΑΝ. (4/2008).
- Ψήφιση νέου Νόμου “Μέτρα για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης κτιρίων και άλλες διατάξεις” του Υπουργείου Ανάπτυξης (ΦΕΚ 89/Α 3661-19/5/2008).
- ΚΥΑ Δ6/Β/14826 “Μέτρα για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την εξοικονόμηση ενέργειας στο δημόσιο και ευρύτερο δημόσιο τομέα” (ΦΕΚ 1122/Β-17/6/2008).

2.2.1 Ο νόμος 3661/2008

Η Ελλάδα παρέλειψε επί τέσσερα χρόνια να εναρμονίσει τη νομοθεσία της σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2002/91/EK της 16^{ης} Δεκεμβρίου 2002 κι έτσι καταδικάζεται από το Δικαστήριο Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων (ΔΕΚ) στις 17 Ιανουαρίου 2008 (C-342/07). Το γεγονός αυτό οδήγησε την Ελλάδα στη θέσπιση του νόμου 3661/2008 στις 19 Μαΐου 2008 ο οποίος στηρίζεται σε παλιότερες νομοθεσίες (Αριθ. 21475/4707 και Αριθ. Δ6/Β/οικ. 11038) που αποσκοπούσαν στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης κτιρίων. Σύμφωνα με το νόμο 3661/2008 προβλέπονται και ορίζονται τα εξής:

- Η μέθοδος υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων.
- Οι ελάχιστες απαιτήσεις για την ενεργειακή απόδοσή τους.
- Ο τύπος και το περιεχόμενο της μελέτης ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων.
- Τα αρμόδια για την εκπόνηση της πρόσωπα.
- Η διαδικασία και η συχνότητα διενέργειας ενεργειακών επιθεωρήσεων των κτιρίων, των λεβήτων, των εγκαταστάσεων θέρμανσης και των συστημάτων κλιματισμού.
- Ο τύπος και το περιεχόμενο του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης.
- Η διαδικασία έκδοσής του, ο έλεγχος αυτής και τα προς τούτο αρμόδια όργανα.
- Το ύψος της δαπάνης έκδοσης του και ο τρόπος υπολογισμού της.

- Τυχόν πρόβλεψη κινήτρων για την εφαρμογή πρόσθετων μέτρων για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων.

2.2.1.1 Καθοριστικοί Παράγοντες στην Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων

Η μέθοδος υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων περιλαμβάνει τα θερμικά χαρακτηριστικά του κτιρίου (κέλυφος και εσωτερικά χωρίσματα, αεροστεγανότητα), την εγκατάσταση θέρμανσης, κλιματισμού και τροφοδοσίας θερμού νερού, περιλαμβανομένων και των χαρακτηριστικών των μονώσεων τους, τον εξαερισμό και το φυσικό αερισμό. Επίσης λαμβάνει υπόψη τη θέση και τον προσανατολισμό των κτιρίων, περιλαμβανομένων και των εξωτερικών κλιματικών συνθηκών αλλά και τις επικρατούσες εσωτερικές κλιματικές συνθήκες, περιλαμβανομένων και των επιδιωκομένων.

Κατά τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων συνεκτιμάται η θετική επίδραση των ακόλουθων παραγόντων:

- Ενεργητικά ηλιακά συστήματα και άλλα συστήματα θέρμανσης, ψύξης και ηλεκτροπαραγωγής, που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Ηλεκτρική ενέργεια παραγόμενη με Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού/Θερμότητας (ΣΗΘ).
- Συστήματα κεντρικής θέρμανσης και ψύξης, σε κλίμακα περιοχής ή οικοδομικού τετραγώνου (τηλεθέρμανση, τηλεψύξη).
- Φυσικός φωτισμός.

Τα κτίρια κατατάσσονται σε οικογενειακές κατοικίες διαφόρων τύπων, σε συγκροτήματα διαμερισμάτων, σε γραφεία και εκπαιδευτικά κτίρια, σε νοσοκομεία, ξενοδοχεία και εστιατόρια και τέλος σε αθλητικές εγκαταστάσεις.

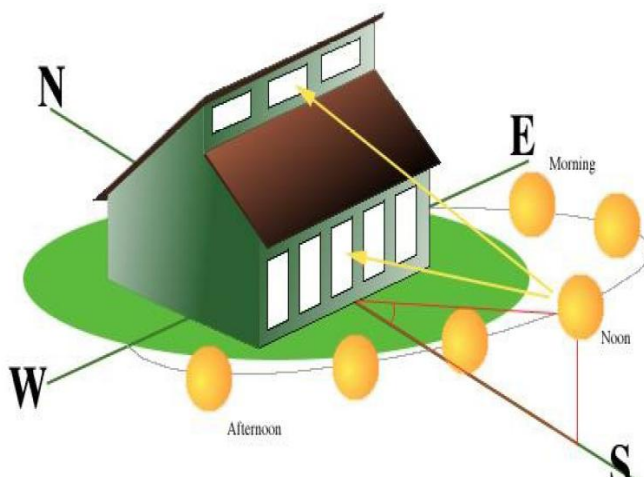
Ορίζεται επίσης αναθεώρηση των ελάχιστων απαιτήσεων για την ενεργειακή απόδοση κάθε πενταετία λόγω τεχνολογικής προόδου στον κτιριακό τομέα. Επίσης η μέθοδος υπολογισμού της απόδοσης θα επανεξετάζεται κάθε δύο χρόνια περίπου. Σημειώνεται ότι ο Κανονισμός ΕΝεργειακής Απόδοσης των Κτιρίων (KENAK) καθορίζει ελάχιστες προδιαγραφές ενεργειακής αποδοτικότητας για όλα τα νέα κτίρια, ενώ ισχύει και για παλαιότερα, τα οποία υφίστανται ριζική ανακαίνιση και έχουν συνολική επιφάνεια μεγαλύτερη από 1000 τμ. (το κόστος της ανακαίνισης υπερβαίνει το 25% της συνολικής αξίας του κτιρίου).

Αναφέρεται επίσης ότι για νέα κτίρια, συνολικής επιφάνειας άνω των 1000 τμ., πριν την έναρξη της ανέγερσης πρέπει να εκπονείται και να υποβάλλεται στην αρμόδια Πολεοδομική Υπηρεσία μελέτη, η οποία περιλαμβάνει την τεχνική, περιβαλλοντική και οικονομική σκοπιμότητα εγκατάστασης ενός εκ των εναλλακτικών συστημάτων παροχής ενέργειας, όπως αποκεντρωμένων συστημάτων παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπαράγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης σε κλίμακα περιοχής ή οικοδομικού τετραγώνου, καθώς και αντλιών θερμότητας. Ο νέος νόμος 3661/2008 προωθεί τη χρήση νέων και καινοτόμων τεχνολογιών στα κτίρια με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας σε αυτά και την υποκατάσταση συμβατικών καυσίμων με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επαναπροσδιορίζοντας τον τρόπο που κατασκευάζονται και ανακατασκευάζονται σήμερα τα κτίρια στην Ελλάδα.

Ο επαναπροσδιορισμός του τρόπου κατασκευής κτιρίων αφορά κυρίως στις αρχές βιοκλιματικού σχεδιασμού οι οποίες εντάσσονται με τη νέα νομοθεσία στην αρχιτεκτονική μελέτη κτιρίων. Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων και χώρων (εσωτερικών και εξωτερικών-υπαίθριων) προϋποθέτει τη χρήση παθητικών συστημάτων για τη θέρμανση, το δροσισμό και το φυσικό φωτισμό του κτιρίου έτσι ώστε να εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια, τον άνεμο και τα υπόλοιπα κλιματικά φαινόμενα με σκοπό να εξασφαλίσει τα παρακάτω:

- ✓ Θερμική προστασία των κτιρίων τόσο το χειμώνα, όσο και το καλοκαίρι με χρήση κατάλληλων τεχνικών που εφαρμόζονται στο εξωτερικό κέλυφος των κτιρίων, ιδιαίτερα με την κατάλληλη θερμομόνωση και αεροστεγάνωση του κτιρίου και των ανοιγμάτων του.
- ✓ Αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση των κτιρίων κατά τη χειμερινή περίοδο και για φυσικό φωτισμό όλο το χρόνο. Αυτό επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο προσανατολισμό των χώρων και ιδιαίτερα των ανοιγμάτων και την διαρρύθμιση των εσωτερικών χώρων ανάλογα με τις θερμικές τους ανάγκες και με τα παθητικά ηλιακά συστήματα που συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και αποτελούν «φυσικά» συστήματα θέρμανσης, αλλά και φωτισμού.
- ✓ Προστασία των κτιρίων από τον καλοκαιρινό ήλιο, κυρίως μέσω της σκίασης, αλλά και της κατάλληλης κατασκευής του κελύφους.
- ✓ Απομάκρυνση της θερμότητας που το καλοκαίρι συσσωρεύεται μέσα στο κτίριο με φυσικό τρόπο προς το εξωτερικό περιβάλλον με συστήματα και τεχνικές παθητικού δροσισμού, όπως ο φυσικός αερισμός τις νυχτερινές ώρες.
- ✓ Βελτίωση-ρύθμιση των περιβαλλοντικών συνθηκών μέσα στους χώρους έτσι ώστε οι άνθρωποι να νιώθουν άνετα και ευχάριστα.
- ✓ Εξασφάλιση επαρκούς ηλιασμού και ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας για φυσικό φωτισμό των κτιρίων, ο οποίος θα πρέπει να εξασφαλίζει επάρκεια και ομαλή κατανομή του φωτός μέσα στους χώρους.
- ✓ Βελτίωση του κλίματος έξω και γύρω από τα κτίρια, με τον βιοκλιματικό σχεδιασμό των χώρων γύρω και έξω από τα κτίρια και εν γένει, του δομημένου περιβάλλοντος, ακολουθώντας όλες τις παραπάνω αρχές.

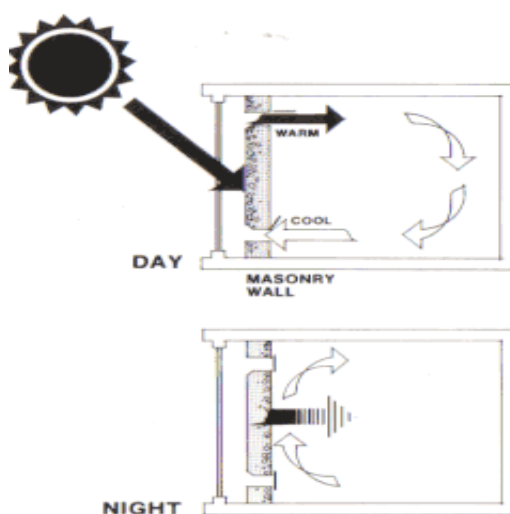
Η βιοκλιματική αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί παθητικά ηλιακά συστήματα τα οποία εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια για θέρμανση των χώρων ενός κτιρίου και για επίτευξη φυσικού φωτισμού. Συλλέγουν και αποθηκεύουν την ηλιακή ενέργεια και τη διανέμουν στο χώρο με τη μορφή θερμότητας. Η συλλογή στηρίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου δηλαδή στην είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω των ανοιγμάτων και στον εγκλωβισμό της θερμότητας στο εσωτερικό του χώρου που καλύπτεται από γυαλί. Ο νότιος προσανατολισμός ενδείκνυται στα κτίρια που βρίσκονται στο Βόρειο Ημισφαίριο καθώς συνδυάζει τον απαιτούμενο ηλιασμό το χειμώνα, ενώ το καλοκαίρι (που ο ήλιος βρίσκεται πιο ψηλά στον ορίζοντα) δέχεται λιγότερη ακτινοβολία, η οποία ελαχιστοποιείται με ένα οριζόντιο σκιάστρο.



Σχήμα 2.1: Πορεία του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας στο νότιο τμήμα ενός κτιρίου.

Ως παθητικά συστήματα ορίζονται επίσης και τα εξής:

- Ηλιακοί τοίχοι: Έχουν στην εξωτερική τους πλευρά, σε μικρή απόσταση από την τοιχοποιία τζάμι (υαλοπίνακα) και λειτουργούν ως ηλιακοί συλλέκτες, μεταφέροντας τη θερμότητα είτε μέσω του υλικού του τοίχου (τοίχος θερμικής αποθήκευσης), είτε μέσω θυρίδων (θερμοσιφωνικό πάνελ) στον εσωτερικό χώρο. Συνδυασμός των δύο λειτουργιών είναι ο τοίχος μάζας με θυρίδες (τοίχος Trombe-Miche).
- Θερμοκήπια (ηλιακοί χώροι): Είναι κλειστοί χώροι που ενσωματώνονται σε νότια τμήματα του κτιριακού κελύφους και περιβάλλονται από υαλοστάσια. Η ηλιακή θερμότητα από το θερμοκήπιο μεταφέρεται στους κυρίως χώρους του κτιρίου μέσω ανοιγμάτων ή και διαπερνά τον τοίχο.
- Ηλιακά αίθρια: είναι εσωτερικοί χώροι του κτιρίου οι οποίοι έχουν στην οροφή τους τζάμι και λειτουργούν όπως τα θερμοκήπια.



Σχήμα 2.2: Τοίχος Trombe-Εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση

Όλα τα παθητικά ηλιακά συστήματα πρέπει να συνδυάζονται με την απαιτούμενη θερμική προστασία (θερμομόνωση) και να υπολογίζονται σε συνδυασμό με την θερμική μάζα του κτιρίου, η οποία αποθηκεύει και αποδίδει τη θερμότητα στο χώρο με χρονική υστέρηση, ομαλοποιώντας έτσι την κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στο εικοσιτετράωρο. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα θα πρέπει το καλοκαίρι να συνδυάζονται με προστασία από τον ήλιο και με δυνατότητα αερισμού.

Οι πιο συνηθισμένες και απλές μέθοδοι φυσικού δροσισμού είναι:

- Η σκίαση του κτιρίου, η οποία επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους και μέσα, όπως η φυσική βλάστηση, τα γεωμετρικά στοιχεία (προεξοχές) του κτιρίου, σκίαστρα μόνιμα ή κινητά τοποθετημένα εξωτερικά ή εσωτερικά των ανοιγμάτων, υαλοπίνακες με ειδικές επιστρώσεις ή ειδικής επεξεργασίας (ανακλαστικοί, επιλεκτικοί, ηλεκτροχρωμικοί, κ.τ.λ.).
- Ο φυσικός εξαερισμός με κατάλληλο σχεδιασμό και λειτουργία των ανοιγμάτων στο κέλυφος και θυρίδες στο πάνω και κάτω τμήμα των διαχωριστικών εσωτερικών τοίχων που επιτρέπουν την κίνηση του αέρα στους εσωτερικούς χώρους.
- Ο νυκτερινός διαμπερής αερισμός είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός, ιδιαίτερα τις θερμές ημέρες, κατά τις οποίες ο ημερήσιος αερισμός δεν είναι δυνατός. Ο νυκτερινός αερισμός μειώνει τη θερμοκρασία της θερμικής μάζας του κτιρίου, με αποτέλεσμα την μειωμένη επιβάρυνση του κτιρίου κατά την επόμενη μέρα.
- Η χρήση ανεμιστήρων, ιδιαίτερα ανεμιστήρων οροφής, ενισχύει το φαινόμενο του φυσικού αερισμού, με ελάχιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Επί πλέον, συνεισφέρει στην επίτευξη θερμικής άνεσης σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τις συνήθεις (περίπου 2-3°C), καθώς με την κίνηση του αέρα αναγάγεται θερμότητα από το ανθρώπινο σώμα λόγω συναγωγής.
- Η χρήση της θερμικής μάζας για τη μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων κατά τη διάρκεια του εικοσιτετράωρου.
- Μείωση των εσωτερικών κερδών του κτιρίου (θερμότητα που παράγεται από τις ηλεκτρικές, κυρίως συσκευές).

Άλλες μέθοδοι παθητικού δροσισμού πιο σύνθετες και όχι τόσο ευρείας εφαρμογής, αλλά που επιφέρουν επιπρόσθετα οφέλη ψύξης είναι η θερμική προστασία του κτιριακού περιβλήματος με τεχνικές όπως φυτεμένο δώμα, αεριζόμενο κέλυφος, ανακλαστικά επιχρίσματα εξωτερικών επιφανειών, φράγμα ακτινοβολίας. Επίσης ο δροσισμός με εξάτμιση νερού με τεχνικές όπως: επιφάνειες νερού, πύργος δροσισμού, ψυκτικές μονάδες εξάτμισης ή και βλάστηση. Δροσισμός θα μπορούσε ακόμη να επιτευχθεί με απόρριψη της θερμότητας στην ατμόσφαιρα με ακτινοβολία στο νυκτερινό ουρανό ή με απόρριψη της θερμότητας από το κτίριο στη γη με αγωγή, (υπόσκαφα ή ημιυπόσκαφα κτίρια, ή υπεδάφιο σύστημα αγωγών και εναλλάκτες εδάφους-αέρα).

Όσον αφορά στον φυσικό φωτισμό, στόχος είναι η επίτευξη οπτικής άνεσης μέσα στα κτίρια, αλλά και γενικότερη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης μέσα στους χώρους, συνδυάζοντας φως, θέα, δυνατότητα αερισμού, αξιοποίηση και ρύθμιση της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας.

Ιδιαίτερη σημασία κατά το σχεδιασμό των συστημάτων φυσικού φωτισμού έχει η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη κάλυψη των απαιτήσεων σε φωτισμό από το φυσικό φως, ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου και την εργασία που επιτελείται μέσα στους χώρους.

Μέσω των κατάλληλων συστημάτων και τεχνικών εξασφαλίζεται στους εσωτερικούς χώρους επαρκής ποσότητα (στάθμη φωτισμού), αλλά και ομαλή κατανομή, ώστε να αποφεύγονται έντονες διαφοροποιήσεις της στάθμης, οι οποίες προκαλούν φαινόμενο «θάμβωσης».

Τα συστήματα φυσικού φωτισμού διακρίνονται σε ανοίγματα στην κατακόρυφη τοιχοποιία, στα αίθρια και στους φωταγωγούς. Τα συστήματα αυτά συνδυάζονται με συγκεκριμένες τεχνικές που αφορούν στο σχεδιασμό των ανοιγμάτων, στις οπτικές ιδιότητες των υαλοπινάκων, στα φωτομετρικά χαρακτηριστικά επιφανειών του χώρου και των ανοιγμάτων του (υφή, χρώμα, φωτοδιαπερατότητα υλικών) και στη χρήση ανακλαστήρων, για την εξασφάλιση επάρκειας και ομαλής κατανομής του φυσικού φωτός. Οι συνηθέστερες τεχνολογίες φυσικού φωτισμού αφορούν υαλοπίνακες με συγκεκριμένες ιδιότητες, πρισματικά φωτοδιαπερατά στοιχεία, διαφανή μονωτικά υλικά και ανακλαστήρες (ράφια φωτισμού ή ανακλαστικές περσίδες).

2.3 Η Ενεργειακή Επιθεώρηση

Όσον αφορά στα υφιστάμενα κτίρια στόχος της Ενεργειακής Επιθεώρησης είναι ο προσδιορισμός των παραγόντων που επηρεάζουν την κατανάλωση και η υπόδειξη οικονομικά εφικτών προτάσεων για εξοικονόμηση ενέργειας και βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε κτίρια ή βιομηχανικές μονάδες. Ο Ενεργειακός Επιθεωρητής είναι μηχανικός ο οποίος διενεργεί ενεργειακές επιθεωρήσεις (κτιρίων, λεβήτων, κλιματιστικών) ο οποίος μετά το πέρας της Ενεργειακής Επιθεώρησης εκδίδει το πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης κτιρίου το οποίο είναι αναγνωρισμένο από το Υπουργείο Ανάπτυξης ή άλλον φορέα. Έχει διάρκεια δέκα ετών και περιλαμβάνει τιμές αναφοράς και κριτήρια συγκριτικής αξιολόγησης έτσι ώστε οι καταναλωτές να έχουν τη δυνατότητα αξιολόγησης της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου. Μία ενεργειακή επιθεώρηση μπορεί ανάλογα με το μέγεθος της προσπάθειας που καταβάλλεται να καταταχθεί στα εξής επίπεδα ενεργειακής ανάλυσης:

Επίπεδο Α: Συνοπτική ενεργειακή επιθεώρηση

Σε αυτό το επίπεδο επιθεώρησης εκτιμώνται τα έξοδα και η ενεργειακή απόδοση με βάση τα τιμολόγια ενέργειας και τα αποτελέσματα μιας σύντομης αυτοψίας. Προσδιορίζονται μέτρα και επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας, οι οποίες είναι άμεσης οικονομικής απόδοσης και απαιτούν ελάχιστα ή μηδενικά κεφάλαια. Επίσης παρέχεται κατάλογος δυνατών παρεμβάσεων ή επενδύσεων μαζί με εκτιμήσεις για τις ενδεχόμενες δαπάνες και το αντίστοιχο όφελος. Σε αυτό το επίπεδο ουσιαστικά εντοπίζονται τα μέτρα άμεσης απόδοσης και τίθενται τα όρια μιας εκτενούς επιθεώρησης.

Τα στάδια μιας συνοπτικής ενεργειακής επιθεώρησης είναι τα εξής:

1. Συλλογή πληροφοριών με τη βοήθεια ερωτηματολογίου.
2. Σύντομη επιθεώρηση στο χώρο.
3. Ανάλυση των ενεργειακών μεγεθών.

Επίπεδο Β:Εκτενής ενεργειακή επιθεώρηση

Στο δεύτερο επίπεδο επιθεώρησης απαιτείται λεπτομερής καταγραφή και ανάλυση των στοιχείων κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου, όπως: θέρμανση, ψύξη, φωτισμός ενώ αναλύονται οι παράγοντες οι οποίοι την επηρεάζουν (κατασκευαστικά υλικά, κλιματικές συνθήκες).

Επίσης, προσδιορίζονται οι δαπάνες και τα οφέλη των επεμβάσεων που είναι σύμφωνα με τις απαιτήσεις της διοίκησης του κτιρίου. Τέλος παρέχεται κατάλογος με σημαντικές επενδύσεις που απαιτούν τη διάθεση κεφαλαίου παράλληλα με τη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων και το ύψος των δαπανών.

Τα στάδια μιας εκτενούς ενεργειακής επιθεώρησης είναι τα εξής:

1. Σχεδιασμός της επιθεώρησης.
2. Συλλογή διαθέσιμων στοιχείων παραγωγής και ενεργειακών καταναλώσεων.
3. Λεπτομερής επιθεώρηση του κτιριακού συγκροτήματος.
4. Εκπόνηση απαραίτητων μετρήσεων για τη συλλογή συγκεκριμένων στοιχείων.
5. Υπολογισμός θερμικών-ενεργειακών ισοζυγίων με στόχο τη μελέτη της ενεργειακής συμπεριφοράς της κτιριακής εγκατάστασης.
6. Αξιολόγηση επεμβάσεων βάσει ενεργειακών, περιβαλλοντικών, τεχνικών, λειτουργικών, οικονομικών και χρηματοδοτικών κριτηρίων.
7. Σχεδιασμός προγράμματος εξοικονόμησης ενέργειας-σχέδιο δράσης.

2.3.1 Τομείς εκπόνησης Ενεργειακής Επιθεώρησης

Οι βασικότεροι τομείς που επιδρά μία ενεργειακή επιθεώρηση είναι το κτιριακό κέλυφος (θερμομόνωση, υαλοπίνακες), τα συστήματα θέρμανσης / κλιματισμού / εξαερισμού (HVAC) και τέλος ο φωτισμός.

2.3.1.1 Θερμομόνωση

Η θερμική προστασία του κελύφους είναι βασική προϋπόθεση για τη σωστή θερμική συμπεριφορά οποιουδήποτε κτιρίου. Η θερμομόνωση αποτελεί βασική αρχή θερμικής προστασίας, μειώνοντας τις ανταλλαγές θερμότητας μεταξύ του κτιρίου και του περιβάλλοντος. Συνίσταται από ένα σύνολο κατασκευαστικών-δομικών στοιχείων (υλικών και συστημάτων) και συνδέεται άμεσα με το κόστος κατασκευής και λειτουργίας των κτιρίων.

Τα συνήθη θερμομονωτικά υλικά εμποδίζουν την αγωγή θερμότητας από το κτίριο προς το εξωτερικό περιβάλλον (αντίστροφα το καλοκαίρι) επειδή περιέχουν ακίνητο αέρα παγιδευμένο είτε σε ίνες (π.χ. υαλοβάμβακας) είτε σε κλειστές κυψελίδες (π.χ. διογκωμένη πολυστερίνη).

Ένα προσεκτικά μονωμένο κτίριο με την απαιτούμενη από τους ισχύοντες κανονισμούς θερμομόνωση, καλύπτει εν γένει τις ανάγκες ενός σωστά σχεδιασμένου από ενεργειακή άποψη κτιρίου, αρκεί να προσεχθεί η μόνωση όλων των δομικών στοιχείων ώστε να αποφεύγονται οι θερμογέφυρες (αμόνωτα ή περιορισμένης μονωτικής ικανότητας στοιχεία του κελύφους), οι οποίες μπορεί να δημιουργήσουν «ευαίσθητα» σημεία στην οικοδομή, ακόμα και συμπύκνωση υδρατμών.

Η Ελλάδα σύμφωνα με τον Κανονισμό Θερμομόνωσης χωρίζεται σε τρεις ζώνες με βάση τις κλιματολογικές συνθήκες στη χώρα. Η ζώνη Α χαρακτηρίζεται από ήπιο κλίμα με αποτέλεσμα τα κτίρια να έχουν μεγάλες ανάγκες σε ψύξη και λιγότερες σε θέρμανση. Στη ζώνη Β τα κτίρια έχουν τις ίδιες ανάγκες σε θέρμανση και ψύξη ενώ στη ζώνη Γ τα κτίρια έχουν μεγάλες ανάγκες σε θέρμανση και μικρότερες σε ψύξη.



Σχήμα 2.3: Οι κλιματικές ζώνες της Ελλάδας.

Οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη θερμομόνωση είναι κυρίως:

- I. Η θερμομονωτική ικανότητα η οποία χαρακτηρίζεται από την αντίσταση θερμοδιαφυγής δηλαδή από την θερμομονωτική ικανότητα ενός στοιχείου. Οι ιδιότητες των υλικών που χαρακτηρίζουν τη θερμομονωτική ικανότητα τους είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, το ποσοστό της υγρασίας που περιέχουν και το πάχος του υλικού.
- II. Ο βαθμός διαπερατότητας του αέρα των στοιχείων κατασκευής ο οποίος εξαρτάται από τα υλικά από τα οποία έχει κατασκευαστεί η εξωτερική τοιχοποιία, από την επιφάνεια των ανοιγμάτων (υαλοπίνακες, πόρτες) και τον συντελεστή θερμοπερατότητας τους ο οποίος ορίζεται ως την ποσότητα της θερμότητας που μεταδίδεται σε μία ώρα από επιφάνεια 1m^2 ενός στοιχείου κατασκευής, όταν η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα που εφάπτεται στις δύο πλευρές του στοιχείου είναι 1°C .
- III. Η θερμοχωρητικότητα των κατασκευαστικών στοιχείων η οποία περιορίζει την ταχύτητα μεταβολής της αρχικής κατάστασης της θερμοκρασίας. Μεγάλη τιμή της θερμοχωρητικότητας σημαίνει ότι οι τοίχοι, η οροφή και το δάπεδο, που αποθήκευαν θερμότητα όσο το σύστημα θέρμανσης λειτουργούσε, την αποβάλλουν σταδιακά όταν η λειτουργία αυτού σταματήσει καθυστερώντας έτσι την ψύξη του χώρου.
- IV. Οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας και αντίστασης θερμοδιαφυγής των κατασκευαστικών υλικών της κατασκευής.

V. Οι απαιτήσεις θερμομόνωσης σύμφωνα με τον Κανονισμό Θερμομόνωσης.

Ο Κανονισμός Θερμομόνωσης ορίζει τις ελάχιστες θερμοκρασίες χώρων οι οποίες αποτελούν προϋπόθεση ώστε να επιτευχθεί θερμική άνεση και ορίζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Επίπεδα θερμοκρασιών για επίτευξη θερμικής άνεσης σε διάφορους χώρους ενός κτιρίου.

Χώροι	°C
Καθημερινό, υπνοδωμάτια, κουζίνες	20
Προθάλαμοι, διάδρομοι, W.C.	15
Κλιμακοστάσια	10
Λουτρό	22
Καταστήματα, γραφεία, εστιατόρια, δωμάτια ξενοδοχείων	20
Κλιμακοστάσια, διάδρομοι, W.C.	15
Αίθουσες διδασκαλίας	20
Χώροι εργαστηρίων	15-18
Αμφιθέατρα	18
Αίθουσες λουτρών, αποδυτήρια	22

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τέσσερις βασικότερες τεχνικές θερμομόνωσης:

1 Τοποθέτηση μονωτικού υλικού στο εσωτερικό του τοίχου.

Η θερμομόνωση τοποθετείται στην εσωτερική πλευρά του τοίχου προστατευόμενη από στερεό δομικό υλικό (π.χ. επίχρισμα).



Σχήμα 2.4: Τοποθέτηση εσωτερικής θερμομόνωσης.

Η τεχνική αυτή έχει διάφορα πλεονεκτήματα όπως μικρή χρονική διάρκεια κατασκευής, μικρό κόστος, κατασκευάζεται με απλό τρόπο, θερμαίνεται σε μικρό χρονικό διάστημα ο χώρος και τέλος δε χρειάζεται να προστατευτεί η μόνωση από εξωτερικές επιδράσεις.

Ωστόσο παρουσιάζει και διάφορα μειονεκτήματα που συνοψίζονται κυρίως στον περιορισμό του εσωτερικού χώρου, στη δύσκολη αντιμετώπιση των θερμογεφυρών και στην απώλεια θερμότητας των χώρων σε μικρό χρονικό διάστημα. Ένα ακόμη πρόβλημα που προκύπτει εξαιτίας της συγκεκριμένης τεχνικής είναι οι συστολές και διαστολές που απειλούν τα δομικά στοιχεία λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών.

2 Τοποθέτηση μονωτικού υλικού στο εξωτερικό του τοίχου.



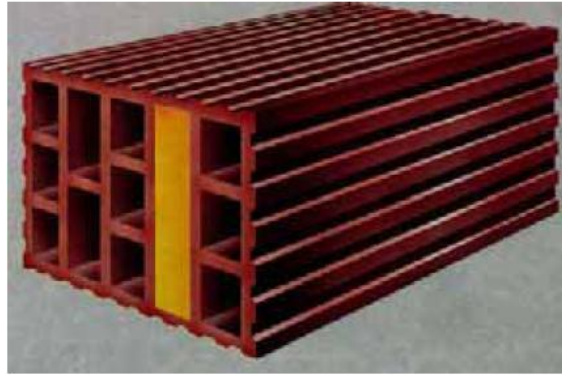
Σχήμα 2.5: Τοποθέτηση εξωτερικής θερμομόνωσης.

Η τεχνική αυτή εκμεταλλεύεται τη θερμοχωρητικότητα των τοίχων ώστε να μειώνεται ο ρυθμός αποβολής της θερμότητας. Δεν περιορίζεται ο εσωτερικός χώρος και οι θερμογέφυρες μπορούν να αντιμετωπιστούν. Τέλος σε σύγκριση με την τοποθέτηση θερμομόνωσης στο εσωτερικό των τοίχων, η συγκεκριμένη τεχνική προστατεύει τα δομικά στοιχεία από συστολές και διαστολές.

Παρόλα αυτά έχει υψηλότερο κόστος σε σχέση με την πρώτη τεχνική και παρουσιάζονται δυσκολίες στην τοποθέτησή της αν υπάρχουν προεξοχές στην αρχιτεκτονική του κτιρίου. Επίσης η τοποθέτηση της απαιτεί σκαλωσιές και τα δομικά υλικά της απαιτούν προστασία από τα καιρικά φαινόμενα.

3 Θερμομόνωση με χρήση ειδικών τούβλων.

Η κατασκευή του τοίχου γίνεται από ειδικά θερμομονωτικά τούβλα τα οποία εξασφαλίζουν τις τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας σύμφωνα με τον Κανονισμό Θερμομόνωσης. Απαιτείται όμως σωστή κατασκευή των επιχρισμάτων ώστε να επιτυγχάνεται η στεγανότητα.



Σχήμα 2.6: Θερμομονωτικό Τούβλο με μόνωση πολυουρεθάνης.

4 Θερμομόνωση στον πυρήνα μεταξύ δύο τοίχων.

Η θερμομόνωση εξασφαλίζεται με την τοποθέτηση του μονωτικού υλικού στη μέση δύο δομικών τοίχων όμως δεν εγγυάται στατική αντοχή του συστήματος σύμφωνα με τον αντισεισμικό κανονισμό. Χρησιμοποιείται ευρέως στην Ελλάδα.



Σχήμα 2.7: Θερμομόνωση στον πυρήνα κατακόρυφου στοιχείου.

2.3.1.2 Υαλοπίνακες

Οι υαλοπίνακες των κτιρίων αποτελούν ένα σημαντικό μέσο μεταφοράς μεγάλης ποσότητας ενέργειας καθορίζοντας έτσι θερμικά και ψυκτικά φορτία και κατ' επέκταση την ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου.

Κατά τη χειμερινή περίοδο μεταφέρεται ενέργεια υπό μορφή θερμότητας μέσω των υαλοπινάκων από το εσωτερικό του κτιρίου στο εξωτερικό περιβάλλον και αντίστροφα κατά τη θερινή περίοδο. Για το λόγο αυτό απαιτούνται καλές θερμομονωτικές ιδιότητες των υαλοπινάκων. Επίσης πρέπει να εξασφαλίζεται και η αεροστεγανότητα ώστε να μην χάνονται ποσά θερμότητας από χαραμάδες.



Σχήμα 2.8: Απώλειες θερμότητας μέσω των υαλοπινάκων

Οι βασικοί παράμετροι που προσδιορίζουν ένα υαλοπίνακα είναι:

- I. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας k ($\text{W/m}^2\text{K}$), ή U , είναι η θερμική ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας που μεταδίδεται εντός/εκτός του κτιρίου και οφείλεται στη διαφορά της θερμοκρασίας ανά βαθμό. Πρέπει να έχει χαμηλή τιμή ώστε οι θερμικές απώλειες το χειμώνα να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα.
- II. Ο συντελεστής ηλιακής ενέργειας g είναι ο λόγος της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας προς την ενέργεια που μεταδίδεται στο εσωτερικό του κτιρίου. Τα ηλιακά κέρδη μπορούν να μειωθούν με χαμηλές τιμές του g .
- III. Ο συντελεστής φωτοδιαπερατότητας T_v είναι το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που εισέρχεται στο κτίριο. Ο φυσικός φωτισμός μπορεί να επιτευχθεί μέσω υψηλών τιμών του T_v .

Οι διπλοί υαλοπίνακες είναι υποχρεωτικοί από το 1979 με βάση τον Κανονισμό Θερμομόνωσης για τα νέα κτίρια. Μία σημαντική τεχνική εξοικονόμησης ενέργειας στα ήδη υπάρχοντα κτίρια είναι η αντικατάσταση των μονών υαλοπινάκων με διπλούς που παρόλο το κόστος επιφέρει ικανοποιητική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Ειδικοί υαλοπίνακες στην εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση, ψύξη και φυσικό φωτισμό πέρα από τους διπλούς είναι οι παρακάτω:

Επιλεκτικοί υαλοπίνακες χαμηλού συντελεστή εκπομπής (low-e): Εμποδίζουν μεγάλο μέρος της θερμικής ακτινοβολίας είτε να εισέρχεται προς το κτίριο, είτε να εκπέμπεται προς το εξωτερικό περιβάλλον (ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο τοποθετούνται). Συνιστώνται για τη μείωση των θερμικών απωλειών (το χειμώνα) ή κερδών (το καλοκαίρι) των κτιρίων, ανάλογα με τις θερμικές απαιτήσεις του κτιρίου και το κλίμα της περιοχής στην οποία βρίσκεται.

Θερμομονωτικοί υαλοπίνακες: Εκτός από τους συνήθεις διπλούς (ή τριπλούς) υαλοπίνακες, αυξημένη θερμομονωτική ικανότητα έχουν υαλοπίνακες που στο διάκενό τους περιέχουν άλλο αέριο (π.χ. αργό) αντί για αέρα. Συνιστώνται σε κτίρια με μεγάλα ανοίγματα, όπου απαιτείται υψηλή θερμομόνωση του κελύφους.

Ανακλαστικοί υαλοπίνακες: Ανακλούν σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας και συνιστώνται για τη μείωση των ηλιακών κερδών, αλλά μπορεί να προκαλέσουν θάμβωση στον περιβάλλοντα χώρο και στα γύρω κτίρια.

Το ΚΑΠΕ προσομοίωσε ένα τυπικό διαμέρισμα 100 m² σε τέσσερις πόλεις στην Ελλάδα με διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες αντικαθιστώντας παλιούς υαλοπίνακες με νέους διπλούς με διάκενο υπολογίζοντας την εξοικονόμηση ενέργειας και πετρελαίου. Ο Πίνακας 2.2 παρουσιάζει την εξοικονόμηση ενέργειας και πετρελαίου ανάλογα με τον τύπο του υαλοπίνακα.

Πίνακας 2.2 Εξοικονόμηση ενέργειας/πετρελαίου σε τυπικό διαμέρισμα από τη χρήση βελτιωμένων υαλοπινάκων σε 4 κλιματικές ζώνες της Ελλάδας [4].

Τύπος Υαλοπίνακα	Εξοικονόμηση Ενέργειας (kWh)	Εξοικονόμηση Πετρελαίου (λίτρα)
Διπλός 4-6-4	12.216	1.222
Διπλός 4-12-4	14.381	1.438
Διπλός χαμηλής εκπομπής με αργό 4-12-4	16.421	1.642
Διπλός 4-6-4	8.551	855
Διπλός 4-12-4	10.007	1.001
Διπλός χαμηλής εκπομπής με αργό 4-12-4	11.604	1.160
Διπλός 4-6-4	5.192	519
Διπλός 4-12-4	6.016	602
Διπλός χαμηλής εκπομπής με αργό 4-12-4	7.473	747
Διπλός 4-6-4	4.191	419
Διπλός 4-12-4	4.449	445
Διπλός χαμηλής εκπομπής με αργό 4-12-4	5.491	549

2.3.1.3 Συστήματα HVAC

Το συστήματα HVAC ή αλλιώς συστήματα θέρμανσης (Heating)/ ψύξης (Ventilation)/κλιματισμού (Air Conditioning) είναι υπεύθυνα για τον θερμικό έλεγχο στο εσωτερικό περιβάλλον ενός κτιρίου και κατ' επέκταση για τη θερμική άνεση των ενοίκων-εργαζομένων σ' αυτό που επηρεάζει την υγεία και παραγωγικότητα τους. Χρησιμοποιούνται για τον ενεργειακό έλεγχο και διαμορφώνουν επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας καθώς και για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα.

Το σύστημα HVAC αποτελεί σημαντικό παράγοντα στον σχεδιασμό ενός κτιρίου καθώς η εγκατάσταση του εξοπλισμού και των διατάξεων διανομής καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος του όγκου του κτιρίου. Ένα μεγάλο ποσοστό του συνολικού προϋπολογισμού της κατασκευής του κτιρίου οφείλεται στα συστήματα HVAC. Μία λάθος επιλογή κατά το σχεδιασμό μπορεί να αυξήσει το αρχικό κόστος εγκατάστασης.

Ένα *σύστημα θέρμανσης* είναι υπεύθυνο για την παραγωγή ενέργειας με σκοπό τη θέρμανση των χώρων και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Η θέρμανση αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κεφάλαιο της ενεργειακής επιθεώρησης. Τα περισσότερα κτίρια της Ελλάδας χρησιμοποιούν κεντρικό σύστημα θέρμανσης το οποίο αποτελείται από:

- Το λέβητα.
- Τον καυστήρα.
- Το δίκτυο αγωγών διανομής νερού.
- Τα θερμαντικά σώματα (καλοριφέρ).

Για να μεταφερθεί η θερμότητα καύσης από το λέβητα στο νερό χρησιμοποιείται μια διάταξη σωλήνων. Οι σωλήνες διακρίνονται σε υδροσωλήνες και φλογοσωλήνες και καθορίζουν έτσι τα δύο είδη λεβήτων που κυκλοφορούν στο εμπόριο.

Στους λέβητες φλογοσωληνών [5] τα καυσαέρια κυκλοφορούν μέσα σε σωλήνες βυθισμένους στο νερό του λέβητα. Η μέγιστη ισχύ τους είναι 10.000 kg ατμού ανά ώρα σε πίεση 16 atm. Η διαδικασία εγκατάστασης και συντήρησης τους είναι απλή.

Στους λέβητες υδροσωληνών [5] το νερό κυκλοφορεί μέσα σε σωλήνες που περιβάλλονται από καυσαέρια. Με μέγιστη ισχύ 1000 MW δίνουν 400 kg ατμού ανά ώρα. Μπορούν όμως να φτάσουν τα 250.000 kg ατμού ανά ώρα (βιομηχανικοί λέβητες). Οι λέβητες για την παραγωγή ενέργειας με σκοπό τη θέρμανση του νερού καταναλώνουν σημαντικές ποσότητες καυσίμων. Για το λόγο αυτό η θερμική απόδοση τους αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα.

Για την καύση χρησιμοποιούνται υδρογονάνθρακες και μέσω της χημικής αντίδρασης άνθρακα-οξυγόνου παράγεται ενέργεια. Οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας μπορούν να επιτευχθούν με την πλήρη καύση του καυσίμου. Για να γίνει αυτό πρέπει να υπάρχει 10% περίσσεια αέρα η οποία δίνει και το βέλτιστο λόγο αέρα/καυσίμου. Η *ολική απόδοση του λέβητα* περιλαμβάνει το βαθμό απόδοσης της καύσης, τις απώλειες καπνοδόχου και τις απώλειες θερμότητας από τις εξωτερικές επιφάνειες του λέβητα και ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού θερμικού έργου που αποδίδει (E_{out}) προς το αντίστοιχο θερμικό που προσδίδεται σ' αυτόν (E_{in}) [5]:

$$\eta_b = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (2.1)$$

Τα σημεία ελέγχου για τη ρύθμιση της λειτουργίας του λέβητα [5] είναι:

- **Θερμοκρασία καμινάδας:** Χαμηλότερη θερμοκρασία καμινάδας σημαίνει μεγαλύτερη απόδοση στην καύση. Για σωστή μεταφορά θερμότητας πρέπει οι σωλήνες μέσα στο λέβητα να καθαρίζονται ώστε να απομακρύνονται η αιθάλη, οι επικαθήσεις και οι επιστρώσεις. Παρ' όλα αυτά η θερμοκρασία θα πρέπει να διατηρείται σε κανονικά επίπεδα, να μην έχει πολύ χαμηλή τιμή ώστε να αποφευχθεί η συμπύκνωση υδρατμών στην καμινάδα που σε συνδυασμό με το θείο προκαλούν τη διάβρωσή της.
- ✓ **Επίπεδο CO₂:** Υψηλές τιμές του διοξειδίου του άνθρακα κάνουν αποδοτικότερη την καύση.

- ✓ Επίπεδο CO: Όταν η καύση είναι ατελής τότε εμφανίζεται ποσότητα μονοξειδίου του άνθρακα. Σε φυσιολογικές συνθήκες το CO δεν εμπεριέχεται στα καυσαέρια.
- ✓ Επίπεδο O₂: Η καύση γίνεται πιο αποδοτική με χαμηλές τιμές του οξυγόνου. Το επιτρεπτό όριο είναι 10%.

Ο νόμος 3661/2008 ορίζει για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και για τον περιορισμό των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα να γίνεται ενεργειακή επιθεώρηση στους λέβητες κτιρίων που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα τουλάχιστον κάθε πέντε έτη, στους λέβητες με ωφέλιμη ονομαστική ισχύ από 20 έως και 100 kW, τουλάχιστον κάθε δύο έτη, στους λέβητες με ωφέλιμη ονομαστική ισχύ ανώτερη από 100 kW και κάθε τέσσερα χρόνια για λέβητες που θερμαίνονται με αέριο καύσιμο.

Οι ενέργειες που μπορούν να επιφέρουν βελτίωση στη θερμική απόδοση του λέβητα είναι οι εξής:

I. Ρύθμιση του υφιστάμενου λέβητα.

- Μόνωση του περιβλήματος του λέβητα με σκοπό τη μείωση των απωλειών.
- Εγκατάσταση ελατηρίων στους φλογοσωλήνες για την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ καυσαερίων και νερού. Τα ελατήρια μειώνουν τη θερμοκρασία των καυσαερίων. Για κάθε 50 °C μείωση έχουμε αύξηση της απόδοσης του λέβητα κατά 2,5 % [5].
- Εγκατάσταση φυσητήρων αιθάλης οι οποίοι μειώνουν τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ καυσαερίων και νερού απομακρύνοντας τις επικαθίσεις στους σωλήνες.
- Χρήση εξοικονομητών (economizers) για τη μεταφορά ενέργειας από τα καυσαέρια στο νερό τροφοδοσίας. Για κάθε αύξηση 5 °C της θερμοκρασίας του νερού επιτυγχάνεται αύξηση κατά 1% της απόδοσης του λέβητα [5].
- Χρήση προθερμαντήρων του αέρα για τη μεταφορά ενέργειας από τα καυσαέρια στον αέρα καύσης.

II. Αντικατάσταση του υφιστάμενου λέβητα με λέβητα υψηλής απόδοσης.

Οι λέβητες που κατασκευάζονται σήμερα επιτυγχάνουν απόδοση καύσης έως και 95% σε αντίθεση με τους συμβατικούς οι οποίοι έχουν ικανοποιητική απόδοση στα 85%. Ένας λέβητας υψηλής απόδοσης, λόγω της τεχνολογίας του, θεωρείται ο λέβητας παλμικής καύσης. Λειτουργούν όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης. Η διαδικασία της καύσης συνεχίζεται αυτόματα μετά τη θέρμανση του θαλάμου καύσης, χωρίς την ανάγκη καυστήρα ή φλόγας. Έτσι σχεδόν όλη η θερμότητα καύσης χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του νερού του λέβητα ενώ η λανθάνουσα θερμότητα από τα προϊόντα της καύσης χρησιμοποιείται για συμπύκνωση των καυσαερίων. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται και η απόδοση του λέβητα. Η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει ως και 99%. Οι λέβητες παλμικής καύσης έχουν την ικανότητα να φτάσουν στη θερμοκρασία λειτουργίας τους σχεδόν στο μισό χρόνο από αυτόν των συμβατικών εκπέμποντας παράλληλα λιγότερους ρύπους.

III. Χρήση λεβήτων με υπομονάδες.

Σχεδόν όλα τα συστήματα θέρμανσης είναι σχεδιασμένα να αποδίδουν περισσότερο σε λειτουργία σε πλήρη ισχύ. Στις εγκαταστάσεις αυτές σπανίως υφίστανται φορτία αιχμής με αποτέλεσμα

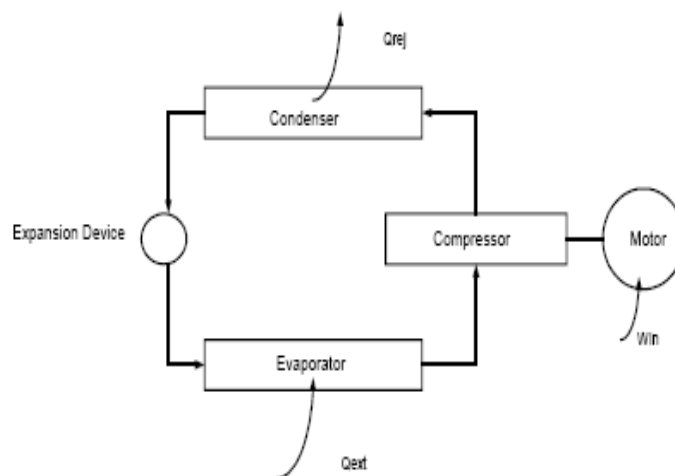
ο λέβητας να λειτουργεί υπό συνθήκες μερικού φορτίου. Μερικοί λέβητες μπορεί να λειτουργούν αναγκαστικά με κυκλικό ρυθμό εκκίνησης-διακοπής το οποίο αποτελεί μη αποδοτική μορφή λειτουργίας γιατί όταν διακόπτεται χάνεται θερμότητα μέσω της καμινάδας προς το περιβάλλον και ψύχεται το νερό στους σωλήνες διανομής. Για να αποφευχθεί η λειτουργία εκκίνησης-διακοπής προτείνεται να γίνεται έλεγχος της λειτουργίας του λέβητα με χρήση βηματικών (υψηλός/χαμηλός/μηδενικός) ρυθμών καύσης ή να γίνεται εγκατάσταση ενός αριθμού μικρότερων λεβήτων ή λεβήτων με υπομονάδες.

Οι λέβητες με υπομονάδες λειτουργούν ως εξής: αρχίζει να λειτουργεί μόνο ένας με σκοπό την κάλυψη μικρών θερμικών φορτίων. Στη συνέχεια καθώς αυξάνεται το φορτίο οι υπόλοιποι λέβητες ξεκινούν μπαίνοντας σε σειρά ώστε να αυξηθεί σταδιακά το δυναμικό του συστήματος θέρμανσης. Στην πορεία καθώς μειώνεται το φορτίο σταματούν να λειτουργούν ένας-ένας. Για μεγάλη διακίνηση φορτίων θέρμανσης ή ζεστού νερού χρήσης (ξενοδοχεία, σχολεία, μεγάλες πολυκατοικίες) οι λέβητες με υπομονάδες είναι οι πλέον κατάλληλοι καθώς μπορούν να αυξήσουν την απόδοση του συστήματος από 15 έως 30% [5].

Συνοπτικά οι τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας είναι:

- Συντήρηση- καθαρισμός του καυστήρα.
- Μόνωση του δικτύου θέρμανσης, του λέβητα και των βαλβίδων.
- Αντικατάσταση του καυστήρα.
- Χρήση συστήματος αυτομάτου ελέγχου.
- Σωστή ενεργειακή συμπεριφορά των χρηστών.

Όσον αφορά στα *συστήματα κλιματισμού*, χρησιμοποιούνται στον κτιριακό τομέα με σκοπό την ψύξη των εσωτερικών χώρων, που επιτυγχάνεται αφαιρώντας θερμότητα από το εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον κατά τη θερινή περίοδο, και τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε φυσιολογικά επίπεδα ώστε να επιτευχθεί η θερμική άνεση των κατοίκων. Ένα ψυκτικό σύστημα αποτελείται κυρίως από ένα συμπιεστή, ένα συμπυκνωτή, ένα εξατμιστή, μία διάταξη διαστολής και βοηθητικό εξοπλισμό και παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.9: Ψυκτικό σύστημα οδηγούμενο από ηλεκτρικό κινητήρα

Διακρίνονται στις παρακάτω βασικές κατηγορίες:

- Τα *αυτόνομα κλιματιστικά συστήματα* που χρησιμοποιούνται σε κατοικίες και μικρά εμπορικά κτίρια. Σ' αυτά ανήκουν τα ατομικά κλιματιστικά, οι αντλίες θερμότητας και οι ολοκληρωμένες κλιματιστικές μονάδες (συστήματα οροφής, κάθετα και διαιρούμενα συστήματα). Η λειτουργία τους στηρίζεται στους εναλλάκτες θερμότητας αέρα-ψυκτικού μέσου για την ψύξη ή θέρμανση του αέρα. Η εξάτμιση του ψυκτικού μέσου προκαλεί την ψύξη του αέρα ενώ η συμπύκνωση του προκαλεί τη θέρμανση του αέρα. Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν και οι *αντλίες θερμότητας* οι οποίες είναι ιδιαίτερα αποδοτικές όταν χρησιμοποιούνται και για ψύξη εκτός από τη θέρμανση. Αποδίδουν θέρμανση ή ψύξη στο χώρο εκμεταλλευόμενες τη θερμική ενέργεια μιας δεξαμενής θερμότητας. Δεξαμενή μπορεί να θεωρηθεί ο αέρας που περιβάλλει το κτίριο, το νερό ή το έδαφος.
- Τα *κεντρικά συστήματα* χρησιμοποιούνται σε μεγάλα κτίρια ψύχοντας νερό για τον κλιματισμό των χώρων με τη βοήθεια ηλεκτροκινητήρων, στροβιλοκινητήρων ή κινητήρων συμβατικών καυσίμων. Ο αέρας ψύχεται στην κεντρική μονάδα διαχείρισης αέρα (Air Handling Units) και μεταφέρεται μέσω αγωγών στους χώρους προς κλιματισμό. Από την κεντρική μονάδα κλιματισμού αναρροφάται εξωτερικός αέρας, ο οποίος αναμιγνύεται με ένα τμήμα του αέρα που επιστρέφει στο κτίριο και φιλτράρεται. Η ψύξη του νερού γίνεται σε ψυκτικές μονάδες ψύχοντας έτσι τον αέρα ο οποίος τελικά οδηγείται μέσα στην κεντρική μονάδα κλιματισμού σε εναλλάκτες αέρα-νερού (ψυκτικά στοιχεία). Αντίθετα η θέρμανση του αέρα γίνεται θερμαίνοντας νερό στο λέβητα. Ο θερμός αέρας οδηγείται κι αυτός με τη σειρά του στην κεντρική μονάδα κλιματισμού σε εναλλάκτες αέρα-νερού (θερμαντικά στοιχεία).
- Στα *συστήματα κλιματισμού με αέρα μεταβλητής παροχής* (Variable Air Volume) ο αέρας εισέρχεται στους χώρους με σταθερή θερμοκρασία αλλά η παροχή του αυξομειώνεται ανάλογα με τις διακυμάνσεις του φορτίου. Περιλαμβάνει ανεμιστήρες μεταβλητής ταχύτητας και θερμοστάτη ο οποίος ελέγχει τη διαφορά θερμοκρασίας και δίνει εντολή να μεταβληθεί η παροχή ώστε να επιτευχθεί η προσδοκώμενη θερμοκρασία στο χώρο.
- Τα *συστήματα κλιματισμού αέρα-νερού* όπου ο έλεγχος των συνθηκών του αέρα γίνεται με την κυκλοφορία του αέρα των χώρων μέσα από κατάλληλες τερματικές συσκευές στις οποίες κυκλοφορεί θερμό ή ψυχρό νερό (Fan-coils/Σώματα Εξαναγκασμένης Κυκλοφορίας). Οι συσκευές αυτές περιλαμβάνουν το θερμαντικό/ψυκτικό στοιχείο και τον ανεμιστήρα για την εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα. Ο φρέσκος αέρας παρέχεται από μία μονάδα διαχείρισης αέρα ή μπορεί να προέρχεται άμεσα από το εξωτερικό περιβάλλον και να διέρχεται μέσω του ανεμιστήρα. Η ψύξη του νερού γίνεται σε ψυκτικές μονάδες και η θέρμανση του σε λέβητες. Για τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός δικτύου αεραγωγών και σωληνώσεων. Για να καθοριστεί η ενεργειακή αποδοτικότητα ενός τέτοιου συστήματος χρησιμοποιείται ο συντελεστής απόδοσης COP (Coefficient Of Performance). Είναι ο λόγος της θερμότητας που απάγεται προς την απαιτούμενη παρεχόμενη ενέργεια [5]:

$$COP = \frac{Q_{ext}}{W_{in}} \quad (2.2)$$

Για να εκτιμηθεί η δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης του συστήματος ο COP συγκρίνεται με τη μέγιστη θεωρητική τιμή του η οποία αντιστοιχεί στον κύκλο Carnot και εκφράζεται ως [5]:

$$COP_{Carnot} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (2.3)$$

Όπου:

T_C : η χαμηλότερη θερμοκρασία του κύκλου (απόλυτη θερμοκρασία εξατμιστή) και

T_H : η υψηλότερη θερμοκρασία του κύκλου (απόλυτη θερμοκρασία συμπυκνωτή)

Η αντικατάσταση υφιστάμενου ψυκτικού συστήματος με σύστημα υψηλής απόδοσης αποτελεί μία τεχνική εξοικονόμησης ενέργειας. Συστήματα ψύξης παλαιότερα των 10-15 ετών πρέπει να αξιολογούνται ώστε είτε να αντικαθίστανται με πιο αποδοτικά συστήματα (δύο συμπιεστών ή συμπιεστών μεταβλητής ταχύτητας ή ελικοειδών συμπιεστών) είτε να αναβαθμίζονται. Τεχνικές αναβάθμισης της ψυκτικής μονάδας για βελτίωση του συντελεστή απόδοσης είναι:

- Αύξηση της επιφάνειας του εξατμιστή και του συμπυκνωτή ώστε η μεταφορά ενέργειας να είναι πιο αποδοτική.
- Βελτίωση στην απόδοση και στο σύστημα ελέγχου του συμπιεστή.
- Μεγέθυνση των σωληνώσεων για μείωση των τριβών.
- Βελτιστοποίηση της μόνωσης με την τοποθέτηση καλύτερων μονωτικών υλικών στις σωληνώσεις και τους ψυκτικούς θαλάμους.
- Συντήρηση του ψυκτικού συστήματος για αύξηση ή διατήρηση της απόδοσης.
- Τοποθέτηση συστημάτων αυτομάτου ελέγχου ώστε να ελέγχεται η θερμοκρασία τροφοδοσίας του κρύου νερού και η θερμοκρασία του νερού του συμπυκνωτή.

Εκτός από τα συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού εξίσου σημαντικά είναι και τα *συστήματα εξαερισμού* καθώς η ποιότητα του αέρα του εσωτερικού χώρου ενός κτιρίου εξαρτάται από την ποσότητα φρέσκου αέρα που εισέρχεται στο κτίριο. Μέσω του εξαερισμού μπορούμε να πετύχουμε συνθήκες θερμικής άνεσης για τους κατοίκους αλλά και εξοικονόμηση στα συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού. Η παροχή φρέσκου αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου γίνεται μέσω του εξαερισμού, είτε αυτός είναι φυσικός είτε τεχνητός καθώς και μέσω διήθησης.

Ο φυσικός εξαερισμός είναι η ροή του αέρα από τα ανοίγματα (πόρτες, παράθυρα) ενώ ο τεχνητός εξαερισμός είναι η εξαναγκασμένη ροή του αέρα που οφείλεται στη χρήση ανεμιστήρων και αεραγωγών. Η διήθηση (infiltration) του αέρα γίνεται μέσω χαραμιάδων-ρωγμών που υπάρχουν στο κέλυφος του κτιρίου ή από αστοχία στη σωστή στεγανοποίηση των κουφωμάτων.

Ο φυσικός εξαερισμός έχοντας μηδενικό κόστος μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας στα συστήματα ψύξης. Ειδικότερα η σωστή λειτουργία των παραθύρων κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου τη νύχτα μπορεί να ελαχιστοποιήσει τη χρήση κλιματιστικών σε συνδυασμό με άλλα μέτρα.

Πίνακας 2.3 Απαιτήσεις εξαερισμού για διάφορους χώρους κτιρίων [5]

Είδος χώρου	Παροχή αέρα εξαερισμού (m ³ /h ανά άτομο)
Δωμάτια	17-26
Τουαλέτες	51-85
Δημόσιοι χώροι	17-26
Αίθουσες Συναντήσεων	34-51
Δημόσιες τουαλέτες	26-34
Τραπεζαρίες	68-85

Παρ' όλα αυτά η περίσσεια αέρα εξαερισμού στο εσωτερικό του κτιρίου μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των φορτίων θέρμανσης ή ψύξης. Για το λόγο αυτό η παροχή αέρα εξαερισμού είναι απαραίτητο να υπολογιστεί και να συγκριθεί με τα πρότυπα. Ο Πίνακας 2.3 παρουσιάζει την απαιτούμενη παροχή αέρα εξαερισμού για διάφορους τύπους κτιρίων.

Ο ρυθμός εναλλαγής του αέρα (I) ορίζεται ως η παροχή αέρα εξαερισμού (Q) ως προς τον όγκο του αεριζόμενου χώρου (V) [6]:

$$I = \frac{Q}{V} \quad (2.4)$$

2.3.1.4 Φωτισμός

Σημαντική παράμετρο του σχεδιασμού αλλά και της ενεργειακής επιθεώρησης ενός κτιρίου αποτελεί ο φωτισμός καθώς έχει επίδραση στην ενεργειακή κατανάλωση αλλά και στην οπτική άνεση των κατοίκων. Σχεδιαστικό στόχο αποτελεί η χρήση και ομοιόμορφη κατανομή φυσικού φωτισμού ώστε να μειωθούν στο ελάχιστο οι απαιτήσεις χρήσης τεχνητού φωτισμού. Παρ' όλα αυτά χώροι εργασίας όπως γραφεία απαιτούν διαφορετικό επίπεδο φωτισμού με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται το 30 έως 50% [5] της απαιτούμενης ενέργειας για φωτισμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εσωτερικών θερμικών φορτίων λόγω της θερμότητας που παράγεται.

Η εξασφάλιση της οπτικής άνεσης γίνεται μέσω της παροχής της απαιτούμενης ποσότητας φωτισμού με βάση τις διεθνείς συστάσεις οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τη χρήση και τις λειτουργικές απαιτήσεις του εκάστοτε χώρου αλλά και μέσω της ποιότητας φωτισμού η οποία εξαρτάται από τη χρωματική απόδοση και το χρώμα του φωτισμού, από τη σωστή κατανομή και αποφυγή φαινομένων θάμβωσης (μείωση οπτικής ικανότητας λόγω υψηλής λαμπρότητας) κ.λπ.

Για να εκτιμηθεί η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται για την ενίσχυση του φωτεινότητας του χώρου πρέπει να ληφθούν υπόψη η ποσότητα του φωτισμού (lux) και οι ώρες λειτουργίας. Παρακάτω παρουσιάζεται η εξίσωση για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουν τα φωτιστικά σε ένα χώρο [5]:

$$E_{el} = \sum_{j=1}^j N_{Lum,j} WR_{Lum,j} N_{h,j} \quad (2.5)$$

Όπου :

E_{el} : η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται για το φωτισμό

$N_{Lum,j}$: ο αριθμός φωτιστικών τύπου j,

$WR_{Lum,j}$: η κατανάλωση ισχύος για κάθε φωτιστικό και

$N_{h,j}$: ο αριθμός των ωρών λειτουργίας ανά έτος των φωτιστικών

Η υψηλή οπτική ποιότητα εξαρτάται από το απαιτούμενο επίπεδο φωτισμού ανάλογα με τη φύση της εργασίας. Ο παρακάτω πίνακας ορίζει τα επιτρεπτά επίπεδα φωτισμού με βάση την κατηγορία του κτιρίου:

Πίνακας 2.4 Επίπεδα φωτισμού χώρων κτιρίου σύμφωνα με το πρότυπο EN 12464-1.

Τύπος κτιρίου	Χώρος	Επίπεδο έντασης φωτισμού E_m σε Lx
Κτίρια γραφείων	Απλά γραφεία	500
	Ανοιχτοί χώροι γραφείων	500
	Αίθουσες Συνεδριάσεων	500
Εκπαιδευτήρια	Αίθουσες	300
	Αίθουσες εκπαίδευσης ενηλίκων	500
	Αμφιθέατρα	500
Νοσοκομεία	Γενικός Φωτισμός θαλάμου	100
	Θάλαμος εξετάσεων	300
	Θάλαμος εξετάσεων και θεραπείας	1000
Αθλητικές	Αθλητικές	300

Εγκαταστάσεις	αίθουσες	
Αποθήκες και χώροι λιανεμπορίου	Χώρος πωλήσεων	300
	Ταμεία	500
Κοινόχρηστοι χώροι	Κλιμακοστάσιο	150
	Διάδρομοι	100

Με την υιοθέτηση κατάλληλων μέτρων και τεχνικών, βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση των συστημάτων τεχνητού φωτισμού επιφέρουν εξοικονόμηση ενέργειας σε ποσοστό 30-50 %. Τέτοια μέτρα είναι ο σωστός σχεδιασμός του τεχνητού φωτισμού με ταυτόχρονη αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού, η χρήση λαμπτήρων υψηλής απόδοσης και χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, η επιλογή κατάλληλων φωτιστικών σωμάτων, η χρήση ηλεκτρονικών στραγγαλιστικών διατάξεων, η εγκατάσταση συστημάτων ελέγχου και τέλος η σωστή συντήρηση των φωτιστικών σωμάτων.

Ενεργειακοί λαμπτήρες θεωρούνται οι *λαμπτήρες φθορισμού* οι οποίοι έχουν υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής. Αποτελούνται από ένα σωλήνα γεμάτο με μίγμα αδρανούς αερίου με μικρή ποσότητα υδραργύρου και ένα ζεύγος ηλεκτροδίων σε κάθε άκρο. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εμπορικά κτίρια και η απόδοσή τους είναι 70-80 lumens/W. Οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού είναι μικρότεροι σε μέγεθος και λιγότερο αποδοτικοί παρέχοντας μόνο 35-55 lumens/W [5]. Θεωρούνται ψυχρότεροι (ως προς τη χρωματική απόκριση) από τους από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως έχοντας όμως μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση. Το κόστος τους είναι υψηλότερο αλλά έχουν 10-15 φορές μεγαλύτερη διάρκεια ζωής [8].

Πίνακας 2.5 Αντιστοιχία ισχύος ενεργειακών λαμπτήρων και λαμπτήρων πυρακτώσεως.

Λαμπτήρας χαμηλής κατανάλωσης (W)	Κοινός λαμπτήρας πυρακτώσεως (W)
5	25
7	40
11	60
15	75
20	100
23	120

Οι *λαμπτήρες αλογόνου* είναι ενεργειακά αποδοτικότεροι από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως κατά 30% [8]. Παρέχουν λευκότερο φως και διαρκούν περισσότερο.

Στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των φωτιστικών φθορισμού συμβάλουν οι αντισταθμιστικές διατάξεις. Αυτό συμβαίνει καθώς το φως πάλλεται πιο γρήγορα και είναι λαμπρότερο. Ουσιαστικά παρέχουν το απαιτούμενο επίπεδο τάσης για την εκκίνηση του ηλεκτρικού τόξου και τη ρύθμιση της έντασης του. Οι ηλεκτρονικές αντισταθμιστικές διατάξεις μπορούν να αποδώσουν μέχρι και 95 lux/W, ανάλογα με το είδος του λαμπτήρα, σε αντίθεση με τις συμβατικές μαγνητικές αντισταθμιστικές διατάξεις.

Πλεονεκτήματα ηλεκτρονικών αντισταθμιστικών διατάξεων [8]:

- Υψηλό συντελεστή ισχύος μεταξύ 0.90-0.98.
- 25% εξοικονόμηση ενέργειας από την αντικατάσταση των μαγνητικών με ηλεκτρονικά.
- 10-20% περισσότερο φως.
- Δεν γίνεται αντιληπτό το τρεμόπαιγμα σε αντίθεση με τα μαγνητικά.
- Δεν υπάρχει πρόβλημα θορύβου.

Πίνακας 2.6 Η απόδοση και η μέση ζωή διαφόρων τύπων λαμπτήρων

Τύπος λαμπτήρα	Απόδοση (lm/W)	Μέση ζωή (ώρες)
Πυρακτώσεως	8–25	1000–2000
Ατμών υδραργύρου	13–48	12.000–24.000
Αλογονιδίων μετάλλου	60–100	10.000–15.000
Νατρίου υψηλής πίεσης	40–110	12.000–24.000
Φθορισμού	60–100	10.000–24.000
Νατρίου χαμηλής πίεσης	80–180	10.000–18.000
Επαγωγής	60–70	60.000

Κεφάλαιο 3

Κτίριο Τεχνικών Υπηρεσιών: Στοιχεία και Μοντελοποίηση

Έχοντας αναλύσει όλο το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά στα κατασκευαστικά στοιχεία του κτιρίου αλλά και στη νομοθεσία που επιβάλλει συγκεκριμένους κανονισμούς ενεργειακής αποδοτικότητας κτιρίων αναλύεται στη συνέχεια η μοντελοποίηση του κτιρίου Τεχνικών Υπηρεσιών του Πολυτεχνείου Κρήτης με τη βοήθεια του λογισμικού DesignBuilder και EnergyPlus. Η ανάλυση που ακολουθεί στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αποσκοπεί στην πραγματοποίηση ενεργειακής επιθεώρησης του κτιρίου με σκοπό την αναγνώριση περιοχών βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης χωρίς τη χρήση εκτεταμένων μετρήσεων αλλά με τη βοήθεια αξιόπιστου λογισμικού.

Το DesignBuilder είναι ένα φιλικό προς το χρήστη λογισμικό στο οποίο εισάγονται τα δεδομένα του κτιρίου όπως κατασκευαστικά υλικά, υαλοπίνακες, στοιχεία για το σύστημα θέρμανσης/κλιματισμού/εξαερισμού, στοιχεία για το είδος της δραστηριότητας των εργαζομένων. Επίσης παρέχει στο χρήστη σχεδιαστικό περιβάλλον αλλά και επιλογές που αφορούν στη μοντελοποίηση του κτιρίου. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω του EnergyPlus το οποίο είναι ένα λογισμικό θερμικής προσομοίωσης κτιρίων. Μερικές από τις βασικές λειτουργίες του είναι:

- Υπολογισμός της θερμοκρασίας και υγρασίας κάθε ζώνης του κτιρίου ανά τέταρτο, ανά ώρα, ανά μήνα.
- Υπολογισμός της ενεργειακής κατανάλωσης κτιρίου.
- Υπολογισμός των εκπομπών CO₂.
- Υπολογισμός του επιπέδου θερμικής άνεσης ή δυσφορίας των εργαζομένων.
- Θερμική προσομοίωση κτιρίων με φυσικό εξαερισμό.
- Δυνατότητα χρήσης συστημάτων ελέγχου για το φωτισμό με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας.
- Διαστασιολόγηση των συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού.

3.1 Βασικοί τομείς μοντελοποίησης του κτιρίου στο DesignBuilder

Το υπό μελέτη κτίριο που μοντελοποιείται παρακάτω κατασκευάστηκε το 2006 και στεγάζει το τμήμα Τεχνικών Υπηρεσιών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Βρίσκεται στην περιοχή Ακρωτήρι, 7 χιλιόμετρα βορειοδυτικά των Χανίων. Η περιοχή είναι αραιοκατοικημένη. Βρίσκεται σε υψόμετρο 137 μέτρα. Το γεωγραφικό μήκος είναι 24° και το γεωγραφικό πλάτος 35°.

Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται από μεγάλης διάρκειας θερμά καλοκαίρια και ψυχρούς χειμώνες με υψηλά ποσοστά υγρασίας και ηλιοφάνεια σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.

Ο χειμώνας διαρκεί από το Νοέμβριο έως τον Απρίλιο ενώ το καλοκαίρι διαρκεί από το Μάιο έως τον Οκτώβριο. Με βάση τα κλιματικά δεδομένα που εισήχθησαν στο EnergyPlus η μέγιστη θερμοκρασία τον Φεβρουάριο είναι 12,5 °C και η ελάχιστη τον Ιούλιο είναι 24,8 °C. Η μέγιστη

θερμοκρασία του χρόνου είναι $27,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ και η ελάχιστη $9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η μέση σχετική υγρασία το καλοκαίρι είναι περίπου 45% και το χειμώνα 55%.

Το κτίριο αποτελείται από δύο ορόφους, ο καθένας έχει επιφάνεια 157 m^2 και χωρίζεται σε δέκα γραφεία, ένα δωμάτιο εξοπλισμού, τέσσερις διαδρόμους, μία τουαλέτα, ένα χώρο συνάντησης και την κεντρική είσοδο. Η διάταξη των δύο ορόφων είναι η ίδια με μόνη διαφορά την ύπαρξη του αίθριου των 9 m^2 στο δεύτερο όροφο στην οροφή. Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες και στοιχεία του κτιρίου.



Σχήμα 3.1: Πρόσοψη του κτιρίου



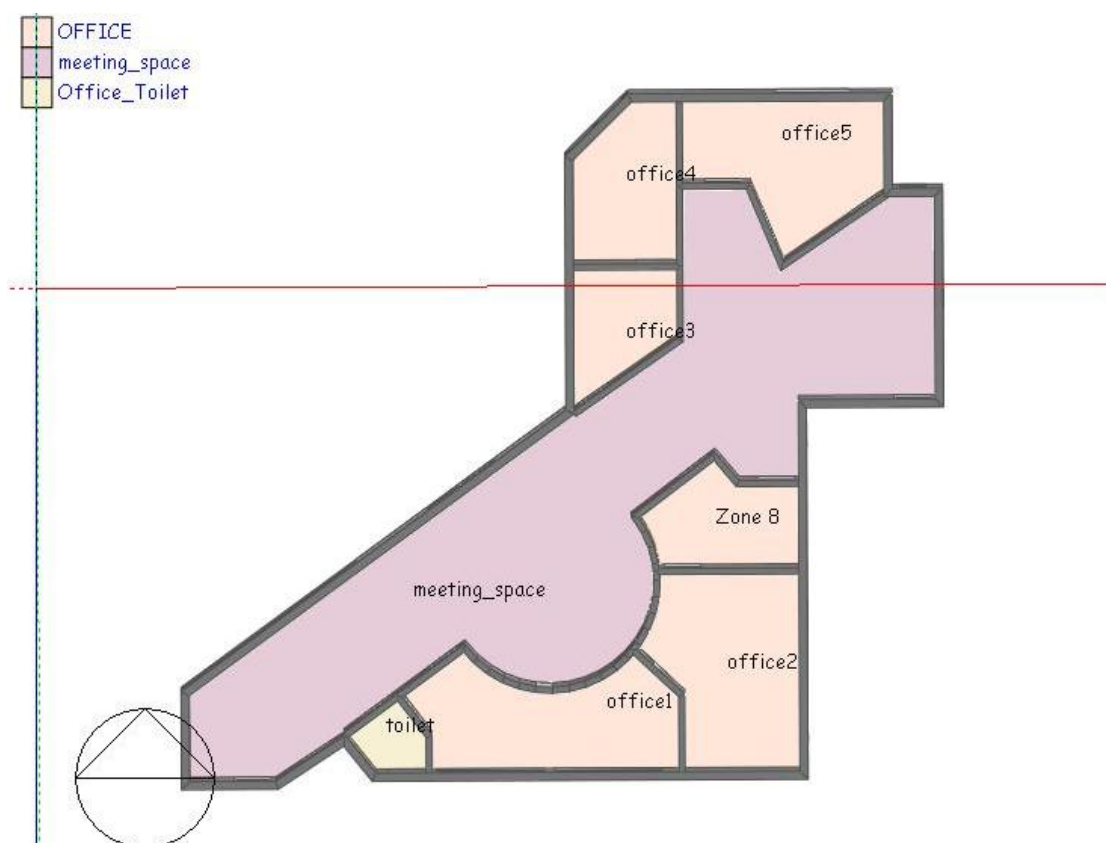
Σχήμα 3.2: Δεύτερος όροφος



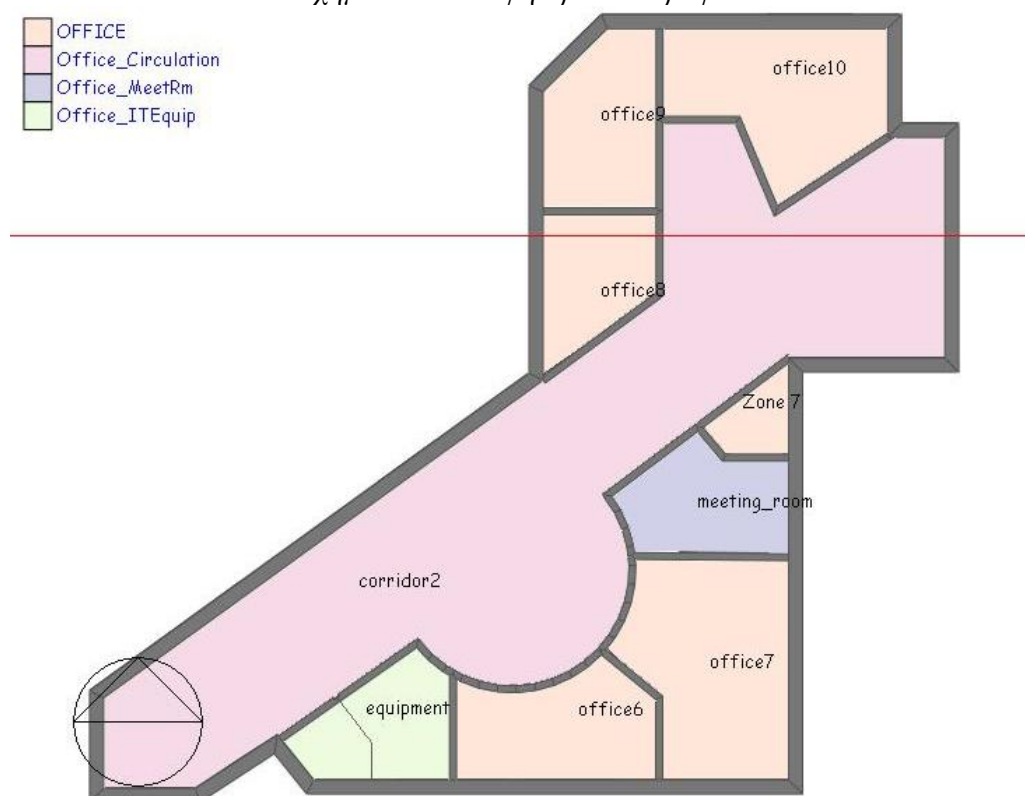
Σχήμα 3.3: Πρώτος όροφος



Σχήμα 3.4: Το κτίριο σχεδιασμένο στο DesignBuilder



Σχήμα 3.5: Κάτοψη πρώτου ορόφου



Σχήμα 3.6: Κάτοψη δεύτερου ορόφου

Πίνακας 3.1 Επιμέρους επιφάνειες του κτιρίου

Περιγραφή	Επιφάνεια (m ²)	Ύψος (m)
Κτίριο	314	6,5
Πρώτος όροφος	157	3,5
Δεύτερος όροφος	157	3
Διάδρομος	59,7	3,5
Χώρος συνάντησης	10,6	6,5
Είσοδος	1,4	3,5
Γραφείο 1	2,4	3,5
Γραφείο 2	15,9	3,5
Γραφείο 3	6,9	3,5
Γραφείο 4	9,3	3,5
Γραφείο 5	13,7	3,5
Γραφείο 6	9,5	3
Γραφείο 7	5,3	3
Γραφείο 8	6,7	3
Γραφείο 9	8,7	3
Γραφείο 10	13	3
Τουαλέτα	6,9	3,5
Δωμάτιο εξοπλισμού	7,2	3

3.1.1 Γενική καρτέλα μοντελοποίησης (General template)

Το DesignBuilder παρέχει στο χρήστη διάφορες επιλογές που αφορούν στον τρόπο μοντελοποίησης του κτιρίου. Η εισαγωγή των στοιχείων της μοντελοποίησης γίνεται στη γενική καρτέλα το περιεχόμενο της οποίας φαίνεται στο Σχήμα 3.7.

Model Options Data

Scope

Scope: Zone, Zone+shading, **Building** (Whole building: Analyse the whole building.)

Construction and Glazing Data

Construction and glazing data: Pre-design, **General** (General construction templates: Construction default data is selected from a list.)

Floor/slab/ceiling representation: 1-Combined

Zone volume calculations:

- ☒ Internal floor constructions not subtracted from zone volume
- ☒ Ground floor construction is below ground and is not subtracted from zone volume
- ☒ External floor constructions not subtracted from zone volume

Gains Data

Gains data: Lumped, **Early** (Early gains: Internal gains are separated into various categories (e.g. occupancy, lighting, computing etc.)), Detailed

Timing

Timing: Typical workday, Schedules (Typical workday: Timing is defined as a single profile having a start and end time for a typical workday. Days/week and summer and/or winter options are possible.)

- ☒ HVAC + natural ventilation operates with occupancy
- ☒ Internal gains operate with occupancy

HVAC

HVAC: Simple, **Compact** (Compact HVAC: HVAC systems are defined parametrically and modelled within EnergyPlus using Compact HVAC descriptions)

HVAC sizing: 1-Adequate

Natural ventilation

Natural ventilation: Scheduled, **Calculated** (Calculated ventilation: Natural ventilation and infiltration air flow rates are calculated based on opening and crack sizes, buoyancy and wind pressures.)

Σχήμα 3.7: General Template

3.1.1.1 Οριοθέτηση της μοντελοποίησης (Scope)

Η ανάλυση του κτιρίου μπορεί να γίνει σε τρία επίπεδα:

- Ζώνης (zone).
- Ζώνης και σκίασης (zone+shading).
- Κτιρίου (building).

Σε επίπεδο ζώνης η μοντελοποίηση του κτιρίου περιορίζεται σε μία και μόνο ζώνη, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας της σκίασης, η οποία πρέπει να οριστεί από το χρήστη. Παρέχεται δηλαδή η δυνατότητα στο χρήστη να επεξεργαστεί μόνο ένα τμήμα του κτιρίου και να γίνει

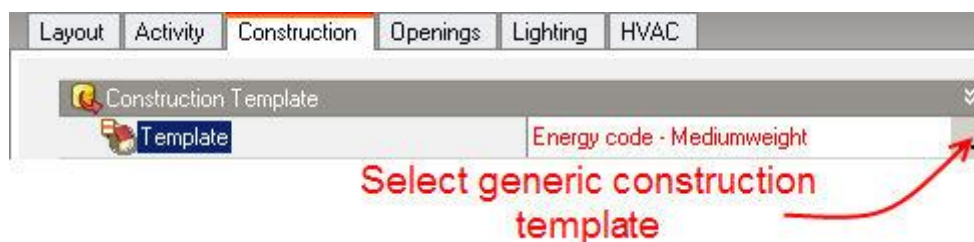
θερμική προσομοίωση μόνο σε αυτό. Η διαφορά με το *επίπεδο ζώνης και σκίασης* έγκειται στο γεγονός ότι η σκίαση που προκαλείται από το ίδιο το κτίριο συμπεριλαμβάνεται στην ανάλυση της ζώνης και άρα επηρεάζει και την ενεργειακή κατανάλωση της ζώνης. Η ανάλυση και θερμική προσομοίωση ολόκληρου του κτιρίου είναι εφικτή επιλέγοντας το *επίπεδο κτιρίου*.

3.1.1.2 Κατασκευαστικά Στοιχεία και Υαλοπίνακες (Construction+Glazing data)

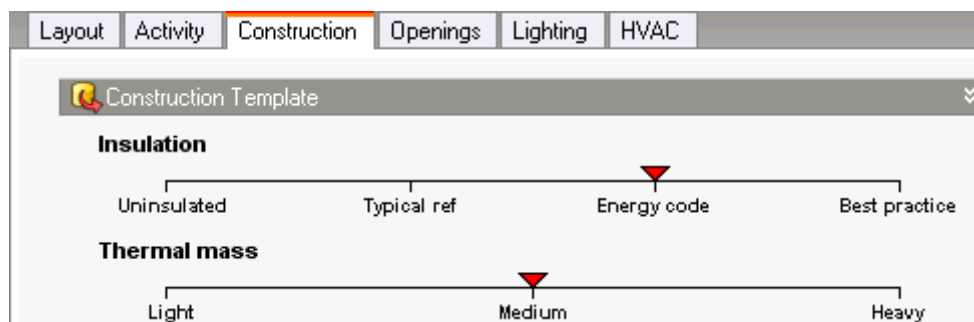
Η εισαγωγή δεδομένων όσων αφορά την κατασκευή και τους υαλοπίνακες μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Γενικός τρόπος εισαγωγής (General).
- Προκαθορισμένες επιλογές (Pre-design).

Επιλέγοντας το γενικό τρόπο εισαγωγής, οι φόρμες για τη συγκεκριμένη κατηγορία, που είτε έχουν δημιουργηθεί απ' το χρήστη είτε προϋπάρχουν στη βιβλιοθήκη του προγράμματος, μπορούν να εισαχθούν απλά είτε επιλέγοντας κάθε φορά την κατάλληλη είτε δημιουργώντας νέα φόρμα εάν οι ήδη υπάρχουσες της βιβλιοθήκης δεν καλύπτουν τις απαιτήσεις του χρήστη. Παρακάτω φαίνεται η εισαγωγή φόρμας των κατασκευαστικών στοιχείων από τη βιβλιοθήκη του DesignBuilder:



Οι προκαθορισμένες επιλογές περιορίζουν το χρήστη όσων αφορά στη θερμομόνωση και στην εισαγωγή θερμικής μάζας σε μία κλίμακα η οποία περιγράφει την αποτελεσματικότητα της θερμομόνωσης εάν υπάρχει και το είδος της θερμικής μάζας, δηλαδή δεν μπορεί να γίνει εισαγωγή των κατασκευαστικών στοιχείων της θερμομόνωσης ή της θερμικής μάζας παρέχοντας του τις επιλογές που φαίνονται παρακάτω:



Για τη μοντελοποίηση των κατασκευαστικών στοιχείων (Floors/Slab/Ceiling representation) το DesignBuilder παρέχει δύο επιλογές:

- Συνδυασμένη (combined)

- Ξεχωριστή (separate)

Αν σε κάποιο όροφο, σε δύο διαφορετικά δωμάτια, χρησιμοποιείται διαφορετική κατασκευή πατώματος ή/και οροφής τότε απαιτείται *ξεχωριστή μοντελοποίηση*. Σε διαφορετική περίπτωση ό-
ταν δηλαδή τα κατασκευαστικά στοιχεία της εξωτερικής τοιχοποιίας, της εσωτερικής, της ορο-
φής, του πατώματος είναι τα ίδια προτιμάται η *συνδυασμένη μοντελοποίηση*.

3.1.1.3 Εσωτερικά Φορτία (Gains Data)

Η εισαγωγή των εσωτερικών θερμικών φορτίων γίνεται με τρεις τρόπους:

- Συγκεντρωμένα (Lumped)
- Ταξινομημένα (Early)
- Αναλυτικά (Detailed)

Με τη πρώτη επιλογή όλα τα εσωτερικά φορτία που οφείλονται στο ανθρώπινο δυναμικό του κτιρίου, στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, στον εξοπλισμό γραφείου, στο φωτισμό συγκεντρώνονται σε μία και μόνο παράμετρο. Αντίθετα με την δεύτερη επιλογή παρέχεται η δυνατότητα να οριστούν τα φορτία ως ξεχωριστές παράμετροι, να οριστούν δηλαδή ξεχωριστά, μια τιμή για κάθε κατηγορία. Με την Τρίτη επιλογή παρέχεται η δυνατότητα να εισαχθούν αναλυτικά τα θερμικά φορτία που οφείλονται σε κάθε υπολογιστή.

3.1.1.4 Μοντελοποίηση χρονοδιαγράμματος εργασίας (Timing Model Option)

Η μοντελοποίηση του χρονοδιαγράμματος εργασίας του ανθρώπινου δυναμικού μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, βάσει:

- Κάποιας ενδεικτικής ημέρας (Typical workday)
- Προγραμματισμού (Schedules)

Μία ενδεικτική ημέρα καθορίζει ένα χαρακτηριστικό πρόγραμμα εργασίας για όλες τις βδομάδες, μήνες του χρόνου ορίζοντας την ώρα έναρξης και λήξης της εργασίας. Αντίθετα με τον καθορισμό προγράμματος παρέχεται η δυνατότητα κάθε ημέρα να υπάρχει διαφορετικό ωράριο εργασίας. Στην περίπτωση που επιλέγεται η μοντελοποίηση του χρονοδιαγράμματος εργασίας βάσει κάποιας ενδεικτικής ημέρας παρέχεται η δυνατότητα τα συστήματα HVAC, ο φυσικός εξαερισμός και τα εσωτερικά φορτία να λειτουργούν μόνο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κτιρίου.

3.1.1.5 Συστήματα HVAC

Για τα συστήματα HVAC μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε:

- Απλή μοντελοποίηση (Simple)
- Σύνθετη μοντελοποίηση (Compact)

Στην απλή μοντελοποίηση χρησιμοποιούνται βασικοί αλγόριθμοι υπολογισμού των φορτίων έχοντας ως βάση τις επιθυμητές τιμές θερμοκρασίας (και υγρασίας). Ο COP (βαθμός απόδοσης συστήματος) ορίζεται σε επίπεδο κτιρίου και το DesignBuilder υπολογίζει την κατανάλωση ως εξής:

Boiler energy= EnergyPlus heating loads / Heating system COP

Chiller energy= EnergyPlus cooling loads / Cooling system COP

Στη σύνθετη μοντελοποίηση γίνεται μία αρκετά λεπτομερής ανάλυση μέσω του EnergyPlus χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί στο DesignBuilder. Ο COP εδώ ορίζεται ως ο βαθμός απόδοσης του λέβητα ή του κλιματιστικού. Η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος θέρμανσης και ψύξης υπολογίζεται αντίστοιχα ως εξής:

Boiler energy=(EnergyPlus heating loads*Heating distribution loss factor) / Boiler COP

Chiller energy=(EnergyPlus cooling loads*Cooling distribution loss factor) / Chiller COP

Όπου:

Heating distribution loss factor=1+(Heating Distribution Loss)/100

Cooling distribution loss factor=1+(Cooling Distribution Loss)/100

Το DesignBuilder μπορεί να διαστασιολογήσει αυτόματα θερμαντική ή ψυκτική ικανότητα (capacity) του συστήματος HVAC. Η μοντελοποίηση του κτιρίου ωστόσο, παρέχει τη δυνατότητα να επιλεγεί ο τρόπος με τον οποίο θα προσομοιωθεί η ικανότητα (capacity) του συστήματος θέρμανσης και κλιματισμού επιλέγοντας ανάμεσα στους εξής τρόπους:

1. Επαρκή ικανότητα (Adequate). Το αντίκτυπο αυτής της επιλογής ποικίλει ανάλογα με το αν έχει επιλεγεί απλή (Simple) ή σύνθετη (Compact) μοντελοποίηση των συστημάτων HVAC. Αν έχει επιλεγεί απλή μοντελοποίηση τότε εισάγεται αυτόματα η μέγιστη απαιτούμενη ικανότητα (capacity) ώστε το σύστημα να ανταποκρίνεται πάντα στις θερμοκρασιακές απαιτήσεις που έχουν οριστεί στην καρτέλα *Activity template*. Η επιλογή αυτή όμως μπορεί να προκαλέσει εμφάνιση πολύ υψηλών τιμών στην κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και κλιματισμό οι οποίες δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα όπως επίσης και χαμηλές τιμές στις ώρες δυσφορίας. Στην περίπτωση που έχει οριστεί σύνθετη μοντελοποίηση των συστημάτων HVAC, η συγκεκριμένη επιλογή με την επιλογή αυτόματης διαστασιολόγησης εξάγουν τα ίδια αποτελέσματα και η διαστασιολόγηση γίνεται με βάση το φυσικό εξαερισμό και με βάση τις απαιτήσεις σε θέρμανση και ψύξη.
2. Εισαγωγή θερμαντικής και ψυκτικής ικανότητας από το χρήστη. Η ικανότητα (capacity) του συστήματος θέρμανσης και κλιματισμού εισάγεται από το χρήστη στην περίπτωση που υπάρχουν τα συγκεκριμένα δεδομένα για το σύστημα θέρμανσης και κλιματισμού.
3. Αυτόματη διαστασιολόγηση. Στη απλή μοντελοποίηση των HVAC οι υπολογισμοί για το σχεδιασμό θέρμανσης/ψύξης γίνονται πριν την προσομοίωση ώστε να υπολογιστεί η απαιτούμενη ικανότητα των συστημάτων. Στην περίπτωση της σύνθετης μοντελοποίησης των συστημάτων HVAC το EnergyPlus υπολογίζει τη διήθηση του αέρα στο κτίριο με βάση την αεροστεγανότητα της κάθε ζώνης και του κτιριακού κελύφους και με βάση τις θερμοκρασίες άνεσης για κάθε ζώνη εξάγει αποτελέσματα για την ικανότητα των συστημάτων.
4. Αυτόματη διαστασιολόγηση όπου δεν έχει οριστεί. Αν η ικανότητα (capacity) του συστήματος δεν έχει οριστεί τότε το DesignBuilder την υπολογίζει αυτόματα και εγγράφει τα αποτελέσματα στα στοιχεία του μοντέλου του HVAC συστήματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα της διαστασιολόγησης των συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού. Η ψυκτική ικανότητα του συστήματος κλιματισμού και ικανότητα του συστήματος θέρμανσης ορίστηκε ως η απαραίτητη ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε ζώνης.

ergasya, Building 1			
Steady-state		Summary	
Zone	Comfort Temperature (°C)	Steady-State Heat Loss (kW)	Design Capacity(kW)
- Building 1 Total design heat loss = 42.600 (kW)			
- first floor Total design heat loss = 23.660 (kW)			
office4	18.48	1.20	2.15
corridor	16.19	4.30	7.73
office5	18.43	1.64	2.95
corridor	15.77	1.51	2.72
Zone 8	11.73	0.00	0.00
meeting_space	13.14	0.00	0.00
office2	18.30	1.85	3.32
office1	18.56	1.78	3.20
toilet	9.05	0.00	0.00
office3	18.84	0.88	1.59
- second floor Total design heat loss = 18.940 (kW)			
office9	18.96	0.89	1.60
corridor2	16.64	3.14	5.65
office10	18.92	1.24	2.23
corridor2	16.19	1.15	2.07
meeting_room	19.22	0.71	1.27
space	11.76	0.00	0.00
office7	19.04	1.30	2.35
office6	19.24	0.88	1.59
equipment	16.69	0.55	0.98
Zone 7	10.63	0.00	0.00
office8	19.28	0.67	1.20
- entrance Total design heat loss = 0.000 (kW)			
Zone 1	5.61	0.00	0.00
Edit Visualise Heating design Cooling design Simulation			

Σχήμα 3.8:Θερμαντική ικανότητα του συστήματος HVAC

ergasya, Building 1

Analysis Parametric **Summary**

Zone	Design Capacity (kW)	Design Flow Rate (m ³ /s)	Total Cooling Load (kW)	Sensible (kW)	Latent (kW)	Air Temper
- Building 1 Total Design Cooling Requirement = 35.060 (kW)						
- first floor Total Design Cooling Requirement = 17.510 (kW)						
office4	3.51	0.25	2.70	1.60	1.10	25.0
corridor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
office5	4.75	0.32	3.65	2.06	1.59	25.0
corridor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
Zone 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
meeting_space	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
office2	3.16	0.26	2.43	1.93	0.50	26.0
office1	3.36	0.25	2.58	1.80	0.78	26.0
toilet	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
office3	2.73	0.23	2.10	1.45	0.65	25.0
- second floor Total Design Cooling Requirement = 17.550 (kW)						
office9	2.44	0.17	1.87	1.27	0.61	26.0
corridor2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
office10	3.04	0.22	2.34	1.64	0.70	26.0
corridor2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
meeting_room	2.33	0.17	1.80	1.21	0.58	26.0
space	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
office7	3.37	0.30	2.59	2.17	0.42	26.0
office6	2.67	0.20	2.05	1.43	0.62	26.0
equipment	1.78	0.12	1.37	0.87	0.50	26.0
Zone 7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
office8	1.92	0.18	1.48	1.33	0.15	26.0
- entrance Total Design Cooling Requirement = 0.000 (kW)						
Zone 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-

Edit Visualise Heating design **Cooling design** Simulation

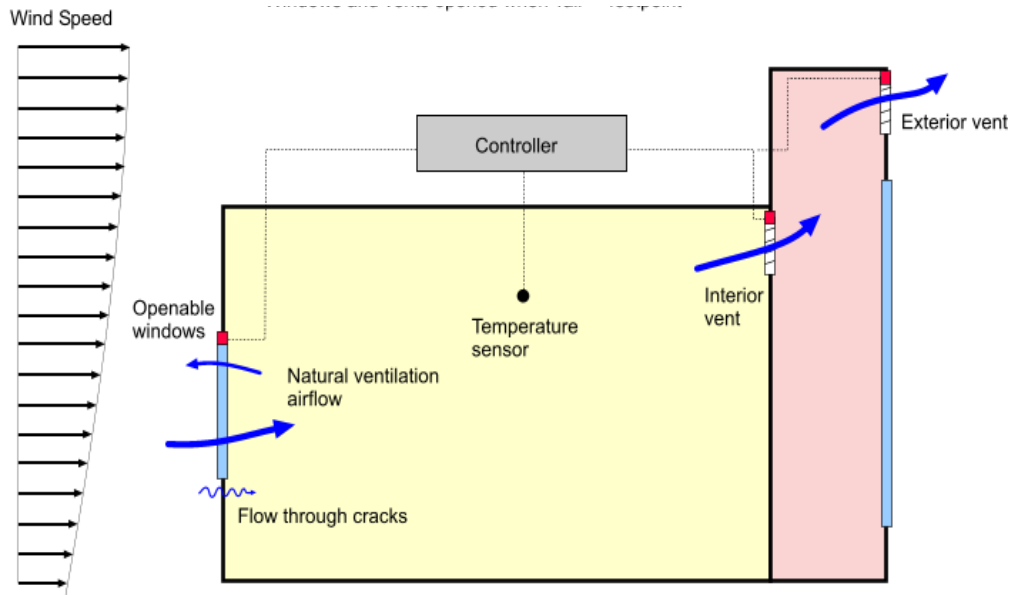
Σχήμα 3.9: Ψυκτική ικανότητα του συστήματος HVAC

3.1.1.6 Φυσικός Εξαερισμός (Natural Ventilation)

Ο φυσικός εξαερισμός μπορεί να μοντελοποιηθεί με:

- Προγραμματισμό λειτουργίας (Scheduled). Καθορίζεται το μέγεθος της παροχής του αέρα ανάλογα με τον όγκο της ζώνης (by zone) ή ανάλογα με τις απαιτήσεις σε φρέσκο αέρα ανά άτομο (min fresh air per person) και ορίζεται μια μέγιστη τιμή εναλλαγών αέρα (air changes per hour) για τον υπολογισμό του ρυθμού διήθησης αέρα (infiltration air change rate).

- Υπολογιστικές μεθόδους (Calculated). Το EnergyPlus μοντελοποιεί την αεροστεγανότητα του κτιρίου και εξάγει αποτελέσματα που αφορούν στη διήθηση του εξωτερικού αέρα στο εσωτερικό με βάση το άνοιγμα των θυρών και παραθύρων (βλ. Openings template) συνυπολογίζοντας την ύπαρξη ρωγμών-σχισμών της εξωτερικής τοιχοποιίας αλλά και λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα του ανέμου και τη διαφορά πίεσης (βλ. Construction template) μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών.



Σχήμα 3.10: Υπολογισμός της διήθησης του αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον στο εσωτερικό

Το EnergyPlus για να υπολογίσει τη μέση θερμοκρασία σε μία ζώνη δίνει τη δυνατότητα επιλογής στο χρήστη να ορίσει τον τρόπο ελέγχου της θερμοκρασίας στην κάθε ζώνη ώστε να εξάγει αποτελέσματα που αφορούν στη θερμική άνεση των εργαζομένων. Στο κέντρο κάθε ζώνης υπάρχει ένας θερμοστάτης ο οποίος έχει τη δυνατότητα να αντιλαμβάνεται τη θερμοκρασία του αέρα (Air temperature) ή τη θερμοκρασία της εξωτερικής τοιχοποιίας (Radiant temperature) ή τον μέσο όρο των δύο θερμοκρασιών (Operative temperature). Ορίζεται στη γενική καρτέλα (Activity Data->Early Gains->Heating design, Cooling design) όπου παρέχεται η δυνατότητα επιλογής ελέγχου ανάμεσα σε:

1-Μέση θερμοκρασία αέρα (MAT). Ο έλεγχος θερμοκρασίας αέρα γίνεται με βάση τις απαιτούμενες θερμοκρασίες άνεσης που έχουν οριστεί στην καρτέλα *Activity template*.

2-Λειτουργική θερμοκρασία (Operative). Ο θερμοκρασιακός έλεγχος γίνεται με βάση τη μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας της εξωτερικής τοιχοποιίας $(MAT + MRT) / 2$ σε σύγκριση με τις απαιτούμενες θερμοκρασίες άνεσης που έχουν οριστεί στην καρτέλα *Activity template*.

3-Μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας (MRT) Ο έλεγχος της θερμοκρασίας της ζώνης γίνεται με βάση τις θερμοκρασίες της εξωτερικής τοιχοποιίας συγκρινόμενες με τις θερμοκρασίες άνεσης.

Η καλύτερη επιλογή εξαρτάται από τα κατασκευαστικά υλικά της τοιχοποιίας. Η έλλειψη μόνωσης έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα εξαιτίας των ιδιοτήτων των κατασκευαστικών

υλικών της τοιχοποιίας (σκυρόδεμα) τα οποία έχουν υψηλούς συντελεστές θερμοπερατότητας απορροφώντας μεγάλα ποσά θερμότητας με αποτέλεσμα να αυξάνεται αισθητά η θερμοκρασία το καλοκαίρι και να μειώνεται το χειμώνα.

3.1.2 Καρτέλα εισαγωγής στοιχείων της δραστηριότητας των εργαζομένων (Activity Template)

Η καρτέλα *Activity template* περιέχει πληροφορίες που αφορούν στα εσωτερικά θερμικά φορτία όπως το είδος της εργασίας, το πλήθος των εργαζομένων αλλά και πληροφορίες για τα επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου και σε κάθε ζώνη ξεχωριστά.

Για να περιγραφεί με ακρίβεια η δραστηριότητα των εργαζομένων στο κτίριο συμπληρώθηκε μια φόρμα (template) με πληροφορίες όπως:

- Πυκνότητα: (Density) που μετράται σε ανθρώπους/m².
- Διάρκεια εργασίας.
- Αριθμός ημερών ανά εβδομάδα.
- Μεταβολικός ρυθμός (είδος δραστηριότητας-ένδυση).
- Διακοπές κατά τη διάρκεια του έτους-αργίες.
- Θερμοκρασίες άνεσης και επιθυμητά επίπεδα φωτισμού και εξαερισμού.
- Θερμικά φορτία που οφείλονται στους υπολογιστές.
- Θερμικά φορτία που οφείλονται στον εξοπλισμό γραφείου.

3.1.2.1 Πυκνότητα ανθρώπινου δυναμικού στο κτίριο

Το κτίριο έχει επιφάνεια 314 m² (10 γραφεία) και εργάζονται σ' αυτό περίπου 20 άτομα δηλαδή έχει πυκνότητα 0,07 άτομα/m². Εργάζονται από τις 9π.μ. έως τις 3μ.μ. από Δευτέρα έως Παρασκευή. Το χρονοδιάγραμμα των εργασιών ορίζεται στη γενική καρτέλα.

Activity Template

Template office-tuc

Sector General

Occupancy

Density (people/m²) 0.0700

On at 9:00

Off at 15:00

Days / week 5.0

Metabolic

Activity Light office work

Factor (Men=1.00, Women=0.85, Children=0.75) 0.90

Clothing >>

Holidays >>

DHW >>

Environmental Control

Heating Setpoint Temperatures

Heating (°C) 22.0

Heating set back (°C) -50.0

Cooling Setpoint Temperatures

Cooling (°C) 26.0

Cooling set back (°C) 50.0

Ventilation Setpoint Temperatures >>

Minimum Fresh Air >>

Lighting

Target Illuminance (lux) 500

Default display lighting density (W/m²) 15

Computers

☒ On

Gain (W/m²) 17.00

Radiant fraction 0.150

Office Equipment

☒ On

Gain (W/m²) 5.00

Radiant fraction 0.250

Σχήμα 3.11: Activity Template

3.1.2.2 Μεταβολικός ρυθμός εργαζομένων

Ως *μεταβολικός ρυθμός* [6] ορίζεται η θερμική ενέργεια που παράγει το ανθρώπινο σώμα με ένα συγκεκριμένο ρυθμό. Ο ρυθμός καθορίζεται από το είδος της εργασίας. Είναι γενικά σημαντικό να συνυπολογίζεται η θερμική ενέργεια που παράγεται από το ανθρώπινο σώμα στα εσωτερικά θερμικά φορτία του χώρου. Ο μεταβολικός παράγοντας ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος του ανθρώπινου σώματος.

Από τη βιβλιοθήκη του DesignBuilder για την περιγραφή του είδους της εργασίας έχει γίνει η επιλογή *light office work*. Ο μεταβολικός ρυθμός για το συγκεκριμένο είδος εργασίας είναι 120 W/εργαζόμενο. Επίσης ορίζεται και ένας μεταβολικός παράγοντας ανάλογα με το φύλο του εργαζομένου. Έχει οριστεί από το DesignBuilder η επιφάνεια ενός άντρα στα 1,8 m², αυτή η τιμή πολλαπλασιάζεται για τις γυναίκες επί 0,85 και για τα παιδιά επί 0,75. Εδώ έχει τοποθετηθεί ένας μέσος όρος 0,90 διότι εργάζονται άντρες και γυναίκες.

Πίνακας 3.2 Μεταβολικός ρυθμός παραγωγής θερμότητας για διάφορες δραστηριότητες [6].

Είδος Δραστηριότητας	W/m ²
Ύπνος	40
Ποδηλασία	45
Καθιστική Εργασία	60
Περπάτημα 3.2 km/h	115
Περπάτημα 4.3 km/h	150
Περπάτημα 6.4 km/h	220
Μελέτη	55
Γράψιμο	60
Δακτυλογράφηση	65
Οδήγηση Αυτοκινήτου	60 - 115

Πίνακας 3.3 Θερμοκρασία άνεσης σε σχέση με τη μεταβολική δραστηριότητα και τον τύπο της ένδυσης [9]

Εργασία	Μεταβολική Δραστηριότητα (W)	Ρουχισμός (clo)	Θερμοκρασία Άνεσης (°C)
Ηρεμία	0	0,5	31
	0	1	29
Καθιστική εργασία	43	0,5	27
	43	1	23
Ελαφριά εργασία	100	0,5	22
	100	1	16

Έντονη εργασία	20	0,5	12
----------------	----	-----	----

Συνθήκες μετρήσεων:

Θερμοκρασία αέρα=μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας

Πίεση ατμών=10 hPa

Ταχύτητα αέρα=0.1 m/s

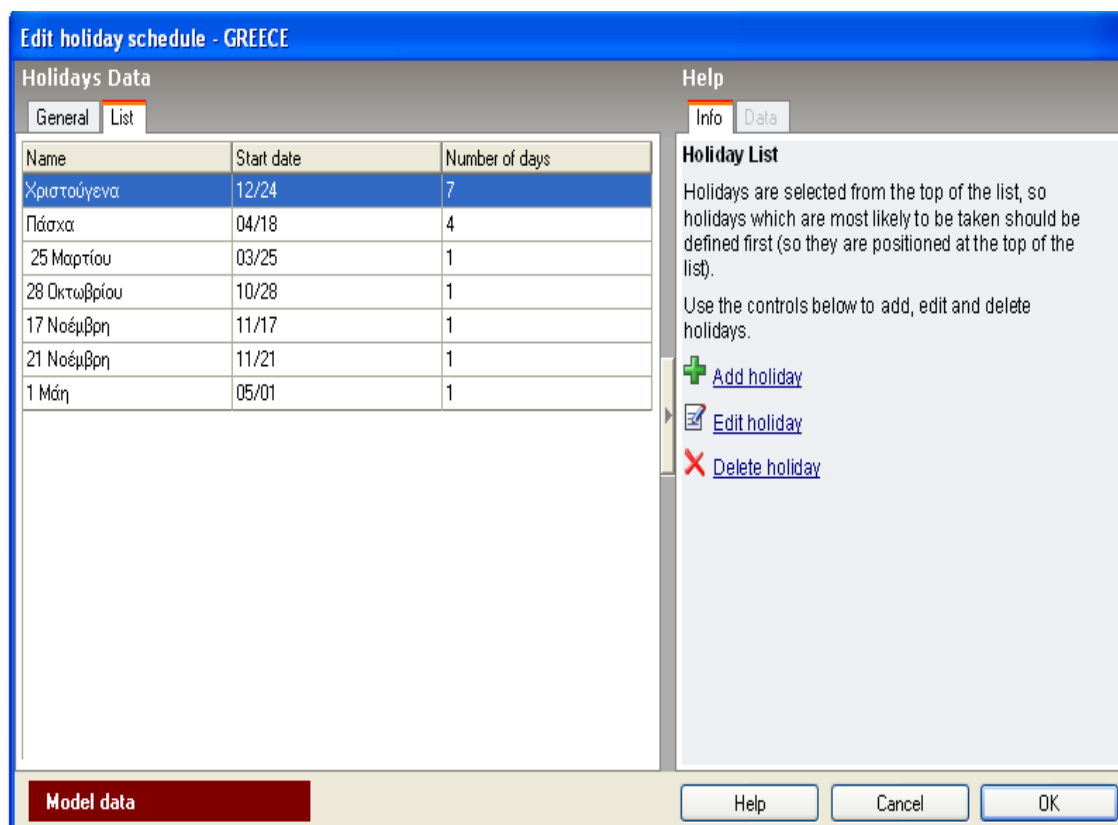
Η ένδυση μειώνει την απώλεια θερμότητας από το ανθρώπινο σώμα προς το περιβάλλον. Ορίστηκε έτσι μία μονάδα μέτρησης της θερμομονωτικής ικανότητας των ενδυμάτων που αναφέρεται ως Clo-Value ($1 \text{ Clo} = 0.155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$) και εκφράζει την αντίσταση της ένδυσης στην απώλεια θερμότητας [10]. Οι τιμές του Clo-Value ορίστηκαν για χειμερινή και θερινή ένδυση ως 1 και 0.5 αντίστοιχα.

Πίνακας 3.4 Θερμομονωτική ικανότητα ενδυμάτων [6]

Ρουχισμός	Clo-Value
Κανένα Ένδυμα	0,00
Εσώρουχα	0,06
Κοντομάνικο μπλουζάκι	0,09
Πουκάμισο μακρυμάνικο	0,29
Πουκάμισο κοντομάνικο	0,14
Φούστα	0,22-0,70
Παντελόνι	0,26-0,32
Πουλόβερ	0,20-0,37
Κάλτσες	0,04-0,10
Ελαφριά καλοκαιρινή ένδυση	0,3
Ρουχισμός εργασίας	0,8
Χειμερινή ένδυση	1,0
Επίσημο κουστούμι	1,5

3.1.2.3 Πίνακας Διακοπών

Κατά τη διάρκεια του έτους ορίζονται συγκεκριμένες ημερομηνίες διακοπών που παραμένει το κτίριο κλειστό με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η συνολική κατανάλωση. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε το χρονοδιάγραμμα διακοπών (template: GREECE) για προσομοιώσεις ενός έτους. Το πρόγραμμα παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:



Σχήμα 3.12: Πρόγραμμα Διακοπών

3.1.2.4 Περιβαλλοντικός έλεγχος

Ο περιβαλλοντικός έλεγχος αφορά στην άνεση των εργαζομένων και περιλαμβάνει τους εξής τομείς:

- Θερμοκρασίες άνεσης (Heating-Cooling setpoint temperatures).
- Θερμοκρασία αέρα φυσικού εξαερισμού (Ventilation set points).
- Ελάχιστο απόθεμα αέρα/εργαζόμενο (Minimum fresh air).
- Επιθυμητά επίπεδα φωτισμού (Lighting).

Ορίζεται η κατάλληλη θερμοκρασία χώρου (Heating-Cooling set point temperatures) με την οποία οι εργαζόμενοι αισθάνονται άνετα. Οι θερμοκρασίες άνεσης είναι 22 °C το χειμώνα και 26 °C το καλοκαίρι σύμφωνα με τον Πίνακα 3.5 για κτίρια γραφείων [11].

Εκτός από τις επιθυμητές θερμοκρασίες άνεσης (set point temperatures) το DesignBuilder παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου της θερμοκρασίας της ζώνης τις χρονικές περιόδους που το κτίριο δεν είναι κατειλημμένο, κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας, ώστε να αποφευχθεί η υψηλή ζήτηση σε θέρμανση ή κλιματισμό την επόμενη μέρα το πρωί. Προς αποφυγή της λειτουργίας του συστήματος HVAC σε περιόδους που το κτίριο δεν χρησιμοποιείται έχουν οριστεί πολύ υψηλές τιμές θερμοκρασίας (setback temperatures) για τον κλιματισμό των χώρων και πολύ χαμηλές για τη θέρμανση.

Πίνακας 3.5 Συνιστώμενα επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας για θερμαινόμενους χώρους το χειμώνα [12]

Κατηγορία Χώρου	Θερμοκρασία (°C)	Υγρασία (%)
Κατοικίες	22	30-50
Κτίρια γραφείων	21-23	30-35
Βιβλιοθήκες-Μουσεία	20-22	40-50
Νοσοκομεία	24	30
Εστιατόρια και Κέντρα Διασκέδασης	21-23	30-40

Πίνακας 3.6 Συνιστώμενα επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας για κλιματιζόμενους χώρους το καλοκαίρι [12]

Κατηγορία Χώρου	Θερμοκρασία (°C)	Υγρασία (%)
Κατοικίες	25-26	40-50
Κτίρια γραφείων	25-26	40-50
Βιβλιοθήκες-Μουσεία	22	40-55
Νοσοκομεία	24	50-60
Εστιατόρια και Κέντρα Διασκέδασης	23-26	50-60

Οι τιμές της θερμοκρασίας αερισμού (Ventilation temperatures) ελέγχουν την ενεργοποίηση του φυσικού εξαερισμού. Αν η εσωτερική θερμοκρασία είναι υψηλότερη από την επιθυμητή (cooling set point temperature) και υψηλότερη από την εξωτερική και ο φυσικός εξαερισμός μπορεί να ενεργοποιηθεί (operation schedule-HVAC template) τότε ανοίγουν τα παράθυρα όπως ορίζεται και στην καρτέλα των ανοιγμάτων (Openings template). Έχει οριστεί ως θερμοκρασία φυσικού εξαερισμού: 24°C.

Οι ελάχιστες απαιτήσεις σε φρέσκο αέρα για κάθε εργαζόμενο (Minimum fresh air per person) στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου είναι 8 lt/person [13, 14]. Η τιμή αυτή ορίζεται ως η επιθυμητή στην περίπτωση που έχει οριστεί στην καρτέλα HVAC να γίνεται έλεγχος της ποσότητας φρέσκου αέρα ανάλογα με τις απαιτήσεις ανά άτομο και όχι ανάλογα με τον όγκο της ζώνης.

Για το φωτισμό γραφείων η απαιτούμενη στάθμη φωτισμού είναι τα 500lux που αντιστοιχεί σε 15 W/m² σύμφωνα με τους πίνακες [8]:

Πίνακας 3.7 Φωτεινότητα και εγκατεστημένα φορτία φωτισμού ανά επιφάνεια

Ονομαστικές τιμές στάθμης φωτισμού (lux)	Τιμές φορτίων φωτισμού (W/m ²)	Τιμές φορτίων φωτισμού (W/m ²)
	Τυπικές	Βελτιωμένες
50	3,2	2,5
100	4,5	3,5
300	10,0	7,5
500	15,0	11,0
750	20,0	16,0
1.000	25,0	21,0

Αν το επίπεδο φωτεινότητας του χώρου μέσω του φυσικού φωτισμού είναι λιγότερο από 500 lux τότε γίνεται χρήση τεχνητού φωτισμού (Lighting Template-lighting control) για να εξασφαλιστεί το επιθυμητό επίπεδο.

3.1.2.5 Υπολογιστές-Εξοπλισμός Γραφείου (Computers-Office equipment)

Εδώ εισάγονται τα θερμικά φορτία που οφείλονται στη λειτουργία υπολογιστών και άλλου εξοπλισμού που χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία τους. Για τους υπολογιστές έχει οριστεί 17 W/m² και για τα υπόλοιπα μηχανήματα (εκτυπωτές, μηχανήματα fax) 5 W/m² [6].

Ως ποσοστό εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (Radiant fraction) ορίζεται το ποσό της θερμότητας που εκλύεται από υπολογιστές και άλλα μηχανήματα ως ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Για το υπόλοιπο ποσό της θερμότητας γίνεται η υπόθεση ότι μεταδίδεται με συναγωγή.

Η τιμή του ποσοστού αυτού περιορίζεται από 0,0 έως 1,0 και αποτελεί τον πολλαπλασιαστικό παράγοντα στο συνολικό ποσό της κατανάλωσης του συγκεκριμένου μηχανήματος για να υπολογιστεί η συνολική τιμή των εσωτερικών κερδών λόγω της ακτινοβολίας. Η τιμή 0 σημαίνει πως όλο το ποσό της θερμότητας μεταφέρθηκε στον αέρα με συναγωγή ενώ τιμή 1 σημαίνει ότι η θερμότητα διανεμήθηκε στις εσωτερικές επιφάνειες μέσω ακτινοβολίας. Για τους υπολογιστές μια φυσιολογική τιμή είναι μεταξύ 0,1 και 0,2 [6, 10]. Για τον εξοπλισμό γραφείου μια φυσιολογική τιμή είναι μεταξύ 0,1 και 0,4. Στην προκειμένη περίπτωση τοποθετήθηκε 0,15 για τους υπολογιστές και 0,25 για τον εξοπλισμό του γραφείου.

Πίνακας 3.8 Ποσοστά μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία και συναγωγή για τον εξοπλισμό γραφείου [6].

Μηχανήματα	Ανεμιστήρας	Ποσοστό	Ποσοστό με-
------------	-------------	---------	-------------

		μετάδοσης λόγω ακτι- νοβολίας	τάδοσης λόγω συναγωγής
Υπολογιστής	ναι	10-15%	85-90%
Οθόνη υπολο- γιστή	όχι	35-40%	60-65%
Εκτυπωτής	ναι	10-20%	80-90%
Φωτοτυπικό	ναι	20-25%	75-80%
Μηχάνημα Fax	όχι	30-35%	65-70%

3.1.3 Καρτέλα κατασκευαστικών στοιχείων (Construction template)

Το DesignBuilder χρησιμοποιεί τα κατασκευαστικά στοιχεία του κτιρίου με σκοπό να υπολογίσει τη μετάδοση θερμότητας που οφείλεται στα υλικά κατασκευής της τοιχοποιίας, του δαπέδου, στο είδος των υαλοπινάκων, χαρακτηριζόμενα από τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (U). Στη συγκεκριμένη καρτέλα έχουν εισαχθεί τα κατασκευαστικά στοιχεία του κτιρίου ως εξής:

3.1.3.1.ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ

Η εξωτερική τοιχοποιία αποτελείται από 200 mm πυκνό σκυρόδεμα με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $U=1,4 \text{ W/mK}$, 60 mm οπτοπλινθοδομή με $U=0,62 \text{ W/mK}$, 20 mm γυψοσανίδα με $U=0,4 \text{ W/mK}$ και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13:Εξωτερική Τοιχοποιία

Η εσωτερική τοιχοποιία αποτελείται από 25 mm γυψοσανίδα με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $U=0,25 \text{ W/mK}$, 100 mm κενό αέρα, 25 mm γυψοσανίδα και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14: Εσωτερική Τοιχοποιία

3.1.3.2 ΟΡΟΦΗ

Η οροφή του κτιρίου είναι επίπεδη, κατασκευασμένη από 190 mm άσφαλτο με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $U=0,7 \text{ W/mK}$, 130 mm *fibreboard* με $U=0,06 \text{ W/mK}$ και μία στρώση 100 mm σκυρόδεμα μέτριας πυκνότητας με $U=1,35 \text{ W/mK}$. Η διαστρωμάτωση της φαίνεται στο Σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Διαστρωμάτωση Οροφής

3.1.3.3 ΔΑΠΕΔΟ

Το εσωτερικό δάπεδο του κτιρίου αποτελείται από λευκά μαρμάρινα πλακάκια πάχους 30 mm με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $U=2,77 \text{ W/mK}$ και 100 mm σκυρόδεμα με $U=1,4 \text{ W/mK}$.



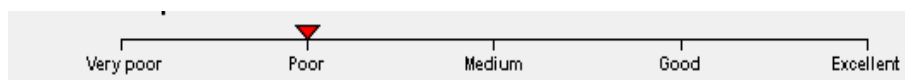
Σχήμα 3.16: Διαστρωμάτωση Δαπέδου

3.1.3.4 ΠΟΡΤΕΣ

Οι εξωτερικές πόρτες του κτιρίου είναι κατασκευασμένες από 3 mm ατσάλι, 10 mm κενό αέρα και 3 mm ατσάλι ενώ οι εσωτερικές από 42 mm βαμμένο ξύλο.

Όσον αφορά την αεροστεγανότητα (Air tightness) εισάγεται μια τιμή για τις εναλλαγές αέρα στην περίπτωση που έχει επιλεγεί *Scheduled Natural Ventilation* στην γενική καρτέλα μοντελοποίησης.

Στην περίπτωση που επιλέγεται στη γενική καρτέλα υπολογισμός του φυσικού εξαερισμού *Calculated Natural Ventilation* μοντελοποιείται η αεροστεγανότητα με βάση την κλίμακα που φαίνεται στο Σχήμα:3.17 ώστε να ληφθεί υπόψη η διήθηση του εξωτερικού αέρα στους εσωτερικούς χώρους του. Η διήθηση του εξωτερικού αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου οφείλεται σε ρωγμές, χαραμάδες και στο πορώδες των επιφανειών των κατασκευαστικών υλικών τις εξωτερικής τοιχοποιίας, του δαπέδου και της οροφής.



Σχήμα:3.17: Κλίμακα αεροστεγανότητας

Ο ρυθμός αερισμού q μέσα από τα διάφορα ανοίγματα υπολογίζεται με βάση τη διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού του κτιρίου (λόγω αερισμού) με τη σχέση [10]:

$$q = C \times (DP)^n \quad (3.1)$$

Όπου:

q : η ογκομετρική ροή μέσω των ανοιγμάτων,

DP : η διαφορά πίεσης της ρωγμής,

n : ο δείκτης ροής του οποίου η τιμή κυμαίνεται από 0.5 για πλήρη τυρβώδη ροή μέχρι 1 για στρωτή ροή και

C : συντελεστής που ορίζεται από το μέγεθος της ρωγμής

Ουσιαστικά στο DesignBuilder προσομοιώνεται το πορώδες των κατασκευαστικών υλικών ώστε να μπορέσει να υπολογιστεί η διήθηση του αέρα. Όταν ο αέρας έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια ενός κτιρίου, μία θετική πίεση αναπτύσσεται με κατεύθυνση προς τον άνεμο. Η ροή διαχωρίζεται στις γωνίες με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν αρνητικές περιοχές πιέσεων στην πλάγια πλευρά του κτιρίου και στην κατάντη όψη. Η κατανομή της πίεσης στην οροφή ποικίλει ανάλογα με το βαθμό κλίσης της. Η πίεση στην ανάντη όψη είναι αρνητική για 30° γωνία κλίσης της οροφής και θετική για γωνίες κλίσης άνω των 30°. Η πίεση σε κάθε επιφάνεια του κτιρίου μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [10]:

$$P_w = 0.5 \times \rho \times C_p \times v_z^2 \quad (3.2)$$

Όπου:

P_w : η επιφάνεια πίεσης λόγω του ανέμου,

ρ : η πυκνότητα του αέρα,

C_p : συντελεστής πίεσης του αέρα σε μία δεδομένη θέση της επιφάνειας και

v_z : είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z.

Ο συντελεστής πίεσης του αέρα, C_p , εξαρτάται από την κατεύθυνση του αέρα, τη θέση στην επιφάνεια του κτιρίου και την πλάγια έκθεση.

Στην περίπτωση που έχει επιλεγεί φυσικός εξαερισμός βάσει προγράμματος, ο ρυθμός διήθησης (ανεπιθύμητη διήθηση αέρα μέσω ρωγμών και χαραμάδων) ορίζεται ως εναλλαγές αέρα ανά ώρα (ac/h) και είναι σταθερός σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η παροχή του αέρα μετράται σε m³/h και ορίζεται ως (ac/h)*όγκος ζώνης [10].

Το DesignBuilder παρέχει τη δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένων αλγορίθμων για την προσομοίωση της μετάδοσης της θερμότητας μέσω συναγωγής των εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών (Surface convection) επιλέγοντας κάθε φορά τον κατάλληλο αλγόριθμο για τα διάφορα μέρη του κτιρίου.

Για τις εσωτερικές επιφάνειες το EnergyPlus διαθέτει 5 διαφορετικούς αλγόριθμους για να υπολογίσει τη συναγωγή θερμότητας ανάμεσα σε διάφορες επιφάνειες και τον περιβάλλοντα αέρα της ζώνης και είναι οι εξής:

1. Λεπτομερής αλγόριθμος (Detailed). Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή υπολογίζεται με βάση τον προσανατολισμό των επιφανειών και τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών και του αέρα της ζώνης. Ο αλγόριθμος προέρχεται από το εγχειρίδιο της ASHRAE [6] και τελειοποιήθηκε από τον Walton. Η ASHRAE παρέχει φυσικούς συντελεστές μετάδοσης θερμότητας μέσω συναγωγής σε πλήρη τυρβώδη ροή για μεγάλες κάθετες ή οριζόντιες πλάκες στρεφόμενες προς τα πάνω στην περίπτωση που έχουμε κλιματισμό και προς τα κάτω στην περίπτωση που έχουμε θέρμανση. Μια προσεγγιστική τιμή του συντελεστή θα μπορούσε να είναι το 50% της τιμής του στην περίπτωση τοποθέτησης της πλάκας προς τα πάνω.
2. Απλός αλγόριθμος (Simple). Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ένας απλός αλγόριθμος για τον υπολογισμό της μετάδοσης θερμότητας μέσω επιφανειών, ο συντελεστής μετάδοσης

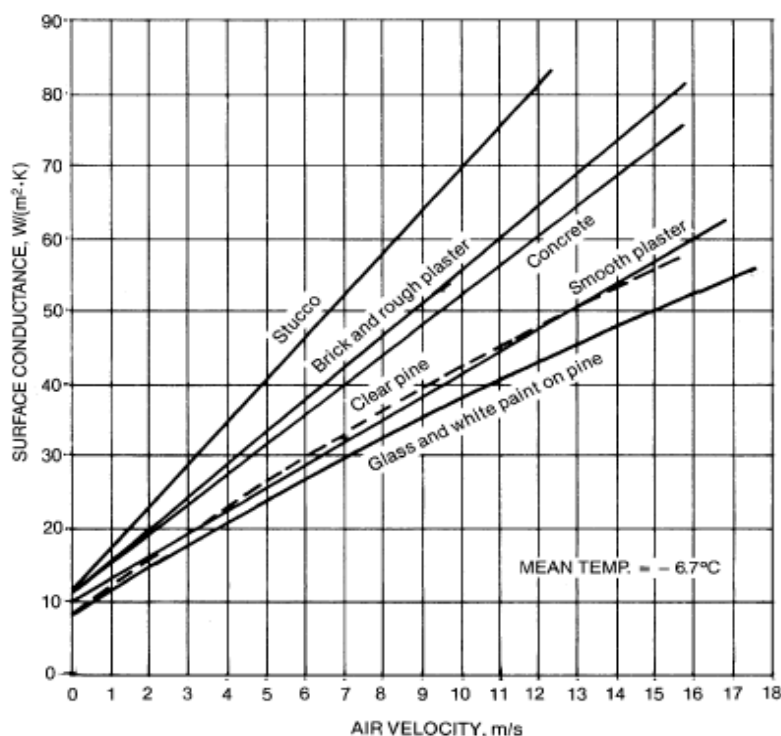
θερμότητας είναι σταθερός και ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τα ίδια κριτήρια με το λεπτομερή αλγόριθμο για να καθορίσει τη μειωμένη ή αυξημένη ικανότητα μετάδοσης θερμότητας των επιφανειών. Στο σύστημα SI οι τιμές των συντελεστών που οριστήκαν είναι οι εξής: για κάθετη επιφάνεια $h=3,076 \text{ W/m}^2\text{K}$, για οριζόντια επιφάνεια με μειωμένη ικανότητα μετάδοσης θερμότητας $h=0,948 \text{ W/m}^2\text{K}$, για οριζόντια επιφάνεια με αυξημένη ικανότητα μετάδοσης θερμότητας $h=4,040 \text{ W/m}^2\text{K}$, για επιφάνειες με κλίση και με μειωμένη ικανότητα μετάδοσης θερμότητας $h=2,281 \text{ W/m}^2\text{K}$, για επιφάνειες με κλίση και με αυξημένη ικανότητα μετάδοσης θερμότητας $h=3,870 \text{ W/m}^2\text{K}$.

3. CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers) αλγόριθμος. Εφαρμόζονται σταθεροί συντελεστές μετάδοσης θερμότητας οι οποίοι προέρχονται από το CIBSE.
4. Ceiling diffuser. Χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις ανεπτυγμένες από τους Fisher and Pedersen (1997). Για δάπεδα: $h=3,873+0,082*ACH^{0.98}$, για οροφές: $h=2.234+4.099*ACH^{0.503}$ και για τοίχους: $h=1,208+1,012*ACH^{0.604}$.
5. Εσοχές (Cavity). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εφαρμόζεται στην περίπτωση που έχει τοποθετηθεί τοίχος Trombe για τον υπολογισμό της μετάδοσης της θερμότητας στην περιοχή μεταξύ τοίχου και υαλοεπιφάνειας του τοίχου Trombe.

Για τις εξωτερικές επιφάνειες έχουν γίνει σημαντικές έρευνες στη μοντελοποίηση του υπολογισμού συντελεστών μετάδοσης θερμότητας στον εξωτερικό χώρο. Μέχρι το 1930 είχαν δημοσιευτεί πολλές μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή οι οποίες ήταν αρκετά αντιφατικές [16, 17]. Μπορεί να γίνει επιλογή ανάμεσα σε 7 αλγορίθμους.

1. Λεπτομερής αλγόριθμος (Detailed). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος έχει πολλές ομοιότητες με τους *BLAST* και *TARP*. Και στα τρία μοντέλα η συναγωγή χωρίζεται σε 2 συνιστώσες, στην εξαναγκασμένη και τη φυσική κατά τον Walton (1981). Η εξαναγκασμένη συνιστώσα μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή στηρίζεται σε έναν συνδυασμό από τους Sparrow, Ramsey, και Mass [18]. Η φυσική συνιστώσα λειτουργεί όπως και ο λεπτομερής αλγόριθμος για τις εσωτερικές επιφάνειες.
2. Απλός αλγόριθμος (Simple). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας και την ταχύτητα του ανέμου. Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας εμπεριέχει και την ακτινοβολία προς τον ουρανό, το έδαφος και τον αέρα.
3. CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers) αλγόριθμος. Εφαρμόζει σταθερούς συντελεστές μετάδοσης θερμότητας οι οποίοι είναι βασισμένοι στον προσανατολισμό και προέρχονται από βασικές αρχές του CIBSE.
4. BLAST Πανομοιότυπος αλγόριθμος με τον λεπτομερή.
5. TARP Πανομοιότυπος αλγόριθμος με τον λεπτομερή.
6. DOE-2 Το μοντέλο μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή είναι ένας συνδυασμός των *MoViTT* και *BLAST* αλγορίθμων.

7. MoWiTT [19]. Το συγκεκριμένο μοντέλο στηρίζεται σε μετρήσεις που έγιναν στο κτίριο Mobile Window Thermal Test (MoWiTT).



Σχήμα 3.18: Επίδραση της ροής του αέρα στην αγωγιμότητα διαφόρων επιφανειών [6].

Όταν οι επιφάνειες είναι υγρές (π.χ. όταν βρέχει και είναι εκτεθειμένες στον άνεμο) ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας εμφανίζεται στα αποτελέσματα με υψηλή τιμή ($1000 \text{ W/m}^2\text{K}$) και η επιφάνεια είναι εκτεθειμένη σε εξωτερική θερμοκρασία υγρού βολβού αντί της θερμοκρασίας ξηρού βολβού.

Οι τιμές των U-value και R-value παρουσιάζονται περιλαμβάνοντας την επίδραση της αντίστασης της επιφάνειας και παραβλέποντας την και υπολογίζονται με ή χωρίς την ύπαρξη γεφυρών όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.19. Η τιμή U-value είναι η θερμική αγωγιμότητα ενός υλικού. Όσο μικρότερη τιμή έχει τόσο μικρότερο είναι το ποσό της θερμότητας σε W που διαπερνά 1 m^2 του υλικού σε διαφορά εσωτερικής-εξωτερικής θερμοκρασίας 1 K . Η τιμή R-value είναι η αντίσταση ενός υλικού στη μετάδοση θερμότητας. Δηλαδή όσο μεγαλύτερη τιμή έχει τόσο μικρότερο είναι το ποσό της θερμότητας που διαπερνά το υλικό.

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	2.152
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.540
Surface resistance (m ² -K/W)	0.130
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19.870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.130
Surface resistance (m ² -K/W)	0.040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0.372
R-Value (W/m ² -K)	2.858
U-Value (W/m²-K)	0.350
With Bridging (BS EN ISO 6946)	
Upper resistance limit (m ² -K/W)	2.858
Lower resistance limit (m ² -K/W)	2.858
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0.372
R-Value (W/m ² -K)	2.858
U-Value (W/m²-K)	0.350

Σχήμα 3.19: Τιμές U και R

3.1.4 Καρτέλα ανοιγμάτων (Openings template)

Ως ανοίγματα του κτιρίου ορίζονται τα παράθυρα, οι πόρτες, οι αεραγωγοί και οι ρωγμές που παρουσιάζονται στην τοιχοποιία. Το DesignBuilder παρέχει στο χρήστη μία βιβλιοθήκη με τυποποιημένα είδη υαλοπινάκων και ανοιγμάτων.

3.1.4.1 Υαλοπίνακες

Οι εξωτερικοί υαλοπίνακες είναι διπλοί πάχους 6 χιλιοστών με 13 χιλιοστά κενό αέρα (Dbl Clr 6mm/13mm Air) με συντελεστή μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή 2,7 W/m²K. Τα πλαίσια είναι αλουμινίου με διαστάσεις 0.5 μέτρα πλάτος, 1 μέτρο ύψος. Ανοίγουν συνήθως κατά 20%. Οι εξωτερικοί υαλοπίνακες περιέχουν εσωτερικά σκίαστρα (περσίδες) με μέτρια αντανάκλαστικότητα. Χρήση των σκιάστρων γίνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών.

Οι εσωτερικοί υαλοπίνακες είναι διπλοί πάχους 6 χιλιοστών με 13 χιλιοστά κενό αέρα (Dbl Clr 6mm/13mm Air) με πλαίσια αλουμινίου. Τα εσωτερικά παράθυρα συνήθως παραμένουν κλειστά. Τα σκίαστρα των εσωτερικών υαλοπινάκων δεν χρησιμοποιούνται.

Ο υαλοπίνακας οροφής (αίθριο) έχει την ίδια κατασκευή με τους υπόλοιπους υαλοπίνακες με τη διαφορά ότι παραμένει πάντα κλειστός.

3.1.4.2 Θύρες

Οι εξωτερικές θύρες έχουν ύψος 2 μέτρα και πλάτος 1.10 μέτρα. Συνήθως ανοίγουν 20% και παραμένουν ανοικτές για περίπου 5% του συνολικού ημερήσιου χρόνου λειτουργίας του κτιρίου.

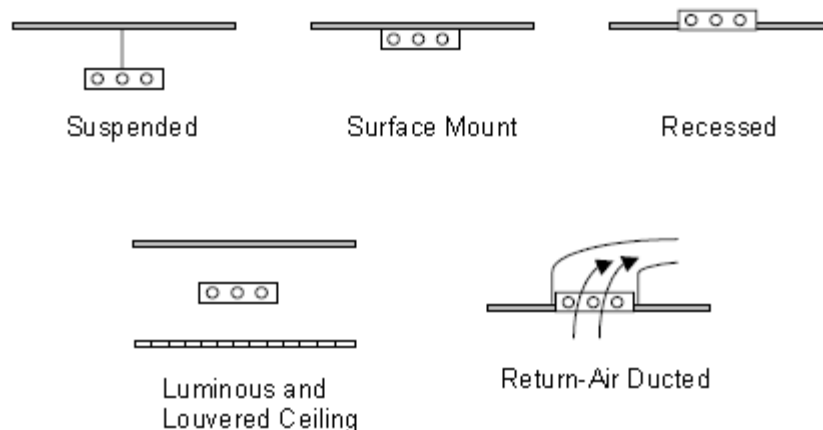
Οι εσωτερικές θύρες έχουν ύψος 2 μέτρα και πλάτος 1.10 μέτρα. Συνήθως ανοίγουν 50% και παραμένουν ανοικτές για περίπου 50% του συνολικού ημερήσιου χρόνου λειτουργίας του κτιρίου. Αεραγωγοί δεν υπάρχουν στο κτίριο.

Στην περίπτωση που έχει επιλεγεί μοντελοποίηση φυσικού εξαερισμού με υπολογιστικές μεθόδους ο αέρας που εισέρχεται στο εσωτερικό του κτιρίου μέσω των ανοιγμάτων υπολογίζεται με βάση το ποσοστό του χρόνου (Openings template) που παραμένουν ανοιχτά τα ανοίγματα, αν επιτρέπεται να ανοίξουν, δηλαδή αν $T_{zone_air} > T_{setpoint}$ και $T_{zone_air} > T_{outside_air}$ σύμφωνα με τα δεδομένα της καρτέλας *Activity template*.

Στην περίπτωση που έχουμε *Scheduled Natural Ventilation* η ροή μέσω ανοιγμάτων δεν μοντελοποιείται, αντίθετα η ροή φυσικού εξαερισμού υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ένα συνολικό δείκτη (natural ventilation flow rate) και με βάση τα δεδομένα στην καρτέλα των συστημάτων HVAC που επιτρέπουν τη λειτουργία των ανοιγμάτων.

3.1.5 Καρτέλα φωτισμού (Lighting template)

Στην καρτέλα *Activity template* εισάγεται το επιθυμητό επίπεδο φωτισμού (500 lux) για το συγκεκριμένο είδος εργασίας. Αν τα επίπεδα φυσικού φωτισμού δε φτάνουν το επιθυμητό τότε γίνεται χρήση του τεχνητού φωτισμού. Σε όλα τα γραφεία του κτιρίου χρησιμοποιούνται συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού. Η απαιτούμενη στάθμη φωτισμού είναι 500 lux (για γραφεία) που αντιστοιχεί σε τιμή φορτίου φωτισμού 22W/m^2 . Οι επιθυμητές τιμές φωτισμού (lux) ορίζονται στην καρτέλα *Activity template* ανάλογα με το είδος της δραστηριότητας των εργαζομένων.



Σχήμα 3.20: Διάφοροι τύποι φωτιστικών

Ανάλογα με τον τύπο του φωτιστικού αντιστοιχούν και οι τιμές του ποσοστού εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (radiant fraction), του ποσοστού ορατής ακτινοβολίας (visible fraction) και του ποσοστού μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή.

Πίνακας 3.9 Διάφοροι τύποι φωτιστικών [20]

Δεδομένα	Κρεμαστά φωτιστικά (suspended)	Στην επιφάνεια της οροφής (Surface Mount)	Σε εσοχή της οροφής (Recessed)	Φωτεινές εσοχές οροφής (Luminous and Recessed Ceiling)	Φωτεινοί αεραγωγοί (Return-air Ducted)
Ποσοστό επιστροφής αέρα	0,0	0,0	0,0	0,0	0,54
Ποσοστό εκπεμπόμενης ακτινοβολίας	0,42	0,72	0,37	0,37	0,18
Ποσοστό ορατής ακτινοβολίας	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Ποσοστό μετάδοσης με συναγωγή	0,40	0,10	0,45	0,45	0,10

Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στο φωτισμό αυξάνει τα εσωτερικά θερμικά φορτία. Στο EnergyPlus αυτή η τιμή χωρίζεται σε τέσσερα ποσοστά από τα οποία τα τρία είναι ανάλογα με το είδος του φωτιστικού (radiant fraction, visible fraction, return air fraction) και το τέταρτο αναφέρεται στη θερμότητα που μεταδίδεται λόγω συναγωγής (Convected Fraction) από τα φώτα και υπολογίζεται στο EnergyPlus ως:

$\text{Convected Fraction} = 1.0 - (\text{Return Air Fraction} + \text{Radiant Fraction} + \text{Visible Fraction})$.

Το ποσοστό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (Radiant Fraction) είναι το ποσό της θερμότητας από τα φώτα που εισέρχεται στο χώρο μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Το EnergyPlus υπολογίζει το ποσό της ακτινοβολίας που απορροφάται από τις εσωτερικές επιφάνειες.

Το ποσοστό της ορατής ακτινοβολίας (Visible Fraction) είναι το ποσό της θερμότητας που μεταδίδεται από τα φώτα μέσω ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος. Το EnergyPlus υπολογίζει το ποσό της ακτινοβολίας που απορροφάται από τις εσωτερικές επιφάνειες. Το άθροισμα τους πρέπει να είναι ίσο με τη μονάδα.

Η λειτουργία των φωτιστικών συγχρονίζεται με το ωράριο λειτουργίας του κτιρίου όπως ορίστηκε στη γενική καρτέλα (General Template). Τα περισσότερα γραφεία του κτιρίου διαθέτουν τέσσερις λαμπτήρες φθορισμού. Έτσι αν ένα γραφείο έχει επιφάνεια 30 m^2 και έχει 4 λαμπτήρες φθορισμού των 60 W τότε η συνολική ισχύς είναι $4 \cdot 60 = 240 \text{ W}$. Οι λαμπτήρες φθορισμού αποδίδουν 60 lumens/W που σημαίνει ότι αποδίδουν σε lumens: $60 \text{ lumens/W} \cdot 240 \text{ W} = 14400 \text{ lumens}$ δηλαδή $14400 \text{ lumens}/30 \text{ m}^2 = 480 \text{ lux}$. Το επιθυμητό επίπεδο είναι 500 lux που σημαίνει ότι το υπερκαλύπτουν εφόσον εργάζονται κατά τη διάρκεια της ημέρας και σε γραφεία μικρότερα των 30 m^2 .

3.1.6 Καρτέλα συστημάτων HVAC (HVAC template)

Τα συστήματα HVAC αποτελούν το σημαντικότερο παράγοντα κατανάλωσης ενέργειας σε ένα κτίριο για το λόγο αυτό η μοντελοποίηση τους στο DesignBuilder πρέπει να είναι λεπτομερής ώστε να προσεγγίζεται η πραγματική λειτουργία τους.

Αρχικά επιλέγεται η μοντελοποίηση του συστήματος HVAC ως *απλή* (Simple) ή *σύνθετη* (Compact). Λεπτομερής ανάλυση και χρήση του EnergyPlus για την επεξεργασία και διεξαγωγή των αποτελεσμάτων γίνεται στη σύνθετη μοντελοποίηση του συστήματος θέρμανσης και κλιματισμού.

Τα συστήματα HVAC διαμορφώνονται ως εξής:

Η θέρμανση του κτιρίου επιτυγχάνεται με τη χρήση λέβητα–καυστήρα. Για την καύση χρησιμοποιείται πετρέλαιο. Ο συντελεστής απόδοσης του λέβητα είναι περίπου 0.8 και οι απώλειες θερμότητας που οφείλονται στις σωληνώσεις 5% . Το κτίριο θερμαίνεται μόνο κατά τη χειμερινή περίοδο, πέντε μέρες την εβδομάδα.

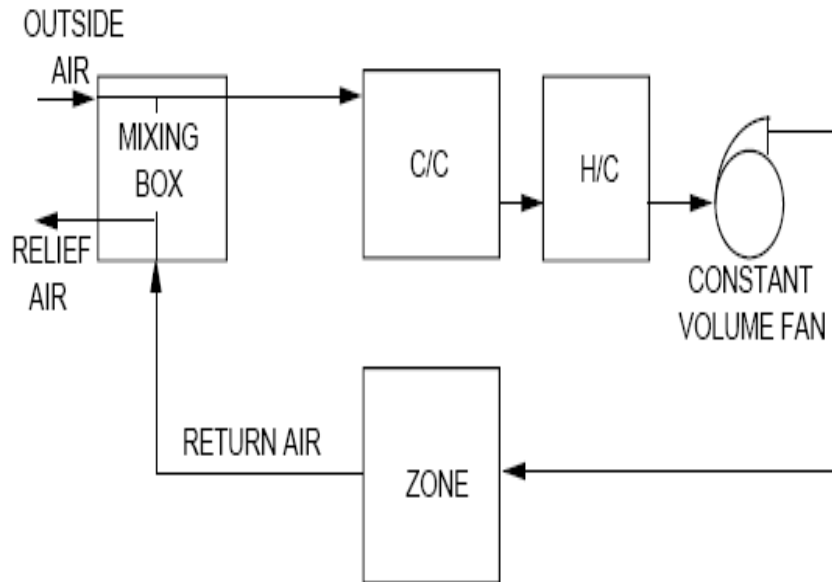
Το κτίριο ψύχεται με τη βοήθεια κλιματιστικών. Ο συντελεστής απόδοσης των κλιματιστικών είναι περίπου 2.5 (COP) και οι απώλειες θερμότητας που οφείλονται στη διανομή αέρα στη ζώνη είναι 5% . Τα κλιματιστικά λειτουργούν μόνο κατά την καλοκαιρινή περίοδο, πέντε μέρες την εβδομάδα.

Τα είδη των συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού στο DesignBuilder είναι τα εξής:

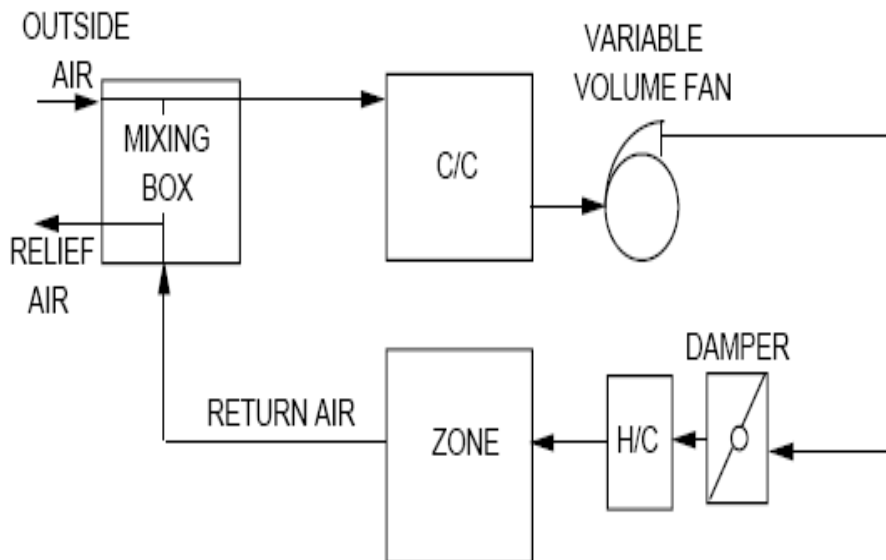
- Συστήματα αυτόνομης μονάδας (Unitary single zone)
- Συστήματα θέρμανσης–κλιματισμού αέρα–νερού (Fan Coil Units)
- Σύστημα πολλαπλών μονάδων (Unitary multizone)
- Συστήματα μεταβλητού όγκου αέρα (VAV)
- Συστήματα σταθερού όγκου αέρα (CAV)

Τα συστήματα μεταβλητού, σταθερού όγκου αέρα και τα συστήματα αέρα–νερού (αναλύονται στο Κεφάλαιο 2) είναι κεντρικά συστήματα κατάλληλα και για θέρμανση και για κλιματισμό. Το συγκεκριμένο κτίριο θερμαίνεται με σύστημα λέβητα–καυστήρα και ψύχεται με αυτόνομες μονάδες κλιματιστικών. Η κατάλληλη μοντελοποίηση με τα δεδομένα της βιβλιοθήκης του DesignBuilder θα ήταν ένα σύστημα αυτόνομης μονάδας (Unitary single zone) για ψύξη και ένα σύστημα πολλαπλών μονάδων (Unitary multizone) για θέρμανση. Επειδή δεν είναι εφικτή η μοντελοποίηση δύο συστημάτων επιλέχθηκε ένα σύστημα θέρμανσης και κλιματισμού αυτόνομης

μονάδας. Στην περίπτωση αυτή επειδή δεν έχουμε μηχανικό εξαερισμό η θέρμανση και ψύξη καθορίζεται αποκλειστικά από το πρόγραμμα λειτουργίας και από τις επιθυμητές τιμές θερμοκρασίας. Παρακάτω φαίνονται ένα σύστημα αυτόνομης μονάδας (Unitary single zone) κι ένα σύστημα μεταβλητού όγκου αέρα (VAV) αντίστοιχα.



Σχήμα 3.21: Απλοποιημένο σύστημα αυτόνομης μονάδας (Unitary single zone)



Σχήμα 3.22: Απλοποιημένο σύστημα μεταβλητού όγκου αέρα (VAV)

Πίνακας 3.10 Υποθετική τιμή του συντελεστή απόδοσης (COP) για διάφορα κλιματιστικά συστήματα [21]

			Υποθετικός COP
Σύστημα κλιματισμού δωματίου	Χωρίς βασικό αέρα	Σύστημα πολλαπλών μονάδων	2,25
		Σύστημα αυτόνομης μονάδας	2,25
	Με βασικό αέρα	Σύστημα πολλαπλών μονάδων	2,25
		Σύστημα αυτόνομης μονάδας	2,25
Κεντρικό σύστημα κλιματισμού	Χωρίς βασικό αέρα	Σύστημα πολλαπλών μονάδων	2,25
		Σύστημα αέρα-νερού-2 βαλβίδες	2,00
		Σύστημα αέρα-νερού-4 βαλβίδες	2,00
	Με βασικό αέρα	Σύστημα αυτόνομης μονάδας	2,25
		Σύστημα πολλαπλών μονάδων	2,25
		Σύστημα σταθερού όγκου αέρα	1,30
		Σύστημα αυτόνομης μονάδας	1,70
		Σύστημα αέρα-νερού-2 βαλβίδες	2,00
		Σύστημα αέρα-νερού-4 βαλβίδες	2,00

Στην περίπτωση που έχει επιλεγεί στην γενική καρτέλα *Scheduled Natural Ventilation* παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει μεταξύ δύο μεθόδων προσδιορισμού του φυσικού εξαερισμού 1.με βάση τον όγκο της ζώνης (by zone) και 2.με βάση τις ελάχιστες απαιτήσεις σε φρέσκο αέρα ανά άτομο (Min fresh air per person).

Οι απαιτήσεις σε φυσικό εξαερισμό υπολογίζονται ως εξής:

$$I=Q/V \text{ [6]}$$

Όπου:

I: εναλλαγές αέρα ανά ώρα (ac/h),

Q: παροχή αέρα (m^3/h).

V: $314 \text{ m}^2 \cdot 6,5 \text{ m} = 2041 \text{ m}^3$ όγκος κτιρίου

Από το Κεφάλαιο 2 για δωμάτια $Q=22 \text{ m}^3/\text{h} \sim 22 \cdot 20$ εργαζόμενοι

$$I = (22 \cdot 20) / 2041 = 0,21 \text{ ac/h}$$

Ο αέρας κάθε χώρου προσομοιώνεται στο EnergyPlus ως πλήρως αναμειγμένος (ομοιόμορφη κατανομή αέρα). Στο DesignBuilder η επιλογή αυτή αποτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία των συστημάτων HVAC και του φυσικού εξαερισμού και επιτρέπει να μελετηθούν διάφορες στρατηγικές μεγιστοποιώντας τον φυσικό εξαερισμό και ελαχιστοποιώντας τη λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης αντίστοιχα. Η κατανομή του αέρα μπορεί επίσης να έχει δυναμική διαβάθμιση αντί της ομοιόμορφης κατανομής. Στην περίπτωση αυτή τα δεδομένα εισόδου για την κατανομή αέρα επιτρέπουν τη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση εντός μιας ζώνης που ποικίλει δυναμικά ως προς:

- Την εξωτερική θερμοκρασία.
- Την εσωτερική θερμοκρασία.
- Τη διαφορά θερμοκρασίας (εσωτερική- εξωτερική).
- Τα θερμικά φορτία.
- Τα ψυκτικά φορτία.

Στην περίπτωση που επιλέγεται δυναμική διαβάθμιση αντί της ομοιόμορφης κατανομής απαιτούνται είσοδοι όπως η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά (έστω 10°C) καθώς και η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση (έστω $4^\circ\text{C}/\text{m}$). Αντίστοιχα απαιτούνται είσοδοι για την ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά (έστω 0°C) καθώς και για την θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση (έστω $0^\circ\text{C}/\text{m}$). Έτσι αν οριστεί θερμοκρασιακή διαφορά 10°C και θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση $4^\circ\text{C}/\text{m}$ σημαίνει ότι καθώς αυξάνεται το ύψος κατά 1 μέτρο έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 4°C στην περίπτωση μέγιστης θερμοκρασιακής διαφοράς. Στην αντίθετη περίπτωση η κατανομή του αέρα είναι ομοιόμορφη. Ορίζεται επίσης το ύψος του θερμοστάτη με σκοπό να αντιλαμβάνεται μια μέση θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου η οποία θα συγκριθεί με την εξωτερική για να υπολογιστεί η διαφορά θερμοκρασίας.

3.2 Αποτελέσματα

Συνοψίζοντας, το κτίριο αναλύθηκε ως ένα ενιαίο σύστημα λαμβάνοντας υπόψη τη σκίαση που δημιουργείται από το ίδιο αλλά και από τα γειτονικά κτίρια. Δημιουργήθηκαν φόρμες για τα κυρίως μέρη της μοντελοποίησης που αφορούν στη δραστηριότητα των εργαζομένων, στην κατασκευή του κτιρίου, στα ανοίγματα, στον φωτισμό και τέλος στα συστήματα HVAC. Για τα εσωτερικά φορτία ορίστηκε μία τιμή για κάθε κατηγορία όπως για παράδειγμα για τους υπολογιστές και για τον εξοπλισμό. Το χρονοδιάγραμμα εργασίας έγινε με βάση μία τυπική ημέρα εφόσον κατά τη διάρκεια της εβδομάδας ακολουθείται το ίδιο πρόγραμμα εργασίας. Όσον αφορά στα συστήματα HVAC επιλέχθηκε η σύνθετη μοντελοποίηση τους λαμβάνοντας υπόψη και αναλύοντας το κάθε σύστημα χωριστά με σκοπό τη λεπτομερή επεξεργασία τους από το EnergyPlus. Η διαστασιολόγηση των HVAC έγινε αυτόματα από το EnergyPlus ώστε να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις θερμικής άνεσης. Όσον αφορά τον χωρίς πρόθεση φυσικό εξαερισμό, δηλαδή τη διήθηση του αέρα μέσα από σχισμές, ρωγμές του κτιρίου, μοντελοποιήθηκε η αεροστεγανότητα του κτιριακού κελύφους για των υπολογισμό της ποσότητας εναλλαγών αέρα. Τέλος ο θερμοκρασιακός έλεγχος έγινε με βάση τη θερμοκρασία αέρα κάθε ζώνης. Στον Πίνακα 3.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμικής προσομοίωσης του κτιρίου.

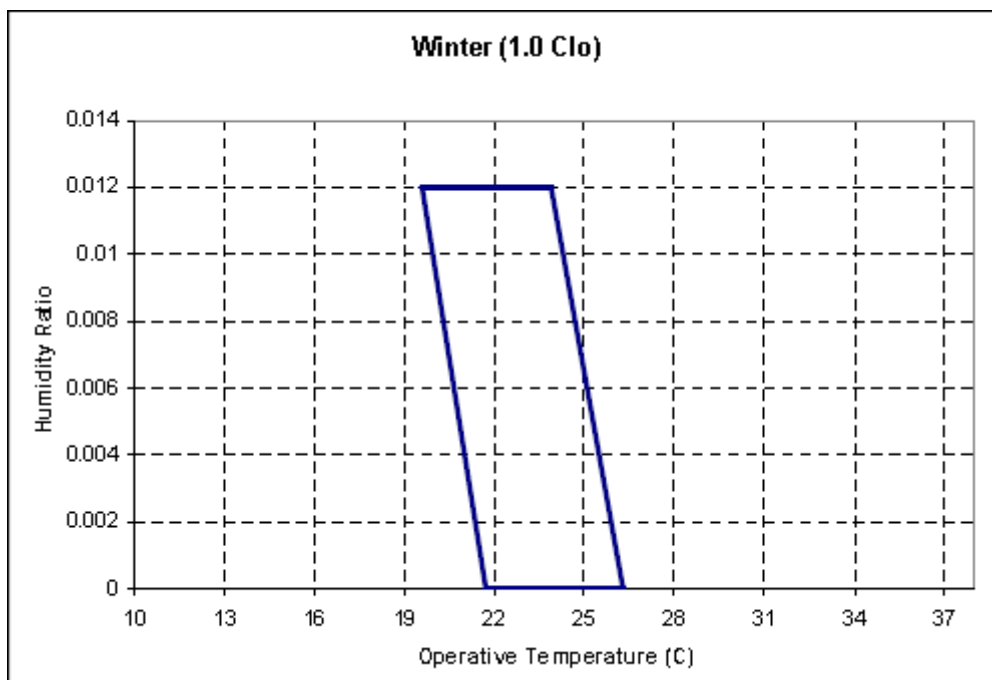
Πίνακας 3.11 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Συνολική Ηλεκτρική Ενέργεια (kWh)	Πετρέλαιο (kWh)	Κλιματιστικά (kWh)	Ηλεκτρική Ενέργεια Γραφείων (kWh)	Φωτισμός (kWh)	CO ₂ (kg)	Ωρες Δυσφορίας (hours)
14.884	11.265	5.426	5.028	4.214	13.271	919

Η ηλεκτρική ενέργεια και το πετρέλαιο αποτελούν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας στο κτίριο που είναι $11.958 + 21.068 = 33.026$ kWh. Η συνολική ηλεκτρική ενέργεια αποτελείται από την ενέργεια που καταναλώνεται για το φωτισμό, για την ψύξη και για τον εξοπλισμό των γραφείων. Οι ώρες δυσφορίας είναι ο χρόνος σε μια κατειλημμένη ζώνη όπου ο συνδυασμός του επιπέδου της υγρασίας και η λειτουργική θερμοκρασία δεν είναι στα όρια της ASHRAE 55-2004 που φαίνονται στους Πίνακες 3.12 και 3.13 και στα Σχήματα 3.23 και 3.24.

Πίνακας 3.12 Επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασίας-υγρασίας με χειμερινή ένδυση

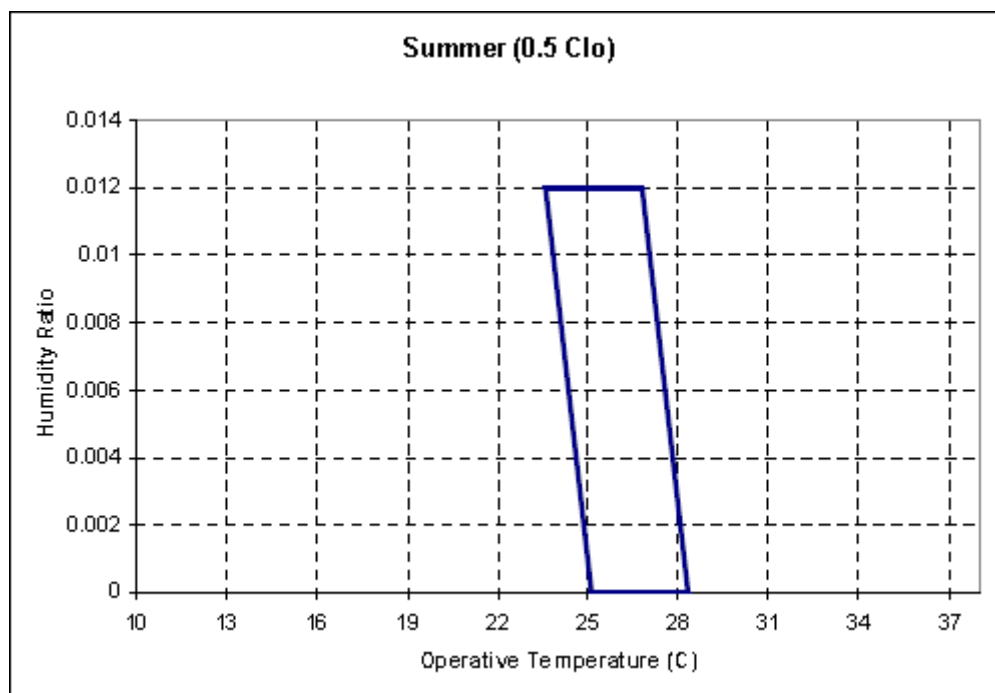
Θερμοκρασία αέρα (°C)	Αναλογία υγρασίας (μάζα νερού προς μάζα ξηρού αέρα)
19,6	0,012
23,9	0,012
26,3	0
21,7	0



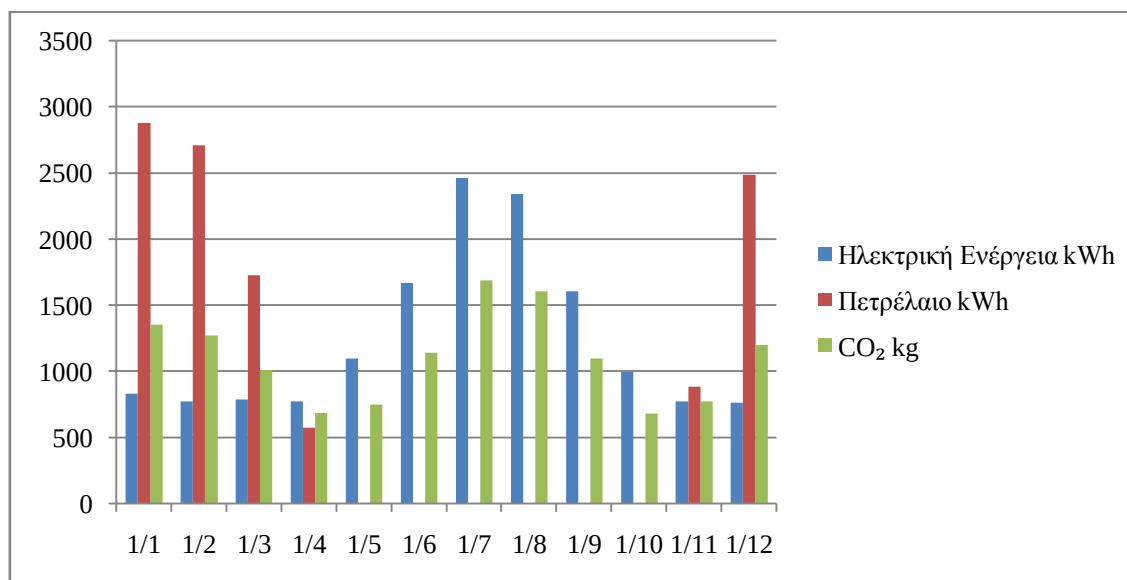
Σχήμα 3.23: Όρια θερμικής άνεσης με χειμερινή ένδυση (ASHRAE 55-2004)

Πίνακας 3.13 Επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασίας–υγρασίας με θερινή ένδυση

Θερμοκρασία αέρα (°C)	Αναλογία υγρασίας (μάζα νερού προς μάζα ξηρού αέρα)
23,6	0,012
26,8	0,012
28,3	0
25,1	0



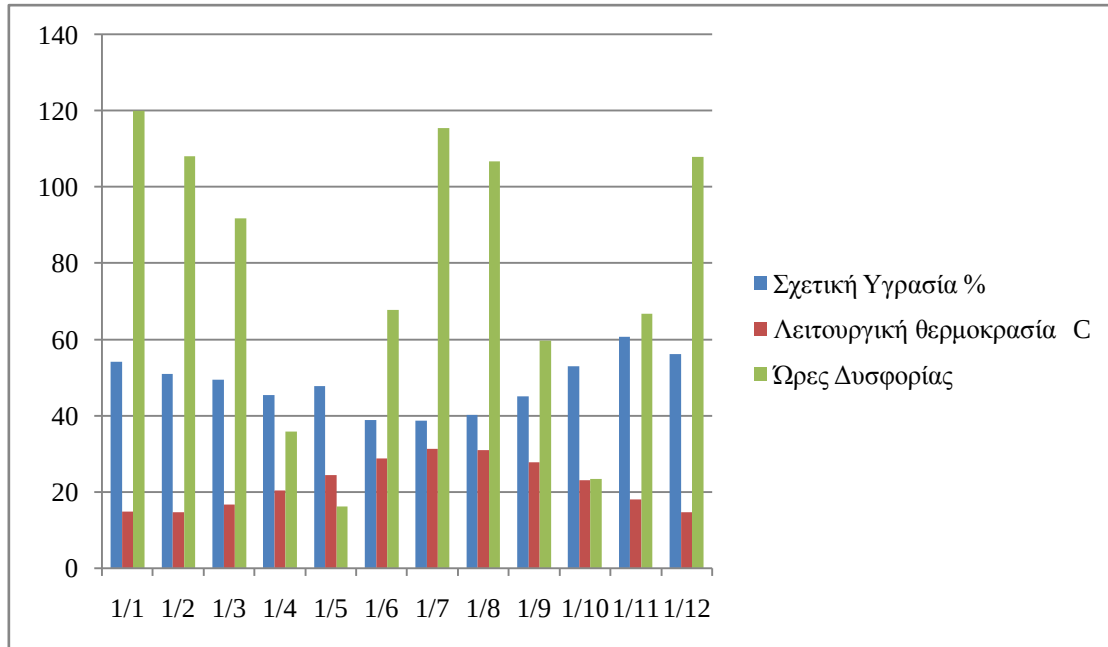
Σχήμα 3.24: Όρια θερμικής άνεσης με θερινή ένδυση (ASHRAE 55-2004)



Σχήμα 3.25: Συνολική κατανάλωση ενέργειας και εκπομπή CO₂

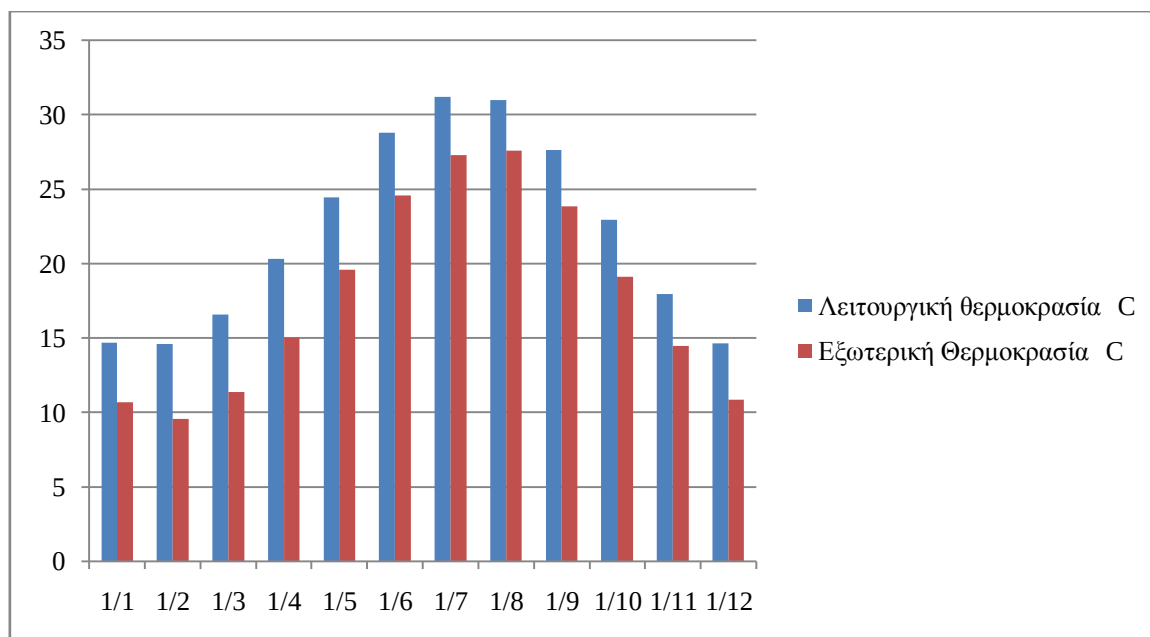
Στο Σχήμα 3.25 παρουσιάζεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας του κτιρίου και διαχωρίζεται σε ηλεκτρική ενέργεια και ενέργεια που καταναλώνει για τη θέρμανση εκφρασμένες σε kWh. Από το Μάιο έως Οκτώβριο το κτίριο δεν θερμαίνεται (καλοκαιρινή περίοδος). Παρατηρείται πως τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο καταναλώνει το μεγαλύτερο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας καθώς οι ανάγκες για κλιματισμό του κτιρίου τη συγκεκριμένη περίοδο είναι αυξημένες σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες της θερινής περιόδου. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα η ηλεκτρική ενέργεια παραμένει σε σταθερά επίπεδα επειδή το κτίριο δεν ψύχεται, οπότε η ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται από το φωτισμό και τον εξοπλισμό των γραφείων. Μεγάλη αύξηση της ενέργειας που καταναλώνεται στη θέρμανση παρατηρείται τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο καθώς

είναι οι μήνες του χρόνου με τη χαμηλότερη θερμοκρασία. Υψηλές τιμές CO₂ παρατηρούνται τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο δηλαδή τους μήνες με την μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Αύξηση παρατηρείται επίσης και τους χειμερινούς μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο, λόγω της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση, αλλά σε μικρότερο βαθμό.



Σχήμα 3.26: Ώρες δυσφορίας σε σχέση με το ποσοστό υγρασίας και λειτουργικής θερμοκρασίας

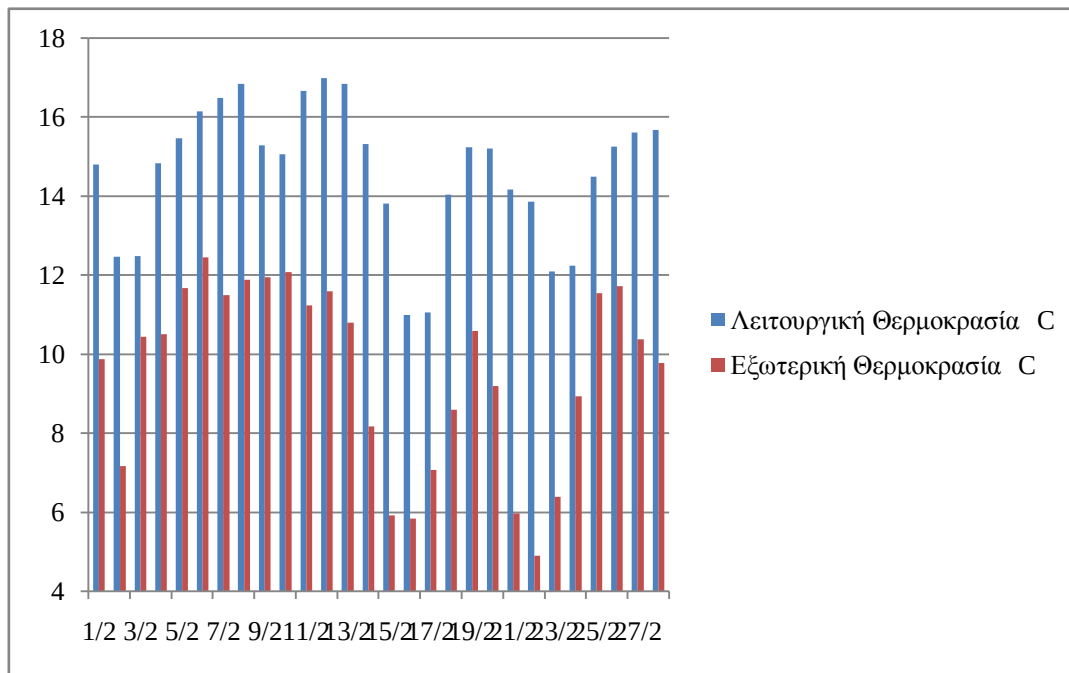
Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της ενότητας, οι ώρες δυσφορίας οφείλονται στα επίπεδα υγρασίας του χώρου και στη λειτουργική θερμοκρασία (operative temperature) η οποία είναι ο μέσος όρος της θερμοκρασίας αέρα και της θερμοκρασίας της εξωτερικής τοιχοποιίας. Περισσότερες ώρες δυσφορίας παρατηρούνται τους μήνες Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Ιούλιο και Αύγουστο, δηλαδή τους μήνες του χρόνου που έχουμε τις χαμηλότερες και υψηλότερες θερμοκρασίες. Τα επίπεδα υγρασίας είναι σε σχετικά φυσιολογικά επίπεδα κι έτσι δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις θερμική άνεση των εργαζομένων. Επειδή ο θερμοκρασιακός έλεγχος γίνεται με βάση τη θερμοκρασία του αέρα (air temperature) και όχι με βάση τη λειτουργική (operative temperature). Για το λόγο αυτό οι ώρες δυσφορίας είναι αρκετά αυξημένες.



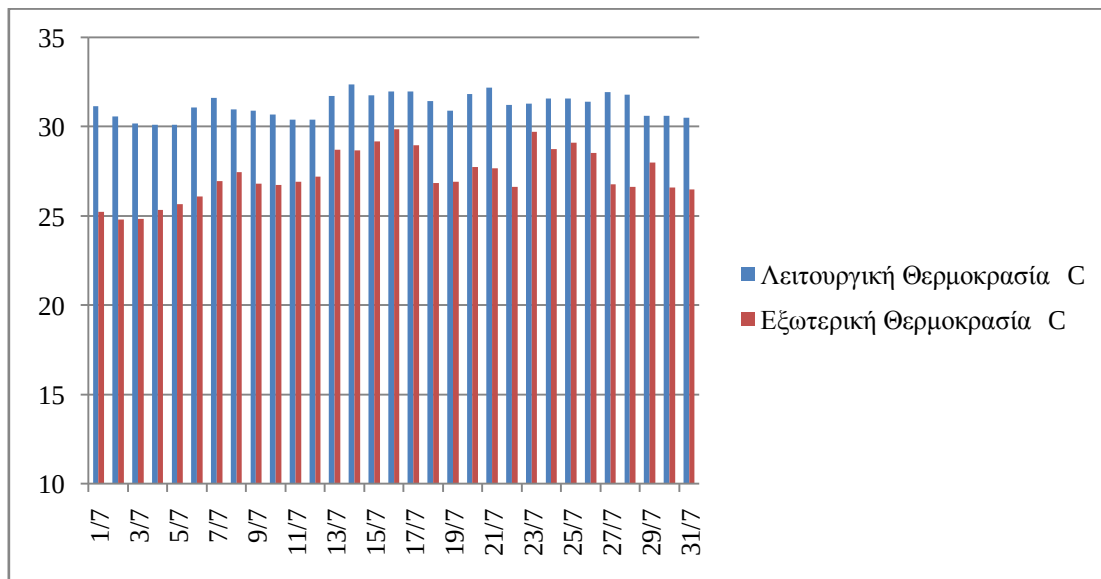
Σχήμα 3.27: Σύγκριση εξωτερικής θερμοκρασίας με εσωτερική λειτουργική θερμοκρασία

Στο Σχήμα 3.27 παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ της εξωτερικής θερμοκρασίας του αέρα και της εσωτερικής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το κέλυφος του κτιρίου δεν είναι μονωμένο. Αυτό έχει ως συνέπεια να απορροφάται μεγάλο ποσό θερμότητας από τα κατασκευαστικά υλικά της εξωτερικής τοιχοποιίας, όπως το σκυρόδεμα. Η θερμότητα αυτή απελευθερώνεται σταδιακά με αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Έτσι, για παράδειγμα, όταν τον Ιούλιο η υψηλότερη εξωτερική θερμοκρασία είναι 27,2 °C, η εσωτερική είναι 31,2 °C δηλαδή τέσσερις βαθμούς υψηλότερη.

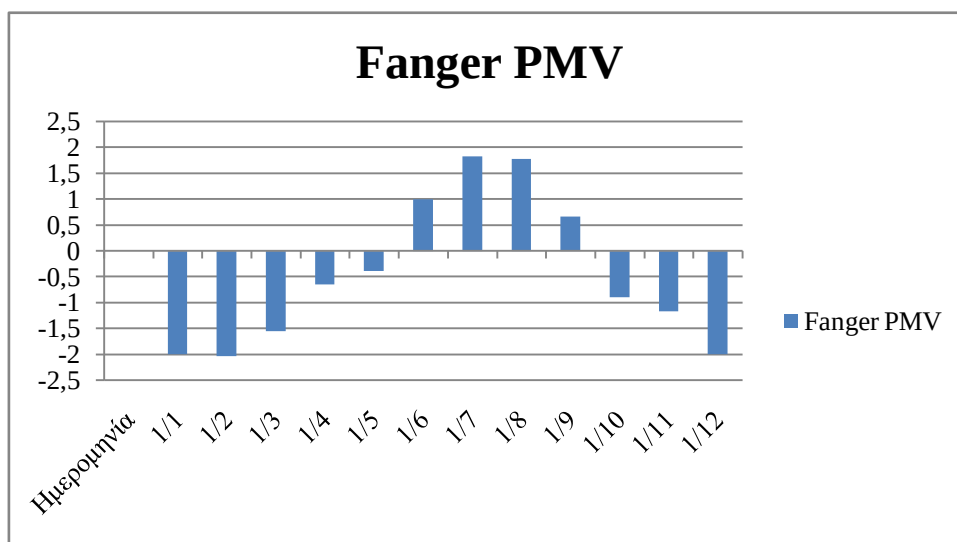
Το Φεβρουάριο, που είναι ο πιο ψυχρός μήνας του χρόνου, παρατηρείται μεγάλη πτώση της εξωτερικής θερμοκρασίας με ταυτόχρονη πτώση της εσωτερικής η οποία δεν ξεπερνά τους 17 °C. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.28 η εσωτερική θερμοκρασία το Φεβρουάριο είναι κάτω από τα επιθυμητά όρια θερμικής άνεσης (24 °C) με αποτέλεσμα την αύξηση των ωρών δυσφορίας αλλά και την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση. Τον Ιούλιο η διαφορά των δύο θερμοκρασιών οφείλεται κυρίως στην απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από την οροφή λόγω έλλειψης μόνωσης με αποτέλεσμα η λειτουργική θερμοκρασία να είναι αρκετά υψηλότερη της εξωτερικής (Σχήμα 3.29).



Σχήμα 3.28: Σύγκριση εξωτερικής θερμοκρασίας με εσωτερική λειτουργική θερμοκρασία το Φεβρουάριο

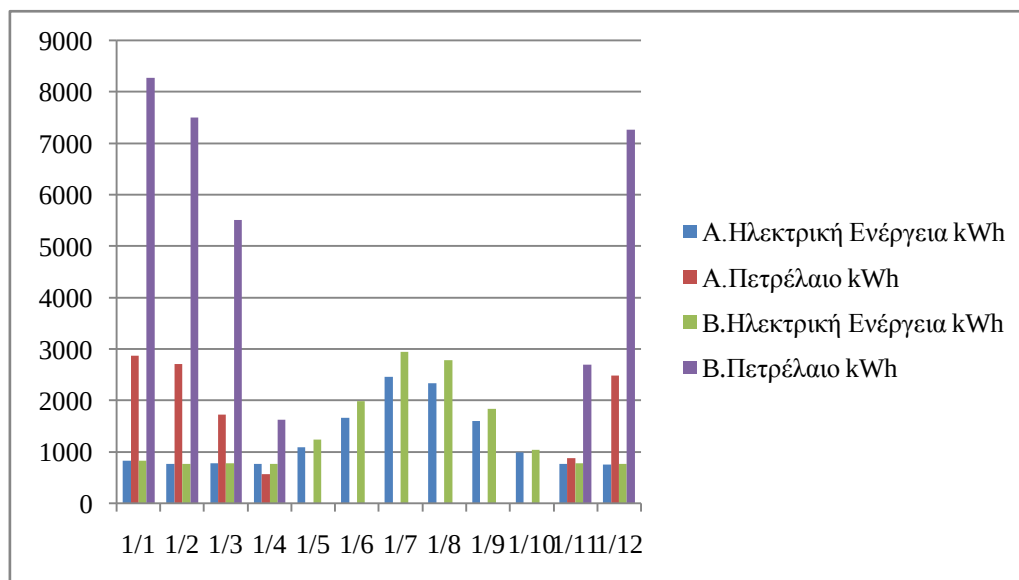


Σχήμα 3.29: Σύγκριση εξωτερικής θερμοκρασίας με εσωτερική λειτουργική θερμοκρασία τον Ιούλιο



Σχήμα 3.30: Μοντέλο θερμικής άνεσης του P.O. Fanger

Το μοντέλο θερμικής άνεσης του Fanger στηρίζεται σε μία κλίμακα επτά σημείων, από το -3 που σημαίνει ότι αισθάνονται πολύ κρύο έως το 3 που αισθάνονται πολύ ζεστό. Στο επίπεδο 0 αισθάνονται άνετα. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα, υψηλές τιμές του Fanger PMV έχουμε τους πιο θερμούς αλλά και πιο κρύους μήνες του χρόνου που σημαίνει ότι τις συγκεκριμένες περιόδους έχουμε αύξηση των ωρών δυσφορίας. Παρόλα αυτά ακραίες τιμές που να αγγίζουν το 3 και -3 δεν υπάρχουν.



Σχήμα 3.31: Σύγκριση συνολικής κατανάλωσης ως προς τις επιλογές θερμοκρασιακού ελέγχου (Α. θερμοκρασία αέρα, Β. λειτουργική θερμοκρασία).

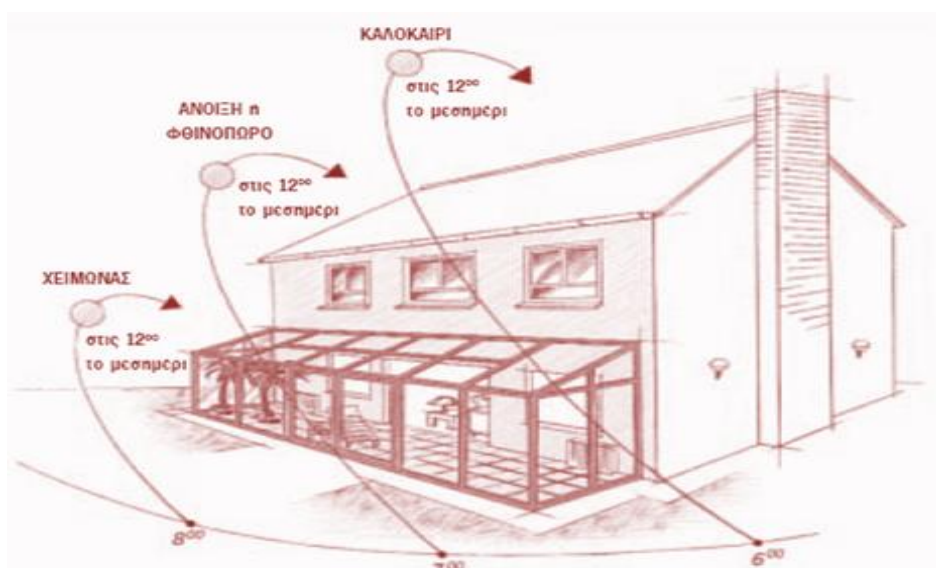
Όπως αναλύθηκε στην αρχή του κεφαλαίου το DesignBuilder στη γενική καρτέλα (General Template) δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα επιλογής θερμοκρασιακού ελέγχου μεταξύ:

1. Θερμοκρασίας αέρα (Air temperature)
2. Θερμοκρασία ακτινοβολίας (Radiant temperature)
3. Λειτουργικής θερμοκρασίας (Operative temperature)

Η διαφορά των τριών έγκειται στο γεγονός ότι ο θερμοστάτης που μετράει την εσωτερική θερμοκρασία του χώρου αντιλαμβάνεται την θερμοκρασία του αέρα ή τη θερμοκρασία ακτινοβολίας (θερμότητα της εξωτερικής τοιχοποιίας που ακτινοβολείται) ή τον μέσο όρο των δύο θερμοκρασιών. Το παραπάνω σχήμα παρουσιάζει τα αποτελέσματα των δύο θερμικών προσομοιώσεων του κτιρίου. Η ένδειξη Α αναφέρεται στην επιλογή θερμοκρασιακού ελέγχου με βάση τη θερμοκρασία αέρα ενώ η Β με βάση τη λειτουργική θερμοκρασία.

Όσον αφορά στη θέρμανση του κτιρίου παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην κατανάλωση ενέργειας η οποία οφείλεται στην απουσία μόνωσης της εξωτερικής τοιχοποιίας (βλ. Σχήμα 3.12). Έτσι κατά τη διάρκεια του χειμώνα όταν επιλέγεται θερμοκρασιακός έλεγχος με βάση την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα δεν λαμβάνεται υπόψη η θερμοκρασία των τοίχων η οποία είναι πολύ χαμηλή λόγω της εξωτερικής θερμοκρασίας. Στην περίπτωση επιλογής θερμοκρασιακού ελέγχου με βάση τη λειτουργική θερμοκρασία καταναλώνονται 5.400 kWh περισσότερες για να θερμανθεί ο χώρος.

Όσον αφορά την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας παρατηρείται μικρότερη διαφοροποίηση σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στα κατασκευαστικά υλικά της οροφής (βλ. Σχήμα 3.14). Η γωνία κλίσης του ηλίου (βλ. Σχήμα 3.32) κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, δείχνει ότι παίζει ουσιαστικότερο ρόλο η κατασκευή της οροφής όσον αφορά στην ηλιακή ακτινοβολία. Η οροφή παρόλο που δεν είναι μονωμένη είναι κατασκευασμένη με υλικά χαμηλού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε αντίθεση με την εξωτερική τοιχοποιία κι έτσι η απορροφά μικρότερα ποσά ηλιακής ενέργειας.



Σχήμα 3.32: Πορεία του ηλίου κατά τη διάρκεια ενός έτους

Με την ολοκλήρωση του τρίτου κεφαλαίου εξάγονται συμπεράσματα που αφορούν στην ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου των Τεχνικών Υπηρεσιών. Στο κεφάλαιο 4 που ακολουθεί, με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση (κεφάλαιο 2) αλλά και με βάση τα αποτελέσματα της θερμικής προσομοίωσης του κτιρίου εντοπίζονται οι κατάλληλες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας οι οποίες αξιολογούνται με σκοπό την εύρεση λύσεων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του υπό μελέτη κτιρίου.

Κεφάλαιο 4

Υποστήριξη Αποφάσεων και Διαχείριση Ενέργειας στα Κτίρια

4.1 Εισαγωγή

Στην Ευρώπη, όπως εξετάστηκε, εκτιμάται πως ο κτιριακός τομέας ευθύνεται για το 40% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης, ενώ ταυτόχρονα είναι υπεύθυνος για το 45% των συνολικών εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Κάθε χρόνο παρατηρείται αύξηση στα παραπάνω ποσοστά, γεγονός που επιβεβαιώνει την αυξανόμενη ενεργειακή εξάρτηση αλλά και τις μεγάλες συνέπειες για το περιβάλλον. Στόχος είναι να μειωθεί αυτή η ενεργειακή εξάρτηση και η ρύπανση του περιβάλλοντος. Για να επιτευχθεί αυτό είναι απαραίτητο να γίνουν παρεμβάσεις στα κτίρια, με σκοπό την βελτίωση της ενεργειακής τους συμπεριφοράς.

Η μεθοδολογία που έχει ακολουθηθεί μέχρι στιγμής περιγράφεται από τα ακόλουθα βήματα:

Σε πρώτη φάση γίνεται μελέτη του κτιρίου. Ο κύριος στόχος αυτής της φάσης είναι να καταγραφούν τα χαρακτηριστικά του κτιρίου, είτε μέσα από μηχανολογικά, ηλεκτρολογικά ή αρχιτεκτονικά σχέδια, είτε μέσα από συζητήσεις με τους χρήστες του κτιρίου. Ακόμη, αν ο ενεργειακός επιθεωρητής έχει στην κατοχή του λογαριασμούς τελευταίων ετών μπορεί να ανιχνεύσει αν υπάρχει κάποιο εποχιακό πρόβλημα στην χρήση ενέργειας του κτιρίου.

Στο δεύτερο βήμα εξετάζεται το κτίριο. Αυτό το βήμα είναι πολύ σημαντικό γιατί εδώ είναι που καθορίζεται αν είναι αναγκαία η ενεργειακή επιθεώρηση. Προσδιορίζονται οι ανάγκες του χρήστη, εξετάζονται οι συνθήκες λειτουργίας του σημαντικότερου ενεργειακού εξοπλισμού (συστήματα εξαερισμού, συστήματα θέρμανσης και ψύξης, φωτισμός, κ.α.) ενώ ταυτόχρονα υπολογίζονται οι καταναλώσεις ενέργειας του εξοπλισμού αυτού. Με αυτόν τον τρόπο εντοπίζονται τα προβλήματα στο κτίριο, είτε αυτά είναι λόγω κακής συντήρησης, είτε λόγω απερίσκεπτης χρήσης ενέργειας.

Στο τρίτο βήμα, όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, εξετάζεται το κτίριο αναφοράς. Χρησιμοποιώντας το κατάλληλο λογισμικό μπορεί να μοντελοποιηθεί και να προσομοιωθεί το κτίριο με τρόπο που να αντικατοπτρίζει με ρεαλισμό το πραγματικό. Το αρχικό αυτό μοντέλο χρησιμοποιείται ως μοντέλο αναφοράς για να μπορούν να εκτιμηθούν οι αποδόσεις των πιθανών εναλλακτικών παρεμβάσεων. Στην περίπτωση αυτής της έρευνας το εργαλείο προσομοίωσης ήταν το DesignBuilder της EnergyPlus.

Συνεχίζοντας την μεθοδολογία, το τέταρτο βήμα περικλείει τον εντοπισμό των εναλλακτικών δράσεων, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον ενεργειακό όσο και τον οικονομικό παράγοντα.

4.1.1 Εναλλακτικές Παρεμβάσεις

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κτιρίου δείχνουν ότι υπάρχουν προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας επεμβαίνοντας στα κατασκευαστικά στοιχεία του κτιρίου, δηλαδή στο κέλυφος ή με παθητικές τεχνικές κυρίως για το δροσισμό του.

Για ένα ήδη υπάρχον κτίριο οι επεμβάσεις που μπορούν να αυξήσουν την αποδοτικότητα του εξοικονομώντας ενέργεια είναι συνοπτικά οι εξής:

Επεμβάσεις στο κέλυφος του κτιρίου όπως η αντιμετώπιση των θερμογεφύρων, η προσθήκη μόνωσης όπου υπάρχει έλλειψη, η αεροστεγανότητα των κουφωμάτων, η αντικατάσταση των υαλοπινάκων με αποδοτικότερους, η τοποθέτηση σκιάστρων εξωτερικά ή εσωτερικά, διάφορες επεμβάσεις στην κατασκευή του κτιρίου.

Επεμβάσεις στο σύστημα θέρμανσης όπως η ρύθμιση του υφιστάμενου λέβητα ή η αντικατάσταση του με αποδοτικότερο.

Επεμβάσεις στο σύστημα ψύξης όπως συντήρηση του ψυκτικού συστήματος, τοποθέτηση καλύτερων μονωτικών υλικών στις σωληνώσεις και τους ψυκτικούς θαλάμους ή αντικατάστασή του με αποδοτικότερο. Επίσης ένα ουσιαστικό μέτρο είναι και η εκμετάλλευση του φυσικού δροσισμού ιδιαίτερα στην περίπτωση που το κτίριο βρίσκεται σε νησιώτικη περιοχή.

Επεμβάσεις στο φωτισμό όπως εκμετάλλευση φυσικού φωτισμού, αντικατάσταση λαμπτήρων με ενεργειακά αποδοτικότερους.

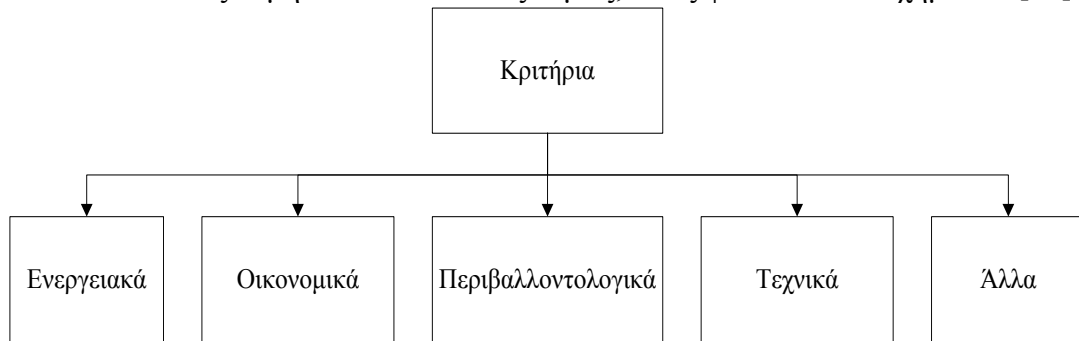
Οι τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας που αναφέρθηκαν παραπάνω αντιπροσωπεύουν μόνο ένα μικρό αριθμό των διαθέσιμων εναλλακτικών. Η τεχνολογική ανάπτυξη των τελευταίων δεκαετιών έχει αυξήσει σε πολύ μεγάλο βαθμό το πλήθος των νέων τεχνικών που εξυπηρετούν την βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κτιρίου. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι δεν είναι κάθε εναλλακτική κατάλληλη για οποιοδήποτε κτίριο, κι έτσι το έργο του ενεργειακού επιθεωρητή να επιλέξει μόνο κάποιες από αυτές μπορεί να είναι αρκετά δύσκολο. Κατά τον Vincke [22] το βήμα της επιλογής των εναλλακτικών δράσεων είναι το πιο δύσκολο της διαδικασίας.

Η επιλογή συγκεκριμένων τεχνικών εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε κτιρίου, από το σκοπό της ανακαίνισης αυτού, αλλά και από τα κριτήρια τα οποία πρέπει να εξυπηρετεί. Για παράδειγμα, στο σχέδιο που προτείνουν οι Wilde and Van der Voorde [23] για την επιλογή συστατικών που συνθέτουν ένα κτίριο εξοικονόμησης ενέργειας, οι εναλλακτικές είναι: ηλιακοί τοίχοι, βελτιωμένοι υαλοπίνακες, ηλιακά αίθρια και φωτοβολταϊκοί υαλοπίνακες. Επιπροσθέτως, από τους Becker et al [24] μελετήθηκε η επίδραση του σχεδιασμού του κτιρίου και της βελτίωσης των σχεδίων του εξαερισμού στη θερμική απόδοση, στην ποιότητα εσωτερικού αέρα και στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Εδώ, οι εναλλακτικές ήταν σχεδιαστικά κομμάτια του κτιρίου (προσανατολισμός του κτιρίου, μέγεθος παραθύρων, θερμομόνωση, θερμική μάζα) αλλά και διάφορα σχέδια εξαερισμού. Αντίστοιχα, οι Δασκαλάκη και Σανταμούρης [25] στο πρόγραμμα OFFICE προτείνουν βελτιωμένα συστήματα φωτισμού, κλιματισμού και εξαερισμού, σε συνδυασμό με τη βελτίωση του κελύφους.

Οι εναλλακτικές δράσεις μπορούν να εφαρμοστούν χωριστά η κάθε μία ή να συνδυαστούν και να αποτελέσουν μία στρατηγική ή ένα σενάριο δράσης. Έτσι, μόλις ο ενεργειακός επιθεωρητής καταλήξει στην επιλογή κάποιων δράσεων, με τη χρήση του εργαλείου προσομοίωσης μπορεί να εκτιμήσει τις αποδόσεις της κάθε δράσης αλλά και του κάθε σεναρίου.

4.1.2 Κριτήρια

Το σύνολο των παρεμβάσεων στο οποίο θα καταλήξει ο επιθεωρητής διαμορφώνεται βάσει των στόχων και των κριτηρίων της επιθεώρησης. Βάσει αυτών των κριτηρίων αξιολογούνται και ταξινομούνται οι εναλλακτικές. Τα κριτήρια αυτά εξετάζουν τα ενεργειακά, οικονομικά, τεχνικά και περιβαλλοντολογικά χαρακτηριστικά των προτεινόμενων παρεμβάσεων. Γενικά, τα κριτήρια μπορούν κι αυτά να ταξινομηθούν σε κάποιους τομείς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1 [26]:



Σχήμα 4.1: Κατηγορίες κριτηρίων [26]

Τα κριτήρια που φαίνεται να είναι περισσότερο σημαντικά στην ενεργειακή επιθεώρηση είναι τα ενεργειακά και τα οικονομικά. Μία κατηγορία κριτηρίων όμως για την οποία δεν υπάρχει παρά μόνο ελλιπής βιβλιογραφία ενώ είναι εξίσου σημαντική με τις άλλες είναι τα χρηματοδοτικά κριτήρια (για παράδειγμα προγράμματα που παρέχουν δάνεια ή οικονομική ενίσχυση). Ένας ενεργειακός επιθεωρητής είναι απαραίτητο να τα λαμβάνει υπόψη του, αφού ένας από τους όρους της ενεργειακής επιθεώρησης είναι η ανάλυση της χρηματοδότησης των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας.

4.1.2.1 Ενεργειακά και περιβαλλοντολογικά κριτήρια

Το κέντρο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας υπαγορεύει οι επιθεωρητές να λαμβάνουν υπόψη τους κριτήρια όπως:

- Ποσότητα εξοικονομούμενων καυσίμων ετησίως.
- Εξοικονομούμενη ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος ετησίως.
- Οικονομικό όφελος λόγω των υιοθετημένων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας ετησίως.
- Ετήσια ποσότητα παραγωγής των κυριότερων αερίων ρύπων (CO_2 , SO_2).

Τα ενεργειακά κριτήρια που αναφέρονται πιο πάνω επειδή μπορούν να αποτελέσουν και κριτήρια κόστους, θα πρέπει να εκφράζονται τόσο σε ενεργειακές όσο και σε οικονομικές μονάδες μέτρησης.

4.1.2.2 Τεχνικά και λειτουργικά κριτήρια

Και εδώ, αυτά που προτείνονται κατά κύριο λόγο είναι τα ακόλουθα:

- Η αξιοπιστία της ενδεχόμενης παρέμβασης.

- Η λειτουργικότητα του μέτρου εξοικονόμησης ενέργειας, δηλαδή εξετάζονται οι όροι της εγγύησης για τον ελάχιστο χρόνο λειτουργίας ετησίως και αξιολογούνται οι όροι συντήρησης του εκάστοτε μέτρου.
- Ο χρόνος που πρέπει να παρέλθει έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία του μέτρου εξοικονόμησης ενέργειας.
- Οι δαπάνες που προβλέπεται να γίνουν για τη συντήρηση του μέτρου εξοικονόμησης ενέργειας.

4.1.2.3 Οικονομικά και χρηματοδοτικά κριτήρια

Εδώ, προτείνονται τα ακόλουθα κριτήρια:

- Το ύψος του διατιθέμενου κεφαλαίου έτσι ώστε να υλοποιηθεί η εκάστοτε παρέμβαση.
- Η οικονομική απόδοση της παρέμβασης αυτής.
- Το ποσό χρηματοδότησης από τρίτους, αξιολογείται η δυνατότητα οικονομικής ενίσχυσης από προγράμματα.

Τα οικονομικά κριτήρια που βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή γενικά στην αξιολόγηση και σύγκριση των τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας είναι ο χρόνος αποπληρωμής, η καθαρή παρούσα αξία, ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης και το κόστος εξοικονόμησης ενέργειας, τα οποία όμως θα αναλυθούν στην επόμενη παράγραφο.

Όπως παρουσιάστηκε, τα κριτήρια στα οποία δίνεται περισσότερη έμφαση είναι αυτά της πρώτης και της τρίτης κατηγορίας. Έτσι, σε έρευνα που έγινε σε ένα κτίριο του πανεπιστημίου U.I.T (University Institute of Technology) στην La Rochelle της Γαλλίας [27], πρότειναν μία πολυκριτήρια ανάλυση για τον εξαερισμό (ventilation) χρησιμοποιώντας την ποιότητα του αέρα μέσα στο κτίριο, την θερμική άνεση των χρηστών και την κατανάλωση ενέργειας ως κριτήρια. Εδώ, η κατανάλωση ενέργειας χρησιμοποιήθηκε σε οικονομικές μονάδες, αντιπροσώπευε δηλαδή το οικονομικό όφελος της εκάστοτε παρέμβασης. Αντίστοιχα, σε έρευνα του CIAT της Γαλλίας [28] για τη βελτίωση του εσωτερικού περιβάλλοντος σε ένα κτίριο γραφείων τα κριτήρια ήταν: ακουστική άνεση, θερμική άνεση, και ενεργειακή κατανάλωση. Όπως στην προηγούμενη έρευνα, η ενεργειακή κατανάλωση χρησιμοποιήθηκε ως οικονομικό κριτήριο. Ακόμα, έρευνες στη Λοζάνη (La Suisse, Da Rahm) και στη Γενεύη (Course de Rive) [29] πάνω σε βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς κτιρίων γραφείων, είχαν ως κριτήρια: ετήσια κατανάλωση για θέρμανση και ηλεκτρισμό, ετήσιες εκπομπές CO₂, SO₂, θερμική και ακουστική άνεση, οπτική άνεση στο τεχνητό και φυσικό φως, όπως επίσης και τα κόστη εγκατάστασης και υλοποίησης των ΜΕ-Ε.

4.1.3 Μέθοδοι

Έχοντας καταλήξει σε μία λίστα μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας και στα κριτήρια βάσει των οποίων θα γίνει η σύγκριση των εναλλακτικών, πρέπει να βρεθεί η μέθοδος με την οποία θα γίνει η σύγκριση αυτή. Η ενεργειακή επιθεώρηση αυτή καθ' αυτή δίνει βάρος στα οικονομικά κριτή-

ρια, προτείνοντας έτσι τις παρεμβάσεις που αποδεικνύονται πιο οικονομικά αποδοτικές. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να πραγματοποιηθεί μία (αμιγώς) οικονομική αξιολόγηση.

➤ Κριτήριο επανείσπραξης

Μία από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους οικονομικής αξιολόγησης είναι η χρήση ενός –μόνο- οικονομικού κριτηρίου: το κριτήριο επανείσπραξης (simple payback time). Το κριτήριο αυτό ορίζεται ως ο χρόνος κατά τον οποίο τα έσοδα ενός μέτρου εξοικονόμησης ενέργειας ισούνται με την αρχική δαπάνη. Η μέθοδος είναι δημοφιλής για το λόγο ότι είναι αρκετά κατανοητή από μη-οικονομολόγους. Παρόλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί πως η μέθοδος αυτή πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση που επιθυμείται απλώς μία επιφανειακή εκτίμηση για την οικονομική αποδοτικότητα των εναλλακτικών παρεμβάσεων. Η απλότητα της μεθόδου εξισορροπείται από κάποια μειονεκτήματα που σε άλλες αντίστοιχες μεθόδους δεν παρουσιάζονται. Έτσι, αυτή η μέθοδος φαίνεται να καταδικάζει τις παρεμβάσεις των οποίων τα οικονομικά οφέλη αργούν να εμφανιστούν, δηλαδή σταματά να λαμβάνει υπόψη τις χρηματοροές από την περίοδο επανείσπραξης και μετά. Ένας ακόμα περιορισμός της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν εκτιμά το κόστος της χρηματοδότησης. Έτσι, μπορεί σε κάποιο χρονικό διάστημα τα οικονομικά οφέλη μίας παρέμβασης να είναι ίσα με την αρχική δαπάνη για την εγκατάσταση αυτής, αλλά στην περίπτωση που το έργο αυτό χρηματοδοτήθηκε το κριτήριο επανείσπραξης δεν δείχνει αν αυτά τα οφέλη αρκούν για να πληρώσουν τους τόκους του δανείου. Ένα τελευταίο σημαντικό μειονέκτημα έναντι άλλων μεθόδων είναι πως δεν λαμβάνει υπόψη τη διάρκεια ζωής του έργου.

➤ Καθαρή Παρούσα αξία

Αυτή η μέθοδος είναι εξίσου δημοφιλής με την πρώτη. Στηρίζεται στον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας (ΚΠΑ) κάθε παρέμβασης. Η μέθοδος αυτή ουσιαστικά συγκρίνει την παρούσα αξία των χρηματοροών (εξοικονόμηση ενέργειας κι έτσι μειωμένα κόστη λειτουργίας) του έργου με την αρχική δαπάνη. Ο υπολογισμός της ΚΠΑ δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{ΚΠΑ} = \sum_{t=1}^n C_t (1+k)^{-t} - I$$

Όπου το I είναι το αρχικό κόστος επένδυσης, το C_t εκφράζει τα έσοδα για τις περιόδους t για το εκάστοτε μέτρο εξοικονόμησης ενέργειας, ενώ ο συντελεστής $(1+k)^{-t}$ είναι ο συντελεστής προεξόφλησης.

Σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο η ΚΠΑ λαμβάνει υπόψη τόσο τη διάρκεια ζωής των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας προς σύγκριση, όσο και το κόστος χρηματοδότησης (αν αυτό υφίσταται). Η κατώτερη τιμή που μπορεί να πάρει η ΚΠΑ είναι μηδέν. Ανάμεσα σε δύο μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας που έχουν θετικές ΚΠΑ θα προτιμηθεί αυτό με τη μεγαλύτερη ΚΠΑ. Το γεγονός πως η ΚΠΑ ενός ΜΕΕ μπορεί να είναι μηδέν δεν σημαίνει πως το ΜΕΕ δεν έχει αποδοτικότητα. Αυτό μάλιστα αποτελεί και ένα από τα μειονεκτήματα της μεθόδου. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι πως η μέθοδος αυτή καθιστά δύσκολη τη σύγκριση ΜΕΕ με διαφορετική αρχική δαπάνη.

➤ Εσωτερικός συντελεστής απόδοσης

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ίδια λογική με την ΚΠΑ. Εκφράζει το επιτόκιο για το οποίο η ΚΠΑ μηδενίζεται, δηλαδή το επιτόκιο για το οποίο το άθροισμα της παρούσας αξίας των χρηματορροών από τα ΜΕΕ ισούται με την αρχική τους δαπάνη.

$$\sum_{t=0}^n C_t (1+k_0)^{-t} = 0$$

Η λύση της παραπάνω εξίσωσης δίνει τον εσωτερικό συντελεστή απόδοσης.

Η ΚΠΑ ενός ΜΕΕ είναι συνάρτηση του επιτοκίου προεξόφλησης k . Όταν ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης είναι μικρότερος από το επιλεγόμενο επιτόκιο προεξόφλησης τότε το ΜΕΕ απορρίπτεται αφού αυτό σημαίνει πως η ΚΠΑ του είναι αρνητική. Όπως και η ΚΠΑ και σε αντίθεση με το κριτήριο επανεξίσπραξης, ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης εκφράζουν την διαχρονική αξία του χρήματος.

➤ Κόστος εξοικονόμησης ενέργειας

Ένα μειονέκτημα των δύο τελευταίων μεθόδων είναι πως εξαρτώνται από την μελλοντική τιμή της ενέργειας, κι αυτό έως ένα βαθμό αναιρεί την αξιοπιστία τους. Μία ακόμα μέθοδος που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των παραπάνω μεθόδων και ταυτόχρονα δεν παρουσιάζει τα μειονεκτήματά τους, είναι ο υπολογισμός του κόστους εξοικονόμησης ενέργειας (CCE).

$$CCE = \left(\frac{I}{S} \right) * \frac{d}{(1 - (1+d)^{-n})}$$

Όπου το I εκφράζει το κόστος της αρχικής επένδυσης σε χρηματικές μονάδες (στην δική μας περίπτωση €), S είναι η εξοικονόμηση ενέργειας σε φυσικές μονάδες (για παράδειγμα MWH), n είναι η διάρκεια ζωής του έργου ενώ d είναι το επιτόκιο προεξόφλησης.

Το κόστος εξοικονόμησης ενέργειας δείχνει τι από τα δύο είναι φθηνότερο: Η κατανάλωση, ή η εξοικονόμηση ενέργειας; Για παράδειγμα, αν το κόστος εξοικονόμησης ενέργειας ενός μέτρου εξοικονόμησης ενέργειας είναι 100€/MWH, ενώ το κόστος αυτή τη στιγμή για θέρμανση είναι 110€/MWH, είναι προφανές πως η φθηνότερη λύση είναι η εξοικονόμηση ενέργειας.

Συνήθως, τα αποτελέσματα των τελευταίων τριών μεθόδων συμπίπτουν, όμως ο υπολογισμός του κόστους εξοικονόμησης ενέργειας είναι πιο απλός, αλλά και ως έννοια είναι πιο κατανοητός από ότι οι άλλες δύο μέθοδοι. Σε μία έρευνα όπου μελετήθηκε η ανακαίνιση τεσσάρων σχολείων που χτίστηκαν ανάμεσα στο 1960 και το 1980 στη Λιθουανία (Martinaitis [30]), το κόστος εξοικονόμησης ενέργειας ήταν το κύριο κριτήριο που επιλέχθηκε για την αξιολόγηση 9 μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας.

Πέρα από τις παραπάνω μεθόδους όμως, μεγάλη χρήση έχουν και οι πολυκριτήριες μέθοδοι. Η πολυκριτήρια ανάλυση αναπτύχθηκε με τη διαπίστωση πως μία μονοδιάστατη ανάλυση ενός περίπλοκου προβλήματος δεν είναι αρκετή για να το επιλύσει. Οι πολυκριτήριες μέθοδοι εκτός του ότι λαμβάνουν υπόψη περισσότερα κριτήρια από ότι οι μέθοδοι που έχουν ήδη αναλυθεί, συνεκτιμούν και τον ρόλο του αποφασίζοντα. Οι προηγούμενες μέθοδοι αγνοούν τον αποφασίζοντα,

προσδίδοντάς του έναν παθητικό ρόλο ο οποίος περιορίζεται στην παρακολούθηση της εφαρμογής τους. Ο στόχος της πολυκριτήριας ανάλυσης είναι η σύνθεση των παραγόντων του προβλήματος με τέτοιο τρόπο ώστε οι τελικές προτάσεις να αντικατοπτρίζουν τις προτιμήσεις ή/και τους περιορισμούς του αποφασίζοντα. Κάποιες από αυτές τις μεθόδους αναφέρονται παρακάτω.

Στην έρευνα των J.K.W. Wong και H. Li [31], χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος AHP (Analytic Hierarchy Process) για την επιλογή των κατάλληλων συστημάτων στα έξυπνα κτίρια (intelligent buildings). Η μέθοδος AHP αναπτύχθηκε από τον Saaty και έχει ως στόχο την αντιμετώπιση και επίλυση προβλημάτων με πολλαπλά κριτήρια. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά απλή, κάτι που έχει βοηθήσει στην ευρεία διάδοση και χρήση της. Η μέθοδος πραγματοποιείται σε τέσσερα στάδια:

α) Ιεραρχική δόμηση του προβλήματος:

Έχοντας καθορίσει τον γενικό στόχο του προβλήματος, αυτός τοποθετείται στο πρώτο επίπεδο. Στο δεύτερο επίπεδο τοποθετούνται τα κριτήρια, ενώ στο τρίτο τα υπο-κριτήρια που συνθέτουν τα στοιχεία του προηγούμενου επιπέδου. Στο τελευταίο επίπεδο έχουμε τις εναλλακτικές.

Β) Εισαγωγή των δεδομένων:

Ο αποφασίζοντας συγκρίνει ανά δύο τα στοιχεία ενός επιπέδου για κάθε στοιχείο του προηγούμενου επιπέδου. Για παράδειγμα ο αποφασίζοντας κάνει διμερείς συγκρίσεις των κριτηρίων του δεύτερου επιπέδου ως προς τον γενικό στόχο του πρώτου επιπέδου.

Γ) Υπολογισμός σχετικών βαρών των κριτηρίων:

Μόλις ολοκληρωθεί το δεύτερο βήμα εκτιμώνται τα βάρη των στοιχείων ενός επιπέδου ως προς τα στοιχεία βάσει των οποίων έγιναν οι συγκρίσεις.

Δ) Αξιολόγηση εναλλακτικών:

Έχοντας υπολογίσει τα βάρη των κριτηρίων, αυτά συνδυάζονται για την αξιολόγηση των εναλλακτικών δράσεων του τελευταίου επιπέδου, η οποία σε τελική φάση δίνει ένα σκορ για κάθε εναλλακτική. Τελικά, προτιμάται η εναλλακτική που συγκεντρώνει το υψηλότερο σκορ.

Η μέθοδος αυτή εκτιμάται από τους χρήστες της αρκετά βολική λόγω της σύγκρισης κατά ζεύγη που φαίνεται να είναι αρκετά εύκολη διαδικασία. Παρόλο που βασίζεται όμως στην άμεση συμμετοχή του αποφασίζοντος αποδεικνύεται αρκετά χρονοβόρα. Αν οι παράγοντες που συνθέτουν το πρόβλημα είναι πολλοί, τότε το πλήθος των διμερών συγκρίσεων που πρέπει να πραγματοποιηθούν είναι τεράστιο. Ακόμα, η μέθοδος αυτή έχει δεχθεί κριτική για το φαινόμενο της αναστροφής της αξιολόγησης των εναλλακτικών δράσεων, το οποίο παρουσιάζεται όταν το πλήθος των εναλλακτικών μεταβάλλεται. Στην περίπτωση που εισαχθεί μία νέα εναλλακτική που παρουσιάζει ίδια σκορ σε όλα τα κριτήρια με μία ήδη υπάρχουσα, η νέα κατάταξη της AHP μπορεί να διαφέρει από την αρχική.

Η οικογένεια μεθόδων ELECTRE έχει επίσης ευρεία χρήση. Κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι η χρήση των σχέσεων υπεροχής μεταξύ των εξεταζόμενων εναλλακτικών δράσεων, η μο-

ντελοποίηση της ασυγκρισιμότητας μεταξύ αυτών, και η χρήση κατωφλίων (thresholds) veto (όπως θα ήταν για παράδειγμα ένας περιορισμός προϋπολογισμού). Στο UIT (University Institute of Technology) της Γαλλίας επιλέχθηκε αυτή η μέθοδος για την αξιολόγηση εναλλακτικών παρεμβάσεων ως προς τον εξαερισμό σε κτίρια τους καλοκαιρινούς μήνες. Στο εργαστήριο του CIAT στην Culoz της Γαλλίας χρησιμοποιήθηκε η οικογένεια ELECTRE για τον προσδιορισμό των κατάλληλων εναλλακτικών δράσεων που θα βελτίωναν το εσωτερικό περιβάλλον σε κτίριο γραφείων. Η οικογένεια αυτή αποτελείται από τις μεθόδους ELECTRE I, ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ενώ ακολούθησαν και κάποιες παραλλαγές των μεθόδων (ELECTRE TRI, IS-Roy, 1991, Roy and Bouyssou 1996). Όλες οι μέθοδοι έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά, ενώ διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο του προβλήματος. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι ο αποφασίζοντας πρέπει να επεξεργαστεί και να καθορίσει μεγάλο όγκο πληροφοριών.

Πέρα από τα παραπάνω, σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ένας συγκεκριμένος τύπος προβλημάτων: κατανομή οικονομικών πόρων. Το πρόβλημα αυτό υφίσταται όταν πρέπει να γίνει κατανομή οικονομικών πόρων για την πραγματοποίηση κάποιων εναλλακτικών δράσεων/σεναρίων, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει έλλειψη οικονομικών πόρων για να μπορέσουν να γίνουν όλα. Για την επίλυση αυτού του τύπου προβλημάτων υπάρχουν τρεις προσεγγίσεις:

1. Απαρίθμηση των εναλλακτικών δράσεων και σύγκριση όλων των στρατηγικών που προκύπτουν. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι πολύ εξαντλητική ακόμα κι αν πρόκειται για ένα μικρό αριθμό εναλλακτικών δράσεων (10 εναλλακτικές δράσεις δίνουν συνολικά 1024 στρατηγικές).
2. Υπολογισμός της αναλογίας οφέλους-κόστους για κάθε εναλλακτική/σενάριο και κατάταξη αυτών από τα λιγότερο απαιτητικά στα πιο απαιτητικά σε οικονομικούς πόρους, συνεχίζοντας την κατάταξη μέχρι να εξαντληθούν οι διαθέσιμοι οικονομικοί πόροι.
3. Η τελευταία προσέγγιση αφορά στην επίλυση ενός μοντέλου μαθηματικού προγραμματισμού τέτοιου ώστε να μεγιστοποιείται το συνολικό κέρδος και ταυτόχρονα να ικανοποιείται ο οικονομικός περιορισμός.

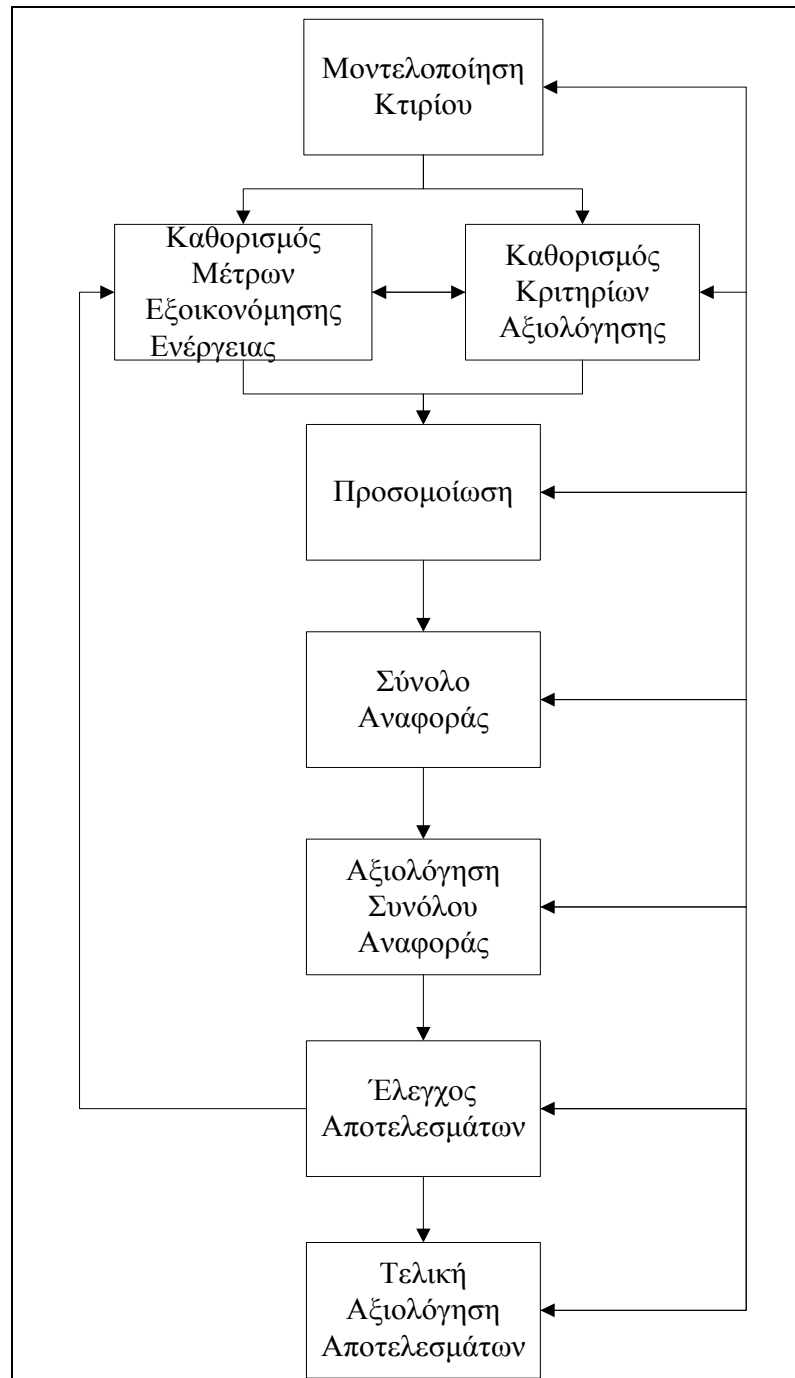
Συμπερασματικά, η μεθοδολογία για μία τέτοια ανάλυση αποτελείται από τον καθορισμό του προβλήματος, τον εντοπισμό των εναλλακτικών παρεμβάσεων οι οποίες δυνητικά αντιμετωπίζουν το πρόβλημα αυτό, τον προσδιορισμό των κριτηρίων βάσει των οποίων θα κριθούν οι παραπάνω εναλλακτικές και τη μέθοδο που καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει αυτή η αξιολόγηση. Πρέπει να σημειωθεί ότι παρόλο που κατά κανόνα ακολουθούνται αυτά τα βήματα, υπάρχουν οι αναμενόμενες διαφοροποιήσεις μίας ανάλυσης από μία άλλη. Ένας αναλυτής για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα ίσως να επιλέξει διαφορετικά μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας, κριτήρια, ή μέθοδο αξιολόγησης από ότι ένας άλλος αναλυτής για το ίδιο πρόβλημα. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου αυτής της εργασίας συνεχίζεται /παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 5

Προτεινόμενη Μεθοδολογία Απόφασης

5.1 Εισαγωγή

Η μεθοδολογία της παρούσας έρευνας παρουσιάζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 5.1 και αναλύεται.



Σχήμα 5.1: Μεθοδολογία έρευνας

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την επίλυση του ενεργειακού προβλήματος ενός υπάρχοντος κτιρίου φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Η μοντελοποίηση του κτιρίου στη σημερινή του κατάσταση, όπως παρατηρήθηκε, αποτελεί την πρώτη πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί κατά την βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός υφιστάμενου κτιρίου. Ο προσδιορισμός των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας και των κριτηρίων αξιολόγησης, σε συνδυασμό με τις προσομοιώσεις, συνθέτουν το στάδιο της ανάπτυξης των εναλλακτικών δράσεων/σεναρίων. Η κατασκευή του συνόλου αναφοράς, η αξιολόγησή του και ο έλεγχος των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης συνιστούν το στάδιο της αξιολόγησης, το οποίο τελικά οδηγεί στην τελική επιλογή των αποτελεσμάτων.

Σε αυτό το σημείο προσδιορίζεται ο αποφασίζοντας. Ο προσδιορισμός του αποφασίζοντα δυσκολεύει την διαδικασία απόφασης καθώς δεν είναι ξεκάθαρο εξ αρχής σε ποιον πρέπει να αποδοθεί ο ρόλος αυτός. Στην έρευνα αυτή πολλοί διεκδικούν το ρόλο του αποφασίζοντα. Αρχικά, οι χρήστες του κτιρίου οι οποίοι εργάζονται καθημερινά μέσα στο κτίριο θα μπορούσαν να είναι αυτοί που θα αποφασίσουν για τις παρεμβάσεις που πρέπει να πραγματοποιηθούν στο κτίριο. Αντίθετα, επειδή πρόκειται για ένα κτίριο του Πολυτεχνείου Κρήτης, το ρόλο του αποφασίζοντα θα μπορούσε να έχει η διοίκηση του ιδρύματος. Στην εργασία αυτή προτιμήθηκε ένας μηχανολόγος μηχανικός για το ρόλο του αποφασίζοντα.

Μέχρι τώρα έχει αναλυθεί η μοντελοποίηση του κτιρίου προς μελέτη (κτίριο Τεχνικών Υπηρεσιών Πολυτεχνείου Κρήτης). Σε αυτό το κεφάλαιο η μεθοδολογία συνεχίζεται, δηλαδή περιγράφονται τα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας που κρίθηκαν κατάλληλα για να εφαρμοστούν στο κτίριο, προσδιορίζονται τα κριτήρια αξιολόγησης και τελικά καθορίζεται η πολυκριτήρια μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την έρευνα.

5.1.1. Μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας

Με την μοντελοποίηση και την προσομοίωση του κτιρίου μέσω του λογισμικού προσομοίωσης, δόθηκε μία πρώτη εικόνα για τις καταναλώσεις ενέργειας του κτιρίου. Η επόμενη φάση ήταν να βρεθούν οι εναλλακτικές παρεμβάσεις που θα μπορούσαν να γίνουν στο κτίριο έτσι ώστε να βελτιωθεί η ενεργειακή του συμπεριφορά. Για να γίνει αυτό, το κτίριο μελετήθηκε στη σημερινή του κατάσταση, τόσο από κατασκευαστικής πλευράς, όσο και μέσω των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης που παρουσιάστηκαν στο τρίτο κεφάλαιο. Μετά από ανασκόπηση βιβλιογραφίας πάνω στο ποιά μέτρα εξοικονόμησης είναι διαθέσιμα και μετά από έρευνα πάνω στο ποιά από αυτά είναι κατάλληλα για εφαρμογή στο συγκεκριμένο κτίριο, κρίθηκε πως οι παρεμβάσεις που μπορούν να γίνουν είναι οι ακόλουθες:

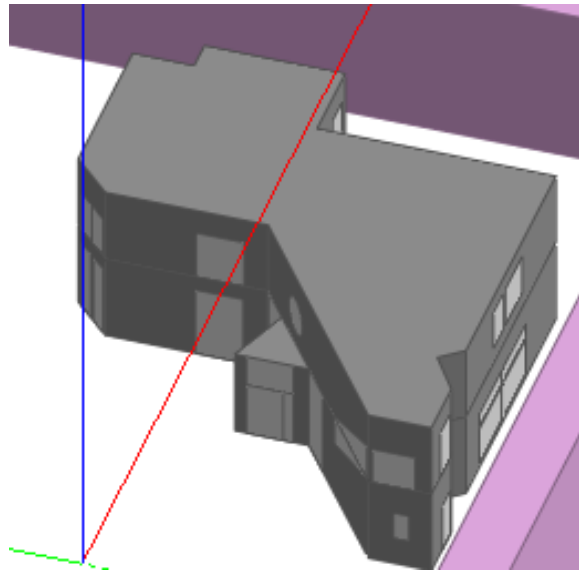
- A. Απομάκρυνση αίθριου
- B. Αλλαγή υαλοπινάκων
- Γ. Βελτίωση σκίασης
- Δ. Εφαρμογή τεχνικής φυσικού εξαερισμού
- E. Τοποθέτηση μόνωσης στην εξωτερική τοιχοποιία

Ζ. Τοποθέτηση μόνωσης στην οροφή

Οι παρεμβάσεις αυτές προσομοιώθηκαν κατ' αντίστοιχο τρόπο, αλλάζοντας τα λειτουργικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κτιρίου (ανάλογα με την παρέμβαση). Πιο συγκεκριμένα, οι αλλαγές που έγιναν στο κτίριο για κάθε παρέμβαση ξεχωριστά διαμέσου του προγράμματος έχουν ως εξής:

Α. Απομάκρυνση αιθρίου

Το αίθριο τροποποιήθηκε έτσι ώστε η οροφή να είναι ενιαία. Δηλαδή το σημείο στο οποίο σήμερα είναι το αίθριο, με την παρέμβαση αυτή στη θέση του τοποθετήθηκε άσφαλτος, γυψοσανίδα και σκυρόδεμα, όπως είναι δηλαδή και η υπόλοιπη οροφή.



Σχήμα 5.2: Απομάκρυνση Αίθριου

Β. Αλλαγή των υαλοπινάκων

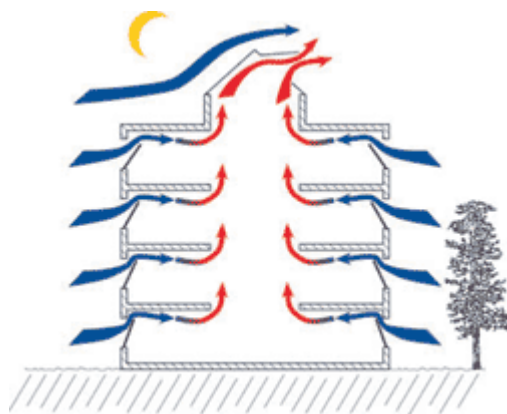
Αρχικά το κτίριο είχε τζάμια του τύπου: Double, clear, 6mm/13mm Air. Ο τρόπος με τον οποίο έγινε η παρέμβαση στα τζάμια ήταν να αντικαταστήσουμε τα αρχικά με νέα τζάμια, του τύπου: Double, LoE, Spectrally selective, 6mm/13mm Arg. Πρέπει να αναφερθεί ότι η παρέμβαση έγινε μόνο στα εξωτερικά τζάμια.

Γ. Παρέμβαση στην σκίαση

Όπως αναφέρεται στο 3^ο κεφάλαιο, στο κτίριο σήμερα δεν υπάρχει εξωτερική σκίαση. Η παρέμβαση που πραγματοποιήθηκε είναι να τοποθετηθούν περσίδες με υψηλή ανακλαστικότητα.

Δ. Φυσικός εξαερισμός

Το κτίριο προσομοιώθηκε με τρόπο ώστε τους καλοκαιρινούς μήνες (από το Μάιο μέχρι τον Οκτώβριο) όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι μικρότερη των 24 C να ανοίγουν τα παράθυρα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται από τις 7 το απόγευμα μέχρι τις 7 το πρωί.



Σχήμα 5.3: Εφαρμογή τεχνικής φυσικού εξαερισμού κατά τη νύχτα

Ε. Θερμομόνωση στους τοίχους

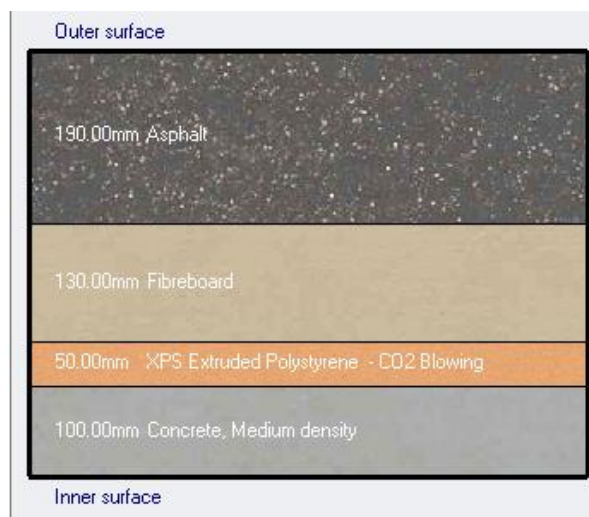
Είδαμε ότι το κτίριο σήμερα δεν έχει μόνωση στους τοίχους. Για την παρέμβαση αυτή, το κτίριο προσομοιώθηκε μετά από πρόσθεση μόνωσης τριών εκατοστών του τύπου XPS extruded Polyesterine – CO₂ boiling. Η μόνωση προστέθηκε μόνο στους εξωτερικούς τοίχους, ως εξωτερική μόνωση.



Σχήμα 5.4: Τοποθέτηση μόνωσης στην εξωτερική τοιχοποιία

Ζ. Θερμομόνωση στην οροφή

Κατ' αντιστοιχία, για αυτήν την παρέμβαση το κτίριο προσομοιώθηκε μετά από πρόσθεση μόνωσης 5 εκατοστών, του τύπου XPS extruded Polyesterine – CO₂ boiling.



Σχήμα 5.5: Τοποθέτηση μόνωσης στην οροφή

Οι παραπάνω εναλλακτικές μπορούσαν να εφαρμοστούν κάθε μία χωριστά στο κτίριο, ή να εφαρμοστούν ανά συνδυασμούς μεταξύ τους (ανά δύο, ανά τρεις, κ.ο.κ.) αποτελώντας έτσι μία **στρατηγική** (ή **σενάριο**). Πρέπει να σημειωθεί ότι ως μία ξεχωριστή εναλλακτική ενέργεια θεωρήθηκε να παραμείνει το κτίριο στην σημερινή του κατάσταση, χωρίς δηλαδή να υποστεί καμία παρέμβαση. (Εννοείται πως αυτή η εναλλακτική δε μπορεί να συνδυαστεί με κάποια άλλη.)

Έτσι, ήταν διαθέσιμα συνολικά 64 σενάρια: την περίπτωση να μην παρέμβουμε στο κτίριο, τις 6 ενέργειες που αναφέρθηκαν παραπάνω, και 57 σενάρια που προέκυψαν από συνδυασμούς μεταξύ των παραπάνω 6 μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας. Ακολούθησε μοντελοποίηση και προσομοίωση των παραπάνω μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας, τα αποτελέσματα των οποίων δίνονται στους Πίνακες 5.1 έως 5.6 (δίνονται ενδεικτικά κάποια από τα αποτελέσματα που είναι διαθέσιμα μετά την προσομοίωση, όπως ετήσιες ενεργειακές καταναλώσεις, ώρες δυσφορίας ετησίως, ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα):

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Εναλλακτικές	Συνολική Ηλεκτρική Ενέργεια (KWh/έτος)	Πετρέλαιο (KWh/έτος)	Άνεση (ώρες δυσφορίας/έτος)	CO ₂ (Kg/έτος)
Αρχικό κτίριο	14884	11266	919	13271
A. Χωρίς αίθριο	13945	11253	900	12625
B. Υαλοπίνακες	14377	11902	899	13098
Γ. Σκίαση	14559	11444	931	13097
Δ. Φυσ. Εξαερισμός	13884	9757	1010	12174
E. Μόνωση Τοίχου	15112	9649	876	12986
Z. Μόνωση Οροφής	14782	11036	905	13139

Πίνακας 5.2 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά δύο

Εναλλακτικές	Συνολική Ηλεκτρική Ενέργεια (KWh/έτος)	Πετρέλαιο (KWh/έτος)	Άνεση (ώρες δυσφορίας/ έτος)	CO ₂ (Kg/έτος)
A-B	13429	11844	871	12432
A-Γ	13589	12179	914	12633
A-Δ	12922	9794	992	11525
A-E	14033	9377	850	12172
A-Z	13795	10989	883	12449
B-Γ	13773	12322	906	12799
B-Δ	13439	9836	998	11891
B-E	14012	9521	863	12197
B-Z	13905	11792	879	12745
Γ-Δ	13593	9873	1013	12007
Γ-E	14981	9632	889	12830
Γ-Z	14403	11971	924	13134
Δ-E	14003	7558	979	11655
Δ-Z	13791	9546	1002	12053
E-Z	15058	8624	855	12669

Πίνακας 5.3 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά τρεις

Εναλλακτικές	Συνολική Ηλεκτρική Ενέργεια (KWh/έτος)	Πετρέλαιο (KWh/έτος)	Άνεση (ώρες δυσφορίας/ έτος)	CO ₂ (Kg/έτος)
A-B-Γ	13209	12110	885	12354
A-B-Δ	12474	9887	978	11244
A-B-E	13458	9085	812	11699
A-B-Z	13280	11544	855	12249
A-Γ-E	13735	9520	868	12007
A-Γ-Δ	12652	9903	996	11370
A-Γ-Z	13462	11905	896	12472
A-Δ-E	12928	7453	953	10891
A-Δ-Z	12794	9551	980	11371
A-E-Z	13903	8324	819	11796
B-Γ-Δ	12875	10245	1003	11616
B-Γ-E	13999	9593	848	12209
B-Γ-Z	13692	12051	889	12669
B-Δ-E	13022	7794	969	11048
B-Δ-Z	13056	9836	983	11629
B-E-Z	14296	9121	821	12283
Γ-Δ-E	13798	7611	984	11529
Γ-Δ-Z	13435	9667	1007	11842
Γ-E-Z	14693	9496	875	12657
Δ-E-Z	13972	7307	968	11566

Πίνακας 5.4 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά τέσσερις

Εναλλακτικές	Συνολική Ηλεκτρική Ενέργεια (KWh/έτος)	Πετρέλαιο (KWh/έτος)	Άνεση (ώρες δυσφορίας/ έτος)	CO ₂ (Kg/έτος)
A-B-Γ-Δ	12278	10067	988	11159
A-B-Γ-E	13263	9291	824	11621
A-B-Γ-Z	13067	11815	864	12177
A-B-Δ-E	12335	7425	950	10477
A-B-Δ-Z	12416	9620	961	11131
A-B-E-Z	13246	8642	779	11433
A-Γ-Δ-E	12723	7492	963	10761
A-Γ-Δ-Z	12471	9663	986	11180
A-Γ-E-Z	13564	9114	835	11780
A-Δ-E-Z	12837	7100	935	10732
B-Γ-Δ-E	13011	7871	965	11061
B-Γ-Δ-Z	12797	10015	994	11500
B-Γ-E-Z	14704	9495	875	12664
B-Δ-E-Z	13319	7307	952	11119
Γ-Δ-E-Z	13742	7342	959	11417

Πίνακας 5.5 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά πέντε

Εναλλακτικές	Συνολική Ηλεκτρική Ενέργεια (KWh/έτος)	Πετρέλαιο (KWh/έτος)	Άνεση (ώρες δυσφορίας/ έτος)	CO ₂ (Kg/έτος)
A-B-Γ-E-Z	13568	9138	836	11789
A-B-Γ-Δ-E	12329	7508	945	10495
A-B-Γ-Δ-Z	12169	9804	976	11012
A-B-Δ-E-Z	12283	6986	916	10321
A-Γ-Δ-E-Z	12636	7099	925	10594
B-Γ-Δ-E-Z	13251	7389	945	11094

Πίνακας 5.6 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά έξι

Εναλλακτικές	Συνολική Ηλεκτρική Ενέργεια (KWh/έτος)	Πετρέλαιο (KWh/έτος)	Άνεση (ώρες δυσφορίας/ έτος)	CO ₂ (Kg/έτος)
A-B-Γ-Δ-E-Z	12519	7156	935	10529

5.1.2 Κριτήρια αξιολόγησης

Οι 64 παραπάνω παρεμβάσεις πρέπει να αξιολογηθούν βάσει κάποιων κριτηρίων. Ένα από τα πλεονεκτήματα του λογισμικού προσομοίωσης είναι ότι τα αποτελέσματά του δεν περιορίζονται

μόνο στην καταγραφή της κατανάλωσης ενέργειας, ή σε κάποιους δείκτες άνεσης. Έτσι, με τις παραπάνω προσομοιώσεις ήταν διαθέσιμα πολλά στοιχεία που θα μπορούσαν να αποτελέσουν κριτήρια αξιολόγησης (δείκτες άνεσης, επίπεδα ενεργειακής κατανάλωσης ανά μέρα, μήνα και έτος). Ταυτόχρονα όμως, ο μεγάλος αριθμός διαθέσιμων δεδομένων δυσκολεύει την επιλογή κατάλληλων κριτηρίων αξιολόγησης. Στην συγκεκριμένη εργασία δόθηκε έμφαση στα στοιχεία που αφορούν στην κατανάλωση ενέργειας, στο περιβάλλον και στην άνεση. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν: η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh), η ετήσια κατανάλωση πετρελαίου (kWh), οι ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, οι ώρες δυσφορίας ανά έτος (discomfort hours per year).

Τα παραπάνω κριτήρια θα μπορούσαν να αποτελέσουν κριτήρια ενεργειακά, περιβαλλοντολογικά και άνεσης. Τα ενεργειακά κριτήρια όμως επιλέχθηκε να μεταφραστούν σε κόστος έτσι ώστε να είναι περισσότερο κατανοητά και συγκρίσιμα. Πιο συγκεκριμένα, μετά από έρευνα και τιμοληψίες υπολογίστηκε πως για το ηλεκτρικό ρεύμα η τιμή αγοράς της κιλοβατώρας (kWh) είναι 0,1036 €. Για να γίνει η αντιστοίχιση του πετρελαίου θέρμανσης με το κόστος, έγινε μετατροπή μονάδας μέτρησης. Έτσι, ένα λίτρο αντιστοιχεί σε 11,69 kWh, ενώ το ένα λίτρο πετρελαίου κοστίζει 1,01 €. Η κατανάλωση ενέργειας στην παρούσα έρευνα αποτέλεσε οικονομικό κριτήριο. Τέλος, πέρα από τα παραπάνω κριτήρια, εισήχθη ένα ακόμη οικονομικό κριτήριο: το κόστος υλοποίησης κάθε εναλλακτικής. Από έρευνα αγοράς που πραγματοποιήθηκε, τα κόστη υλοποίησης συνολικά για κάθε ένα από τα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας διαμορφώνονται ως εξής:

Πίνακας 5.7 Κόστος για την πραγματοποίηση των εναλλακτικών παρεμβάσεων

Εναλλακτικές	Αγορά (€)	Εγκατάσταση / Υλοποίηση (€)	Σύνολο (€)
A. Χωρίς αίθριο	-	2417	2417
B. Υαλοπίνακες	6382	8616	14999
Γ. Σκίαση	2393	3231	5624
Δ. Φυσικός Εξαερισμός	0	0	0
E. Μόνωση Τοίχου	3206	4328	7534
Z. Μόνωση Οροφής	2198	2967	5165

Συνολικά έχουμε τέσσερα κριτήρια: δύο οικονομικά (ετήσιο κόστος εγκατάστασης / υλοποίησης και ετήσιο κόστος λειτουργίας), ένα περιβαλλοντολογικό (ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα CO₂) και ένα άνεσης (ώρες δυσανεξίας ανά έτος). Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τις αποδόσεις κάθε εναλλακτικής παρέμβασης και κάθε σεναρίου σε κάθε ένα από τα επιλεγμένα κριτήρια:

Πίνακας 5.8 Πολυκριτήριος πίνακας: Οι κύριες παρεμβάσεις

Μέτρα Εξοικονόμησης Ενέργειας	Κόστος Λειτουργίας (€/έτος)	Κόστος Εγκατάστασης (€)	Άνεση (ώρες δυσφορίας/έτος)	CO ₂ (kg/έτος)
Αρχικό κτίριο	2553	0	919	13271
A. Χωρίς αίθριο	2455	2000	899	12624
B. Υαλοπίνακες	2558	14998	899	13097
Γ. Σκίαση	2536	5624	931	13096
Δ. Φυσ. Εξαερισμός	2314	0	1010	12174
E. Μόνωση Τοίχου	2432	7534	876	12985
Z. Μόνωση Οροφής	2522	5165	905	13138

Πίνακας 5.9 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά δύο

Μέτρα Εξοικονόμησης Ενέργειας	Κόστος Λειτουργίας (€/έτος)	Κόστος Εγκατάστασης (€)	Άνεση (ώρες δυσφορίας/έτος)	CO ₂ (kg/έτος)
A-B	2455	16998	870	12432
A-Γ	2501	7624	914	12633
A-Δ	2218	2000	991	11525
A-E	2296	9534	849	12172
A-Z	2416	7165	882	12449
B-Γ	2533	20623	905	12798
B-Δ	2275	14998	997	11890
B-E	2306	22532	863	12197
B-Z	2499	20163	878	12744
Γ-Δ	2295	5624	1012	12006
Γ-E	2417	13158	888	12829
Γ-Z	2567	10789	923	13134
Δ-E	2129	7534	979	11655
Δ-Z	2286	5165	1001	12052
E-Z	2334	12699	855	12669

Πίνακας 5.10 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά τρεις

Μέτρα Εξοικονόμησης Ενέργειας	Κόστος Λειτουργίας (€/έτος)	Κόστος Εγκατάστασης (€)	Άνεση (ώρες δυσφορίας/έτος)	CO ₂ (kg/έτος)
A-B-Γ	2456	22623	885	12354
A-B-Δ	2180	16998	977	11243
A-B-E	2210	24532	812	11698
A-B-Z	2412	22163	854	12248
A-Γ-E	2278	15158	868	12007
A-Γ-Δ	2200	7624	995	11370
A-Γ-Z	2463	12789	896	12471
A-Δ-E	2008	9534	953	10890

A-Δ-Z	2183	7165	979	11371
A-E-Z	2188	14699	819	11796
B-Γ-Δ	2254	20623	1002	11616
B-Γ-E	2312	28157	848	12208
B-Γ-Z	2500	25788	888	12669
B-Δ-E	2049	22532	969	11047
B-Δ-Z	2236	20163	982	11628
B-E-Z	2300	27698	820	12283
Γ-Δ-E	2113	13158	984	11529
Γ-Δ-Z	2260	10789	1007	11842
Γ-E-Z	2375	18323	875	12657
Δ-E-Z	2103	12699	967	11565

Πίνακας 5.11 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά τέσσερις

Μέτρα Εξοικονόμησης Ενέργειας	Κόστος Λειτουργίας (€/έτος)	Κόστος Εγκατάστασης (€)	Άνεση (ώρες δυσφορίας/έτος)	CO ₂ (kg/έτος)
A-B-Γ-Δ	2176	22623	988	11158
A-B-Γ-E	2208	30157	824	11621
A-B-Γ-Z	2415	27788	864	12176
A-B-Δ-E	1944	24532	949	10476
A-B-Δ-Z	2150	22163	961	11130
A-B-E-Z	2148	29698	778	11432
A-Γ-Δ-E	1991	15158	963	10760
A-Γ-Δ-Z	2159	12789	985	11180
A-Γ-E-Z	2223	20323	835	11779
A-Δ-E-Z	1967	14699	935	10731
B-Γ-Δ-E	2054	28157	965	11061
B-Γ-Δ-Z	2225	25788	993	11499
B-Γ-E-Z	2376	33322	874	12664
B-Δ-E-Z	2036	27698	951	11118
Γ-Δ-E-Z	2083	18323	959	11417

Πίνακας 5.12 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά πέντε

Μέτρα Εξοικονόμησης Ενέργειας	Κόστος Λειτουργίας (€/έτος)	Κόστος Εγκατάστασης (€)	Άνεση (ώρες δυσφορίας/έτος)	CO ₂ (kg/έτος)
A-B-Γ-E-Z	2226	35322	835	11788
A-B-Γ-Δ-E	1951	30157	945	10495
A-B-Γ-Δ-Z	2141	27788	976	11012
A-B-Δ-E-Z	1900	29698	916	10321
A-Γ-Δ-E-Z	1946	20323	924	10594
B-Γ-Δ-E-Z	2036	33322	944	11094

Πίνακας 5.13 Οι εναλλακτικές συνδυασμένες ανά έξι

Μέτρα Εξοικονόμησης Ενέργειας	Κόστος Λειτουργίας (€/έτος)	Κόστος Εγκατάστασης (€)	Άνεση (ώρες δυσφορίας/έτος)	CO ₂ (kg/έτος)
A-B-Γ-Δ-E-Z	1939	35322	935	10529

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι η διαδικασία της επιλογής των εναλλακτικών παρεμβάσεων και των κριτηρίων δεν είναι μία διαδικασία που μπορεί να ακολουθηθεί με βήματα. Οι παρεμβάσεις πολλές φορές επιλέγονται λαμβάνοντας εκ των προτέρων υπόψη κάποια κριτήρια, και αντίστροφα η επιλογή των κριτηρίων καθορίζεται συχνά από τις παρεμβάσεις που έχουν επιλεχθεί. Ο εντοπισμός των κριτηρίων και των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας μπορεί να γίνεται ταυτόχρονα αφού ο ένας παράγοντας επηρεάζει τον άλλον (Σχήμα 5.1).

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι τα διαμορφωμένα σενάρια δεν είναι απλώς μία σύνθεση των εναλλακτικών δράσεων. Τα σενάρια αυτά μοντελοποιήθηκαν και προσομοιώθηκαν το καθένα χωριστά. Σε διαφορετική περίπτωση θα ήταν αρκετό να προσομοιωθούν οι 6 εναλλακτικές ενέργειες και τα σενάρια να διαμορφώνονται μέσω αυτών. Για παράδειγμα, όσον αφορά στο κριτήριο του κόστους εγκατάστασης μπορεί να ειπωθεί ότι τα σενάρια είναι μία απλή σύνθεση των εναλλακτικών, αφού η εγκατάσταση του σεναρίου B-Z κοστίζει τόσο όσο και η εγκατάσταση των B και Z χωριστά. Αντιθέτως, για τα άλλα τρία κριτήρια αυτό δεν ισχύει.

5.1.3 Μέθοδος αξιολόγησης

Για να γίνει η αξιολόγηση των παραπάνω παρεμβάσεων πρέπει να αποφασιστεί ποια μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί. Στην παρούσα έρευνα να χρησιμοποιηθεί μία πολυκριτήρια μέθοδος για την σύγκριση και αξιολόγηση των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας έναντι των οικονομικών μεθόδων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι οικονομικές μέθοδοι αφενός δεν λαμβάνουν υπόψη την παρουσία των πολλαπλών και αντικρουόμενων μεταξύ τους κριτηρίων αξιολόγησης αυτής της έρευνας, και αφετέρου δεν συνυπολογίζουν το σύστημα προτιμήσεων του αποφασίζοντα. Γενικά, η αδυναμία αυτή των μονοκριτηρίων μεθόδων να οδηγήσει στην ανάπτυξη της Πολυκριτηριας Λήψης Αποφάσεων (MultiCriteria Decision Making).

Η πολυκριτήρια υποστήριξη λήψης αποφάσεων (Multi Criteria Decision Aid - MCDM) αναπτύχθηκε για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, δηλαδή για να αντιμετωπίσει πολυδιάστατα προβλήματα αποφάσεων. Εδώ υπάρχει ένα σύστημα αξιών το οποίο αντιπροσωπεύει τις προτιμήσεις και τους περιορισμούς του αποφασίζοντα ως προς ένα σύνολο εναλλακτικών αποφάσεων. Ο ρόλος της πολυκριτηριακής ανάλυσης δεν είναι να υποδείξει στον αποφασίζοντα ποιες αποφάσεις είναι καλύτερες από αυτές που ο ίδιος αντιλαμβάνεται. Ο σκοπός είναι να τον βοηθήσει να επιλέξει την καλύτερη απόφαση μέσα από την σταδιακή κατανόηση των αναγκών και προτιμήσεών του.

Σε αυτό το σημείο είναι βασικό να διευκρινιστούν κάποιες βασικές έννοιες:

Εναλλακτικές Ενέργειες είναι οι επιλογές που θα πρέπει να μελετηθούν κατά τη διαδικασία λήψης μίας απόφασης. Το σύνολο των εναλλακτικών ενεργειών συμβολίζεται ως:

$A = \{a_i, i = 1, 2, \dots, m\}$ όπου n ο αριθμός των εναλλακτικών ενεργειών.

Ως κριτήριο ορίζεται μία πραγματική συνάρτηση g , ορισμένη σε ένα σύνολο A των εναλλακτικών ενεργειών, και εκφράζει τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα.

$g: A \rightarrow \mathbb{R}$, για την οποία ισχύει ότι: αν $g(a_1) > g(a_2)$ τότε η a_1 είναι καλύτερη της a_2 .

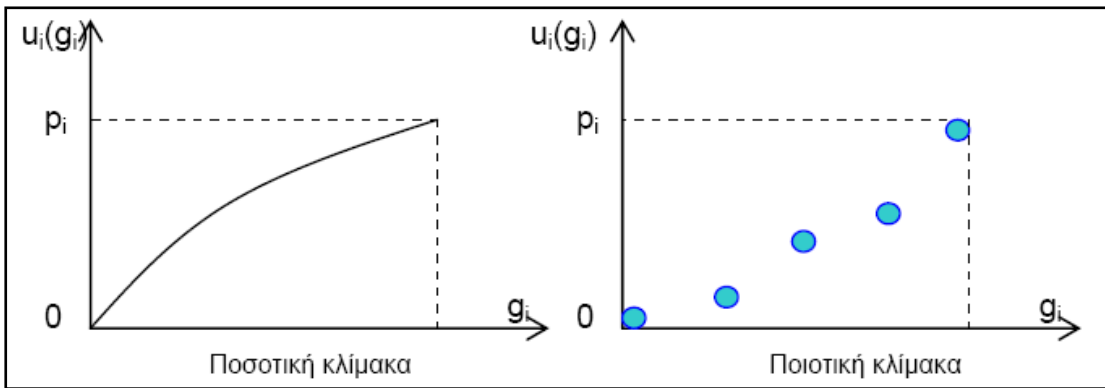
Αν έχουμε ένα σύνολο κριτηρίων $\{g_1, g_2, \dots, g_n\}$, λέμε ότι η εναλλακτική a_1 κυριαρχεί της εναλλακτικής a_2 όταν:

$g_i(a_1) \geq g_i(a_2)$ για κάθε i , ενώ τουλάχιστον μία ανίσωση είναι αυστηρά μεγαλύτερη. Μία εναλλακτική επιλογή a είναι ικανοποιητική λύση για ένα σύνολο κριτηρίων εάν δεν υπάρχει καμία άλλη εναλλακτική η οποία κυριαρχεί της a .

Για το πρόβλημα αυτής της έρευνας χρησιμοποιήθηκε η οικογένεια μεθόδων UTA. Οι μέθοδοι UTA υπερτερούν των μεθόδων που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο αφενός επειδή λαμβάνουν υπόψη τον αποφασίζοντα δίνοντάς του έτσι ενεργό ρόλο στη διαδικασία απόφασης, αφετέρου επειδή το επιτυγχάνουν χωρίς να τον επιβαρύνουν με την επεξεργασία μεγάλου όγκου πληροφοριών. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι μέθοδοι UTA.

5.1.3.1 Μέθοδος UTA

Στη μέθοδο UTA έχουμε ένα σύνολο εναλλακτικών ενεργειών $A =$ οι οποίες αξιολογούνται από μία συνεπή οικογένεια κριτηρίων $g = (g_1, g_2, \dots, g_n)$ όπου κάθε κριτήριο αναπαριστά μία μονότονη ποσοτική ή ποιοτική μεταβλητή. Προτιμάται η εναλλακτική δράση στην οποία αντιστοιχεί η μεγαλύτερη αξιολόγηση. Κάθε εναλλακτική δράση a_i αναπαριστάται από το διάνυσμα $g(a_i) = [g_1(a_i), g_2(a_i), \dots, g_n(a_i)]$ το οποίο δίνει την απόδοση αυτής σε κάθε ένα από τα κριτήρια.



Σχήμα 5.6: Μονότονη ποσοτική και ποιοτική μεταβλητή [32]

Στην μέθοδο UTA η σύνθεση (aggregation) των κριτηρίων εκτιμάται ως μία προσθετική συνάρτηση αξίας της ακόλουθης μορφής :

$$u(g) = \sum_{i=1}^n p_i u_i(g_i) \quad (5.1)$$

υπό τους ακόλουθους περιορισμούς κανονικοποίησης:

$$1. \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (5.2)$$

$$2. \quad u_i(g_{i*}) = 0, \quad u_i(g_i^*) = 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

Όπου u_i είναι οι μερικές αξίες κανονικοποιημένες ανάμεσα στο 0 και το 1, ενώ το p_i είναι το βάρος της u_i . Ακόμη, ορίζεται πως g_{i*} και g_i^* είναι αντίστοιχα η μικρότερη και η μεγαλύτερη τιμή του κριτηρίου g_i .

Τόσο η ολική όσο και οι μερικές αξίες έχουν την ιδιότητα της μονοτονίας του αληθούς κριτηρίου. Δηλαδή:

$$u[g(a_1)] > u[g(a_2)] \rightarrow a_1 > a_2 \quad (\text{προτίμηση}) \quad (5.3)$$

$$u[g(a_1)] = u[g(a_2)] \rightarrow a_1 \sim a_2 \quad (\text{αδιαφορία})$$

Το νόημα της προσθετικής συνάρτησης αξίας είναι ότι η ολική συνάρτηση αξίας μίας εναλλακτικής ενέργειας ισούται με το άθροισμα των μερικών συναρτήσεων αξίας των κριτηρίων που αξιολογούν αυτήν την εναλλακτική:

$$u(g) = \sum_{i=1}^n u_i(g_i) \quad (5.4)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} 1. \quad & \sum_{i=1}^n u_i(g_i^*) = 1 \\ 2. \quad & u_i(g_{i*}) = 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (5.5)$$

Βάσει αυτού του προσθετικού μοντέλου η συνάρτηση αξίας μίας εναλλακτικής παρέμβασης a που ανήκει στο σύνολο αναφοράς A_R μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$u'[g(a)] = \sum_{i=1}^n u_i[g_i(a)] + \sigma(a) \quad \forall a \in A_R \quad (5.6)$$

Όπου $\sigma(a)$ εκφράζει το πιθανό σφάλμα στον υπολογισμό της $u[g(a)]$.

Για τον υπολογισμό των μερικών αξιών οι Jacquet-Lagrèze και Siskos προτείνουν τη χρήση γραμμικής παρεμβολής. Για κάθε κριτήριο διασπάται το διάστημα $[g_{i*}, g_i^*]$ σε $a_i - 1$ διαστήματα (το a_i ορίζεται από τον αναλυτή), κι έτσι μπορεί να υπολογιστεί η τιμή του κριτηρίου στα όρια βάσει του τύπου:

$$g_i^j = g_{i*} + \frac{j-1}{a_i-1}(g_i^* - g_{i*}), \quad \forall j = 1, 2, \dots, a_i \quad \dots\dots\dots(5.7)$$

Έπειτα οι μερικές συναρτήσεις αξίας για κάθε εναλλακτική προσεγγίζονται μέσω γραμμικής παρεμβολής. Έτσι, για μία εναλλακτική a για την οποία η τιμή του κριτηρίου g_i ανήκει στο $[g_i^j, g_i^{j+1}]$, η μερική χρησιμότητα δίνεται από τον τύπο:

$$u_i[g_i(a)] = u_i(g_i^j) + \frac{g_i(a) - g_i^j}{g_i^{j+1} - g_i^j} [u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j)] \quad (5.8)$$

Οι εναλλακτικές δράσεις του συνόλου αναφοράς A_R κατατάσσονται βάσει της αξιολόγησης του αποφασίζοντα. Αφού το σύνολο αναφοράς έχει έρθει στην επιθυμητή μορφή, για κάθε ζεύγος διαδοχικών εναλλακτικών (a_k, a_{k+1}) υπάρχει είτε σχέση προτίμησης ($a_k > a_{k+1}$) είτε σχέση αδιαφορίας ($a_k \sim a_{k+1}$). Έτσι, αν

$$\Delta(a_k, a_{k+1}) = u'[g_i(a_k)] - u'[g_i(a_{k+1})] \quad (5.9)$$

τότε οι σχέσεις αυτές μπορούν να γραφούν με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\begin{aligned} \bullet \quad \Delta(a_k, a_{k+1}) &\geq \delta && \text{εάν } a_k \succ a_{k+1} \\ \bullet \quad \Delta(a_k, a_{k+1}) &= 0 && \text{εάν } a_k \sim a_{k+1} \end{aligned} \quad (5.10)$$

όπου δ είναι ένας μικρός αυστηρά θετικός αριθμός τέτοιος ώστε να διαχωρίσει σημαντικά τις δύο εναλλακτικές λόγω προτίμησης, ενώ δεν πρέπει να πάρει αρχικά ψηλή τιμή.

Λαμβάνοντας υπόψη την μονοτονία στις προτιμήσεις, οι μερικές αξίες πρέπει να ικανοποιούν τον ακόλουθο περιορισμό:

$$u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j) \geq s_i \quad \forall j=1, 2, \dots, a_i - 1, i = 1, 2, \dots, n \quad (5.11)$$

όπου s_i είναι επίσης αυστηρά θετικός αριθμός. Όπως και με το δ , είναι προτιμότερο να δίνεται στο s_i αρχικά χαμηλή τιμή.

Οι μερικές συναρτήσεις αξίας τελικά υπολογίζονται μέσω του ακόλουθου γραμμικού προβλήματος με τους τύπους (5.4), (5.5), (5.10) και (5.11) ως περιορισμούς, και την αντικειμενική συνάρτηση να εξαρτάται από το σφάλμα $\sigma(a_i)$ που δείχνει το ποσό της συνολικής διασποράς:

$$[\min] F = \sum_{a \in A_R} \sigma(a)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} \Delta(a_k, a_{k+1}) &\geq \delta && \text{αν } a_k \succ a_{k+1} \\ \Delta(a_k, a_{k+1}) &= 0 && \text{αν } a_k \sim a_{k+1} \\ u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j) &\geq 0 && \forall i \text{ και } j \\ \sum_{i=1}^n u_i(g_i^*) &= 1 \\ u_i(g_{i*}) &= 0, u_i(g_i^j) \geq 0, \sigma(a) \geq 0 \quad \forall a \in A_R \text{ και } \forall i \text{ και } j \end{aligned} \quad (5.12)$$

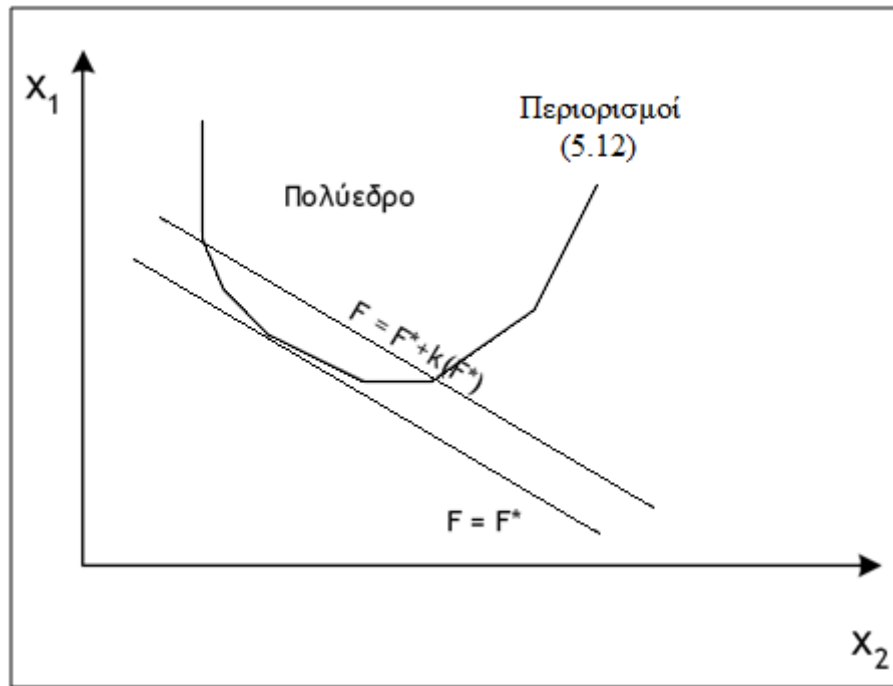
Η ανάλυση ευστάθειας των αποτελεσμάτων του παραπάνω προβλήματος θεωρείται ως μία ανάλυση μεταβελτιστοποίησης του προβλήματος. Οι Jacquet-Lagrèze και Siskos παρατήρησαν πως όταν $F^* = 0$, το πολύεδρο των αποδεκτών λύσεων για τα $u_i(g_i)$ δεν είναι κενό, κι έτσι είναι πολλές οι συναρτήσεις αξίας που αναπαριστούν τέλεια τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα. Ακόμα κι όταν η αντικειμενική συνάρτηση F είναι αυστηρά θετική, άλλες εναλλακτικές λιγότερο καλές για την F βελτιώνουν άλλα εξίσου ικανοποιητικά κριτήρια, όπως είναι για παράδειγμα ο συντελεστής τ του Kendall.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, οι λύσεις της μεταβελτιστοποίησης ορίζονται από το πολύεδρο:

$$F \leq F^* + k(F^*) \quad (5.13)$$

υπό τους περιορισμούς του αρχικού γραμμικού προβλήματος,

με $k(F^*)$ να είναι ένα μικρό ποσοστό του F^* υπολογίστηκε στην πρώτη φάση.



Σχήμα 5.7: Μεταβελτιστοποίηση [32]

Για την μελέτη του πολύεδρου οι Jacquet-Lagrèze και Siskos προτείνουν τη λύση των ακόλουθων γραμμικών προβλημάτων:

$$[\min] u_i(g_i^*)$$

$$[\max] u_i(g_i^*)$$

Υπό τους περιορισμούς

υπό τους περιορισμούς

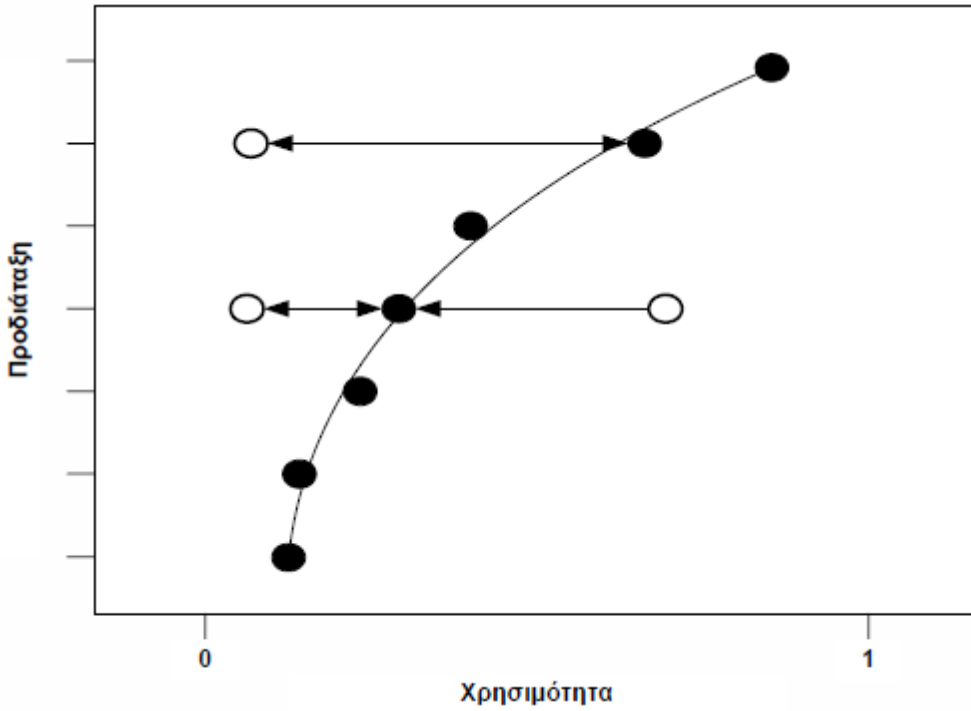
του γ.π. 5.13

του γ.π. 5.13

Ως τελική λύση θεωρείται ο μέσος όρος των λύσεων που δίνουν τα παραπάνω γραμμικά προβλήματα. Ακόμα και σε περίπτωση αστάθειας, τα παραπάνω γραμμικά προβλήματα δίνουν την εσωτερική διακύμανση των βαρών των όλων των κριτηρίων, δίνοντας έτσι μία Σχήμα για το σύστημα προτιμήσεων του αποφασίζοντα.

5.1.3.2 Περιγραφή της μεθόδου UTASTAR

Για το πρόβλημα της παρούσας έρευνας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος UTASTAR. Η μέθοδος αυτή είναι μία βελτιωμένη έκδοση της UTA που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Είδαμε πως στην UTA εισάγεται ένα σφάλμα $\sigma(a)$ για κάθε εναλλακτική a του συνόλου αναφοράς. Αυτό το σφάλμα δεν ελαχιστοποιεί αποτελεσματικά την διασπορά των σημείων γύρω από την καμπύλη του σχήματος. Το πρόβλημα έγκειται στα σημεία που εντοπίζονται δεξιά της καμπύλης. Θα ήταν καταλληλότερο να αφαιρεθεί ένα ποσό της αντίστοιχης συνάρτησης αξίας και όχι να αυξηθούν οι αξίες των υπόλοιπων εναλλακτικών.



Σχήμα 5.8: Εισαγωγή διπλού σφάλματος [32]

Στην UTASTAR οι Siskos και Yannacopoulos προτείνουν την εισαγωγή διπλού σφάλματος, τέτοιου ώστε ο τύπος της αξίας μίας εναλλακτικής a να διαμορφώνεται ως εξής [3]:

$$u'[g(a)] = \sum_{i=1}^n u_i[g_i(a)] - \sigma^+(a) + \sigma^-(a) \quad \forall a \in A_R \quad (5.14)$$

όπου σ^+ σ^- είναι τα σφάλματα υπερεκτίμησης και υποτίμησης αντίστοιχα.

Μία επιπλέον διαφοροποίηση αφορά στον περιορισμό μονοτονίας των κριτηρίων, ο οποίος λαμβάνεται υπόψη μέσω της μετατροπής των μεταβλητών:

$$w_{ij} = u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j) \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \forall j = 1, 2, \dots, a_i - 1 \quad (5.15)$$

και με αυτόν τον τρόπο οι περιορισμοί του τύπου (5.11) μπορούν να αντικατασταθούν από περιορισμούς μη αρνητικότητας για τις μεταβλητές w_{ij} .

Συμπερασματικά, βάσει του αλγόριθμου της UTA, ο αλγόριθμος της UTASTAR μπορεί να δοθεί συνοπτικά στα επόμενα βήματα:

ΒΗΜΑ 1:

Οι ολικές συναρτήσεις αξίας εκφράζονται σε μερικές συναρτήσεις αξίας $u_i(g_i)$, κι έπειτα συναρτήσεις των όρων w_{ij} βάσει των τύπων που ακολουθούν:

$$u_i(g_i^1) = 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (5.16)$$

$$u_i(g_i^j) = \sum_{t=1}^{j-1} w_{it} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \text{ και } \forall j = 1, 2, \dots, a_i - 1$$

ΒΗΜΑ 2:

Εισαγωγή των δύο παραγόντων σφάλματος σ^+ και σ^- για κάθε εναλλακτική δράση του συνόλου αναφοράς A_R . Έτσι, κάθε ζεύγος δύο διαδοχικών εναλλακτικών στην κατάταξη του αποφασίζονται μπορεί να γραφτεί:

$$\Delta(a_k, a_{k+1}) = u'[g(a_k)] - \sigma^+(a_k) + \sigma^-(a_k) - u'[g_i(a_{k+1})] + \sigma^+(a_{k+1}) - \sigma^-(a_{k+1}) \quad (5.17)$$

BHMA 3:

Γίνεται επίλυση του ακόλουθου γραμμικού προβλήματος:

$$[\min]z = \sum_{k=1}^m [\sigma^+(a_k) + \sigma^-(a_k)]$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\Delta(a_k, a_{k+1}) \geq \delta \quad \text{αν } a_k \succ a_{k+1}$$

$$\Delta(a_k, a_{k+1}) = 0 \quad \text{αν } a_k \sim a_{k+1}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\alpha_i-1} w_{ij} = 1$$

$$w_{ij} \geq 0, \sigma^+(a_k) \geq 0, \sigma^-(a_k) \geq 0, \forall i, j, k$$

όπου το δ , όπως και στην UTA είναι ένας μικρός θετικός αριθμός.

BHMA 4:

Εξετάζεται αν υπάρχει πολλαπλή ή πολύ κοντινή βέλτιστη λύση (ανάλυση ευστάθειας) στο παραπάνω πρόβλημα. Σε περίπτωση ύπαρξης μη μοναδικής λύσης, εντοπίζονται οι μέσες προσθετικές συναρτήσεις αξίας οι οποίες μεγιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση:

$$u_i(g_i^*) = \sum_{j=1}^{\alpha_i-1} w_{ij} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (5.19)$$

λαμβάνοντας υπόψη και έναν νέο περιορισμό:

$$\sum_{k=1}^m [\sigma^+(a_k) + \sigma^-(a_k)] \leq z^* + \varepsilon \quad (5.20)$$

Όπου z^* είναι η βέλτιστη τιμή του z στο πρόβλημα του βήματος 3 και ε είναι ένας πολύ μικρός θετικός αριθμός.

Κεφάλαιο 6

Εφαρμογή της Μεθόδου UTASTAR

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα για την εφαρμογή της μεθόδου UTASTAR στη διαδικασία απόφασης. Σε πρώτη φάση δόθηκε στον αποφασίζοντα ένα σύνολο 15 επιλεγμένων εναλλακτικών (σύνολο αναφοράς) για να δημιουργήσει μία κατάταξη αυτών από την καλύτερη στην χειρότερη εναλλακτική ενέργεια, δηλώνοντας έτσι τις προτιμήσεις του. Ταυτόχρονα και ανεξάρτητα υπολογίστηκαν τα υποδιαστήματα $[g_i^*, g_i^*]$ για κάθε ένα από τα κριτήρια, οι συντελεστές των μεταβλητών w_{ij} και τελικά ο αλγόριθμος της UTASTAR υπολόγισε τις μερικές αξίες των επιμέρους κριτηρίων. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε μέχρι να επιτευχθεί συμφωνία μεταξύ της κατάταξης του αποφασίζοντα και της κατάταξης του μοντέλου. Έπειτα, αφού είχαν προσδιοριστεί οι μερικές αξίες των τεσσάρων κριτηρίων αξιολόγησης της παρούσας έρευνας υπολογίστηκαν οι ολικές προσθετικές συναρτήσεις αξίας κάθε μέτρου εξοικονόμησης ενέργειας. Τελικά, ήταν διαθέσιμη η αρχική λίστα με τα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας τα οποία είχαν πλέον καταταχθεί από το καλύτερο προς το χειρότερο, σύμφωνα πάντα με το σύστημα αξιών του αποφασίζοντα.

6.1.1 Σύνολο αναφοράς

Με τη δημιουργία του πολυκριτήριου πίνακα με τις εναλλακτικές και τις αποδόσεις αυτών στα τέσσερα κριτήρια, το επόμενο βήμα είναι η εφαρμογή της μεθόδου. Επειδή ο αριθμός των εναλλακτικών μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας ήταν μεγάλος, επιλέχθηκε ένα αντιπροσωπευτικό πλήθος αυτών, το οποίο αποτελεί το σύνολο αναφοράς (A_R). Το σύνολο αναφοράς πρέπει να επιλεγεί με προσοχή, καθώς αυτό θα καθορίσει της μερικές αξίες των κριτηρίων. Στην περίπτωση μας, το σύνολο αναφοράς αποτελούνταν από 15 μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας. Τα μέτρα αυτά δεν επιλέχθηκαν αυθαίρετα.

Για να δημιουργηθεί το σύνολο αναφοράς χρειάζεται οι εναλλακτικές που θα το απαρτίζουν να πληρούν κάποιες προϋποθέσεις: Αρχικά, τα σενάρια που θα είναι μέσα στο σύνολο αναφοράς θα πρέπει να καλύπτουν όλο το εύρος τιμών των κριτηρίων. Ακόμη, η επιλογή των σεναρίων για το σύνολο αναφοράς θα πρέπει να γίνει με τρόπο ώστε να αποφευχθεί η σχέση κυριαρχίας μίας εναλλακτικής έναντι μίας άλλης. Τέλος, πρέπει στα σενάρια του συνόλου αναφοράς να περιλαμβάνονται όλες οι εναλλακτικές δράσεις.

Στην παρούσα έρευνα, λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω προϋποθέσεις το σύνολο αναφοράς διαμορφώθηκε μετά από επιλογή 15 εναλλακτικών δράσεων οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1 Σύνολο αναφοράς

Μέτρα Εξοικονόμησης Ενέργειας	Κόστος Λειτουργίας (€/έτος)	Κόστος Εγκατάστασης (€)	Άνεση (ώρες δυσφορίας/έτος)	CO ₂ (kg/έτος)
Αρχικό κτίριο	2553	0	919	13271
A. Χωρίς αίθριο	2455	2000	899	12624
B. Υαλοπίνακες	2558	14998	899	13097
Γ. Σκίαση	2536	5624	931	13096
Δ. Φυσ. Εξαερισμός	2314	0	1010	12174
E. Μόνωση Τοίχου	2432	7534	876	12985
Z. Μόνωση Οροφής	2522	5165	905	13138
Γ-Δ	2295	5624	1012	12006
Γ-Z	2567	10789	923	13134
E-Z	2334	12699	855	12669
A-E-Z	2188	14699	819	11796
B-Γ-Δ	2254	20623	1002	11616
B-Δ-E	2049	22532	969	11047
Γ-Δ-Z	2260	10789	1007	11842
A-B-Γ-Δ-E-Z	1939	35322	935	10529
MIN	1939	0	819	10529
MAX	2567	35322	1012	13271

Στον Πίνακα 6.1 φαίνονται τα δεκαπέντε μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας που επελέγησαν για το σύνολο αναφοράς. Κάτω από τον πίνακα αναγράφονται οι ελάχιστες και μέγιστες αποδόσεις των 15 μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας στα τέσσερα κριτήρια. Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη αφορά στην κυριαρχία. Όπως έχει αναφερθεί, μία εναλλακτική a κυριαρχεί μία εναλλακτικής b όταν οι αποδόσεις της a είναι μεγαλύτερες ή ίσες για κάθε ένα από τα κριτήρια αξιολόγησης της διαδικασίας ($g_i(a) \geq g_i(b)$ για κάθε i , ενώ τουλάχιστον μία ανίσωση είναι αυστηρά μεγαλύτερη). Δεν υπάρχει λόγος στο σύνολο αναφοράς να υπάρχουν εναλλακτικές που έχουν κυριαρχία έναντι κάποιων άλλων γιατί έτσι δεν τίθεται θέμα σύγκρισης ανάμεσα στις εναλλακτικές παρεμβάσεις. Στην περίπτωση μας λοιπόν, παρατηρείται ότι η εναλλακτική A-B-Δ-E-Z παρουσιάζει την ελάχιστη απόδοση τόσο στο πρώτο όσο και στο τέταρτο κριτήριο. Αν ληφθεί υπόψη μόνο η πρώτη προϋπόθεση για την κατασκευή του συνόλου αναφοράς, δηλαδή να εισαχθούν οι εναλλακτικές με τις περισσότερες ακραίες αποδόσεις, τότε η παρέμβαση A-B-Δ-E-Z θα έπρεπε σίγουρα να αποτελεί μέρος του συνόλου αναφοράς. Αν όμως εισαγόταν, τότε θα κυριαρχούσε της A-B-Γ-Δ-E-Z, η οποία επίσης συνδυάζει τις δύο προϋποθέσεις κι έτσι θα επηρεαζό-

ταν ολόκληρο το σύνολο αναφοράς. Τέλος, οι εναλλακτικές που θα απαρτίζουν τελικά το σύνολο αναφοράς θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να περιλαμβάνουν κάθε κύρια εναλλακτική χωριστά αλλά και σε συνδυασμούς μεταξύ τους. Έτσι, οι κύριες εναλλακτικές μπαίνουν στο σύνολο αναφοράς, παρόλο που υπάρχει κυριαρχία μεταξύ κάποιων.

6.1.1.1 Κατάταξη συνόλου αναφοράς

Το σύνολο με τα επιλεγμένα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας δόθηκε στον αποφασίζοντα, ο οποίος τα κατέταξε βάσει του δικού του συστήματος αξιών (ranking of the decision maker – DM ranking). Η διαδικασία της κατάταξης των ενεργειών μπορεί φαινομενικά να είναι εύκολη, όμως πρόκειται για μία αρκετά σύνθετη διαδικασία. Πολλές φορές χωρίς ο ίδιος να το αντιλαμβάνεται επιλέγει για παράδειγμα μία εναλλακτική δράση α έναντι μίας άλλης δράσης β για κάποιο λόγο, και μία άλλη δράση γ έναντι της β για κάποιο διαφορετικό λόγο. Ο ρόλος της μεθόδου είναι να βοηθήσει τον αποφασίζοντα να κατανοήσει περισσότερο τις ανάγκες και τις γνώσεις του κι όχι να του υποδείξει ποιες είναι καλύτερες επιλογές.

Η κατάταξη του αποφασίζοντα γίνεται γνωστή στο πρώτο στάδιο της μεθόδου. Ο αποφασίζοντας στην περίπτωση του κτιρίου του προβλήματος κατέταξε τα εναλλακτικά μέτρα του συνόλου αναφοράς ως εξής:

Πίνακας 6.2 Κατάταξη συνόλου αναφοράς από τον αποφασίζοντα

Μέτρα Εξοικονόμησης Ενέργειας	Κόστος Λειτουργίας (€/έτος)	Κόστος Εγκατάστασης (€)	Άνεση (ώρες δυσφορίας/έτος)	CO ₂ (kg/έτος)	Αρχική Κατάταξη Αποφασίζοντα
Αρχικό κτίριο	2553	0	919	13271	6
A. Χωρίς αίθριο	2455 (-3,85%)	2000	899 (-2,12%)	12624 (-4,87%)	3
B. Υαλοπίνακες	2558 (0,18%)	14998	899 (-2,2%)	13097 (-1,31%)	14
Γ. Σκίαση	2536 (-0,69%)	5624	931 (1,27%)	13096 (-1,31%)	13
Δ. Φυσ. Εξαερισμός	2314 (-9,36%)	0	1010 (9,88%)	12174 (-8,27%)	2
Ε. Μόνωση Τοίχου	2432 (-4,76%)	7534	876 (-4,67%)	12985 (-2,15%)	9
Z. Μόνωση Οροφής	2522 (-1,22%)	5165	905 (-1,57)	13138 (-1%)	12
Γ-Δ	2295 (-10,14%)	5624	1012 (10,15%)	12006 (-9,53%)	7

Γ-E	2567 (0,53%)	10789	923 (0,46%)	13134 (-1,03%)	15
E-Z	2334 (-8,59%)	12699	855 (-6,99%)	12669 (-4,54%)	8
A-E-Z	2188 (-14,32%)	14699	819 (-10,88%)	11796 (-11,12%)	1
B-Γ-Δ	2254 (-11,74%)	20623	1002 (9,04%)	11616 (-12,47%)	11
B-Δ-E	2049 (-19,76%)	22532	969 (5,39%)	11047 (-16,75%)	4
Γ-Δ-Z	2260 (-11,50%)	10789	1007 (9,57%)	11842 (-10,77%)	10
A-B-Γ-Δ-E-Z	1939 (-24,05%)	35322	935 (1,73%)	10529 (-20,66%)	5

Στον Πίνακα 6.2 δίνονται οι αποδόσεις των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας του συνόλου αναφοράς, κάτω από τις οποίες αναγράφεται σε παρενθέσεις η μεταβολή της απόδοσης σε σχέση με το αρχικό κτίριο για κάθε παρέμβαση για την διευκόλυνση του αποφασίζοντα. Στην δεξιά στήλη δίνεται η κατάταξη που τελικά έκανε ο αποφασίζοντας στα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας που του δόθηκαν.

Η κατάταξη αυτή διαμορφώνει διαφορετικά τον πολυκριτήριο πίνακα του συνόλου αναφοράς, αφού τώρα οι εναλλακτικές ενέργειες τοποθετούνται από την καλύτερη προς την χειρότερη βάρσει του συστήματος προτιμήσεων του αποφασίζοντα.

Πριν τη διαμόρφωση του γραμμικού προβλήματος προς επίλυση χρειάζεται να υπολογιστούν τα υποδιαστήματα $[g_i^*, g_i]$ των κριτηρίων για να καθοριστούν οι συντελεστές των μεταβλητών w_{ij} .

6.1.2. Καθορισμός παραμέτρων UTASTAR

Όπως έχει αναφερθεί, ως g_i^* και g_i ορίζονται η ελάχιστη και η μέγιστη απόδοση που εμφανίζεται στον πολυκριτήριο πίνακα για το κριτήριο g_i . Ο λόγος που γίνεται διάσπαση του διαστήματος $[g_i^*, g_i]$ σε $\alpha_i - 1$ τμήματα είναι για να μπορέσουν να υπολογιστούν οι μερικές χρησιμότητες των κριτηρίων μέσω γραμμικής παρεμβολής. Ο αριθμός α_i επιλέγεται από τον αναλυτή, και δεν είναι απαραίτητο να είναι ο ίδιος για κάθε κριτήριο g_i . Τα διαστήματα αυτά θα πρέπει να διαμορφώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή στον αριθμό των εναλλακτικών που εντοπίζονται σε αυτά. Στον Πίνακα 6.3 δίνονται οι ελάχιστες και μέγιστες αποδόσεις για κάθε κριτήριο αξιολόγησης στο σύνολο αναφοράς:

Πίνακας 6.3 Ελάχιστες και μέγιστες αποδόσεις για κάθε κριτήριο αξιολόγησης

	Κόστος Λειτουργίας	Κόστος Εγκα- τάστασης	Άνεση (ώρες δυσφορί-	CO ₂
--	-----------------------	--------------------------	-------------------------	-----------------

	(€/έτος)	(€)	αζ/έτος)	(kg/έτος)
MIN	1939	0	819	10529
MAX	2567	35322	1012	13271

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι τα κριτήρια αποτελούν κριτήρια κόστους, δηλαδή όσο μειώνεται η τιμή του κριτηρίου τόσο πιο επιθυμητή είναι η εναλλακτική, κι αυτό με τη σειρά του σημαίνει πως η μέγιστη τιμή θα έχει μερική χρησιμότητα 0 ενώ η ελάχιστη τιμή θα έχει μερική χρησιμότητα 1. Στα κριτήρια κέρδους (όπως θα ήταν για παράδειγμα το κριτήριο άνεσης εάν μετρίονταν σε ώρες άνεσης και όχι σε ώρες δυσφορίας όπως είναι εδώ) συμβαίνει το αντίστροφο.

Οι υπολογισμοί των διαστημάτων πρέπει να γίνουν με προσοχή. Ένας τρόπος υπολογισμού θα μπορούσε να είναι ο εξής: Σαν ελάχιστη τιμή g_i^* του πρώτου κριτηρίου να επιλεγθεί η ελάχιστη τιμή του συνόλου αναφοράς, αντίστοιχα και η μέγιστη, και να διασπαστεί το διάστημα αυτό σε τέσσερα ισόποσα υποδιαστήματα. Θα πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι ελάχιστες τιμές που αναγράφονται παραπάνω αποτελούν τις ελάχιστες αποδόσεις για τις 15 εναλλακτικές που ανήκουν στο σύνολο αναφοράς, και όχι για όλες τις 64 εναλλακτικές προς αξιολόγηση. Έτσι, με την παραπάνω διάσπαση, η εναλλακτική με την ελάχιστη απόδοση στο πρώτο κριτήριο θα έχει μερική χρησιμότητα 1. Το μέτρο A-B-D-F-G όμως παρουσιάζει ακόμη μικρότερη απόδοση (1900,033), κι έτσι θα έχουμε 2 μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας με μερική αξία 1. Γενικά, θα πρέπει τα άκρα των διαστημάτων να περικλείουν όλες τις αποδόσεις. Για το λόγο αυτό οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές των κριτηρίων για τη διαμόρφωση των διαστημάτων επελέγησαν ως εξής:

Πίνακας 6.4 Ελάχιστες και μέγιστες τιμές των κριτηρίων για τη διαμόρφωση των διαστημάτων

	Κόστος Λειτουργίας (€/έτος)	Κόστος Εγκατάστασης (€)	Άνεση (ώρες δυσφορίας/έτος)	CO ₂ (kg/έτος)
MAX (g_i^*)	2650	35000	1040	13400
MIN (g_i^*)	1900	0	800	11000

Η διάσπαση των διαστημάτων σε $a_i - 1$ τμήματα γίνεται από τον αναλυτή όπως αναφέρθηκε. Είναι επιθυμητό τα διαστήματα να είναι ομοιόμορφα χωρίς αυτό όμως να είναι απαραίτητο. Το πρώτο κριτήριο στην έρευνα αυτή διασπάστηκε σε 3 τμήματα, το δεύτερο και το τρίτο επίσης, ενώ το τέταρτο σε δύο τμήματα. Αφού προσδιοριστεί ο αριθμός a_i , τα όρια των τμημάτων υπολογίζονται από τον τύπο (5.7):

$$g_i^j = g_i^* + \frac{j-1}{a_i-1} (g_i^* - g_i^*)$$

ο οποίος δίνει την τελική διαμόρφωση των διαστημάτων:

Πίνακας 6.5 Διαστήματα κριτηρίων

Κόστος Λειτουργίας	Κόστος Εγκατά-	Άνεση	CO ₂
--------------------	----------------	-------	-----------------

αζ (€/έτος)	στασης (€)	(ώρες δυσφορί- ας/έτος)	(kg/έτος)
2650	35000	1040	13400
2400	20000	960	12200
2150	5000	880	11000
1900	0	800	

Ο σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι να υπολογιστούν οι μερικές χρησιμότητες για τα άκρα των τμημάτων και έπειτα με γραμμική παρεμβολή να προσδιοριστούν οι μερικές χρησιμότητες όλων των 64 εναλλακτικών μέτρων.

Αρχικά, οι ολικές αξίες κάθε εναλλακτικής εκφράζονται συναρτήσει των μερικών συναρτήσεων αξίας που τις συνθέτουν μέσω του τύπου (5.8):

$$u_i[g_i(a)] = u_i(g_i^j) + \frac{g_i(a) - g_i^j}{g_i^{j+1} - g_i^j} [u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j)]$$

Ο τύπος εφαρμόζεται για το εκάστοτε διάστημα στο οποίο εντοπίζεται η απόδοση της εναλλακτικής. Για παράδειγμα, η απόδοση της πρώτης εναλλακτικής στο πρώτο κριτήριο εντοπίζεται στο διάστημα [2650, 2400]. Αυτό είναι το διάστημα στο οποίο θα εφαρμοστεί ο τύπος. Μετά από πράξεις υπολογίζεται ότι:

$$u_1[g_1(\text{Αρχικό κτίριο})] = 0,389 * u_1(2400)$$

$$\text{αφού } u_1(2650) = 0.$$

Για να ολοκληρωθεί αυτό το βήμα της διαδικασίας πρέπει να εκφραστούν οι μερικές συναρτήσεις αξίας ως προς τις μεταβλητές w_{ij} βάσει του τύπου (5.16):

$$u_i(g_i^j) = \sum_{t=1}^{j-1} w_{it}$$

Κατά αυτόν τον τύπο, συνεχίζοντας την παραπάνω εφαρμογή, το $u_1(2400)$ στον παραπάνω τύπο γράφεται ως εξής:

$$u_1(2400) = w_{11}$$

αφού το 2400 μέσα στην παρένθεση αντιστοιχεί στο $t=2$.

Αυτή η διαδικασία γίνεται για όλα τα κριτήρια, έτσι ώστε τελικά να έχουμε μία ολική συνάρτηση χρησιμότητας για κάθε εναλλακτικό μέτρο εξοικονόμησης ενέργειας που ανήκει στο σύνολο αναφοράς, η οποία θα είναι εκφρασμένη συναρτήσει των μεταβλητών w_{ij} . Στον Πίνακα 6.6 αναγράφονται οι αθροιστικές συναρτήσεις αξίας για κάθε εναλλακτική συναρτήσει αυτών των μεταβλητών.

Πίνακας 6.6 Αθροιστικές συναρτήσεις χρησιμότητας κάθε εναλλακτικής συναρτήσει των w_{ij}

ΣΕΝΑΡΙΑ	w_{11}	w_{12}	w_{13}	w_{21}	w_{22}	w_{23}	w_{31}	w_{32}	w_{33}	w_{41}	w_{42}
Αρχικό κτίριο	0,3844	0	0	1	1	1	1	0,5075	0	0,1073	0
A. Χωρίς αίθριο	0,7779	0	0	1	1	0,6	1	0,7508	0	0,6460	0
B. Υαλοπίνακες	0,3659	0	0	1	0,3334	0	1	0,7602	0	0,2519	0
Γ. Σκίαση	0,4552	0	0	1	0,9583	0	1	0,3613	0	0,2525	0
Δ. Φυσ. Εξαερισμός	1	0,3409	0	1	1	1	0,3717	0	0	1	0,0215
Ε. Μόνωση Τοίχου	0,8710	0	0	1	0,8310	0	1	1	0,0446	0,3453	0
Z. Μόνωση Οροφής	0,5093	0	0	1	0,9889	0	1	0,6875	0	0,2178	0
Γ-Δ	1	0,4197	0	1	0,9583	0	0,3412	0	0	1	0,1611
Γ-E	0,3304	0	0	1	0,6140	0	1	0,455	0	0,2215	0
E-Z	1	0,2615	0	1	0,4867	0	1	1	0,3102	0,6091	0
A-E-Z	1	0,8477	0	1	0,3533	0	1	1	0,7578	1	0,3366
B-Γ-Δ	1	0,5837	0	0,9584	0	0	0,4687	0	0	1	0,4864
B-Δ-E	1	1	0,4034	0,8311	0	0	0,8875	0	0	1	0,9601
Γ-Δ-Z	1	0,5592	0	1	0,6140	0	0,4075	0	0	1	0,2981
A-B-Γ-Δ-E-Z	1	1	0,8410	0	0	0	1	0,3081	0	1	1

6.1.3 Διαμόρφωση και επίλυση του προβλήματος

Σε αυτή τη φάση διαμορφώνεται το πρόβλημα προς επίλυση. Με την κατάταξη του αποφασίζονται η διαδικασία προχωρά στο στάδιο των συγκρίσεων μεταξύ των εναλλακτικών παρεμβάσεων. Η δημιουργία του αρχικού γραμμικού προβλήματος γίνεται βάσει των τύπων (5.18):

$$[\min]z = \sum_{k=1}^m [\sigma^+(a_k) + \sigma^-(a_k)]$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\Delta(a_k, a_{k+1}) \geq \delta \quad \text{αν } a_k \succ a_{k+1}$$

$$\Delta(a_k, a_{k+1}) = 0 \quad \text{αν } a_k \sim a_{k+1}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{a_i-1} w_{ij} = 1$$

$$w_{ij} \geq 0, \sigma^+(a_k) \geq 0, \sigma^-(a_k) \geq 0, \forall i, j, k.$$

Σε πρώτη φάση εισάγονται οι παράγοντες σφάλματος σ^+ και σ^- για κάθε ένα από τα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας του συνόλου αναφοράς και αντικειμενική συνάρτηση του γραμμικού προβλήματος (ΓΠ) είναι η ελαχιστοποίησή τους. Οι περιορισμοί του ΓΠ σε αυτό το στάδιο διαμορφώνονται ως εξής:

- Έχοντας 15 εναλλακτικές δράσεις, οι διμερείς συγκρίσεις που λαμβάνουν χώρα είναι 14 (όσες είναι οι εναλλακτικές μείον 1). Στο πρόβλημα αυτής της έρευνας δεν υπάρχει σχέση αδιαφορίας μεταξύ των εναλλακτικών (θα υπήρχε αδιαφορία εάν στην κατάταξη του αποφασίζοντα δύο εναλλακτικές καταλάμβαναν μία θέση), οπότε υπάρχουν 14 ανισότητες του τύπου $\Delta(a_k, a_{k+1}) \geq \delta$, όπου το δ στη συγκεκριμένη περίπτωση ορίστηκε ως 0,05. Σύμφωνα με την ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου, δύο διαδοχικές εναλλακτικές στην κατάταξη του αποφασίζοντα (Πίνακας 6.2) γράφονται ως εξής:

$$\Delta(a_k, a_{k+1}) = u'[g(a_k)] - \sigma^+(a_k) + \sigma^-(a_k) - u'[g_i(a_{k+1})] + \sigma^+(a_{k+1}) - \sigma^-(a_{k+1})$$

- Το άθροισμα των μεταβλητών w_{ij} θα πρέπει να ισούται με τη μονάδα.

Με αυτούς τους περιορισμούς και με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των παραγόντων σφάλματος, η λύση του προβλήματος δίνει το ελάχιστο σφάλμα.

Προχωρώντας στην μεταβελτιστοποίηση, το γραμμικό πρόβλημα μετατρέπεται. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η μεγιστοποίηση και ελαχιστοποίηση των βαρών των κριτηρίων b_i . Το βάρος του κάθε κριτηρίου είναι η μερική χρησιμότητα της μέγιστης απόδοσης που σημειώνεται σε αυτό το κριτήριο, δηλαδή $b_i = u_i(g_i^*)$. Επίσης, εισάγεται ο περιορισμός (5.20) για τον οποίο επιλέχθηκε το $\varepsilon=0,01$. Επειδή το αποτέλεσμα του πρώτου ΓΠ δεν είναι μηδενικό, το δεξί μέρος του παραπάνω περιορισμού αλλάζει και γίνεται:

$$(1 + \varepsilon) * z^*$$

Η λύση αυτών των γραμμικών προβλημάτων δίνουν τις μεταβλητές w_{ij} . Από την παραπάνω διαδικασία βγαίνει ένας μέσος όρος αυτών των μεταβλητών:

Πίνακας 6.7 Υπολογισμός των w_{ij}

	w11	w12	w13	w21	w22	w23	w31	w32	w33	w41	w42
minb1	0,1732	0,2936	0	0	0,0299	0,3459	0	0,1050	0	0,0521	0
maxb1	0,2531	0,3036	0	0	0,0514	0,3205	0	0,0711	0	0	0
minb2	0,2855	0,2572	0	0	0,0075	0,3444	0	0,1052	0	0	0
maxb2	0,2412	0,3000	0	0	0,0403	0,3432	0	0,0750	0	0	0
minb3	0,2531	0,3036	0	0	0,0514	0,3205	0	0,0711	0	0	0
maxb3	0,2682	0,2576	0	0	0	0,3534	0	0,1090	0,0088	0,0026	0
minb4	0,2268	0,3068	0	0	0,0333	0,3457	0	0,0872	0	0	0
maxb4	0,2737	0,2067	0	0	0,0263	0,3482	0	0,0796	0	0	0,0652
Μέσος Όρος	0,2469	0,2786	0	0	0,0300	0,3402	0	0,0879	0,0011	0,0068	0,0081

Σε αυτό το τελικό στάδιο υπολογίζεται η ολική προσθετική αξία κάθε μέτρου εξοικονόμησης ενέργειας, αφού σε προηγούμενη φάση έχουν εκφραστεί συναρτήσεις των μεταβλητών. Έχοντας υπολογίσει τις ολικές αξίες, το μοντέλο παράγει μία κατάταξη των εναλλακτικών παρεμβάσεων (Πίνακας 6.8).

Πίνακας 6.8 Κατάταξη της UTASTAR και του αποφασίζοντα

Σενάρια	Συνολική Αξία	Κατάταξη UTASTAR	Αρχική Κατάταξη Αποφασίζοντα
Αρχικό κτίριο	0,5106	5	6
A. Χωρίς αίθριο	0,4967	6	3
B. Υαλοπίνακες	0,1689	14	14
Γ. Σκίαση	0,1747	13	13
Δ. Φυσ. Εξαερισμός	0,7192	1	2
E. Μόνωση Τοίχου	0,3304	11	9
Z. Μόνωση Οροφής	0,2174	12	12
Γ-Δ	0,4008	10	7
Γ-E	0,1415	15	15
E-Z	0,4268	8	8
A-E-Z	0,5921	2	1
B-Γ-Δ	0,4204	9	11
B-Δ-E	0,5402	4	4
Γ-Δ-Z	0,4305	7	10

A-B-Γ-Δ-E-Z	0,5677	3	5
-------------	--------	---	---

Στον παραπάνω πίνακα αναγράφονται τα σκορ που συγκεντρώνει κάθε μία από τις εναλλακτικές δράσεις, η κατάταξη που δίνει το μοντέλο UTASTAR και η αρχική κατάταξη του αποφασίζοντα. Το συγκεντρωτικό σκορ για κάθε εναλλακτική παρέμβαση υπολογίστηκε με τον πολλαπλασιασμό των συντελεστών w_{ij} του Πίνακα 6.7 (γραμμή Μέσος Όρος) με τους συντελεστές των μεταβλητών w_{ij} για κάθε παρέμβαση στον Πίνακα 6.6. Παρατηρείται κάποια απόκλιση στις δύο κατατάξεις. Σε αυτήν την περίπτωση δίνεται στον αποφασίζοντα η κατάταξη στην οποία κατέληξε το μοντέλο. Ο αποφασίζοντας σε αυτό το στάδιο έχει τρεις επιλογές:

1. Αναθεωρεί την κατάταξή του, κι έτσι επιτυγχάνεται απόλυτη συμφωνία ανάμεσα σε αυτόν και το μοντέλο.
2. Αναθεωρεί την αρχική του κατάταξη, μεταβάλλοντας αυτήν χωρίς όμως να συμφωνεί απόλυτα με την κατάταξη του μοντέλου.
3. Δεν αναθεωρεί την αρχική του κατάταξη.

Στην πρώτη περίπτωση η διαδικασία συνεχίζεται και προχωρά στο επόμενο βήμα κατά το οποίο υπολογίζονται οι ολικές προσθετικές χρησιμότητες σε όλο το σύνολο των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας.

Στη δεύτερη περίπτωση η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να υπάρξει απόλυτη συμφωνία μεταξύ του μοντέλου και του αποφασίζοντα.

Στην τρίτη περίπτωση η διαδικασία πρέπει να επαναληφθεί εξολοκλήρου από την αρχή. Όταν ο αποφασίζοντας δεν αναθεωρεί την αρχική του κατάταξη, πρέπει να εισαχθούν νέα κριτήρια ή να αλλάξει το σύνολο αναφοράς, ή να μεταβληθεί η αξιολόγηση, οι αποδόσεις δηλαδή των σεναρίων στα κριτήρια.

Στην προκειμένη περίπτωση ο αποφασίζοντας αναθεώρησε την άποψή του χωρίς όμως να συμφωνεί με την κατάταξη του μοντέλου. Έτσι, ο αλγόριθμος της UTASTAR επαναλήφθηκε. Τα αποτελέσματα δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.9 Κατάταξη UTASTAR μετά την αναθεώρηση

Σενάρια	Συνολική Αξία Χρησιμότητας	Κατάταξη UTASTAR	Αναθεωρημένη Κατάταξη Αποφασίζοντα
Αρχικό κτίριο	0,5063	5	6
A. Χωρίς αίθριο	0,4813	6	4
B. Υαλοπίνακες	0,1623	13	14
Γ. Σκίαση	0,1585	14	13
Δ. Φυσ. Εξαερισμός	0,7082	1	2
E. Μόνωση Τοίχου	0,3073	11	10

Z. Μόνωση Οροφής	0,2002	12	12
Γ-Δ	0,3796	10	9
Γ-E	0,1321	15	15
E-Z	0,4112	8	8
A-E-Z	0,5894	2	1
B-Γ-Δ	0,4090	9	11
B-Δ-E	0,5319	4	3
Γ-Δ-Z	0,4141	7	7
A-B-Γ-Δ-E-Z	0,5574	3	5

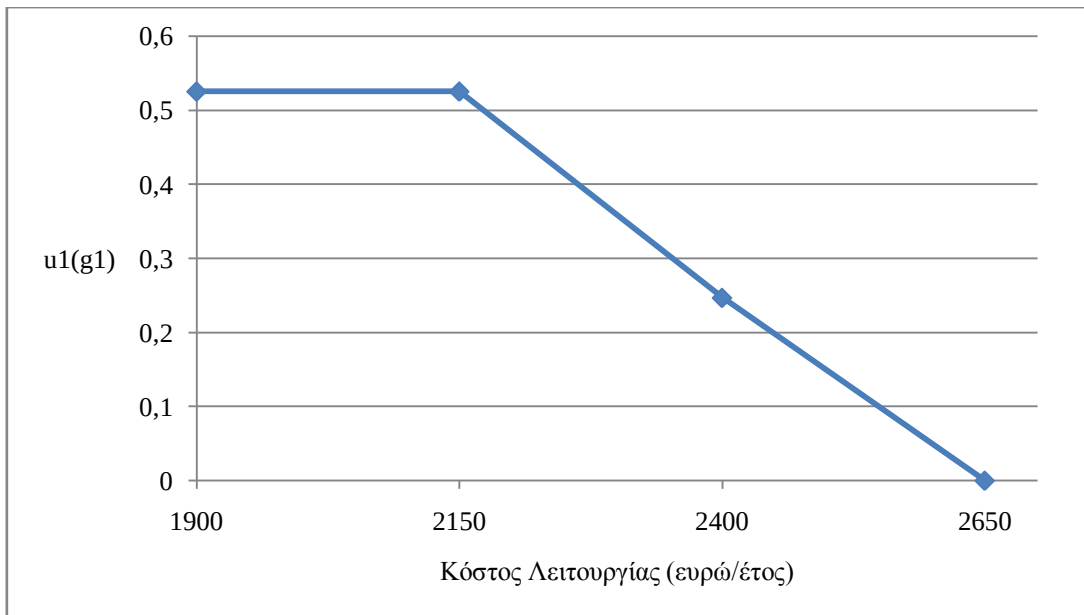
Η διαδικασία κατέληξε σε παρόμοιο αποτέλεσμα. Οι δύο κατατάξεις δεν ταυτίζονται οπότε πάλι ο αποφασίζοντας χρειάστηκε να επιλέξει μία από τις παραπάνω περιπτώσεις. Ο αποφασίζοντας επέλεξε να αναθεωρήσει την κατάταξή του με τρόπο ώστε να υπάρξει απόλυτη ταύτιση με αυτής του μοντέλου, υιοθέτησε δηλαδή την κατάταξη του μοντέλου.

6.1.4 Αξιολόγηση συνόλου εναλλακτικών σεναρίων

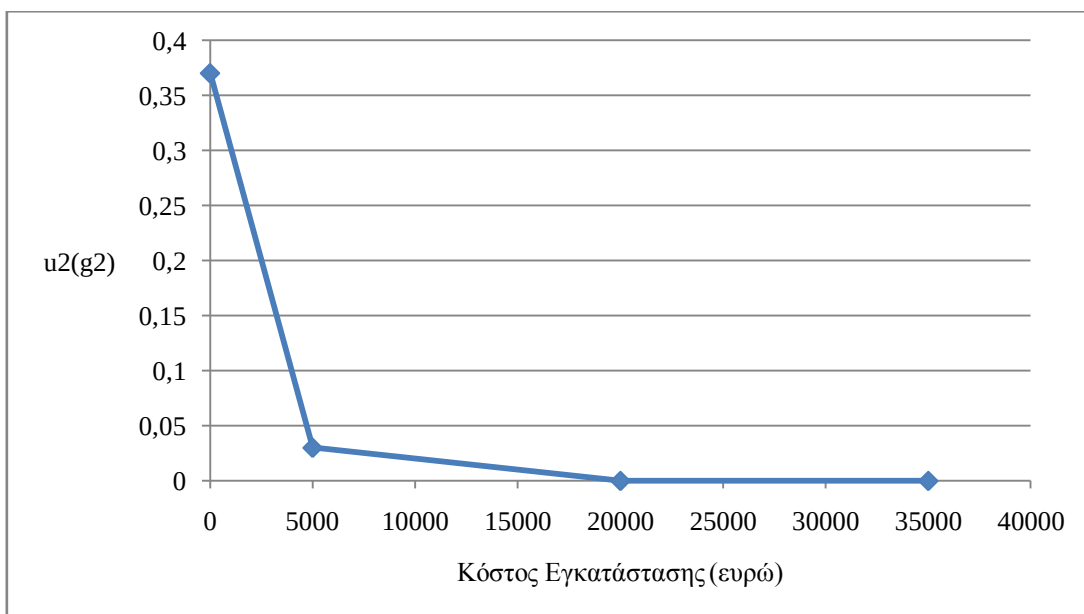
Σύμφωνα με τα παραπάνω, με την αξιολόγηση του συνόλου αναφοράς υπολογίζονται οι μερικές αξίες στα τμήματα των διαστημάτων που τέθηκαν στην ενότητα 6.1.2. Παρακάτω δίνονται διαγραμματικά αυτές οι μερικές χρησιμότητες:

Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται πως ο αποφασίζων δεν διαχωρίζει τα κόστη λειτουργίας μεταξύ 1900 € και 2150 € ενώ παρατηρείται πως μετά από αυτό το ποσό είναι περισσότερο διστακτικός. Αυτό σημαίνει πως το ποσό των 2150 € λειτουργεί σαν κατώφλι βέτο, είναι δηλαδή σαν ένα όριο που έχει καθορίσει ο αποφασίζων τέτοιο ώστε οποιαδήποτε εναλλακτική δράση το ξεπερνά, να επιλέγεται δυσκολότερα από αυτές που δεν το ξεπερνούν.

Στο Σχήμα 6.2 σημειώνεται ότι ο αποφασίζων διαχωρίζει το μηδενικό κόστος από τα 5000 €. Όπως και στο κριτήριο του κόστους εγκατάστασης, έτσι κι εδώ υπάρχει ένα κατώφλι που όμως τώρα είναι αρκετά πιο αυστηρό. Δηλαδή τις εναλλακτικές που παρουσιάζουν κόστος εγκατάστασης άνω των 0 € ο αποφασίζων τις επιλέγει πολύ πιο δύσκολα. Τέλος παρατηρείται ότι οι εναλλακτικές με κόστος εγκατάστασης άνω των 20000 € έχουν μηδενικό βάρος σε αυτό το κριτήριο.

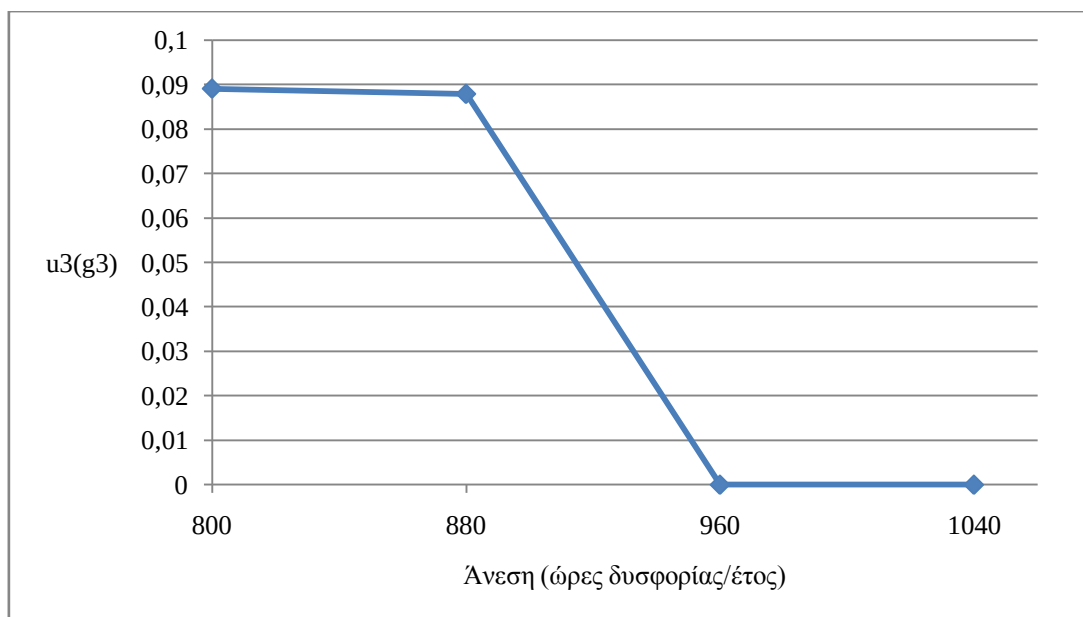


Σχήμα 6.1: Συνάρτηση αξίας για το κόστος λειτουργίας

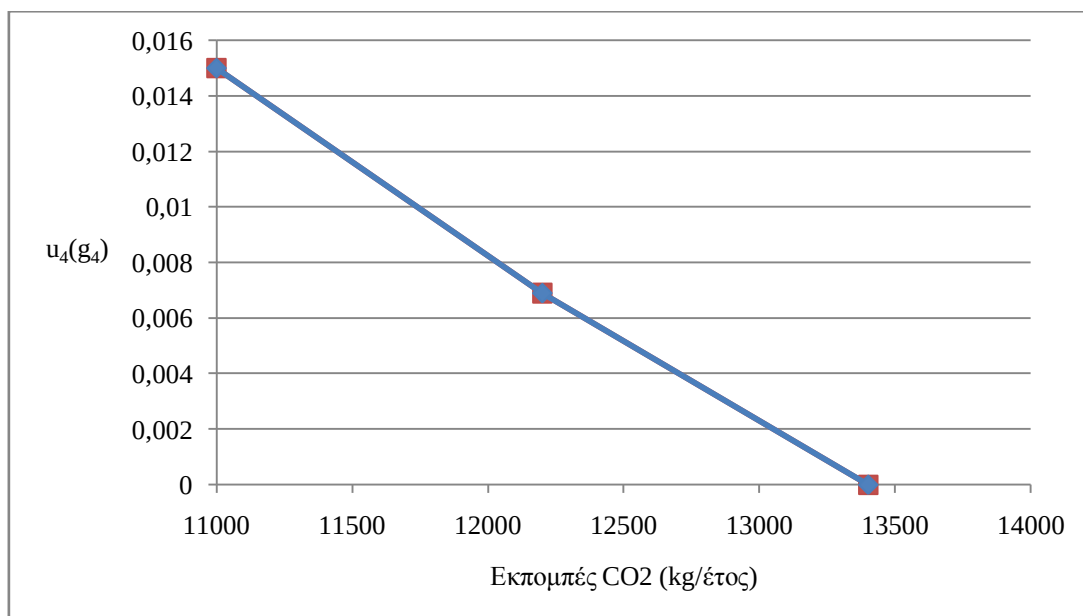


Σχήμα 6.2: Συνάρτηση αξίας για το κόστος εγκατάστασης

Κατ' αντιστοιχία, στο κριτήριο της άνεσης (Σχήμα 6.3) ο αποφασίζων έχει καθορίσει το κατώφλι στις 880 ώρες δυσφορίας ανά έτος. Το κριτήριο αυτό μπορεί να μην έχει μεγάλο βάρος σε σχέση με τα προηγούμενα δύο για τον αποφασίζοντα (μέγιστη τιμή μερικής αξίας είναι 0,89), αλλά κι εδώ είναι αρκετά αυστηρό το κατώφλι που έχει θέσει.



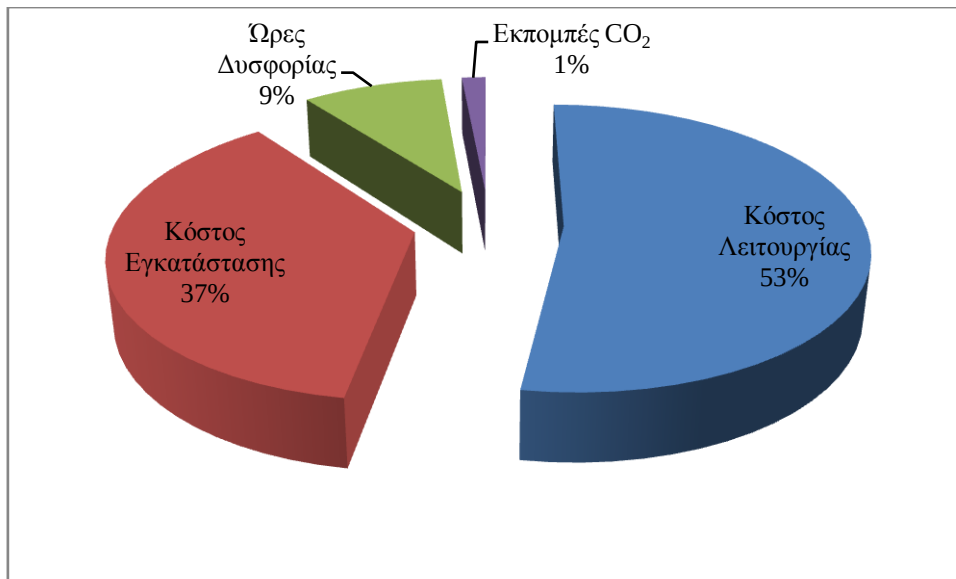
Σχήμα 6.3: Συνάρτηση αξίας για το κριτήριο άνεσης



Σχήμα 6.4: Συνάρτηση αξίας για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα

Τέλος, στο Σχήμα 6.4 σημειώνεται η γραμμικά αναλογική προτίμηση του αποφασίζοντα στο συγκεκριμένο κριτήριο. Δηλαδή, όσο λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ετησίως τόσο καλύτερη η εναλλακτική. Αξίζει να σημειωθεί παρόλα αυτά ότι οι ετήσιες εκπομπές CO₂ έχουν το μικρότερο μερίδιο στην πίτα των κριτηρίων (Σχήμα 6.5).

Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται σε κάθε ένα από τα Σχήματα 6.1 έως 6.4 αποτελεί το βάρος του εκάστοτε κριτηρίου (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5: Βάρη κριτηρίων

Με τα παραπάνω δεδομένα είναι πλέον εφικτό να υπολογιστούν οι μερικές χρησιμότητες κάθε εναλλακτικής σε κάθε κριτήριο και κατά συνέπεια μπορούν πλέον να υπολογιστούν οι ολικές χρησιμότητες κάθε εναλλακτικής. Ενδεικτικά, για παράδειγμα, η μερική χρησιμότητα του όγδου μέτρου εξοικονόμησης ενέργειας (A-B) στο πρώτο κριτήριο υπολογίζεται:

$$u_1[g_1(A-B)] = [(2650 - 2455,026)/(2650 - 2400)] * 0,2469 = 0,1926$$

Αντίστοιχα υπολογίζονται και οι άλλες τρεις μερικές χρησιμότητες για αυτή την εναλλακτική:

$$u_2[g_2(A-B)] = 0,0060$$

$$u_3[g_3(A-B)] = 0,0881$$

$$u_4[g_4(A-B)] = 0,0055$$

Έτσι, το σκορ που συγκεντρώνει η συνολικά η εναλλακτική είναι (τύπος 5.4):

$$u[(g(A-B)] = 0,2922$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται οι συναρτήσεις αξίας για κάθε μέτρο εξοικονόμησης ενέργειας από το σύνολο των 64 που είχαν κριθεί κατάλληλα για να εφαρμοστούν στο κτίριο με σκοπό την βελτίωση της ενεργειακής του συμπεριφοράς. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για κάθε εναλλακτική παρέμβαση δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.10 Συνολικές συναρτήσεις αξίας για κάθε εναλλακτική παρέμβαση και κατάταξη

Εναλλακτικές	Μερικές Χρησιμότητες - UTASTAR				Συνολική Αξία	Κατάταξη
	u1(g1)	u2(g2)	u3(g3)	u4(g4)		
	Κόστος Λειτουργίας	Κόστος Εγκατάστασης	Άνεση	CO ₂		

Αρχικό κτίριο	0,0949	0,3703	0,0446	0,0007	0,5106	30
A. Χωρίς αίθριο	0,1920	0,2342	0,0660	0,0044	0,4967	33
B. Υαλοπίνακες	0,0903	0,0100	0,0668 5	0,0017	0,1689	63
Γ. Σκίαση	0,1124	0,0288	0,0317	0,0017	0,1747	62
Δ. Φυσ. Εξαερισμός	0,34192	0,3703	0	0,0070	0,7192	1
E. Μόνωση Τοίχου	0,2150	0,0249	0,0879	0,0023	0,3304	50
Z. Μόνωση Οροφής	0,1257	0,0297	0,0604	0,0014	0,2174	60
A-B	0,1925	0,0060	0,0880	0,0055	0,2921	54
A-Γ	0,1464	0,0248	0,0503	0,0043	0,2259	59
A-Δ	0,4493	0,2342	0	0,0114	0,6950	2
A-E	0,3627	0,0209	0,0883	0,0070	0,4791	35
A-Z	0,2309	0,0257	0,0848	0,0054	0,3469	49
B-Γ	0,1148	0	0,0598	0,0034	0,1781	61
B-Δ	0,3854	0,0100	0	0,0089	0,4044	45
B-E	0,3507	0	0,0881	0,0068	0,4458	38
B-Z	0,1483	0	0,0879	0,0037	0,2400	57
Γ-Δ	0,3638	0,0288	0	0,0081	0,4008	46
Γ-E	0,2299	0,0137	0,0783	0,0032	0,3251	53
Γ-Z	0,0815	0,0184	0,0400	0,0015	0,1415	64
Δ-E	0,5255	0,0249	0	0,0105	0,5611	10
Δ-Z	0,3738	0,0297	0	0,0078	0,4113	44
E-Z	0,3197	0,0146	0,0882	0,0041	0,4268	42
A-B-Γ	0,1914	0	0,0819	0,0059	0,2793	55
A-B-Δ	0,4917	0,0060	0	0,0133	0,5111	29
A-B-E	0,4584	0	0,0888	0,0102	0,5575	12
A-B-Z	0,2343	0	0,0882	0,0065	0,3291	51
A-Γ-E	0,3828	0,0097	0,0881	0,0081	0,4888	34
A-Γ-Δ	0,4695	0,0248	0	0,0124	0,5068	32
A-Γ-Z	0,1837	0,0144	0,0701	0,0053	0,2736	56
A-Δ-E	0,5255	0,0209	0,0073	0,015	0,5689	8

A-Δ-Z	0,4884	0,0257	0	0,0124	0,5266	28
A-E-Z	0,4831	0,0106	0,0887	0,0095	0,5921	4
B-Γ-Δ	0,4095	0	0	0,0108	0,4204	43
B-Γ-E	0,3449	0	0,0883	0,0068	0,4401	40
B-Γ-Z	0,1472	0	0,0785	0,0041	0,2298	58
B-Δ-E	0,5255	0	0	0,0146	0,5402	24
B-Δ-Z	0,4295	0	0	0,0107	0,4403	39
B-E-Z	0,3579	0	0,0887	0,0063	0,4530	37
Γ-Δ-E	0,5255	0,0137	0	0,0114	0,5507	17
Γ-Δ-Z	0,4027	0,0184	0	0,0092	0,43056	41
Γ-E-Z	0,2746	0,0033	0,0880	0,0042	0,3702	47
Δ-E-Z	0,5255	0,0146	0	0,0111	0,5513	16
A-B-Γ-Δ	0,4963	0	0	0,0139	0,5102	31
A-B-Γ-E	0,4603	0	0,0887	0,0107	0,5598	11
A-B-Γ-Z	0,2320	0	0,0881	0,0070	0,3272	52
A-B-Δ-E	0,5255	0	0,0110	0,0150	0,5516	15
A-B-Δ-Z	0,5252	0	0	0,0141	0,5393	26
A-B-E-Z	0,5255	0	0,0890	0,0120	0,6267	3
A-Γ-Δ-E	0,5255	0,0097	0	0,0150	0,5503	18
A-Γ-Δ-Z	0,5145	0,0144	0	0,0137	0,5427	20
A-Γ-E-Z	0,4431	0	0,0885	0,0097	0,5414	22
A-Δ-E-Z	0,5255	0,0106	0,0271	0,0150	0,5783	7
B-Γ-Δ-E	0,5255	0	0	0,0145	0,5401	25
B-Γ-Δ-Z	0,4416	0	0	0,0116	0,4532	36
B-Γ-E-Z	0,2734	0	0,0880	0,0042	0,3656	48
B-Δ-E-Z	0,5255	0	0,0088	0,0142	0,5486	19
Γ-Δ-E-Z	0,5255	0,0033	0,0007	0,0121	0,5418	21
A-B-Γ-E-Z	0,4403	0	0,0885	0,0096	0,5385	27
A-B-Γ-Δ-E	0,5255	0	0,0162	0,0150	0,5568	13
A-B-Γ-Δ-Z	0,5255	0	0	0,0149	0,5405	23

A-B-Δ-E-Z	0,5255	0	0,0481	0,0150	0,5887	5
A-Γ-Δ-E-Z	0,5255	0	0,0388	0,0150	0,5794	6
B-Γ-Δ-E-Z	0,5255	0	0,0168	0,0143	0,5567	14
A-B-Γ-Δ-E-Z	0,5255	0	0,0270	0,0150	0,5677	9

Με τα συνολικά σκορ για κάθε εναλλακτική δράση, η μέθοδος UTASTAR καταλήγει στο μέτρο εξοικονόμησης ενέργειας που είναι καλύτερο για το σύστημα προτιμήσεων του αποφασίζοντα. Είναι βασικής σημασίας να διευκρινιστεί ότι η μέθοδος αυτή προτείνει τις καλύτερες λύσεις για τον εκάστοτε αποφασίζοντα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν βασίζονται στην κατάταξη που αυτός έδωσε. Για κάποιον άλλο η κατάταξη αυτή θα ήταν ίσως τελείως διαφορετική, και αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε τελείως διαφορετικά αποτελέσματα.

Από την κατάταξη που διαμορφώθηκε από την μέθοδο προκύπτει ότι το καλύτερο μέτρο εξοικονόμησης ενέργειας για τον αποφασίζοντα είναι η εφαρμογή φυσικού εξαερισμού στο κτίριο, με σκορ 0.7192. Ακολουθεί το σενάριο (Α-Δ), δηλαδή η εφαρμογή φυσικού εξαερισμού με ταυτόχρονη απομάκρυνση του αίθριου, με αρκετά μικρή διαφορά στο συγκεντρωτικό σκορ από την πρώτη (0.695), ενώ ως τρίτη εναλλακτική δράση στην κατάταξη έρχεται το μέτρο Α-Β-Ε-Ζ, δηλαδή η απομάκρυνση του αίθριου, αντικατάσταση υαλοπινάκων και μόνωση στους τοίχους και την οροφή, με συγκεντρωτικό σκορ 0,6267.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα ολοκληρωμένο εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για την ανακαίνιση υφιστάμενων κτιρίων με στόχο της βελτίωσης της ενεργειακής τους συμπεριφοράς. Με τη βοήθεια του λογισμικού EnergyPlus γίνεται θερμική προσομοίωση των κτιρίων και εξάγονται συμπεράσματα που αφορούν στην κατανάλωση ενέργειας, στη θερμική άνεση, στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε ετήσια βάση για όλες τις υποψήφιες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας. Η μέθοδος UTASTAR χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των εναλλακτικών παρεμβάσεων και την επίλυση του πολυκριτήριου προβλήματος.

Τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας συνοψίζονται αφενός στην ακριβή αναπαράσταση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου και των μηχανισμών κατανάλωσης ενέργειας, και αφετέρου στη δυνατότητα προσομοίωσης του συνδυασμού διαφόρων τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας. Ακόμα, η πολυκριτήρια μέθοδος απόφασης προτείνει τις πιο ικανοποιητικές λύσεις λαμβάνοντας υπόψη τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα αλλά και την αντικρουόμενη φύση των κριτηρίων.

Παρόλα αυτά η δυσκολία τόσο της εύρεσης όσο και της μοντελοποίησης κατασκευαστικών, λειτουργικών και άλλων χαρακτηριστικών του κτιρίου αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα της μεθοδολογίας. Η αξιοπιστία των πληροφοριών που αφορούν αυτά τα χαρακτηριστικά καθορίζουν τελικά την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της θερμικής προσομοίωσης του κτιρίου. Ένας ακόμη περιορισμός είναι η δυσκολία εφαρμογής της προτεινόμενης πολυκριτήριας μεθόδου σε μεγαλύτερο αριθμό μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας.

Μελλοντικά, πέρα από τις ήδη εφαρμοσμένες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας, θα μπορούσε να εξεταστεί η εφαρμογή παθητικών ηλιακών συστημάτων όπως ηλιακοί τοίχοι, θερμοκήπια κ.α. Ακόμη, θα μπορούσε να μελετηθεί η εφαρμογή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες κ.τ.λ.) με σκοπό την κάλυψη των βασικών ενεργειακών αναγκών του κτιρίου και τη περαιτέρω αύξηση της ενεργειακής του αποδοτικότητας. Τέλος, μία μελέτη στα συστήματα κλιματισμού και θέρμανσης θα έδειχνε αν υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης της αποδοτικότητάς τους.

Βιβλιογραφία

1. Περδίο, Σ.Δ., *Ενεργειακή απόδοση κτιρίων και κατασκευή κήπων σε δώματα*. 2006.
2. Σανταμούρης, Μ., *Ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων και οι νέες τεχνικές για τη μείωσή της*. Available from: www.buildings.gr. 2004.
3. Siskos Y., G.E., and N.F.Matsatsinis ed. *UTA methods*. ed. S.G. J. Figueira, and M. Ehrhott. 2005, Springer: New York. 297-344.
4. ΚΑΠΕ, *Double Glazing in Southern Countries*. 2000,.
5. ΚΑΠΕ, *Οδηγοί ενεργειακής επιθεώρησης- Τεύχος 2*.
6. ASHRAE Handbook of Fundamentals SI Edition. 2005.
8. Paulssen, K, and Hermann.L., *Τεχνικό εγχειρίδιο για το φωτισμό*. Available from: www.eu-greenbuilding.org.
9. Hope,P., Martinac, I., *Biometeorology, Indoor Climate and Air Quality*. 1988.
10. Design Builder Manual. Available from: <http://www.designbuilder.co.uk/helpv1/>.
11. Παπαδόπουλος, Α.Μ. *Θερμική Άνεση στα Κτίρια. Νέα Πρότυπα και Βελτίωση Θερμικής Άνεσης στα Κτίρια*. 2006.
12. ΤΕΕ, *Τεχνική Οδηγία 2425/86: Εγκαταστάσεις σε κτίρια. Στοιχεία υπολογισμού φορτίων κλιματισμού κτιριακών χώρων*. 1986.
13. ASHRAE Handbook. *Ventilation for acceptable indoor air quality*. 2004.
14. Clements-Croome, D.J., et al., *Ventilation rates in schools*. Building and Environment, 2008. 43(3): p. 362-367.
16. Swaid, H., *Urban climate related aspects of the force-restore method*. Atmospheric Environment, 1995. 29(23): p. 3401-3409.
17. Yazdanian, M., and J. Klems, *Measurement of the Exterior Convective Film Coefficient for Windows in Low-Rise Buildings*, A.T. (1), Editor. 1994, Lawrence Berkeley Laboratory Report 34717.
18. Sparrow, E.M., J.W. Ramsey, and E.A. Mass *Effect of finite width on heat transfer and fluid flow about an inclined rectangular plate*. Journal of heat transfer, 1979. 101.
19. ASHRAE Transactions 98 (2), *Method of Measuring Nighttime U-Values Using the Mobile Window Thermal Test (MoWiTT) Facility*. 1992.
20. Illuminating Engineering Society of North America, *Lighting Handbook: Reference & Application*, 8th Edition. 1993, New York.
21. Adnot, J., *Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners (EECCAC)* 2003.
22. Vincke, P., *L'Aide multicritère à la Décision : Editions de L'Universiti*, 1988, FB708.00, 179 pages. European Journal of Operational Research, 1990. 44(2): p. 302-302.
23. Wilde, P.d. and M.v.d. Voorden, *Providing computational support for the selection of energy saving building components*. Energy and Buildings, 2004. 36(8): p. 749-758.
24. Becker, R., I. Goldberger, and M. Paciuk, *Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation*. Building and Environment, 2007. 42(9): p. 3261-3276.
25. Dascalaki, E. and M. Santamouris, *On the potential of retrofitting scenarios for offices*. Building and Environment, 2002. 37(6): p. 557-567.
26. Kolokotsa, D., Diakaki, C., Grigoroudis, E., Stavrakakis, G., Kalaitzakis, K., *Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings*. Advances in Building Energy Research, 2009. 3: p. 121-146.
27. Blondeau, P., M. Sprandio, and F. Allard, *Multicriteria analysis of ventilation in summer period*. Building and Environment, 2002. 37(2): p. 165-176.
28. Rutman, E., Inard, C., Bailly, A., Allard, F., *A global approach of indoor environment in an air-conditioned office room*. Building and Environment, 2005. 40(1): p. 29-37.

29. Rey, E., *Office building retrofitting strategies: multicriteria approach of an architectural and technical issue*. Energy and Buildings, 2004. 36(4): p. 367-372.
30. Martinaitis, V., A. Rogoza, and I. Bikmaniene, *Criterion to evaluate the "twofold benefit" of the renovation of buildings and their elements*. Energy and Buildings, 2004. 36(1): p. 3-8.
31. Wong, J.K.W. and Li. H., *Application of the analytic hierarchy process (AHP) in multi-criteria analysis of the selection of intelligent building systems*. Building and Environment, 2008. 43(1): p. 108-125.
32. Ματσατσίνης, Ν.Φ., *Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων*. 2006, Χανιά.
33. Botsaris, P. N., and Prebezanos, S., *A methodology for a thermal energy building audit*, Building and Environment 39 (2004), no. 2, 195-199.
34. Balaras, C. A., Drousa, K., Dascalaki, E., and Kontoyiannidis, S., *Heating energy consumption and resulting environmental impact of european apartment buildings*, Energy and Buildings 37 (2005), no. 5, 429-442.

Νομοθεσία

- Νόμος 3661/2008 [ΦΕΚ 89/Α/19/5/2008]. Μέτρα για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων και άλλες διατάξεις.
- Κανονισμός Θερμομόνωσης [ΦΕΚ 362 Δ'. 1979].
- Νόμος 3661: Σχέδιο Κανονισμού για την Ενεργειακή Αποδοτικότητα των Κτιρίων-KENAK
- Κανονισμός ενεργειακής αποδοτικότητας κτιρίων KENAK.
- Κανονισμός Ορθολογικής Χρήσης και Εξοικονόμησης Ενέργειας-KOXEE [ΦΕΚ 880/Β/19.8.1998]
- Κοινή Υπουργική Απόφαση [ΦΕΚ Β 651/27.04.2007]
- Κοινοτική Οδηγία 2002/91/ΕΚ (EPBD)