

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Model development for improving energy efficiency in buildings based
on genetic algorithms**

**Ανάπτυξη μοντέλου για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης
κτιρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων**

**Εξεταστική
επιτροπή:**

Γρηγορούδης Ευάγγελος

Καλαϊτζάκης Κώστας

Σταυρακάκης Γεώργιος

Chania 2014

Περίληψη

Η αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας αποτελεί ένα από τα κυριότερα θέματα που απασχολούν την ανθρωπότητα σήμερα. Τα μέτρα που χρησιμοποιούνται για την εξοικονόμηση ενέργειας ποικίλουν και μέσα από διαφορετικά κριτήρια όπως η ενεργειακή κατανάλωση, το επενδυτικό κόστος και η εκπομπή ρύπων, ο αποφασίζων πρέπει να λάβει τις καλύτερες αποφάσεις. Πολλές φορές, τα κριτήρια είναι ανταγωνιστικά και έτσι δημιουργείται ένα πολυστοχικό πρόβλημα λήψης αποφάσεων για το οποίο διάφορες τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως οι τεχνικές προσομοίωσης και οι τεχνικές πολυκριτήριας ανάλυσης. Στην παρούσα εργασία, αναπτύσσεται ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής διαχείρισης κτιρίων, δίνοντας βάρος στις προτιμήσεις του αποφασίζοντα. Τα κριτήρια που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι η ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, οι ετήσιες εκπομπές CO₂ και το κόστος επένδυσης. Η βελτιστοποίηση των κριτηρίων πραγματοποιείται με χρήση εξελικτικού-γενετικού αλγορίθμου που ενσωματώθηκε στην εφαρμογή GREENY, η οποία αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB και δίνει την δυνατότητα μέσα από ένα σύγχρονο γραφικό περιβάλλον να γίνει χρήση του γενετικού αλγορίθμου και των δεδομένων του προβλήματος.

Η δομή της παρούσας εργασίας αρχίζει με το θεωρητικό υπόβαθρο και τη βιβλιογραφική ανασκόπηση ενώ στην συνέχεια παρατίθεται το μαθηματικό πρότυπο, η δομή και λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου και ένα παράδειγμα χρήσης της εφαρμογής GREENY, καταλήγοντας σε χρήσιμα συμπεράσματα και προτάσεις για την βελτίωση της παρούσας αντιμετώπισης του προβλήματος της ενεργειακής διαχείρισης κτιρίων.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	5
1.1 Περιγραφή ερευνητικού αντικειμένου.....	5
1.2 Αναγκαιότητα αναπτυχθέντος μοντέλου	6
1.3 Στόχοι και δομή της εργασίας.....	7
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	10
2.1 Εισαγωγή	10
2.2 Πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων (ΠΑΑ)	14
2.2.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο	14
2.2.2 Βασικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις λήψης αποφάσεων	15
2.3 Κριτήρια στη λήψη αποφάσεων για την βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων	15
2.4 Τεχνικές λήψης αποφάσεων για την βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων	19
2.4.1 Μεθοδολογίες αξιολόγησης ενεργειακής απόδοσης κτιρίων	20
2.4.1.1 Προσεγγίσεις μη-πραγματικού χρόνου.....	23
2.4.1.2 Προσεγγίσεις πραγματικού χρόνου	26
2.5 Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές.....	29
3. Μαθηματικό πρότυπο	30
3.1 Βασικές αρχές	30
3.2 Μεταβλητές απόφασης και περιορισμοί.....	31
3.2.1 Μεταβλητές απόφασης και περιορισμοί του κτιριακού κελύφους.....	31
3.2.2 Μεταβλητές απόφασης και περιορισμοί των συστημάτων.....	36
3.3 Κριτήρια απόφασης	41
3.3.1 Ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας	41
3.3.2 Εκπομπές CO ₂	50
3.3.3 Κόστος επένδυσης	51
3.4 Διαδικασία επίλυσης προτύπου απόφασης.....	54

4. Γενετικός Αλγόριθμος	56
4.1 Εισαγωγή	56
4.2 Ρύθμιση και εφαρμογή γενετικού αλγορίθμου	59
5. Εφαρμογή GREENY	64
5.1 Εισαγωγή στο GREENY®	64
5.2 Παραδειγμα εφαρμογής	71
5.3 Ανάλυση και επίλυση προτύπου	86
Συμπεράσματα	93
Βιβλιογραφία	95

1. Εισαγωγή

1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ

Η αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας αποτελεί ένα από κυριότερα θέματα που απασχολούν την ανθρωπότητα σήμερα. Ο κτιριακός τομέας συγκαταλέγεται στους τομείς οι οποίοι εισάγονται καθημερινά στην ατζέντα ενεργειακών συναντήσεων και πρότζεκτ της Ε.Ε αλλά και των αναπτυγμένων κρατών. Δεν θα μπορούσαν άλλωστε να τον αγνοήσουν, όντας ο τομέας του οποίου η ενέργεια αντιστοιχεί στο 40% της συνολικής κατανάλωσης, ενισχύοντας την εκπομπή επικίνδυνων ποσοτήτων CO_2 στην ατμόσφαιρα και γενικότερα την υπερθέρμανση του πλανήτη.

Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή πολιτική στα θέματα ενέργειας, υπάρχει σαφής προσανατολισμός για τη διατήρηση της ενέργειας και την βελτίωση της περιβαλλοντικής ποιότητας του εσωτερικού των κτιρίων. Η πολιτική αυτή περιλαμβάνει δράσεις όπως η υιοθέτηση της οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση κτιρίων (EPBD) 2002/91/EC, αλλά και στόχους που έχουν θεσπιστεί (2007-2020), οι οποίοι περιλαμβάνουν 20% μείωση των αερίων «θερμοκηπίου», 20% αύξηση στην ενεργειακή απόδοση αλλά και αύξηση της ανανεώσιμης ενέργειας κατά 20% σε σχέση με τη συνολική κατανάλωση.

Μερικά από τα μέτρα που ήδη λαμβάνονται για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων κατηγοριοποιούνται σε α) μέτρα που αφορούν στο σχεδιασμό, την κατασκευή ή παρεμβάσεις επί του κτιριακού κελύφους(σκίαση, μόνωση κ.α.) και β) μέτρα που αφορούν στο σχεδιασμό, ρύθμιση και συντήρηση των ενεργειακών εγκαταστάσεων του κτιρίου όπως τα συστήματα θέρμανσης/ψύξης, ζεστού νερού, φωτισμού κ.λπ. Πρέπει επίσης να τονιστεί ότι μέσω της επιστημονικής έρευνας και εξέλιξης της τεχνολογίας, νέες λύσεις αναδεικνύονται συνεχώς, όπως η παραγωγή

ενέργειας από συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας(ΑΠΕ), υβριδικά συστήματα κ.α.

Το πρόβλημα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη πολλών αλλά και ανταγωνιστικών στόχων αν λάβουμε υπόψη ότι για το σχεδιασμό αλλά και την υλοποίηση παρεμβάσεων σε ένα κτίριο, σημαντικοί παράγοντες είναι η αξιολόγηση, επιλογή και προσαρμογή των εναλλακτικών μέτρων βάσει κριτηρίων, όπως η ενεργειακή κατανάλωση, το οικονομικό κόστος, το περιβαλλοντικό κόστος, η αισθητική, κ.α. Γίνεται λοιπόν σαφές ότι το πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο αποφασίζων είναι πρόβλημα απόφασης με πολλαπλά κριτήρια. Στα συγκεκριμένα προβλήματα, τα κριτήρια είναι ανταγωνιστικά καθιστώντας την εύρεση λύσης που να ικανοποιεί ταυτόχρονα όλα τα κριτήρια αδύνατη. Τα προβλήματα πολυστοχικού προγραμματισμού εντάσσονται στα προβλήματα χαμηλού βαθμού δόμησης, στα οποία η λύση δεν προϋπάρχει, αλλά αποτελεί αντικείμενο προοδευτικής αναζήτησης, ενώ οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση τους έχουν ως στόχο την εύρεση μιας ενδιάμεσης αποτελεσματικής λύσης.

1.2 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΑΝΑΠΤΥΧΘΕΝΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Πολλές είναι οι προσπάθειες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα στον τομέα της ενεργειακής απόδοσης αλλά και του εσωτερικού περιβάλλοντος των κτιρίων. Οι πρώτοι που συμπεριέλαβαν τεχνικές βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλά κριτήρια ήταν οι Gero et al. (1983). Από τότε, έχουν γίνει σημαντικά βήματα, όπως η εφαρμογή συστήματος και προτύπου απόφασης στην παρακολούθηση της λειτουργίας των κτιρίων για την ρύθμιση των συστημάτων υποστήριξης (Doukas et al., 2006) όπως και για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του χρήστη σε σχέση με την θερμική άνεση, την ποιότητα του αέρα και την οπτική άνεση (Kolokotsa et al., 2002).

Αξίζει να αναφερθεί και η προσπάθεια των Wright et al.(2002) και Blondeau et al.(2002) για την ενσωμάτωση του κόστους επένδυσης, του κόστους λειτουργίας κτιρίου και της θερμικής άνεσης ή της ποιότητας αέρα σε ένα ενιαίο σύστημα. Επιπλέον, όσο η τεχνολογία προχωρά, τόσο μεγαλώνει η ανάγκη για ανάπτυξη μοντέλων για την ενσωμάτωση των νέων τεχνολογιών στον κτιριακό τομέα. Σε αυτό το πλαίσιο έχουν κινηθεί διάφοροι ερευνητές, όπως οι Brazillan and Deo Prasad (2002), οι οποίοι μελέτησαν την απόδοση εγκατάστασης φωτοβολταϊκών στοιχείων σε συνδυασμό με σύστημα συμπαραγωγής αλλά και οι Rylatt et al.(2001) που ασχολήθηκαν με την χρήση ηλιακής ενέργειας στο αστικό περιβάλλον (π.χ. φωτοβολταϊκά και παθητικά συστήματα). Σημαντική είναι και η προσπάθεια των Kolokotsa et al. (2006), οι οποίοι επιχείρησαν να αυτοματοποιήσουν την διαδικασία ενεργειακής επιθεώρησης με την ανάπτυξη ενός μοντέλου που στόχο είχε την ενεργειακή και περιβαλλοντική κατάταξη κτιρίων και την πρόταση εναλλακτικών σεναρίων βελτίωσης των εσωτερικών τους συνθηκών.

Η παρούσα εργασία καλείται να συμβάλει στην περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση των συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων που έχουμε μέχρι σήμερα χρησιμοποιώντας πολυστοχικό προγραμματισμό (Collette and Siarry, 2004; Ehrgott, 2005), μία επιστημονική περιοχή που περιέχει πληθώρα τεχνικών, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων απόφασης.

1.3 ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα για την ενεργειακή επιθεώρηση κτιρίων, είναι κυρίως δύο (Kolokotsa et al., 2009). Η πρώτη μέθοδος περιλαμβάνει τη διενέργεια ανάλυσης του κτιρίου με χρήση προσομοίωσης για έναν αριθμό σεναρίων, κάθε ένα εκ των οποίων περιλαμβάνει συγκεκριμένα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας, τα οποία προκαθορίζονται από τον ειδικό σύμβουλο σε θέματα ενέργειας κτιρίων (π.χ.

ενεργειακός επιθεωρητής). Κατά τη δεύτερη μέθοδο, γίνεται χρήση τεχνικών πολυκριτήριας ανάλυσης σε συνδυασμό με προσομοίωση για την επιλογή μέτρων που έχουν και σε αυτή τη περίπτωση διαμορφωθεί από τον σύμβουλο σε θέματα ενέργειας κτιρίων. Τα προβλήματα που παρουσιάζονται και στις δύο περιπτώσεις, είναι ότι η λύση βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην εμπειρία και στις γνώσεις του ενεργειακού συμβούλου αλλά και η απουσία της δυνατότητας του αποφασίζοντα (π.χ. ιδιοκτήτης κτιρίου) να συμμετέχει ενεργά στη διαδικασία. Λύση στα προβλήματα αυτά προσπάθησαν να δώσουν οι Diakaki et al., 2008, οι οποίοι διενήργησαν προκαταρκτική έρευνα όσον αφορά την δυνατότητα ανάπτυξης ενός πολυστοχικού πρότυπου υποστήριξης αποφάσεων για τη βελτίωση της ενεργειακής επιθεώρησης κτιρίων. Βασιζόμενοι στην συγκεκριμένη μελέτη, οι Diakaki et al., 2010 ανέπτυξαν ένα πρότυπο ικανό να ξεπεράσει τα παραπάνω προβλήματα, προσθέτοντας μεταβλητές απόφασης που αφορούν το κτιριακό κέλυφος και τα ενεργειακά συστήματα του κτιρίου στη φάση του σχεδιασμού, αλλά και παρέχοντας την δυνατότητα αξιολόγησης μη πεπερασμένου αριθμού μέτρων και επιλογής της βέλτιστης(μη κυριαρχούμενη) λύσης βάσει των προτιμήσεων του αποφασίζοντα σε σχέση με συγκεκριμένα κριτήρια απόφασης. Το μοντέλο που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία διαμορφώθηκε με βάση την προσπάθεια αυτή και επεκτάθηκε ώστε ο χειρισμός των κριτηρίων απόφασης να προκύπτει μετά από χρήση γενετικού αλγορίθμου ο οποίος έχει την δυνατότητα να χειριστεί μεγάλο αριθμό μεταβλητών. Η δομή και η λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε αναλύεται στο 4^ο κεφάλαιο.

Τα κριτήρια απόφασης που χρησιμοποιούνται είναι:

A) Η ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας

B) Οι ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα

Γ) Το κόστος επένδυσης

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση, τόσο του θεωρητικού υπόβαθρου, όσο και των τεχνικών αντιμετώπισης του προβλήματος της ενεργειακής επιθεώρησης κτιρίων. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μαθηματικό πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε. Στο τέταρτο, παρουσιάζεται ο γενετικός αλγόριθμος που εφαρμόστηκε ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή που αναπτύχθηκε για να υιοθετήσει το μοντέλο μας και η λειτουργία του. Στο έκτο κεφάλαιο, αναπτύσσονται τα συμπεράσματα αλλά και οι προοπτικές για μελλοντική έρευνα και τέλος, η βιβλιογραφία.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας στον κτιριακό τομέα είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για την διατήρηση των φυσικών πόρων. Επιπλέον, τα οικονομικά οφέλη από την χρήση αποδοτικών τεχνολογιών για την διαχείριση ενέργειας αποτελεί σημαντικό κίνητρο για τους κατόχους των κτιρίων. Για την επιλογή των κατάλληλων δράσεων και στρατηγικών για ενεργειακή αποδοτικότητα αλλά και τη μείωση του αποτυπώματος του κτιρίου στο περιβάλλον, είτε κατά την φάση της σχεδίασης είτε κατά τη φάση της λειτουργίας του, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι.

Ο στόχος κατά τη φάση της σχεδίασης ή ανακαίνισης ενός κτιρίου συνήθως είναι (Kolokotsa et al., 2009):

- Συμμόρφωση του κτιρίου με τους κανονισμούς που αφορούν τον σχεδιασμό ή τη φάση λειτουργίας του κτιρίου
- Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίου ανά τομέα (π.χ. θέρμανση) ή συνολικά
- Βελτίωση του εσωτερικού περιβάλλοντος
- Μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος του κτιρίου
- Μείωση του ενεργειακού κόστους

Συγκεκριμένα, στη φάση του σχεδιασμού, στόχος είναι η καλύτερη ισορροπία μεταξύ των κρίσιμων παραμέτρων σχεδιασμού σε σχέση με ένα σύνολο κριτηρίων που υπόκεινται σε συγκεκριμένους περιορισμούς. Οι βασικές μεταβλητές απόφασης που συνεισφέρουν στο ενεργειακό και περιβαλλοντικό φορτίο ενός κτιρίου και επηρεάζουν την άνεση των κατοίκων αλλά και την ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό, μπορεί να είναι:

- Το σχήμα του κτιρίου
- Ο προσανατολισμός του κτιρίου
- Η μάζα του κτιρίου
- Η σκίαση του κτιρίου
- Ο εξαερισμός του κτιρίου

Συνήθως, ο σχεδιαστής (π.χ. ενεργειακός σύμβουλος) χρησιμοποιεί τεχνικές προσομοίωσης μοντέλων κτιρίων για να διερευνήσει προκαθορισμένες λύσεις οι οποίες υπόκεινται στις προτιμήσεις του αποφασίζοντα (κόστος κτιρίου, αισθητική του κτιρίου κ.λπ.).

Κατά τη λειτουργική φάση του κτιρίου, οι επιλογές γίνονται μετά από ενεργειακό έλεγχο και έρευνα (Krafft, 2000). Ο ενεργειακός έλεγχος περιλαμβάνει από μία σύντομη περιήγηση μέχρι πλήρη προσομοίωση του μοντέλου σε υπολογιστή.

Τα στάδια της διαδικασίας βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων κατά τη λειτουργική φάση είναι (Kolokotsa et al., 2009):

1. Ανάλυση κτιρίου
2. Επιτόπιος έλεγχος
3. Δημιουργία μοντέλου
4. Αξιολόγηση οικονομικών ενεργειακών μέτρων

Αναλυτικά, η **ανάλυση του κτιρίου** είναι η αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των ενεργειακών συστημάτων και της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου. Στοιχεία όπως λογαριασμοί που αφορούν τις καταναλώσεις μπορούν αν διερευνηθούν σε βάθος χρόνου να βοηθήσουν στην προβολή εποχικών και καιρικών φαινομένων που επηρεάζουν τις καταναλώσεις.

Κατά τον **επιτόπιο έλεγχο**, αναγνωρίζονται μέτρα για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου. Αυτό επιτυγχάνεται με την καταγραφή τυχόν κρίσιμων παραμέτρων μέσα από μία σύντομη περιήγηση ή μέσα από αναλυτική διαδικασία καταγραφής. Κάποιες από τις δράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία αυτή είναι:

- Προσδιορισμός των αναγκών του αποφασίζοντα
- Έλεγχος των διαδικασιών συντήρησης και λειτουργίας του κτιρίου
- Εξακρίβωση των συνθηκών λειτουργίας των κύριων ενεργειακών συστημάτων του κτιρίου (συστήματα θέρμανσης, ψύξης κ.λπ.)
- Εκτίμηση της χρήσης του κτιρίου σε σχέση με τον αριθμό κατοίκων του κτιρίου, τον χρόνο χρήσης κ.λπ.

Το στάδιο της **δημιουργίας μοντέλου** ασχολείται με τη δημιουργία ενός μοντέλου χρησιμοποιώντας ενεργειακή ανάλυση και εργαλεία προσομοίωσης το οποίο αντιπροσωπεύει την πραγματική διαχείριση ενέργειας και τις λειτουργικές συνθήκες του κτιρίου. Αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση των διαθέσιμων εναλλακτικών μέτρων.

Τέλος, κατά την **αξιολόγηση οικονομικών ενεργειακών μέτρων** αξιολογούνται οι επιδόσεις των εναλλακτικών μέτρων στα κριτήρια απόφασης που περιλαμβάνει η ανάλυση (κόστος, εκπομπές κ.α.).

Η ύπαρξη διαφορετικών υποσυστημάτων που αλληλεπιδρούν, καθιστά τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής επιθεώρησης κτιρίων ένα πολύπλοκο πρόβλημα. Τα υποσυστήματα αυτά είναι (Kolokotsa et al., 2009):

- Δομικά στοιχεία και υλικά
- Συστήματα (θέρμανσης, ψύξης κ.α.)

- Συστήματα ενεργειακής διαχείρισης και άλλοι παράμετροι που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση

Συνεπώς, η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων παίρνοντας τις βέλτιστες αποφάσεις για όλο το σύστημα μέσα από ένα σύστημα απόφασης που περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα (Kolokotsa et al., 2009):

1. Εξακρίβωση στόχου για τον οποίο θα παρθούν οι αποφάσεις
2. Εξακρίβωση εναλλακτικών επιλογών και στρατηγικών
3. Εκτίμηση της απόδοσης όλων των εναλλακτικών σε σχέση με τα καθορισμένα κριτήρια
4. Προσθήκη βαρών στα κριτήρια
5. Αξιολόγηση των επιλογών και της συνολικής απόδοσης

Οι τεχνικές βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες (Kampelis 2011):

- Τεχνικές που χρησιμοποιούν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και αφορούν τη ρύθμιση παραμέτρων της λειτουργίας του κτιρίου
- Τεχνικές που έχουν ως στόχο τον προσδιορισμό υλικών και συστημάτων και οι οποίες δεν αλληλεπιδρούν με το κτίριο σε πραγματικό χρόνο

Η παρούσα εργασία αφορά τη δεύτερη κατηγορία, όπου το πρόβλημα εστιάζεται στην επιλογή υλικών και συστημάτων κατά τον σχεδιασμό ενός νέου κτιρίου για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του.

2.2 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ (ΠΑΑ)

2.2.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο

Η ΠΑΑ είναι ο χώρος της επιχειρησιακής έρευνας ο οποίος εξετάζει προβλήματα απόφασης λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλά κριτήρια, ενώ η αξιολόγηση των επιλογών πραγματοποιείται σύμφωνα με τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα. Συνήθως, το μεθοδολογικό αυτό πλαίσιο αποτελείται από τα εξής στάδια (Kampelis, 2011):

1. Ανάλυση της ανταγωνιστικής φύσης των κριτηρίων
2. Μοντελοποίηση των προτιμήσεων του αποφασίζοντα
3. Εντοπισμός ικανοποιητικών λύσεων

Για την υλοποίηση των παραπάνω σταδίων ο Hajkowicz(2003) πρότεινε ένα γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο περιγράφει την διαδικασία αντιμετώπισης πολυκριτήριων προβλημάτων σε τρία βήματα:

1. **Δόμηση προβλήματος:** Αυτή η κρίσιμη φάση της ΠΑΑ συνήθως απαιτεί τον μεγαλύτερο φόρτο εργασίας. Περιλαμβάνει την εξακρίβωση των διαφορετικών επιλογών και κριτηρίων και την εξασφάλιση μέτρων για την βελτίωση της απόδοσης.
2. **Ανάλυση προβλήματος:** Η φάση αυτή περιλαμβάνει την δημιουργία της σύνθετης συνάρτησης, την απόκτηση πληροφοριών από τον αποφασίζοντα για τη σχετική σημαντικότητα των κριτηρίων (βάρη) και τη μετατροπή των κριτηρίων ώστε να έχουν ισόμετρες μονάδες για την ενσωμάτωση τους στην συνάρτηση.
3. **Αξιολόγηση:** Κατά τη φάση της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, διάφορες μέθοδοι ΠΑΑ, μέτρα απόδοσης και διαφορετικά βάρη, ελέγχουν τα αποτελέσματα. Ο αποφασίζων είναι τότε σε θέση να πάρει την τελική απόφαση.

Διάφορα μεθοδολογικά πλαίσια παρουσιάζουν το ίδιο πρόβλημα με μικρές διαφορές όπως του Roy (1996).

2.2.2 Βασικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις λήψης αποφάσεων

Για τις διάφορες μεθοδολογικές προσεγγίσεις λήψης αποφάσεων συγκεκριμένα, οι Pardalos et al. (1995) πρότειναν την ακόλουθη κατηγοριοποίηση:

1. Πολυκριτήριος μαθηματικός προγραμματισμός (multi-objective mathematical programming)
2. Θεωρία πολυκριτήριας αξίας / χρησιμότητας (multi-attribute value / utility theory)
3. Θεωρία των σχέσεων υπεροχής (outranking relations theory)
4. Αναλυτική-συνθετική προσέγγιση (preference disaggregation approach)

Η θεωρία πολυκριτήριας αξίας, η θεωρία των σχέσεων και η αναλυτική-συνθετική προσέγγιση χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση διακριτών προβλημάτων λήψης αποφάσεων. Αντίθετα, ο πολυκριτήριος μαθηματικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται και σε περιπτώσεις πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων με συνεχείς μεταβλητές, όπως το πρόβλημα της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων της παρούσας εργασίας.

2.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΤΗ ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ

Τα κριτήρια για την λήψη αποφάσεων στην ενεργειακή διαχείριση κτιρίων χωρίζονται στις παρακάτω 5 κατηγορίες (Kolokotsa et al., 2009; Kampelis 2011):

- Κόστος
- Ενέργεια
- Φυσικό περιβάλλον
- Εσωτερικό περιβάλλον

- Άλλο

Για το **κόστος**, τα κριτήρια που έχουν χρησιμοποιηθεί ως σήμερα σε χρονολογική σειρά είναι:

- Άμεσο κόστος και κόστος επένδυσης (Rosenfeld and Shohet, 1999)
- Οικονομική διάρκεια ζωής (Rosenfeld and Shohet, 1999)
- Ετήσιο συνεχές κόστος συντήρησης (Rosenfeld and Shohet, 1999; Rey, 2004)
- Ετήσιο συνεχές κόστος (Rey, 2004)
- Καθαρή παρούσα αξία ενεργειακής επένδυσης (Martinaitis et al., 2004)
- Εσωτερικός ρυθμός απόδοσης ενεργειακής επένδυσης (Martinaitis et al., 2004)
- Κόστος διατηρητέας ενέργειας (Martinaitis et al., 2004)
- Κόστος κύκλου ζωής (Wang et al., 2005)
- Κόστος ενεργειακής αναβάθμισης (Gholap and Khan, 2007)

Για την **ενέργεια** αντίστοιχα:

- Θερμικό και ψυκτικό φορτίο για κλιματιζόμενα κτίριο (D'Cruz and Radford, 1987; Bouchlaghem, 2000)
- Κανονικοποιημένη ετήσια κατανάλωση ενέργειας και ενέργεια θέρμανσης σε kWh/m² (Rey, 2004; Zhu, 2006)
- Ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση σε kWh/m² (Rey, 2004)
- Ενσωματωμένη ενέργεια (Chen et al., 2006)
- Δείκτης ενέργειας-χρόνου (Chen et al., 2006)
- Εξοικονόμηση ενέργειας (Gholap and Khan, 2007)

Για το **φυσικό περιβάλλον** αντίστοιχα:

- Ετήσιες εκπομπές CO₂ (δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη σε kg_{eq}CO₂) (Rey, 2004)

- Μείωση του δυναμικού εκπομπών υπερθέρμανσης του πλανήτη (Alanne, 2004)
- Περιβαλλοντικό αποτύπωμα κύκλου ζωής (Wang et al., 2005)
- Δυναμικό τοξικότητας σε $\text{kg}_{\text{eq}}\text{SO}_2/\text{m}^2$ (Rey, 2004; Alanne et al., 2007)
- Χρήση νερού (Alanne et al., 2007)

Τα κριτήρια που αφορούν το **εσωτερικό περιβάλλον** διακρίνονται σε αυτά που σχετίζονται με την θερμική άνεση, την οπτική άνεση, την ποιότητα εσωτερικού αέρα και την ακουστική άνεση.

Συγκεκριμένα, για τη θερμική άνεση, τα κριτήρια είναι:

- Μέσος αναμενόμενος θερμικός δείκτης (ISO, 1984)
- Ξηρή συνισταμένη θερμοκρασία για μη-κλιματιζόμενα κτίρια (Bouchlaghem, 2000)
- Εσωτερική θερμοκρασία και υγρασία (Jaggs and Palmer, 2000)
- Ώρες μη-άνεσης κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ή του χειμώνα (Roulet et al., 2002)
- Ημερήσια υπερθέρμανση σε $^{\circ}\text{K}$ (Rey, 2004)
- Ποσοστιαία μη ικανοποίηση ατόμων (Rutman et al., 2005)
- Δείκτης έντασης θερμικής δυσανεξίας (Becker et al., 2007)

Για την οπτική άνεση αντίστοιχα:

- Διαθεσιμότητα φυσικού φωτός (Radford and Gero, 1980)
- Φωτισμός και οπτική άνεση (Bluyssen, 2000; Rey, 2004)
- Ποσοστό φυσικού φωτισμού (Rey, 2004)
- Δείκτης μη ανεκτικότητας εκτυφλωτικού φωτισμού (Becker et al., 2007)

Για την ποιότητα εσωτερικού αέρα:

- Δείκτης συγκέντρωσης CO_2 (Kolokotsa et al., 2001; Doukas et al., 2007)

- Μέγιστος λόγος μέσης συγκέντρωσης μολυσματικής ουσίας προς τη χρονική διάρκεια παραμονής και την τιμή κατωφλίου για βραχεία ή μακρά έκθεση (Blondeau et al., 2002)
- Ρυθμός εξαερισμού (Blondeau et al., 2002)

Για την ακουστική άνεση:

- Επίπεδα θορύβου σε dB σε εργασιακά περιβάλλοντα (Rey, 2004)
- Δείκτης κατάταξης θορύβου (Rutman et al., 2005)

Άλλα κριτήρια που έχουν χρησιμοποιηθεί για την βελτίωση της ενεργειακής διαχείρισης κτιρίων είναι:

- Διάρκεια κατασκευής (Rosenfeld and Shohet, 1999)
- Αξιολόγηση και ταξινόμηση λειτουργικότητας σε σχέση με τις βέλτιστες πρακτικές (Rosenfeld and Shohet, 1999)
- Παράγοντες αβεβαιότητας (Rosenfeld and Shohet, 1999)
- Κόστος επικοινωνίας μεταξύ χώρων (Homoud, 2001)
- Χωροθέτηση δραστηριοτήτων εντός χώρων (Homoud, 2001)
- Εργονομία σε σχέση με τον βαθμό υλοποίησης της δράσης βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης, την αποτελεσματικότητα όσον αφορά την άνεση, τις απαιτήσεις χώρου, την προσαρμοστικότητα στην υφιστάμενη κατασκευή, τη χρηστικότητα και την εξυπηρετικότητα (Alanne, 2004)
- Απόδοση και αξιοπιστία συστήματος διαχείρισης απόδοσης κτιρίου και ευφώνων συστημάτων (Wong and Li, 2008)
- Ασφάλεια (πυρός, συναγερμός κ.α.) (Wong and Li, 2008)

Τα περισσότερα από τα παραπάνω κριτήρια είναι ανταγωνιστικά. Συνεπώς, είναι αδύνατο να βρεθεί λύση που να τα ικανοποιεί όλα ταυτόχρονα. Γι' αυτό το λόγο,

χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές λήψης αποφάσεων τόσο στην φάση της δόμησης όσο και στη λειτουργική φάση με σκοπό την εύρεση λύσης που θα είναι ικανοποιητική σύμφωνα με τις επιλογές και τις προτεραιότητες του αποφασίζοντα.

2.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ

Η επιλογή των δράσεων για κάθε κτίριο εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του, τη σχεδίαση και τα κριτήρια τα οποία οι δράσεις αυτές εξυπηρετούν. Μια μέθοδος υποστήριξης αποφάσεων που αφορά την επιλογή δράσεων για εξοικονόμηση ενέργειας σε κτίρια κατά τον αρχικό τους σχεδιασμό προτάθηκε από τους Wilde and Van der Voorden (2004). Οι διαθέσιμες εναλλακτικές επιλογές περιλάμβαναν εξελεγμένους τύπους παραθύρου, φωταγωγούς και φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Επιπλέον, η επιρροή των μεταβλητών σχεδιασμού του κτιρίου, η βελτιστοποίηση του συστήματος εξαερισμού, η ποιότητα του εσωτερικού αέρα και η ενεργειακή απόδοση του κτιρίου αποτέλεσαν κομμάτι έρευνας για τους Becker et al. (2007). Οι εναλλακτικές στην συγκεκριμένη έρευνα συνδέονται αφενός με το σχεδιασμό του κτιρίου π.χ. προσανατολισμός, μέγεθος παραθύρων, θερμομόνωση, μάζα, χρώμα προσόψεων και αφετέρου με τις διάφορες τεχνικές εξαερισμού.

Διάφορες δράσεις προτείνονται από διάφορους ερευνητές όπως οι Alanne(2004) και οι Doukas et al. (2008). Ενδεικτικά κάποιες από αυτές είναι (Kolokotsa et al., 2009):

- Αναβάθμιση φωτισμού (αντικατάσταση λαμπτήρων κ.α.)
- Αναβάθμιση συστημάτων θέρμανσης-ψύξης (εγκατάσταση συσκευών ελέγχου κ.α.)
- Αναβάθμιση ηλεκτρομηχανικών εξοπλισμού (διόρθωση ποιότητας ισχύος κ.α.)

- Άλλες αναβαθμίσεις (εγκατάσταση ΑΠΕ κ.α.)

Ένα παράδειγμα εναλλακτικών σε στρατηγική μορφή παρουσίασαν οι Rosenfeld and Shohet (1999) και περιλαμβάνουν ολική αναβάθμιση, μερική αναβάθμιση, ανακατασκευή του κτιρίου και κατασκευή νέου κτιρίου σε κοντινή περιοχή.

Επιπλέον, όσον αφορά τις στρατηγικές (συνδυασμός δράσεων που οδηγούν σε συγκεκριμένο αποτέλεσμα), ο Rey (2004) πρότεινε τα ακόλουθα:

- Στρατηγική σταθεροποίησης που περιλαμβάνει ένα σετ δράσεων που δεν αλλοιώνουν την εμφάνιση του κτιρίου
- Στρατηγική αντικατάστασης που περιλαμβάνει ένα σετ δράσεων που αλλοιώνουν την εμφάνιση του κτιρίου σε μεγάλο βαθμό
- Η στρατηγική διπλής όψης που αφορά την προσθήκη νέας όψης παραθύρου.

Γενικά, οι προσπάθειες για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων εστιάζουν σε συγκεκριμένες δράσεις ή κατηγορίες δράσεων χωρίς την υιοθέτηση συνολικής προσέγγισης κυρίως λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος.

2.4.1 Μεθοδολογίες αξιολόγησης ενεργειακής απόδοσης κτιρίων

Γενικά, τα προβλήματα απόφασης βασίζονται σε ένα σετ εναλλακτικών οι οποίες μπορεί να είναι (Ehrgott, 2005):

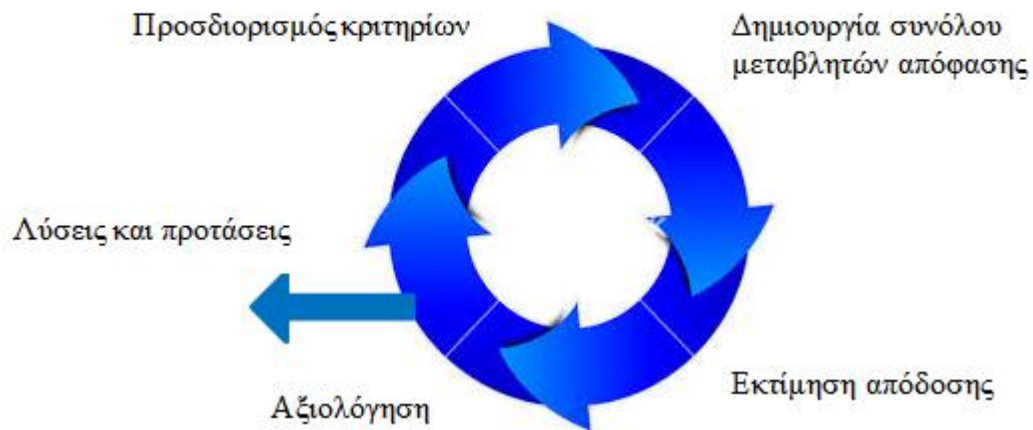
- Προβλήματα με μεγάλο αλλά πεπερασμένο αριθμό εναλλακτικών οι οποίες είναι γνωστές. Συνήθως, ο στόχος είναι η επιλογή της βέλτιστης εναλλακτικής σύμφωνα με τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα
- Διακριτά προβλήματα όπου οι εναλλακτικές περιγράφονται από περιορισμούς σε μορφή μαθηματικών συναρτήσεων
- Συνεχή προβλήματα όπου οι περιγράφονται από περιορισμούς

Η λήψη της σωστής απόφασης είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Βελτιστοποίηση είναι η τεχνική μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης συγκεκριμένων αντικειμενικών συναρτήσεων υπό περιορισμούς. Άρα, οι επιλογές κατά τη βελτιστοποίηση εξαρτώνται από τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος.

Στον κτιριακό τομέα, η επιλογές κατά τη βελτιστοποίηση περιλαμβάνουν τη βαθμολόγηση προδιαγεγραμμένων εναλλακτικών ή στρατηγικών ως προς τα εξεταζόμενα κριτήρια. Τα κυριότερα ζητήματα που προκύπτουν είναι:

- Τα κριτήρια είναι συνήθως περισσότερα από ένα και ανταγωνιστικά (κατανάλωση ενέργειας και κόστος κ.α.)
- Οι εναλλακτικές περιλαμβάνουν ένα αριθμό από μεταβλητές απόφασης που δεν τίθενται προς εξέταση λόγω της μη σημαντικότητας τους

Συνεπώς, η διαδικασία αξιολόγησης είναι μια επαναληπτική διαδικασία η οποία επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα κριτήρια, τις εναλλακτικές, τις δράσεις, τις στρατηγικές και τελικά από τον αποφασίζοντα. Η επαναληπτική διαδικασία παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1:



Σχήμα 2.1: Επαναληπτική διαδικασία υποστήριξης αποφάσεων

Οι μέθοδοι για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ενεργειακής διαχείρισης κτιρίων κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους στις παρακάτω κατηγορίες:

- Προσεγγίσεις μη-πραγματικού χρόνου
- Προσεγγίσεις πραγματικού χρόνου

Η βασική κατηγοριοποίηση των προσεγγίσεων γίνεται με γνώμονα το αν αυτές αλληλεπιδρούν με τον αποφασίζοντα σε πραγματικό χρόνο ή όχι. Οι μη-πραγματικού χρόνου στοχεύουν στην ανάδειξη εναλλακτικών όπως η επιλογή μονωτικών υλικών, δομής τοιχοποιίας κ.α. και αναμένεται να οδηγήσουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου. Αυτές οι προσεγγίσεις μπορούν να εφαρμοστούν είτε κατά την διάρκεια του σχεδιασμού είτε κατά τη φάση της ενεργειακής αναβάθμισης του κτιρίου. Αντίθετα, οι προσεγγίσεις πραγματικού χρόνου στοχεύουν στην ανάδειξη συγκεκριμένων παραμέτρων που αφορούν τις ρυθμίσεις λειτουργίας του κτιρίου με βάση μετρήσεις πραγματικού χρόνου που πραγματοποιούνται με συστήματα ενεργειακής

διαχείρισης κτιρίων (Σ.Ε.Δ.Κ). Τέτοιου είδους συστήματα εξασφαλίζουν την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Οι προσεγγίσεις μη-πραγματικού και πραγματικού χρόνου αναλύονται παρακάτω.

2.4.1.1 Προσεγγίσεις μη-πραγματικού χρόνου

Οι προσεγγίσεις μη-πραγματικού χρόνου διακρίνονται σε προσεγγίσεις που αφορούν προβλήματα με διακριτές μεταβλητές και προσεγγίσεις που αφορούν προβλήματα με συνεχείς ή μεικτές μεταβλητές και είναι οι ακόλουθες (Kolokotsa et al., 2009;Kampelis 2011):

- Προσεγγίσεις βασισμένες στην προσομοίωση
- ΠΑΑ (Πολυκριτήρια ανάλυση)
- Συνδυασμός προσεγγίσεων
- Πολυστοχικός προγραμματισμός
- Τεχνικές προβλημάτων απόφασης συνεχών η μεικτών μεταβλητών

Οι τεχνικές **προσομοίωσης** διακρίνονται σε αναλυτικές και λεπτομερείς και συνήθως υλοποιούνται μέσω κάποιου προγράμματος λογισμικού (Clark, 2001). Τα κριτήρια επιλογής του κατάλληλου λογισμικού μπορεί να είναι:

- Τύπος κριτηρίων απόφασης
- Απαιτούμενη ακρίβεια
- Ευκολία χρήσης
- Διαθεσιμότητα απαιτούμενων δεδομένων
- Είδος μελέτης

Η **ΠΑΑ** εφαρμόζεται από πολλούς ερευνητές και περιλαμβάνει τεχνικές όπως η θεωρία της πολλαπλής χρησιμότητας (Keeney and Raifa, 1993) και η μέθοδος

κατάταξης ELECTRE (Roy, 1991). Για τον ενεργειακό σχεδιασμό κτιρίου, κάποιες από τις μελέτες που έχουν εκπονηθεί είναι:

- Gero et al. (1983) με στόχο την εύρεση του βέλτιστου προσανατολισμού και του λόγου της επιφάνειας των παραθύρων προς τη συνολική επιφάνεια του κτιρίου
- Jedrzejuk and Marks (2002) με στόχο την εύρεση της λύσης μέσω επαναληπτικής διαδικασίας όσον αφορά το σχήμα του κτιρίου, την εσωτερική διαρρύθμιση και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων θέρμανσης σε πολυκατοικίες
- Blondeau et al. (2002) με στόχο την εύρεση λύσης μέσα από μεθόδους κατάταξης σε σχέση με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα, τη θερμική άνεση και την ενεργειακή κατανάλωση, όπου κάθε πιθανή δράση αξιολογείται μέσω μιας συνάρτησης αξιών
- Rutman et al. (2005) με στόχο την αξιολόγηση της θερμικής και ακουστικής άνεσης και της κατανομής του εσωτερικού αέρα σε κλιματιζόμενο χώρο γραφείων με χρήση της μεθόδου ELECTRE.
- Rey (2004) με στόχο την κατάταξη τριών στρατηγικών αναβάθμισης της ενεργειακής απόδοσης με χρήση της μεθόδου ELECTRE III.
- Roulet et al. (2002) με στόχο την κατάταξη γραφείων με κριτήρια την άνεση, τη σπατάλη και την κατανάλωση ενέργειας, κάνει χρήση της μεθόδου ELECTRE και εισάγει την εναλλακτική βαθμολογία απόδοσης:

$$EERS = 1 - \frac{\text{Απόσταση σεναρίου } i \text{ απο το στόχο}}{\text{Απόσταση βασικού σεναρίου απο το στόχο}}$$

Ο **συνδυασμός προσεγγίσεων** αφορά τα πρότυπα συνδυαστικής βελτιστοποίησης όπως το πρότυπο που προτείνεται από την Alanne (2004) για την υποστήριξη αποφάσεων αναβάθμισης και ανακαίνισης κτιρίων. Το πρόβλημα ονομάζεται πρόβλημα του σακιδίου και οφείλει το όνομα του στη βέλτιστη επιλογή αντικειμένων που μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα σακίδιο ταξιδιού. Κατά τη προσέγγιση αυτή, γίνεται προσπάθεια εξαγωγής των συναρτήσεων αξιών των προτεινόμενων δράσεων καθώς και της τελικής κάθε φορά συνολικής αξίας σε σχέση με τα επιλεγόμενα κριτήρια. Οι βαθμολογίες που προκύπτουν από τη διαδικασία χρησιμοποιούνται ως συντελεστές βαρύτητας σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης σακιδίου για τον προσδιορισμό των δράσεων που βελτιστοποιούν την παρακάτω αντικειμενική συνάρτηση υπό περιορισμούς προϋπολογισμού:

$$ObjF = \max \sum_{i=1}^n a_i S_i$$

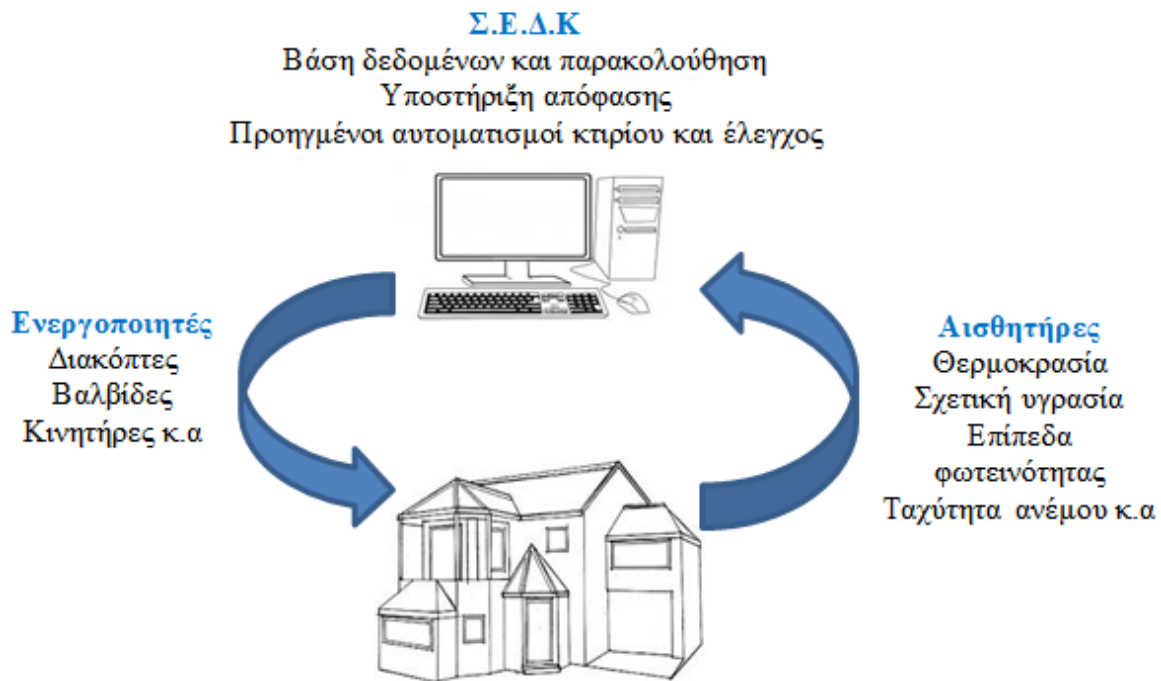
Όπου a_i η δράση ανακαίνισης i και S_i η βαθμολογία της. Το πρότυπο είναι κατάλληλο όταν ο αριθμός δράσεων ανακαίνισης είναι μεγάλος και οι δυνατοί συνδυασμοί οδηγούν σε ιδιαίτερα μεγάλο αριθμό λύσεων που δεν είναι εφικτή η αξιολόγηση τους με περιορισμούς.

Στον **πολυστοχικό προγραμματισμό** είναι δυνατή η δημιουργία μαθηματικών μοντέλων με περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις (Mavrotas et al., 2008) όπου υπάρχει ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων (Pareto frontier) και όχι μία μοναδική βέλτιστη λύση. Ο σκοπός της εφαρμογής του πολυστοχικού προγραμματισμού είναι η εύρεση λύσεων που προσεγγίζουν όσο περισσότερο γίνεται το Pareto (Fonseca and Flemming, 1998). Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται πολυστοχικός προγραμματισμός τον οποίο εξετάζουμε βιβλιογραφικά και παρουσιάζουμε στο 4^ο κεφάλαιο.

Για τις **τεχνικές προβλημάτων απόφασης συνεχών ή μεικτών μεταβλητών** είναι απαραίτητη η ανάπτυξη εργαλείων υποστήριξης αποφάσεων για την εξέταση του συνόλου των εναλλακτικών μέτρων όπως περιγράφονται από τους περιορισμούς του προβλήματος. Σε αυτή την κατεύθυνση κινείται η βελτιστοποίηση του θερμικού σχεδιασμού των κτιρίων με χρήση της μεθόδου downhill simplex (Nelder and Mead, 1965) κατά την οποία ελαχιστοποιείται μια αντικειμενική συνάρτηση η οποία κινείται σε πολυδιάστατο χώρο. Η διαδικασία διακρίνεται σε 3 βήματα: α) προσδιορισμός του κτιριακού κελύφους, β) προσομοίωση και γ) βελτιστοποίηση μέσω αλληλεπίδρασης.

2.4.1.2 Προσεγγίσεις πραγματικού χρόνου

Κατά την διάρκεια λειτουργίας των κτιρίων, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης επιτυγχάνεται από την απόκτηση δεδομένων με την χρήση ολοκληρωμένων συστημάτων ενεργειακής διαχείρισης κτιρίων (Σ.Ε.Δ.Κ). Η αρχιτεκτονική ενός Σ.Δ.Ε.Κ παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2:



Σχήμα 2.2: Σύστημα ενεργειακής διαχείρισης κτιρίου

Τα Σ.Δ.Ε.Κ συνεισφέρουν σε σημαντική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων και στη βελτίωση της άνεσης εσωτερικού χώρου μέσα από τη χρήση αναπτυγμένων τεχνικών ελέγχου (Kolokotsa et al., 2005). Οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης παρέχουν σημαντικά οφέλη σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές ελέγχου. Η συνεισφορά της ασαφούς λογικής στον έλεγχο εσωτερικής άνεσης μελετήθηκε από την (Kolokotsa, 2007), ενώ ο ρόλος των νευρωνικών δικτύων στα κτίρια αναλύθηκε από τον Kalogirou (2006). Οι κανόνες ελέγχου για τη βελτίωση της ενεργειακής διαχείρισης μέσω Σ.Δ.Ε.Κ μπορεί να είναι (Doukas et al., 2007; Mathews et al., 2000):

- Βελτιστοποίηση εκκίνησης / διακοπή λειτουργίας: Περιλαμβάνει κανόνες που αφορούν την έναρξη ή τη διακοπή των ενεργειακών συστημάτων

- Στρατηγικές ενεργειακής διαχείρισης σημειακών ρυθμίσεων: Περιλαμβάνει κανόνες μείωσης ενεργειακής κατανάλωσης με χρήση σημειακών ρυθμίσεων (θερμοκρασίας, άνεσης κ.α.)
- Διαδικαστική ιεραρχία: Περιλαμβάνει κανόνες που αφορούν την ιεραρχία παρεμβάσεων για τη θερμοκρασία, υγρασία, ποιότητα αέρα και φωτισμού
- Βελτιστοποίηση ενεργειακής διαχείρισης: Περιλαμβάνει κανόνες που αφορούν τη ρύθμιση των περιόδων υψηλών καταναλώσεων (αύξηση/μείωση της αιχμής, μετατοπισμός φορτίου κ.α.)

Τα Σ.Δ.Ε.Κ και τα ευφυή κτίρια μπορούν να συνδυαστούν με προηγμένες τεχνικές λήψης αποφάσεων για την παρακολούθηση και τη βελτίωση της απόδοσης των κτιρίων σε πραγματικό χρόνο. Κάποιες από αυτές τις τεχνικές είναι:

- Αναλυτική ιεραρχική διαδικασία που προτάθηκε από τους Wong and Li (2008) για να αξιολογήσει τα πιο κρίσιμα κριτήρια απόφασης για ευφυή κτίρια
- Αναλυτική δικτυακή διαδικασία, όπως προτάθηκε από τους Chen et al (2006) με στόχο την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης του κύκλου ζωής ενός ευφυές κτιρίου
- Πολυστοχικός αλγόριθμος υποστήριξης αποφάσεων με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης κλίσης (gradient), που προτάθηκε από τους Atthajariyakul and Leephakpreeda (2004) για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού σε πραγματικό χρόνο. Τα κριτήρια πολλαπλασιάζονται με συντελεστές βαρύτητας και προστίθενται για να σχηματιστεί η αντικειμενική συνάρτηση η οποία βελτιστοποιείται.

2.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Μια από τις βασικές προτεραιότητες των ενεργειακών πολιτικών παγκοσμίως αποτελεί η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων. Στην διαδικασία λήψης αποφάσεων διάφορα μέτρα είναι διαθέσιμα και ο αποφασίζων πρέπει να λάβει υπόψη του, ενεργειακές, περιβαλλοντικές και άλλους παραμέτρους για να καταλήξει στο βέλτιστο σχεδιασμό ή στη βέλτιστη επιλογή κατά τη λειτουργία του κτιρίου. Το πρόβλημα του αποφασίζοντα χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη πολλαπλών και σε πολλές περιπτώσεις αντικρουόμενων στόχων κάθε ένας από τους οποίους μπορεί να βελτιστοποιηθεί σε σχέση με τις διαθέσιμες εναλλακτικές που επηρεάζονται από ένα σει παραμέτρων και περιορισμών.

Συνεπώς, ο αποφασίζων αντιμετωπίζει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων που μέχρι σήμερα αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας είτε τεχνικές προσομοίωσης είτε τεχνικές πολυκριτήριας ανάλυσης με δυνατότητα όμως χειρισμού μικρού αριθμού μεταβλητών.

Συμπερασματικά, υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω ανάπτυξη των συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων για την υποστήριξη περισσότερων εναλλακτικών επιλογών αλλά και για την υποστήριξη των λιγότερο έμπειρων αποφασιζόντων στην προσπάθεια τους για λήψη της καλύτερης απόφασης.

3. Μαθηματικό πρότυπο

3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Το μαθηματικό πρότυπο που χρησιμοποιούμε, έχει ως στόχο τη λήψη τέτοιων αποφάσεων ώστε να επιτευχθεί η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, οι ελάχιστες εκπομπές CO₂ και το χαμηλότερο οικονομικό κόστος επένδυσης. Το πρότυπο χρησιμοποιείται στη φάση του σχεδιασμού των κτιρίων και λαμβάνει υπόψη τα αρχιτεκτονικά σχέδια του κτιρίου, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υλικών και συστημάτων, τα κλιματολογικά δεδομένα κ.α. (παρουσιάζονται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο) ώστε να παρέχει τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε για να αποφασίσουμε σχετικά με την κατασκευή του κελύφους αλλά και τις εγκαταστάσεις (θέρμανση, ψύξη, ζεστό νερό).

Η δημιουργία ενός τέτοιου προτύπου προϋποθέτει μία σειρά από ορισμούς συγκεκριμένων μεταβλητών απόφασης, κριτηρίων και περιορισμών, αλλά και την τεχνική επίλυσης του προβλήματος. Το σύνολο των εναλλακτικών δυνατών μέτρων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου αποτελούν οι μεταβλητές απόφασης, ενώ τα κριτήρια αναφέρονται σε γραμμικές ή μη συναρτήσεις, οι οποίες είναι ουσιαστικά, οι στόχοι του προβλήματος. Οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών απόφασης αλλά και τα κριτήρια εκφράζονται υπό τη μορφή γραμμικών ή μη περιορισμών ώστε να προκύψει ο περιορισμός των εφικτών λύσεων. Το μαθηματικό πρότυπο που χρησιμοποιούμε αναπτύχθηκε από τους Diakaki et al. (2010) και Kampelis (2011).

3.2 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

3.2.1 Μεταβλητές απόφασης και περιορισμοί του κτιριακού κελύφους

Το κτιριακό κέλυφος παίζει σημαντικό ρόλο στη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου, καθώς τα δομικά του στοιχεία αποτελούν βασικό γνώμονα των ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση και ψύξη. Τα δομικά του στοιχεία χωρίζονται σε ομοιογενή και σύνθετα, με τα πρώτα να χρησιμοποιούνται αυτοτελώς και χωρίς να συνδυάζονται με άλλα, έχοντας θερμική διαπερατότητα $U(W/m^2K)$, και τα σύνθετα τα οποία απαρτίζονται από διαφορετικά επίπεδα υλικών. Στην περίπτωση μας, ομοιογενή θεωρούμε τις πόρτες και τα παράθυρα, ενώ η θερμική διαπερατότητα των σύνθετων δομικών στοιχείων υπολογίζεται από τη σχέση (Kampelis 2011):

$$U_T = \sum \frac{k_i}{d_i} = \sum \frac{1}{R_i} \quad (1)$$

Όπου:

U_T : Θερμική διαπερατότητα σύνθετου δομικού στοιχείου (W/m^2K)

k : Θερμική αγωγιμότητα υλικού ($W/m^\circ C$)

d : Πάχος υλικού (m)

i : Επίπεδο δομικού στοιχείου

R : Θερμική αντίσταση επιπέδου

Το προτεινόμενο πρότυπο περιλαμβάνει μεταβλητές απόφασης που αφορούν την επιλογή υλικού αλλά και το πάχος του κάθε επιπέδου αφού όπως είδαμε και παραπάνω η θερμική απόδοση του κτιριακού κελύφους εξαρτάται και από το συνδυασμό των υλικών και το πάχος του κάθε επιπέδου για τα σύνθετα δομικά στοιχεία. Οι τύποι των μεταβλητών απόφασης που παρουσιάζονται αναλυτικά είναι (Diakaki et al., 2010):

- Μεταβλητές απόφασης για την επιλογή τύπου πόρτας
- Μεταβλητές απόφασης για την επιλογή τύπου παραθύρου
- Μεταβλητές απόφασης για τον αριθμό των διαφορετικών επιπέδων στα σύνθετα δομικά στοιχεία(τοιχοποιία, δάπεδο, στέγη)
- Μεταβλητές απόφασης για την επιλογή των διαφορετικών υλικών στα σύνθετα δομικά στοιχεία

Για λόγους απλούστευσης, ένας τύπος πόρτας και παραθύρου επιλέγεται κάθε φορά για όλο το κτίριο ενώ το ίδιο συμβαίνει και με τον αριθμό των επιπέδων και την επιλογή των υλικών για τα σύνθετα δομικά στοιχεία. Οι μεταβλητές απόφασης,ορίζονται σε μαθηματική μορφή ως εξής (Kampelis 2011):

Δεδομένης διαθεσιμότητας V εναλλακτικών τύπων πόρτας και S εναλλακτικών κατηγοριών παραθύρου κάθε μια εκ των οποίων περιλαμβάνει Ts όπου $s = 1, \dots, S$ διαφορετικούς τύπους παραθύρου, δυαδικές μεταβλητές x_v^{DOR} όπου $v = 1, \dots, V$ και x_{st}^{WIN} όπου $t = 1, \dots, Ts$ ορίζονται ως εξής:

$$x_v^{DOR} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται τύπος πόρτας } v \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (2)$$

$$x_{st}^{WIN} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται τύπος παραθύρου } t \text{ απο κατηγορία } s \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3)$$

Εφόσον επιλέγεται μόνο ένας τύπος πόρτας και παραθύρου, ισχύουν οι περιορισμοί:

$$\sum_{v=1}^V x_v^{DOR} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^{Ts} x_{st}^{WIN} = 1 \quad (5)$$

Για την τοιχοποιία, γίνεται επιλογή μεταξύ W εναλλακτικών δομών(π.χ. 1^η δομή: οπτόπλινθος-μόνωση, 2^η δομή: οπτόπλινθος-μόνωση-οπτόπλινθος). Άρα, η μεταβλητή απόφασης X_W^{WAL} ορίζεται ως εξής:

$$x_w^{WAL} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται δομή τοιχοποιίας } w \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (6)$$

Εφόσον μόνο μία εναλλακτική δομή τοιχοποιίας χρησιμοποιείται κάθε φορά, ισχύει ο περιορισμός:

$$\sum_{w=1}^W x_w^{WAL} = 1 \quad (7)$$

Κάθε μια δομή τοιχοποιίας W αποτελείται από ένα σύνολο επιπέδων KWL_w , για τα οποία τα υλικά και επομένως η θερμική τους αγωγιμότητα $kk_{w,kwl}^{dwal}(W/m^{\circ}C)$ και το πάχος $d_{w,kwl}^{dwal}$ (m), όπου $kwl = 1, \dots, KWL_w$ είναι προκαθορισμένα και γνωστά, ενώ για ένα σύνολο επιπέδων Y_w τα υλικά και το πάχος προσδιορίζονται ως μεταβλητές απόφασης. Επίσης, για κάθε επίπεδο $y = 1, \dots, Y_w$ δομής w , C_{wy} εναλλακτικά υλικά είναι διαθέσιμα εκ των οποίων ένα επιλέγεται σε κάθε επίπεδο της δομής η οποία ενεργοποιείται(για την οποία ισχύει ότι $x_W^{WAL}=1$). Επομένως, η μεταβλητή απόφασης x_{wyc}^{mWAL} όπου $c = 1, \dots, C_{wy}$ σε αυτή τη περίπτωση ορίζεται ως εξής:

$$x_{wyc}^{mWAL} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται υλικό } c \text{ για το επίπεδο } y \text{ δομής τοιχοποιίας } w \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (8)$$

Για την μεταβλητή απόφασης (8), ισχύει ο περιορισμός (9), καθώς όπως προαναφέρθηκε, μόνο για την ενεργή δομή επιλέγονται υλικά:

$$\sum_{c=1}^{C_{wy}} x_{wyc}^{mWAL} = x_w^{WAL} \quad \forall y = 1, \dots, Y_w \quad \forall w = 1, \dots, W \quad (9)$$

Συμπληρωματικά, για κάθε επίπεδο y δομής τοιχοποιίας w , το πάχος (m) ορίζεται ως μεταβλητή απόφασης X_{wy}^{dWAL} . Το πάχος, ως πραγματικός μη-αρνητικός αριθμός, περιορίζεται μόνο από το διαθέσιμο διάστημα για το εκάστοτε επίπεδο τοιχοποιίας π.χ. $X_{wy}^{dWAL} \leq d_{max,wy}^{WAL}$ όπου $d_{max,wy}^{WAL}$ το μέγιστο δυνατό πάχος (m) του επιπέδου y που ανήκει στη δομή τοιχοποιίας w . Είναι εφικτό για κάποια επίπεδα σε μια δομή που είναι ενεργή, το X_{wy}^{dWAL} να είναι ίσο με μηδέν. Για τον ορθό προσδιορισμό του πεδίου τιμών των μεταβλητών απόφασης που αφορούν το πάχος της μόνωσης, στην τοιχοποιία τέθηκε ο περιορισμός:

$$x_{wy}^{dWAL} \in [0, d_{max,wy}^{WAL}] \quad \forall (y = 1, \dots, Y_w \quad \forall w = 1, \dots, W) \quad (10)$$

Με τον ίδιο τρόπο ορίζονται οι μεταβλητές απόφασης που αφορούν τη στέγη και το δάπεδο του κτιρίου. Υποθέτοντας διαθεσιμότητα D και H εναλλακτικών δομών για τη στέγη και το δάπεδο αντίστοιχα, ορίζονται μεταβλητές απόφασης X_d^{CEIL} όπου $d = 1, \dots, D$ και X_h^{FLO} όπου $h = 1, \dots, H$:

$$X_d^{CEIL} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται δομή στέγης } d \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (11)$$

$$X_h^{FLO} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται δομή δαπέδου } h \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (12)$$

Εφόσον μόνο μία εναλλακτική δομή στέγης και δαπέδου επιλέγεται κάθε φορά, ισχύουν οι περιορισμοί:

$$\sum_{d=1}^D x_d^{CEIL} = 1 \quad (13)$$

$$\sum_{h=1}^H x_h^{FLO} = 1 \quad (14)$$

Κάθε δομή στέγης d αποτελείται από ένα σύνολο επιπέδων KCL_d για τα οποία τα υλικά και επομένως οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας $kk_{d,kcl}^{dCEIL}$ (W/m^oC) και το πάχος $d_{d,kcl}^{dCEIL}$ (m) όπου $kcl = 1, \dots, KCL_d$ είναι προκαθορισμένα και γνωστά, ενώ για ένα σύνολο επιπέδων F_d της δομής d , τα υλικά και το πάχος προσδιορίζονται ως μεταβλητές απόφασης. Επίσης, για κάθε επίπεδο $f = 1, \dots, F_d$ δομής d , A_{df} εναλλακτικά υλικά είναι διαθέσιμα εκ των οποίων μόνο ένα επιλέγεται σε κάθε επίπεδο της δομής (για την οποία ισχύει ότι $X_d^{CEIL}=1$ όπου $d = 1, \dots, D$). Επομένως, η δυαδική μεταβλητή απόφασης X_{dfa}^{mCEILL} όπου $a = 1, \dots, A_{df}$ ορίζεται ως εξής:

$$x_{dfa}^{mCEIL} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται υλικό } a \text{ για το επίπεδο } f \text{ της δομής στέγης } d \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (15)$$

Για τη μεταβλητή απόφασης (15) ισχύει ο περιορισμός (16) καθώς όπως προαναφέρθηκε μόνο για την ενεργή δομή επιλέγονται υλικά:

$$\sum_{a=1}^{A_{df}} x_{dfa}^{mCEIL} = x_d^{CEIL} \quad \forall (f = 1, \dots, F_d \quad \forall d = 1, \dots, D) \quad (16)$$

Επιπλέον, κάθε δομή δαπέδου h αποτελείται από ένα σύνολο KFL_h για τα οποία τα υλικά και επομένως οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας $kk_{h,kfl}^{dFLO}$ (W/m^oC) και το πάχος $d_{h,kfl}^{dFLO}$ (m) όπου $kfl = 1, \dots, KFL_h$ είναι προκαθορισμένα και γνωστά, ενώ για ένα σύνολο επιπέδων E_h της δομής h , τα υλικά και το πάχος προσδιορίζονται ως μεταβλητές

απόφασης. Επίσης, για κάθε επίπεδο $e = 1, \dots, E_h$ δομής h , G_{he} εναλλακτικά υλικά είναι διαθέσιμα εκ των οποίων μόνο ένα επιλέγεται σε κάθε επίπεδο της δομής εκείνης η οποία ενεργοποιείται (για την οποία ισχύει ότι $x_h^{FLO}=1$ όπου $h = 1, \dots, H$). Επομένως, η δυαδική μεταβλητή απόφασης x_{heg}^{mFLO} όπου $g=1, \dots, G_{he}$ ορίζεται ως εξής:

$$x_{heg}^{mFLO} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται υλικό } g \text{ για το επίπεδο } e \text{ της δομής στέγης } h \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (17)$$

Για τη μεταβλητή απόφασης (17) ισχύει ο περιορισμός (18) δεδομένου ότι επιλέγονται υλικά μόνο για την ενεργή δομή:

$$\sum_{g=1}^{G_{he}} x_{heg}^{mFLO} = x_h^{FLO} \quad \forall (e = 1, \dots, E_h \quad \forall h = 1, \dots, H) \quad (18)$$

Τέλος, ορίζονται οι μεταβλητές απόφασης x_{df}^{dCEIL} και x_{he}^{dFLO} οι οποίες αντιπροσωπεύουν τα πάχη θερμομόνωσης των επιπέδων στέγης και δαπέδου, $f = 1, \dots, F_d$ και $e = 1, \dots, E_h$ αντίστοιχα. Για τις δύο αυτές μεταβλητές απόφασης ισχύουν οι περιορισμοί (19) και (20) όπου x_{df}^{dCEIL} και x_{he}^{dFLO} είναι τα μέγιστα πάχη (m) των επιπέδων f της δομής στέγης d και των επιπέδων h της δομής δαπέδου e αντίστοιχα:

$$x_{df}^{dCEIL} \in [0, d_{max,df}^{CEIL}] \quad \forall (f = 1, \dots, F_d \quad \forall d = 1, \dots, D) \quad (19)$$

$$x_{he}^{dFLO} \in [0, d_{max,he}^{FLO}] \quad \forall (e = 1, \dots, E_h \quad \forall h = 1, \dots, H) \quad (20)$$

3.2.2 Μεταβλητές απόφασης και περιορισμοί των συστημάτων

Για τις ανάγκες θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού, δημιουργήθηκαν οι παρακάτω κατηγορίες συστημάτων (Diakaki et al., 2010):

- **Συστήματα θέρμανσης (HS):** Συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται μόνο για θέρμανση. Διακρίνονται σε ηλεκτρικά και μη-ηλεκτρικά εκ των οποίων τα μη-ηλεκτρικά διακρίνονται με βάση το καύσιμο.
- **Συστήματα ψύξης (CS):** Συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται μόνο για ψύξη και λειτουργούν μόνο με ηλεκτρική ενέργεια.
- **Συστήματα θέρμανσης-ψύξης (HC):** Συστήματα που παρέχουν θέρμανση και ψύξη και λειτουργούν μόνο με ηλεκτρική ενέργεια.
- **Συστήματα ζεστού νερού χρήσης (DHW):** Συστήματα για τις ανάγκες ζεστού νερού τα οποία διακρίνονται σε ηλεκτρικά και μη-ηλεκτρικά με τα τελευταία να διακρίνονται με βάση το καύσιμο.
- **Συστήματα θέρμανσης-ζεστού νερού χρήσης (HDHW):** Συστήματα που χρησιμοποιούνται για θέρμανση και ζεστό νερό χρήσης. Διακρίνονται σε ηλεκτρικά και μη-ηλεκτρικά με τα τελευταία να διακρίνονται με βάση το καύσιμο.
- **Θερμικά ηλιακά συστήματα (SDHW):** Συστήματα που χρησιμοποιούνται για παροχή ζεστού νερού χρήσης με χρήση ηλιακής ακτινοβολίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω κατηγοριοποίηση είχε ως στόχο τη δυνατότητα διερεύνησης όλων των δυνατών συνδυασμών για την παροχή θέρμανσης, ψύξης και DHW. Είναι πιθανό ένα σύστημα να εμφανίζεται σε παραπάνω από μία κατηγορίες ανάλογα με την προβλεπόμενη εφαρμογή και τις τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος. Εάν για παράδειγμα ένα σύστημα πρόκειται να ληφθεί υπόψη αποκλειστικά για παροχή θέρμανσης αλλά και για παράλληλη παροχή θέρμανσης και DHW, οφείλει να ενταχθεί και στις δύο σχετικές κατηγορίες ενώ αν πρόκειται να ληφθεί υπόψη μόνο για θέρμανση, εντάσσεται μόνο στην κατηγορία των συστημάτων θέρμανσης.

Για την δυνατότητα επιλογής των παραπάνω συστημάτων, ορίζονται διάφορες μεταβλητές απόφασης και σχετικοί περιορισμοί όπως αναφέρονται διεξοδικά στη συνέχεια: Υποθέτοντας EHI κατηγορίες ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης κάθε μια εκ των οποίων περιλαμβάνει EHI_{ehi} διαφορετικά συστήματα, όπου $ehi = 1, \dots, EHI$, $NEHI$ κατηγορίες μη-ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης κάθε μια εκ των οποίων περιλαμβάνει $NEHI_{nehi}$ διαφορετικά συστήματα όπου $nehi = 1, \dots, NEHI$, ECI κατηγορίες ηλεκτρικών συστημάτων ψύξης κάθε μια εκ των οποίων περιλαμβάνει ECI_{eci} διαφορετικά συστήματα όπου $eci = 1, \dots, ECI$, EWI κατηγορίες ηλεκτρικών συστημάτων DHW, κάθε μια εκ των οποίων περιλαμβάνει EWI_{ewi} διαφορετικά συστήματα όπου $ewi = 1, \dots, EWI$, όπως ορίζονται παρακάτω:

$$x_{ehi.ehj}^{EH} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης } ehj \text{ κατηγορίας } ehi \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (21)$$

$$x_{nehi.nehj}^{NEH} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται ηλεκ. σύστημα θέρμανσης } nehj \text{ κατηγορίας } nehi \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (22)$$

$$x_{eci.ecj}^{EC} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται ηλεκτρικό σύστημα ψύξης } ecj \text{ κατηγορίας } eci \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (23)$$

$$x_{ewi.ewj}^{EW} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται ηλεκ. σύστημα DHW } ewj \text{ κατηγορίας } ewi \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (24)$$

Επίσης, $NEWI$ κατηγορίες μη-ηλεκτρικών συστημάτων DHW κάθε μία εκ των οποίων περιλαμβάνει $NEWI_{newi}$ διαφορετικά συστήματα όπου $newi = 1, \dots, NEWI$, $EHCI$ κατηγορίες ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης-ψύξης κάθε μια εκ των οποίων περιλαμβάνει $EHCI_{ehci}$ διαφορετικά συστήματα όπου $ehci = 1, \dots, EHCI$, EHW κατηγορίες ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης-DHW κάθε μια εκ των οποίων περιλαμβάνει EHW_{ehwi} διαφορετικά συστήματα όπου $ehwi = 1, \dots, EHW$ και $NEHW$ κατηγορίες μη-ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης-DHW κάθε μια εκ των οποίων

περιλαμβάνει $NEHWJ_{nehwi}$ διαφορετικά συστήματα όπου $nehwi = 1, \dots, NEHWI$, μεταβλητές απόφασης $x_{ehi,ehj}^{EH}$ όπου $ehj = 1, \dots, EHJ_{ehi}$, $x_{nehi,nehj}^{NEH}$ όπου $nehj = 1, \dots, NEHJ_{nehi}$, $x_{eci,ecj}^{EC}$ όπου $ecj = 1, \dots, ECJ_{eci}$, $x_{ewi,ewj}^{EW}$ όπου $ewj = 1, \dots, EWJ_{ewi}$, $x_{newi,newj}^{NEW}$ όπου $newj = 1, \dots, NEWJ_{newi}$, $x_{ehci,ehcj}^{EHC}$ όπου $ehcj = 1, \dots, EHCJ_{ehci}$, $x_{ehwi,ehwj}^{EHW}$ όπου $ehwj = 1, \dots, EHWJ_{ehwi}$, $x_{nehwi,nehwj}^{NEHW}$ όπου $nehwj = 1, \dots, NEHWJ_{nehwi}$ όπως ορίζονται ακολούθως:

$$x_{newi,newj}^{NEW} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται μη - ηλεκτ. σύστημα DHW newj κατηγορίας newi} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (25)$$

$$x_{ehci,ehcj}^{EHC} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται ηλεκτ. σύστ. θέρμανσης/ψύξης ehcj κατηγορίας ehci} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (26)$$

$$x_{ehwi,ehwj}^{EHW} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται ηλεκτ. σύσ. θέρμανσης/DHW ehwj κατηγορίας ehwi} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (27)$$

$$x_{nehwi,nehwj}^{NEHW} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγ. μη - ηλεκ. σύσ. θέρμ./DHW nehwj κατηγορίας nehwi} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (28)$$

Για λόγους απλότητας, γίνεται η παραδοχή ότι από τα εναλλακτικά συστήματα θέρμανσης μόνο ένας τύπος επιλέγεται για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης. Ομοίως για τα συστήματα θέρμανσης και DHW. Επίσης, στην περίπτωση επιλογής συστήματος θέρμανσης / ψύξης ή θέρμανσης / DHW, δεν επιλέγεται επιπλέον σύστημα για τον ίδιο σκοπό(29-31):

- Για την επιλογή ενός συστήματος θέρμανσης μεταξύ των συστημάτων θέρμανσης / ψύξης και θέρμανσης / DHW:

$$\begin{aligned} & \sum_{ehi=1}^{EHI} \sum_{ehj=1}^{EHJ_{ehi}} x_{ehi,ehj}^{EH} + \sum_{ehci=1}^{EHCI} \sum_{ehcj=1}^{EHCJ_{ehci}} x_{ehci,ehcj}^{EHC} + \\ & \sum_{ehwi=1}^{EHWI} \sum_{ehwj=1}^{EHWJ_{ehwi}} x_{ehwi,ehwj}^{EHW} + \sum_{nehwi=1}^{NEHI} \sum_{nehj=1}^{NEHJ_{nehi}} x_{nehi,nehj}^{NEH} + \\ & \sum_{nehwi=1}^{NEHWI} \sum_{nehwj=1}^{NEHWJ_{nehwi}} x_{nehwi,nehwj}^{NEHW} = 1 \end{aligned} \quad (29)$$

- Για την επιλογή ενός συστήματος ψύξης μεταξύ των συστημάτων ψύξης και θέρμανσης / ψύξης:

$$\sum_{eci=1}^{ECI} \sum_{ecj=1}^{ECJ_{eci}} x_{eci.ecj}^{EC} + \sum_{ehci=1}^{EHCI} \sum_{ehcj=1}^{EHCJ_{ehci}} x_{ehci.ehcj}^{EHC} = 1 \quad (30)$$

- Για την επιλογή ενός συστήματος DHW μεταξύ των συστημάτων DHW και θέρμανσης / DHW:

$$\begin{aligned} & \sum_{ewi=1}^{EWI} \sum_{ewj=1}^{EWJ_{ewi}} x_{ewi.ewj}^{EW} + \sum_{ehwi=1}^{EHWI} \sum_{ehwj=1}^{EHWJ_{ehwi}} x_{ehwi.ehwj}^{EHW} + \\ & \sum_{newi=1}^{NEWI} \sum_{newj=1}^{NEWJ_{newi}} x_{newi.newj}^{NEW} + \sum_{nehwi=1}^{NEHWI} \sum_{nehwj=1}^{NEHWJ_{nehwi}} x_{nehwi.nehwj}^{NEHW} = 1 \end{aligned} \quad (31)$$

Υποθέτοντας διαθεσιμότητα U κατηγοριών ηλιακών θερμικών συστημάτων κάθε μια εκ των οποίων περιλαμβάνει B_u διαφορετικά συστήματα όπου $u = 1, \dots, U$ ορίζονται μεταβλητές απόφασης x_{ub}^{SLC} όπου $b = 1, \dots, B_u$:

$$x_{ub}^{SLC} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται ηλιακός συλλέκτης } b \text{ κατηγορίας } u \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (32)$$

Η Μεταβλητή απόφασης (32) υπάγεται στον περιορισμό (33) ώστε να υπάρχει η δυνατότητα επιλογής η μη, ηλιακού θερμικού συστήματος:

$$\sum_{u=1}^U \sum_{b=1}^{B_u} x_{ub}^{SLC} \leq 1 \quad (33)$$

3.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ

3.3.1 Ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας

Οι κύριες ενεργειακές καταναλώσεις σε ένα κτίριο αφορούν την θέρμανση, ψύξη, DHW, φωτισμό και λοιπές ηλεκτρικές καταναλώσεις. Ο φωτισμός και οι λοιπές ηλεκτρικές καταναλώσεις δεν συμπεριλαμβάνονται στο παρόν πρότυπο και επομένως η ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας δίδεται από τη σχέση:

$$Q_T = Q_H + Q_C + Q_{DHW} \quad (34)$$

Όπου Q_T η ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ($MJ/έτος$), Q_H η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση ($MJ/έτος$), Q_C η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για ψύξη ($MJ/έτος$) και Q_{DHW} η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για DHW ($MJ/έτος$).

Η συνολική ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για θέρμανση εξαρτάται από την πηγή ενέργειας του συστήματος θέρμανσης (π.χ. καύσιμο) και την απόδοση του συστήματος και υπολογίζεται από τη σχέση (35) (US Department of Energy and Environmental Protection Agency, 2000):

$$Q_H = \frac{Q_{el}^H}{n_{el}} + \sum_{fuel=1}^{FUEL} Q_{nel,fuel}^H \quad (35)$$

Όπου Q_{el}^H η ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας από ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης και n_{el} ο συντελεστής απόδοσης του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ $Q_{nel,fuel}^H$ η ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας από μη-ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης καυσίμου $f = 1, \dots, FUEL$ όπου $FUEL$ ο αριθμός των εναλλακτικών καυσίμων (π.χ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.λπ.).

Η ενεργειακή κατανάλωση ενός δεδομένου συστήματος θέρμανσης υπολογίζεται βάση της ενεργειακής ζήτησης και της απόδοσης του συστήματος σύμφωνα με τις σχέσεις (36) (37):

$$Q_{el}^H = Q^{HD} SEH_{el} \quad (36)$$

$$Q_{nel,fuel}^H = Q^{HD} SEH_{nel,fuel} \quad \forall fuel \in \{1, \dots, FUEL\} \quad (37)$$

Όπου Q^{HD} η συνολική ετήσια ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση ($MJ/\acute{\epsilon}τος$) ενώ SEH_{el} και SEH_{nel} οι ενεργειακές αποδόσεις των συστημάτων εκ των οποίων ένα κάθε φορά επιλέγεται για την παροχή της απαιτούμενης ενέργειας για θέρμανση. Λαμβάνοντας υπόψη τις σχετικές μεταβλητές απόφασης για τα διαθέσιμα εναλλακτικά συστήματα θέρμανσης, καθώς και τις αντίστοιχες αποδόσεις τους, τα SEH_{el} και SEH_{nel} υπολογίζονται από τις σχέσεις (38) και (39):

$$SEH_{el} = \sum_{ehi=1}^{EHI} \sum_{ehj=1}^{EHJ_{ehi}} \left(\frac{x_{ehi,ehj}^{EH}}{e_{ehi,ehj}^{EH}} \right) + \sum_{ehci=1}^{EHCI} \sum_{ehcj=1}^{EHCJ_{ehci}} \left(\frac{x_{ehci,ehcj}^{EHC}}{e_{ehci,ehcj}^{EHC}} \right) + \sum_{ehwi=1}^{EHWI} \sum_{ehwj=1}^{EHWJ_{ehwi}} \left(\frac{x_{ehwi,ehwj}^{EHW}}{e_{ehwi,ehwj}^{EHW}} \right) \quad (38)$$

$$SEH_{nel,fuel} = \sum_{nehi=1}^{NEHI} \sum_{nehj=1}^{NEHJ_{nehi}} \left(\frac{x_{nehi,nehj}^{NEH} FU_{nehi,nehj,fuel}^{NEH}}{e_{nehi,nehj}^{NEH}} \right) + \sum_{nehwi=1}^{NEHWI} \sum_{nehwj=1}^{NEHWJ_{nehwi}} \left(\frac{x_{nehwi,nehwj}^{NEHW} FU_{nehwi,nehwj,fuel}^{NEHW}}{e_{nehwi,nehwj}^{NEHW}} \right) \quad \forall fuel \in \{1, \dots, FUEL\} \quad (39)$$

Όπου $e_{ehi,ehj}^{EH}$, $e_{ehci,ehcj}^{EHC}$ και $e_{ehwi,ehwj}^{EHW}$ οι αποδόσεις των ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης ehj από την κατηγορία ehi , των ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης / ψύξης $ehcj$ από την κατηγορία $ehci$ και των ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης / DHW $ehwj$

από την κατηγορία $ehwi$ αντίστοιχα, $e_{nehi,nehj}^{NEH}$, $e_{nehwi,nehwj}^{NEHW}$ οι αποδόσεις των μη-ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης $nehj$ από την κατηγορία $nehi$ και των μη-ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης / DHW $nehwj$ από την κατηγορία $nehwi$ αντίστοιχα και $FU_{nehi,nehj,fuel}^{NEH}$, $FU_{nehwi,nehwj,fuel}^{NEHW}$ παράμετροι οι οποίοι καθορίζουν το καύσιμο ($f = 1, \dots, FUEL$) το οποίο χρησιμοποιείται από ένα συγκεκριμένο μη-ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης. Οι παράμετροι αυτοί λαμβάνουν τιμή ίση με 1 όταν ένα σύστημα χρησιμοποιεί τον τύπο καυσίμου τον οποίο προσδιορίζουν, διαφορετικά τιμή ίση με 0. Η ενεργοποίηση του περιορισμού (29) σε συνδυασμό με τις σχέσεις (36-39) οδηγούν το σύστημα στην επιλογή ενός αποκλειστικά συστήματος για την παροχή θερμότητας, του οποίου η απόδοση σε συνδυασμό με την μορφή ενέργειας που χρησιμοποιεί καθορίζει τελικά την ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σύμφωνα με την εξίσωση (35).

Για τον υπολογισμό της ετήσιας πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας απαιτείται η εκτίμηση της ετήσιας ενεργειακής ζήτησης για θέρμανση, που προκύπτει από το άθροισμα της ζήτησης Q_n^{HD} ($MJ/month$) για κάθε μήνα $n = 1, \dots, 12$ του έτους:

$$Q^{HD} = \sum_{n=1}^{12} Q_n^{HD} \quad (40)$$

Η μηνιαία ζήτηση για θέρμανση είναι συνισταμένη πολλών παραγόντων (Berben et al., 2004). Αυξάνεται λόγω των απωλειών θερμότητας από το κτιριακό κέλυφος $Q_{T,n}$ και του φυσικού εξαερισμού του κτιρίου $Q_{ven,n}$ και μειώνεται λόγω της λανθάνουσας θερμότητας $Q_{INHG,n}$ και της προσπίπτουσας στα ανοίγματα ηλιακής ακτινοβολίας $Q_{SL,n}$. Η μηνιαία ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_n^{HD} = \begin{cases} HS_n(Q_{T,n} + Q_{VEN,n} - Q_{AINHG,n} - Q_{SL,n}), & \text{εάν } Q_n^{HD} \text{ θετικός} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} =$$

$$\begin{cases} HS_n(BLC(\theta_{IH} - \theta_{E,n}))T_n + p_{air}c_{air}V_{air}(\theta_{IH} - \theta_{E,n}) - Q_{AINHG}T_n - \\ \sum_{wn=1}^{WN}(A_{wn}^{WIN}F_{F,wn}F_{S,wn}F_{CM,wn}I_{SL,wn,n}\sum_{s=1}^S\sum_{t=1}^T(x_{st}^{WIN}g_{st}^{WIN})), & \text{εάν θετικός} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (41)$$

HS_n είναι η παράμετρος που καθορίζει αν απαιτείται θέρμανση για τον μήνα n ($HS_n = 1$), ή όχι ($HS_n = 0$) όπου $n = 1, \dots, 12$, BLC είναι ο μέσος συντελεστής θερμοδιαπερατότητας του κτιρίου ($W/^\circ C$), θ_{IH} και $\theta_{E,n}$ η εσωτερική (επιθυμητή) θερμοκρασία και η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^\circ C$) αντίστοιχα για κάθε μήνα n της περιόδου κατά την διάρκεια της οποίας απαιτείται θέρμανση, T_n η διάρκεια (s) του μήνα n , p_{air} , c_{air} , V_{air} η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3), η ειδική θερμότητα του αέρα ($J/kg \ ^\circ C$) και ο μηνιαίος όγκος αέρα που ανανεώνεται (m^3) αντίστοιχα, $Q_{AINHG,n}$ η μέση τιμή λανθάνουσας ενέργειας ($W/\mu\eta\nu\alpha$) κατά τη χρήση του κτιρίου, A_{wn}^{WIN} είναι η επιφάνεια (m^2) του παραθύρου $wn = 1, \dots, WN$, όπου WN ο συνολικός αριθμός παραθύρων ενός δεδομένου κτιρίου, $F_{F,wn}$, $F_{S,wn}$, $F_{CM,wn}$ είναι οι μειωτικοί συντελεστές πλαισίου, σκίασης και κινητών μηχανισμών των παραθύρων wn αντίστοιχα, $I_{SL,wn,n}$ η μέση ηλιακή ακτινοβολία των παραθύρων wn με συγκεκριμένη κλίση και προσανατολισμό κατά την διάρκεια του μηνός n ($MJ/m^2 \mu\eta\nu\alpha$) και g_{st}^{WIN} ο συντελεστής διαπερατότητας της ηλιακής ακτινοβολίας για το παράθυρο s της κατηγορίας t .

Ο συντελεστής BLC (Building Load Coefficient) αφορά τη θερμοδιαπερατότητα του κτιρίου συνολικά και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση $BLC = \sum_{com} A_{com} U_{com} b_{com}$ (Krtati, 2000), όπου com είναι το κτιριακό κατασκευαστικό στοιχείο (component), A_{com} και U_{com} η επιφάνεια (m^2) και η θερμοδιαπερατότητα του κατασκευαστικού στοιχείου ($W/m^2 \ ^\circ C$) αντίστοιχα και b_{com} είναι ο μειωτικός

συντελεστής θερμοκρασίας και ισούται με 1 για στοιχεία που είναι σε άμεση επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον και μειώνεται για επιφάνειες σε επαφή με το έδαφος, ή επιφάνειες σε επαφή με μη θερμαινόμενους χώρους όπως μεσοτοιχίες, σοφίτες, υπόγεια κ.λπ. (Berben et al., 2001).

Εισάγοντας στην παραπάνω σχέση τις μεταβλητές απόφασης του κεφαλαίου 2 και λαμβάνοντας υπόψη ότι για τα σύνθετα δομικά στοιχεία (Krarti, 2000):

- Η θερμική διαπερατότητα U είναι ίση με την αντίστροφη θερμική αντίσταση R ενός στοιχείου ($U = 1/R$),
- Η θερμική αντίσταση R ισούται με το άθροισμα των θερμικών αντιστάσεων κάθε επιπέδου R_{layer} ενός πολυεπίπεδου στοιχείου ($R = \sum R_{layer}$),
- Η θερμική αντίσταση ενός επιπέδου R_{layer} ισούται με το πάχος του επιπέδου d_{layer} διαιρούμενο προς την θερμική αγωγιμότητα k_{layer} του υλικού του ομοιογενούς επιπέδου ($R_{layer} = d_{layer} / k_{layer}$).

Από τα παραπάνω προκύπτει η εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή BLC του κτιρίου:

$$\begin{aligned}
 BLC = & \sum_{dr=1}^{DR} (A_{dr}^{DOR} b_{dr}^{DOR}) \sum_{v=1}^V (x_v^{DOR} U_v^{DOR}) + \\
 & \frac{\sum_{wn=1}^{WN} (A_{wn}^{WIN} b_{wn}^{WIN}) \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^{T_s} (x_{st}^{WIN} U_{st}^{WIN}) + \sum_{wl=1}^{WL} (A_{wl}^{WAL} b_{wl}^{WAL})}{\sum_{w=1}^W \left(x_w^{WAL} \left(\sum_{kwl=1}^{KWL} \left(\frac{q_{w,kwl}^{dWAL}}{kk_{w,kwl}^{mWAL}} \right) + \sum_{y=1}^{Y_w} \left(x_{wy}^{dWAL} \sum_{c=1}^{Cwy} \left(\frac{x_{wyc}^{mWAL}}{k_{wyc}^{mWAL}} \right) \right) \right) \right)} + \\
 & \frac{\sum_{ce=1}^{CE} (A_{ce}^{CEIL} b_{ce}^{CEIL})}{\sum_{d=1}^D \left(x_d^{CEIL} \left(\sum_{kcl=1}^{KCL} \left(\frac{d_{d,kcl}^{dCEIL}}{kk_{d,kcl}^{mCEIL}} \right) + \sum_{f=1}^{F_d} \left(x_{df}^{dCEIL} \sum_{a=1}^{A_{df}} \left(\frac{x_{dfa}^{mCEIL}}{k_{dfa}^{mCEIL}} \right) \right) \right) \right)} + \\
 & \frac{\sum_{hl=1}^{HL} (A_{hl}^{FLO} b_{hl}^{FLO})}{\sum_{h=1}^H \left(x_h^{FLO} \left(\sum_{kfl=1}^{KFL} \left(\frac{d_{h,kfl}^{dFLO}}{kk_{h,kfl}^{mFLO}} \right) + \sum_{e=1}^{E_h} \left(x_{he}^{dFLO} \sum_{g=1}^{G_{he}} \left(\frac{x_{heg}^{mFLO}}{k_{heg}^{mFLO}} \right) \right) \right) \right)}
 \end{aligned} \tag{42}$$

Στην (42), A_{dr}^{DOR} , A_{wn}^{WIN} , A_{wl}^{WAL} , A_{ce}^{CEIL} , A_{fl}^{FLO} είναι οι επιφάνειες (m^2) των θυρών $dr = 1, \dots, DR$, των παραθύρων $wn = 1, \dots, WN$, της τοιχοποιίας $wl = 1, \dots, WL$, των στεγών $ce = 1, \dots, CE$ και των δαπέδων $fl = 1, \dots, FL$ αντίστοιχα, όπου DR, WN, WL, CE και FL ο συνολικός αριθμός πορτών, παραθύρων, τύπων τοιχοποιίας, στεγών και δαπέδων αντίστοιχα. Επιπλέον, U_v^{DOR} και U_{st}^{WIN} είναι οι τιμές θερμοδιαπερατότητας ($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$) πόρτας τύπου v και παραθύρου υποκατηγορίας t , τύπου s αντίστοιχα και k_{wyc}^{mWAL} , k_{dfa}^{mCEIL} , k_{eg}^{mFLO} είναι οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας ($W/m\text{ }^\circ\text{C}$) των διαθέσιμων υλικών c του επιπέδου y της δομής τοιχοποιίας w , των διαθέσιμων υλικών a του επιπέδου f της δομής στέγης d και των διαθέσιμων υλικών g του επιπέδου e της δομής δαπέδου h αντίστοιχα.

Ο πρώτος και δεύτερος όρος της (42) αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές θερμοδιαπερατότητας για τις πόρτες και τα παράθυρα αντίστοιχα, ενώ ο τρίτος, τέταρτος και πέμπτος όρος αντιπροσωπεύουν τα σύνθετα στοιχεία της τοιχοποιίας, των στεγών και των δαπέδων αντίστοιχα. Όπως είναι προφανές, η ενεργοποίηση των περιορισμών (4) για τις πόρτες, (5) για τα παράθυρα, (7), (8) και (9) για την τοιχοποιία, (13), (16) και (19) για τις στέγες και (14), (18) και (20) για τα δάπεδα έχει ως αποτέλεσμα την επιλογή ενός τύπου πόρτας και παραθύρου καθώς και μιας δομής τοιχοποιίας, στέγης και δαπέδου, με συγκεκριμένα επίπεδα και υλικά απ' όπου τελικά προκύπτει ο συντελεστής BLC του κτιρίου.

Ομοίως, υπολογίζεται η συνολική ετήσια πρωτογενής ενέργεια για τις ανάγκες ψύξης (US Department of Energy and Environmental Protection, 2000):

$$Q_c = \frac{Q_{el}^c}{n_{el}} \quad (43)$$

Όπου Q_{el}^C είναι η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας ($MJ/έτος$) ηλεκτρικού συστήματος ψύξης:

$$Q_{el}^C = Q^{CD} SEC_{el} \quad (44)$$

$$Q^{CD} = \sum_{n=1}^{12} Q_n^{CD} \quad (45)$$

$$Q_n^{CD} = \begin{cases} CS_n(Q_{SL,n} + Q_{AINHG,n} - Q_{T,n} - Q_{VEN,n}), & \text{εάν θετικός} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} = \begin{cases} CS_n \sum_{wn=1}^{WN} (A_{wn}^{WIN} F_{F,wn} F_{S,wn} F_{CM,wn} I_{SL,wn,n} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T (x_{st}^{WIN} g_{st}^{WIN})) + Q_{AINHG} T_n \\ - (BLC(\theta_{IC} - \theta_{E,n})) T_n + p_{air} c_{air} V_{air} (\theta_{IC} - \theta_{E,n}), & \text{εάν θετικός} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (46)$$

$$SEC_{el} = \sum_{eci=1}^{ECI} \sum_{ecj=1}^{ECJ_{eci}} \left(\frac{x_{eci,ecj}^{EC}}{e_{eci,ecj}^{EC}} \right) + \sum_{ehci=1}^{EHC I} \sum_{ehcj=1}^{EHC J_{ehci}} \left(\frac{x_{ehci,ehcj}^{EHC}}{e_{ehci,ehcj}^{EHC}} \right) \quad (47)$$

Όπου Q^{CD} και Q_n^{CD} , η συνολική ετήσια ενεργειακή ζήτηση ($MJ/έτος$) για ψύξη και η μέση μηνιαία ζήτηση για ψύξη ($MJ/μήνα$) αντίστοιχα, SEC_{el} η απόδοση του επιλεγθέντος συστήματος για την παροχή της απαιτούμενης ψυκτικής ενέργειας, $e_{eci,ecj}^{EC}$ και $e_{ehci,ehcj}^{EHC}$ οι συντελεστές απόδοσης ενέργειας του ηλεκτρικού συστήματος ψύξης ecj από την κατηγορία eci και του ηλεκτρικού συστήματος ψύξης / θέρμανσης $ehcj$ από την κατηγορία $ehci$ αντίστοιχα, CS_n μια παράμετρος που δείχνει για ποιον μήνα n του έτους, όπου $n = 1, \dots, 12$ υπάρχουν ψυκτικά φορτία ($CS_n = 1$) και για ποιόν όχι ($CS_n = 0$) και θ_{IC} είναι η εσωτερική (επιθυμητή) θερμοκρασία ($^{\circ}C$).

Η ενεργοποίηση των περιορισμών (30) σε συνδυασμό με τις εξισώσεις (44-47) οδηγούν το σύστημα στην επιλογή ενός μόνο συστήματος παροχής ψύξης, ο συντελεστής

απόδοσης του οποίου καθορίζει την καταναλισκόμενη ενέργεια ψύξης σύμφωνα με την εξίσωση (43).

Τέλος, υπολογίζεται η συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση από το σύστημα DHW (US Department of Energy and Environmental Protection, 2000):

$$Q_{DHW} = \frac{Q_{el}^W}{n_{el}} + \sum_{fuel=1}^{FUEL} Q_{nel,fuel}^W \quad (48)$$

Όπου το Q_{el}^W αντιπροσωπεύει την ετήσια ενέργεια ($MJ/έτος$) η οποία καταναλώνεται από ένα ηλεκτρικό σύστημα DHW και το $Q_{nel,fuel}^W$ αντιπροσωπεύει την ετήσια ενέργεια ($MJ/έτος$) η οποία καταναλώνεται από ένα μη-ηλεκτρικό σύστημα DHW το οποίο κάνει χρήση κάποιας εναλλακτικής πηγής ενέργειας.

Η ενεργειακή κατανάλωση του ηλεκτρικού ή μη-ηλεκτρικού συστήματος DHW υπολογίζεται αντίστοιχα από τις σχέσεις (49) και (50):

$$Q_{el}^W = Q^{WD} SEW_{el} \quad (49)$$

$$Q_{nel,fuel}^W = Q^{WD} SEW_{nel,fuel} \forall fuel \in \{1, \dots, FUEL\} \quad (50)$$

Όπου Q^{WD} είναι η συνολική ετήσια ενεργειακή ζήτηση ($MJ/έτος$) από το σύστημα DHW και SEW_{el} και SEW_{nel} οι αποδόσεις των συστημάτων που επιλέγονται για την κάλυψη της ζήτησης και υπολογίζονται με βάση τις σχέσεις:

$$SEW_{EL} = \sum_{ewi=1}^{EWI} \sum_{ewj=1}^{EWJ_{ehi}} \left(\frac{x_{ewi,ewj}^{EW}}{e_{ewi,ewj}^{EW}} \right) + \sum_{ehwi=1}^{EHWI} \sum_{ehwj=1}^{EHWJ_{ehwi}} \frac{x_{ehwi,ehwj}^{EHW}}{e_{ehwi,ehwj}^{EHW}} \quad (51)$$

$$SEW_{EL} = \sum_{newi=1}^{NEWI} \sum_{newj=1}^{NEWJ} \left(\frac{x_{newi,newj}^{NEW} FU_{newi,newj,fuel}^{NEW}}{e_{newi,newj}^{NEW}} \right) + \sum_{nehwi=1}^{NEHWI} \sum_{nehwj=1}^{NEHWJ} \left(\frac{x_{nehwi,nehwj}^{NEHW} FU_{nehwi,nehwj,fuel}^{NEHW}}{e_{nehwi,nehwj}^{NEHW}} \right) \forall fuel \in \{1, \dots, FUEL\} \quad (52)$$

Όπου $e_{ewi,ewj}^{EW}$ και $e_{ehwi,ehwj}^{EHW}$ η απόδοση του ηλεκτρικού συστήματος DHW ewj που ανήκει στην κατηγορία ewi και του ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης / DHW $ehwj$ που ανήκει στην κατηγορία $ehwi$ αντίστοιχα και $e_{newi,newj}^{NEW}$ και $e_{nehwi,nehwj}^{NEHW}$ η απόδοση του μη-ηλεκτρικού συστήματος DHW $newj$ που ανήκει στην κατηγορία $newi$ και του μη-ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης / DHW $nehwj$ που ανήκει στην κατηγορία $nehwi$. Η ενεργοποίηση του περιορισμού (31) σε συνδυασμό με τις (43-52) οδηγούν στην επιλογή ενός μόνο συστήματος, του οποίου ο συντελεστής απόδοσης καθορίζει τελικά την ενεργειακή κατανάλωση για την κάλυψη των αναγκών DHW σύμφωνα με την (48).

Για τον υπολογισμό της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης για DHW, Q^{WD} η συνολική ζήτηση υπολογίζεται με βάση το άθροισμα των μηνιαίων ενεργειακών τιμών ζήτησης $Q_{dDHW,n}$ (MJ):

$$Q^{WD} = \sum_{n=1}^{12} (WS_n DQ_{dDHW,n}) \quad (53)$$

Όπου WS_n είναι μία παράμετρος η οποία προσδιορίζει για ποιον μήνα n υπάρχει ζήτηση DHW ($WS_n = 1$) και για ποιον όχι ($WS_n = 0$).

Η μηνιαία ενεργειακή ζήτηση των συστημάτων DHW, $DQ_{dDHW,n}$, προκύπτει από τη μέση μηνιαία ενεργειακή ζήτηση για DHW, Q_{dhwu} (MJ/μήνα), μειωμένης κατά την ενέργεια $Q_{dSLC,n}$ (MJ/μήνα), η οποία παράγεται από ηλιακό θερμικό σύστημα στην περίπτωση που επιλέγεται η εγκατάστασή του:

$$DQ_{DHW,n} = \begin{cases} Q_{dhwu} - Q_{dSLC,n}, & \text{if } Q_{dhwu} \geq Q_{dSLC,n} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (54)$$

Η μέση μηνιαία ενεργειακή ζήτηση για DHW, Q_{dhwu} , καθώς και η μηνιαία παροχή ενέργειας από το ηλιακό θερμικό σύστημα $Q_{dSLC,n}$ υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (55), (56):

$$Q_{dhwu} = \frac{V_{water} p_{water} c_{water} (\theta_{DHW} - \theta_{DCW})}{10^6 \sum_{n=1}^{12} SW_n} \quad (55)$$

$$Q_{dSLC,n} = \frac{A_{SLC} I_{SL,SLC,n} F_{S,SLC} \sum_{u=1}^U \sum_{b=1}^{B_u} (x_{ub}^{SLC} e_{ub}^{SLC})}{10^6} \quad (56)$$

Όπου V_{water} , p_{water} και c_{water} ο θερμαινόμενος όγκος νερού (m^3), η πυκνότητα (kg/m^3), και η ειδική θερμότητα νερού ($J/Kg^\circ C$) αντίστοιχα, θ_{DCW} και θ_{DHW} οι θερμοκρασίες ψυχρού ($^\circ C$) και ζεστού νερού χρήσης ($^\circ C$) αντίστοιχα, A_{SLC} , $I_{SL,SLC,n}$ και $F_{S,SLC}$ η επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη (m^2), η ηλιακή ακτινοβολία στον συλλέκτη με συγκεκριμένο προσανατολισμό και γωνία κλίσης κατά τον μήνα n (MJ/m^2 μήνα) και ο συντελεστής σκίασης (%) αντίστοιχα και e_{ub}^{SLC} η απόδοση του ηλιακού θερμικού συστήματος τύπου b της κατηγορίας u . Η ενεργοποίηση του περιορισμού (33) οδηγεί στην επιλογή το πολύ ενός (ή κανενός) ηλιακού θερμικού συστήματος για συμπληρωματική χρήση προς το συμβατικό σύστημα DHW.

3.3.2 Εκπομπές CO₂

Οι εκπομπές CO_2 ($kg CO_2 / \acute{\epsilon}τος$) οι οποίες απελευθερώνονται στο περιβάλλον από τη λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και DHW εξαρτώνται από το καύσιμο που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση (US Department of Energy and Environmental Protection, 2000):

$$EM_{CO_2} = (Q_{el}^H + Q_{el}^C + Q_{el}^W)F_{station} + \sum_{fuel=1}^{FUEL} (Q_{nel,fuel}^H + Q_{nel,fuel}^W) \frac{F_{fuel}}{LHP_{fuel}} \quad (57)$$

$F_{station}$ ($kg CO_2 / MJ$) είναι ο συντελεστής εκπομπών του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, F_{fuel} ($kg CO_2 / kg$ καυσίμου) ο συντελεστής μετατροπής καυσίμου σε εκπομπές CO_2 και LHP_{fuel} ($MJ / kg fuel$) ο συντελεστής μετατροπής καυσίμου σε ενέργεια, ενώ Q_{el}^H , Q_{el}^C , Q_{el}^W , $Q_{nel,fuel}^H$, $Q_{nel,fuel}^W$ η συνολική ετήσια ενέργεια η οποία καταναλώνεται από το ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης, το ηλεκτρικό σύστημα ψύξης, το ηλεκτρικό σύστημα DHW, το μη-ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης και το μη-ηλεκτρικό σύστημα DHW και υπολογίζονται στις (36), (44), (49), (37) και (50) αντίστοιχα.

Η ενεργοποίηση όλων των περιορισμών που ισχύουν για τις μεταβλητές απόφασης στις εξισώσεις (36), (44), (49), (37), (50) και (57), καθιστά εφικτό τον υπολογισμό των εκπομπών CO_2 με βάση τα επιλεγέντα από το πρότυπο απόφασης συστήματα.

3.3.3 Κόστος επένδυσης

Το κόστος επένδυσης για την κατασκευή του κτιρίου και την προμήθεια / εγκατάσταση των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και DHW υπολογίζεται προσθέτοντας τα αντίστοιχα κόστη:

$$INCOST = COST_{DOR} + COST_{WIN} + COST_{WAL} + COST_{CEIL} + COST_{FLO} + COST_{HS} + COST_{CS} + COST_{WS} + COST_{HCS} + COST_{HWS} + COST_{SLC} \quad (58)$$

Όπου $COST_{DOR}$, $COST_{WIN}$, $COST_{WAL}$, $COST_{CEIL}$, $COST_{FLO}$ είναι το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης (€) των υλικών για τις πόρτες, τα παράθυρα, την τοιχοποιία, τη στέγη και

το δάπεδο αντίστοιχα, ενώ $COST_{HS}, COST_{CS}, COST_{WS}, COST_{HCS}, COST_{HWS}$ και $COST_{SLC}$ το κόστος (€) για την προμήθεια και εγκατάσταση των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, DHW, θέρμανσης / ψύξης, θέρμανσης / DHW και των ηλιοθερμικών συστημάτων αντίστοιχα.

Λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβλητές απόφασης και τα αντίστοιχα κόστη για τα υλικά και τα ενεργειακά συστήματα, υπολογίζονται τα επιμέρους κόστη:

$$COST_{DOR} = \sum_{dr=1}^{DR} (A_{dr}^{DOR}) \sum_{v=1}^V (x_v^{DOR} C_v^{DOR}) \quad (59)$$

$$COST_{WIN} = \sum_{wn=1}^{WN} (A_{st}^{WIN}) \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^{T_s} (x_{st}^{WIN} C_{st}^{WIN}) \quad (60)$$

$$COST_{WAL} = \sum_{wl=1}^{WL} (A_{wl}^{WAL}) \sum_{w=1}^W \left(x_w^{WAL} \left(\sum_{kwl=1}^{KWL_w} (d_{w,kwl}^{dWAL} C_{w,kwl}^{mWAL}) + \sum_{y=1}^{Y_w} \left(x_{wy}^{dWAL} \sum_{c=1}^{C_{wy}} (x_{wyc}^{mWAL} C_{wyc}^{mWAL}) \right) \right) \right) \quad (61)$$

$$COST_{CEIL} = \sum_{ce=1}^{CE} (A_{ce}^{CEIL}) \sum_{d=1}^D \left(x_d^{CEIL} \left(\sum_{kcl=1}^{KCL_d} (d_{d,kcl}^{dCEIL} C_{w,kcl}^{mCEIL}) + \sum_{f=1}^{F_d} \left(x_{df}^{dCEIL} \sum_{a=1}^{A_{df}} (x_{dfa}^{mCEIL} C_{dfa}^{mCEIL}) \right) \right) \right) \quad (62)$$

$$COST_{FLO} = \sum_{fl=1}^{FL} (A_{fl}^{FLO}) \sum_{h=1}^H \left(x_h^{FLO} \left(\sum_{kfl=1}^{KFL_h} (d_{h,kfl}^{dFLO} C_{w,kfl}^{mFLO}) + \sum_{e=1}^{E_h} \left(x_{he}^{dFLO} \sum_{g=1}^{G_{he}} (x_{heg}^{mFLO} C_{heg}^{mFLO}) \right) \right) \right) \quad (63)$$

$$COST_{HS} = \sum_{ehi=1}^{EHI} \sum_{ehj=1}^{EHJ_{ehi}} (x_{ehi,ehj}^{EH} CST_{ehi,ehj}^{EH}) + \sum_{nehi=1}^{NEHI} \sum_{nehj=1}^{NEHJ_{nehi}} (x_{nehi,nehj}^{NEH} CST_{nehi,nehj}^{NEH}) \quad (64)$$

$$COST_{CS} = \sum_{eci=1}^{ECI} \sum_{ecj=1}^{ECJ_{eci}} (x_{eci,ecj}^{EC} CST_{eci,ecj}^{EC}) \quad (65)$$

$$COST_{WS} = \sum_{ewi=1}^{EWI} \sum_{ewj=1}^{EWJ_{ehi}} (x_{ewi,ewj}^{EW} CST_{ewi,ewj}^{EW}) + \sum_{newi=1}^{NEWI} \sum_{newj=1}^{NEWJ_{newi}} (x_{newi,newj}^{NEW} CST_{newi,newj}^{NEW}) \quad (66)$$

$$COST_{HCS} = \sum_{ehci=1}^{EHCI} \sum_{ehcj=1}^{EHCJ_{ehci}} (x_{ehci,ehcj}^{EHC} CST_{ehci,ehcj}^{EHC}) \quad (67)$$

$$COST_{HWS} = \sum_{ehwi=1}^{EHWI} \sum_{ehwj=1}^{EHWJ_{ehwi}} (x_{ehwi,ehwj}^{EHW} CST_{ehwi,ehwj}^{EHW}) + \sum_{nehwi=1}^{NEHWI} \sum_{nehwj=1}^{NEHWJ_{nehwi}} (x_{nehwi,nehwj}^{NEHW} CST_{nehwi,nehwj}^{NEHW}) \quad (68)$$

$$COST_{SLC} = A_{SLC} \sum_{u=1}^U \sum_{b=1}^{B_u} (x_{ub}^{SLC} CST_{ub}^{SLC}) \quad (69)$$

Όπου C_v^{DOR} και C_{st}^{WIN} είναι το κόστος (€/m²) της πόρτας τύπου v και του παραθύρου τύπου t κατηγορίας s αντίστοιχα, $CK_{w,kwl}^{mWAL}$, $CK_{d,kcl}^{mCEIL}$ και $CK_{h,kfl}^{mFLO}$ είναι το κόστος του υλικού (€/m³) του επιπέδου kwl της δομής τοιχοποιίας w , του επιπέδου kcl της δομής στέγης d , του επιπέδου kfl της δομής δαπέδου h αντίστοιχα, και C_{wyc}^{mWAL} , C_{dfa}^{mCEIL} και C_{heg}^{mFLO} το κόστος (€/m³) για το υλικό c του επιπέδου y της δομής τοιχοποιίας w , για το υλικό a του επιπέδου f της δομής στέγης d και του υλικού g του επιπέδου e της δομής δαπέδου h αντίστοιχα. Επίσης, $CST_{ehi,ehj}^{EH}$, $CST_{nehi,nehj}^{NEH}$ είναι το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης (€) του ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης ehj από την κατηγορία ehi και το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης (€) του μη-ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης $nehj$ από την κατηγορία $nehi$ αντίστοιχα, $CST_{eci,ecj}^C$ το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης (€) του ηλεκτρικού συστήματος ψύξης ecj από την κατηγορία eci , $CST_{ewi,ewj}^{EW}$ και $CST_{newi,newj}^{NEW}$ το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης (€) του ηλεκτρικού συστήματος DHW ewj από την κατηγορία ewi και το κόστος προμήθειας

και εγκατάστασης (€) του μη-ηλεκτρικού συστήματος DHW $newj$ από την κατηγορία $newi$ αντίστοιχα, $CST_{ehci,ehcj}^{HC}$ το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης (€) του ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης / ψύξης $ehcj$ από την κατηγορία $ehci$, $CST_{ehwi,ehwj}^{EHW}$ και $CST_{nehwi,nehwj}^{NEHW}$ το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης (€) του ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης / DHW $ehwj$ από την κατηγορία $ehwi$ και το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης (€) του μη-ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης / DHW $nehwj$ από την κατηγορία $nehwi$ αντίστοιχα και $CST_{u,b}^{SLC}$ το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης (€/m²) ηλιοθερμικού συστήματος b κατηγορίας u .

Η ενεργοποίηση των περιορισμών που εφαρμόζονται στις μεταβλητές απόφασης οδηγούν το σύστημα στην κατάσταση όπου το συνολικό κόστος επένδυσης ισούται με το άθροισμα του κόστους των υλικών και συστημάτων που επιλέγονται.

3.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΑΠΟΦΑΣΗΣ

Οι μεταβλητές απόφασης που αναπτύχθηκαν στις ενότητες 2.2 και 2.3, καταλήγουν στη διαμόρφωση του παρακάτω προβλήματος απόφασης:

$$\begin{aligned} [min]g_1(x) &= Q_T \\ [min]g_2(x) &= EM_{CO2} \\ [min]g_3(x) &= INCOST \end{aligned} \tag{70}$$

υ.π (1)-(69)

Το πρόβλημα απόφασης (70) είναι πολυστοχικό πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης μικτού ακεραίου για την επίλυση του οποίου ο επιστημονικός τομέας του πολυστοχικού προγραμματισμού παρέχει διάφορες τεχνικές όπως ο συναινετικός προγραμματισμός, προγραμματισμός στόχων, κλπ. Η αποτελεσματικότητα αυτών των μεθόδων για την επίλυση παρόμοιου αλλά σημαντικά μικρότερου σε μέγεθος προβλήματος απόφασης είχε διερευνηθεί κατά προηγούμενη σχετική έρευνα για το υπό

εξέταση πρόβλημα (Diakaki et al., 2008). Πέρα από τις τεχνικές που εφαρμόστηκαν στο πλαίσιο της πρώτης, άλλες τεχνικές εν δυνάμει χρήσιμες για το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι οι συνθετικές προσεγγίσεις, αλληλεπιδραστικές τεχνικές κ.α.

$$[min]z = \lambda$$

υ.π

του πολυστοχικού προβλήματος (70) και

$$\begin{aligned}\lambda &\geq (g_1(x) - g_{1min}) \left(\frac{p_1}{g_{1min}} \right) \\ \lambda &\geq (g_2(x) - g_{2min}) \left(\frac{p_2}{g_{2min}} \right) \\ \lambda &\geq (g_3(x) - g_{3min}) \left(\frac{p_3}{g_{3min}} \right)\end{aligned}\tag{71}$$

Στην παραπάνω εφαρμογή του συναινετικού προγραμματισμού διακρίνονται οι εξής όροι για κάθε μία αντικειμενική συνάρτηση:

- $g_i(x) - g_{imin}$: Απόσταση (Chebychev) αντικειμενικής συνάρτησης g_i από την ελάχιστη (βέλτιστη) τιμή της όπου $i = 1,2,3$.
- p_1 : Βάρος της αντικειμενικής συνάρτησης i που δηλώνει το βαθμό παραχώρησης (ή τη σχετική βαρύτητα) της.
- λ : Όρος που χρησιμοποιείται για την ενιαία βελτιστοποίηση των τριών αντικειμενικών συναρτήσεων.
- z : Όρος που εκφράζει την σύνθεση των αντικειμενικών συναρτήσεων σε μία νέα συνάρτηση, η βελτιστοποίηση της οποίας έχει ως αποτέλεσμα τη σταθμισμένη βελτιστοποίηση των τριών επιμέρους αντικειμενικών συναρτήσεων.

4. Γενετικός Αλγόριθμος

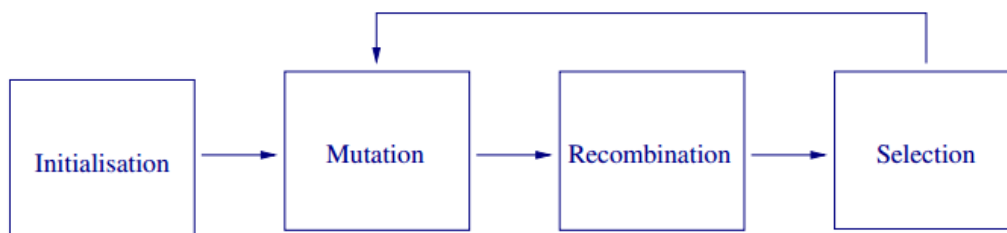
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, ο πολυστοχικός προγραμματισμός είναι μία από τις τεχνικές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη αποφάσεων στα πλαίσια της βελτιστοποίησης της ενεργειακής διαχείρισης κτιρίων και είναι η τεχνική που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Οι γενετικοί αλγόριθμοι ανήκουν στους εξελικτικούς αλγόριθμους και είναι μια τεχνική προγραμματισμού που εισήγαγε στα τέλη της δεκαετίας του 1960 ο Τζον Χόλαντ, ερευνητής του Ινστιτούτου της Σάντα Φε (ΗΠΑ) και αποτελούν μια μέθοδο αναζήτησης βέλτιστων λύσεων σε συστήματα που μπορούν να περιγραφούν ως μαθηματικά προβλήματα. Είναι χρήσιμοι σε προβλήματα που περιέχουν πολλές παραμέτρους / διαστάσεις και δεν υπάρχει αναλυτική μέθοδος που να μπορεί να βρει το βέλτιστο συνδυασμό τιμών για τις μεταβλητές.

Ο τρόπος λειτουργίας των Γενετικών Αλγορίθμων είναι εμπνευσμένος από τη βιολογία. Χρησιμοποιεί την ιδέα της εξέλιξης μέσω γενετικής μετάλλαξης, φυσικής επιλογής και διασταύρωσης. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι αρκετά απλοί στην υλοποίησή τους. Οι τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος πρέπει να κωδικοποιούνται με τρόπο ώστε να αναπαρασταθούν από μια μεταβλητή που περιέχει σειρά χαρακτήρων ή δυαδικών ψηφίων (0/1). Αυτή η μεταβλητή μιμείται το γενετικό κώδικα που υπάρχει στους ζωντανούς οργανισμούς. Αρχικά, ο Γενετικός Αλγόριθμος παράγει πολλαπλά αντίγραφα της μεταβλητής/γεννητικού κώδικα, συνήθως με τυχαίες τιμές, δημιουργώντας ένα πληθυσμό λύσεων. Κάθε λύση (τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος) δοκιμάζεται για το πόσο κοντά φέρνει την αντίδραση του συστήματος στην επιθυμητή, μέσω μιας συνάρτησης που δίνει το μέτρο ικανότητας της λύσης και η οποία ονομάζεται συνάρτηση ικανότητας (Σ.Ι). Οι λύσεις που βρίσκονται πιο κοντά στην

επιθυμητή, σε σχέση με τις άλλες, σύμφωνα με το μέτρο που μας δίνει η Σ.Ι, αναπαράγονται στην επόμενη γενιά λύσεων και λαμβάνουν μια τυχαία μετάλλαξη. Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία για αρκετές γενιές, οι τυχαίες μεταλλάξεις σε συνδυασμό με την επιβίωση και αναπαραγωγή των γονιδίων/λύσεων που πλησιάζουν καλύτερα το επιθυμητό αποτέλεσμα θα παράγουν ένα γονίδιο/λύση που θα περιέχει τις τιμές για τις παραμέτρους που ικανοποιούν όσο καλύτερα γίνεται την Σ.Ι. Στην πράξη ο αλγόριθμος ξεκινά μ' ένα σύνολο λύσεων - ονομάζονται γονιδιώματα, δανειζόμενες το όνομά τους από τη βιολογία- οι οποίες συνιστούν τον "πληθυσμό". Κατόπιν ζητείται από τον υπολογιστή να δημιουργήσει μια σειρά τυχαίων ανασυνδυασμών και μεταλλάξεων των "γονιδιωμάτων".

Οι πιο ικανές λύσεις για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα συνεχίζουν να εξελίσσονται και ανασυνδυάζονται τυχαία, μέχρις ότου "επιβιώσουν" οι καλύτερες. Συνήθως, όσο περισσότερες γενιές περνούν τόσο καλύτερες λύσεις βρίσκονται, μπορεί όμως ο αλγόριθμος να βρεθεί σε σημείο του πεδίου των λύσεων από όπου και δεν μπορεί να προχωρήσει λόγο του ότι βρίσκεται σε τοπικό μέγιστο. Για το λόγο αυτό έχουν υπάρχουν διαφορετικές εκδοχές του αλγόριθμου ανάλογα με τη μορφή του προβλήματος, κάποιες από τις οποίες περιλαμβάνουν και τη διασταύρωση (ζευγάρωμα) γονιδίων/λύσεων ώστε ο αλγόριθμος να φτάσει στο αποτέλεσμα πιο γρήγορα (σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Μεθοδολογία αλγορίθμου

Μια από αυτές τις μεθόδους, είναι η μέθοδος της Διαφορικής Εξέλιξης (ΔΕ). Η ΔΕ είναι ένας στοχαστικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης βασισμένος στον πληθυσμό των πιθανών λύσεων. Παρουσιάστηκε από τους Storn and Price το 1996 με σκοπό την αντιμετώπιση προβλημάτων με αντικειμενικές συναρτήσεις που είναι μη-διαφορίσιμες, μη-συνεχείς, μη-γραμμικές, θορυβώδεις, πολυδιάστατες ή έχουν πολλά τοπικά ελάχιστα και περιορισμούς. Σε αυτού του είδους τα προβλήματα όπου δεν μπορούν να λυθούν αναλυτικά, ο αλγόριθμος ΔΕ μπορεί να προσφέρει λύσεις κατά προσέγγιση και αυτό το είδος εξελικτικού αλγορίθμου θα χρησιμοποιήσουμε.

Η ανάπτυξη ενός εξελικτικού αλγορίθμου για τη βελτίωση της ενεργειακής διαχείρισης των κτιρίων με πολλαπλά κριτήρια απαιτεί :

- Τον ορισμό των μεταβλητών απόφασης, διακριτών και / η συνεχών μεταβλητών που αντικατοπτρίζουν τις διαθέσιμες εναλλακτικές που θα χρησιμοποιηθούν
- Την εξακρίβωση και διατύπωση των στόχων σε κατάλληλες γραμμικές ή μη μαθηματικές εκφράσεις
- Την οριοθέτηση των πιθανών λύσεων μέσα από την ανάδειξη των γραμμικών ή μη περιορισμών που αφορούν είτε τις μεταβλητές απόφασης και τις ενδιάμεσες σχέσεις τους, είτε τους στόχους του προβλήματος
- Την ανάπτυξη ενός εξελικτικού αλγορίθμου ικανού να διαχειριστεί τις μεταβλητές, στόχους και περιορισμούς που έχουν οριστεί.

Παρακάτω, παρουσιάζεται η ρύθμιση και η λειτουργία του εξελικτικού αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για το πρόβλημα της βελτίωσης της ενεργειακής διαχείρισης κτιρίων.

4.2 ΡΥΘΜΙΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Ο εξελικτικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήσαμε αναπτύχθηκε από τον Gilberto Reynoso Meza βασιζόμενος στην έρευνα των Storn, and Price (1997).

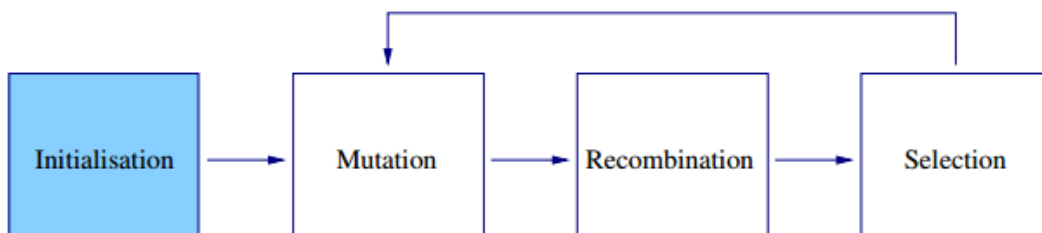
Τα βασικά στοιχεία του εξελικτικού αλγορίθμου είναι:

- Ο πληθυσμός N : Ο αριθμός των τυχαίων λύσεων με τις οποίες αρχίζει η λειτουργία του αλγορίθμου
- Ο αριθμός γενεών G : Σε κάθε επανάληψη, ο πληθυσμός ονομάζεται γενιά.
- Τα πάνω και κάτω όρια για κάθε παράμετρο
- Ο αριθμός μεταβλητών απόφασης
- Ο συντελεστής crossover : Ο συντελεστής με βάση τον οποίο δημιουργούνται ποικίλες λύσεις από γενιά σε γενιά
- Η συνάρτηση μετάλλαξης : Εδώ μεταλλάσσονται οι λύσεις με συνδυασμό παλιών και νέων λύσεων
- Η συνάρτηση κόστους: Η τιμή της συνάρτησης κόστους αποτελεί τον αριθμό που καλούμαστε να βελτιστοποιήσουμε

Παρακάτω, παρουσιάζονται τα βήματα λειτουργίας του αλγορίθμου και η ρύθμιση των παραπάνω στοιχείων (σχήμα 4.2-4.5) (Kelly Fleetwood).

Υποθέτοντας ότι έχουμε να βελτιστοποιήσουμε συνάρτηση με D παραμέτρους:

Αρχικοποίηση:



Σχήμα 4.2: Αρχικοποίηση αλγορίθμου

- Ορίζουμε τον αρχικό πληθυσμό. Ο αρχικός πληθυσμός υπολογίζεται συνήθως από τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης πολλαπλασιασμένο με τον αριθμό 10. Στην παρούσα εργασία, με τον κατάλληλο προγραμματισμό, καταλήγουμε σε 15 μεταβλητές απόφασης. Συνεπώς, ο αρχικός πληθυσμός ορίζεται σε 150.

- Τα διανύσματα των παραμέτρων έχουν την μορφή:

$$x_{i,G} = [x_{1,i,G}, x_{2,i,G}, \dots, x_{D,i,G}] \quad i = 1, 2, \dots, N$$

Όπου G ο αριθμός των γενεών ο οποίος ορίστηκε εμπειρικά σε 10000 καθώς για αυτόν τον αριθμό παίρνουμε ικανοποιητικές λύσεις.

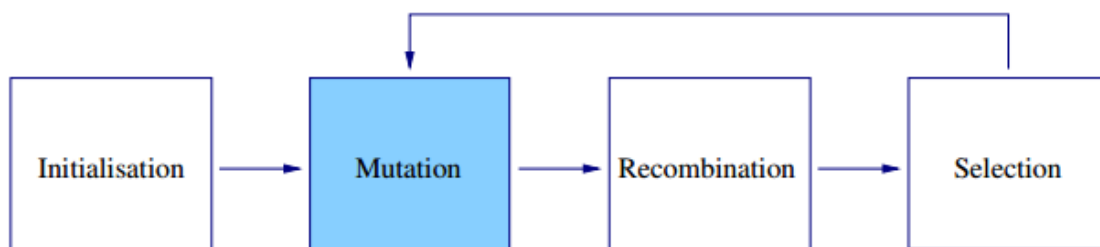
- Ορισμός άνω και κάτω ορίων για κάθε παράμετρο όπως ορίστηκαν στο κεφάλαιο 3:

$$x_j^L \leq x_{j,i,1} \leq x_j^U$$

- Επιλογή τυχαίων τιμών των αρχικών παραμέτρων στο διάστημα:

$$[x_j^L, x_j^U]$$

Μετάλλαξη:



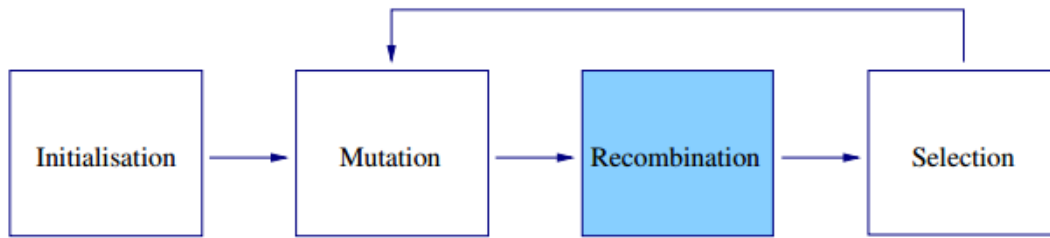
Σχήμα 4.3:Μετάλλαξη

- Κάθε ένα από τα N διανύσματα παραμέτρων περνάνε από τα στάδια της μετάλλαξης, ανασυνδυασμού και επιλογής
- Για ένα διάνυσμα παραμέτρου $x_{i,G}$, επιλέγουμε τυχαία τρία διανύσματα $x_{r1,G}$, $x_{r2,G}$ και $x_{r3,G}$ ώστε οι δείκτες $i, r1, r2$ και $r3$ να είναι διαφορετικοί.
- Προσθέτουμε τη διαφορά των δύο διανυσμάτων στο τρίτο:

$$U_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G})$$

Όπου F μια σταθερά ορισμένη σε 1.

Ανασυνδυασμός:



Σχήμα 4.4: Ανασυνδυασμός

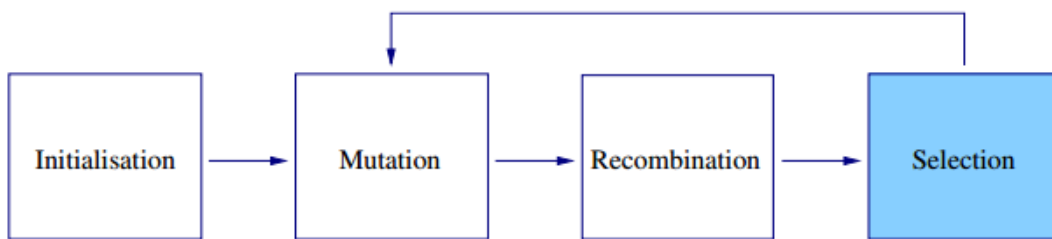
- Ο ανασυνδυασμός ενσωματώνει τις σωστές λύσεις από την προηγούμενη γενιά
- Το δοκιμαστικό διάνυσμα $U_{i,G+1}$ σχηματίζεται από τα στοιχεία του διανύσματος-στόχου $x_{i,G}$ και από τα στοιχεία του διανύσματος $U_{i,G+1}$.
- Τα στοιχεία του διανύσματος $U_{i,G+1}$ μπαίνουν στο δοκιμαστικό διάνυσμα με πιθανότητα crossover:

$$U_{j,i,G+1} = \begin{cases} U_{j,i,G+1} & \text{αν } rand_{j,i} \leq CR \text{ or } j = I_{rand} \\ x_{j,i,G} & \text{αν } rand_{j,i} > CR \text{ and } j \neq I_{rand} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, D$$

Όπου $randj, i \sim U[0,1]$, $Irand$ είναι ένας τυχαίος αριθμός που ανήκει στο διάστημα $[1,2,\dots,D]$

- Ο $Irand$ μας βοηθάει να σιγουρευτούμε ότι $U_{i,G+1} \neq x_{i,G}$
- Το crossover (CR) τίθεται εμπειρικά σε 0.8 (μετά από ελέγχους των αποτελεσμάτων)

Επιλογή:



Σχήμα 4.5: Επιλογή

- Το διάνυσμα-στόχος $x_{i,G}$ συγκρίνεται με το δοκιμαστικό διάνυσμα $U_{i,G+1}$ και αυτό με την μικρότερη τιμή συνάρτησης, περνάει στην επόμενη γενιά:

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} U_{i,G+1} & \text{if } f(U_{i,G+1}) \leq f(x_{i,G}) \\ x_{i,G}, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

- Η μετάλλαξη, ο ανασυνδυασμός και η επιλογή συνεχίζονται μέχρι να φτάσουμε στο κριτήριο εξόδου. Το κριτήριο αυτό στην περίπτωση μας είναι οι minimum τιμές των κριτηρίων του κόστους, ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπής ρύπων.

- Η συνάρτηση που ελαχιστοποιείται, στην περίπτωση μας αποτελεί το άθροισμα των αντικειμενικών συναρτήσεων των κριτηρίων κόστους, ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπής ρύπων, πολλαπλασιασμένα με τα κατάλληλα βάρη:

$$Function_value = Q_T p_1 + E_{co_2} p_2 + INCOST p_3$$

Οι γενετικοί αλγόριθμοι τέτοιου είδους έχουν αποδειχτεί χρήσιμοι για μια μεγάλη γκάμα προβλημάτων που αφορούν την ενεργειακή διαχείριση. Σε συγκρίσεις των Storn and Price (1997), Ali and Torn (2004) και των Lampinen and Storn (2004) αποδείχτηκε ότι ο ΔΕ ήταν πιο αποδοτικός σε σχέση με άλλους γενετικούς αλγόριθμους και μεθευρετικές διαδικασίες. Για την αποδοτική χρήση του αλγορίθμου από έναν ειδικό αλλά και από το μέσο χρήστη, αναπτύχθηκε η εφαρμογή Greeny, η οποία μέσα σε ένα σύγχρονο γραφικό περιβάλλον, ενσωματώνει το ΓΕ και δίνει την ευκαιρία στους χρήστες να τον χρησιμοποιήσουν ευκολά και να επέμβουν αν το θελήσουν στις ρυθμίσεις του για την εύρεση των κατάλληλων επιλογών στο πρόβλημα της ενεργειακής διαχείρισης κτιρίων που πραγματεύεται η παρούσα εργασία.

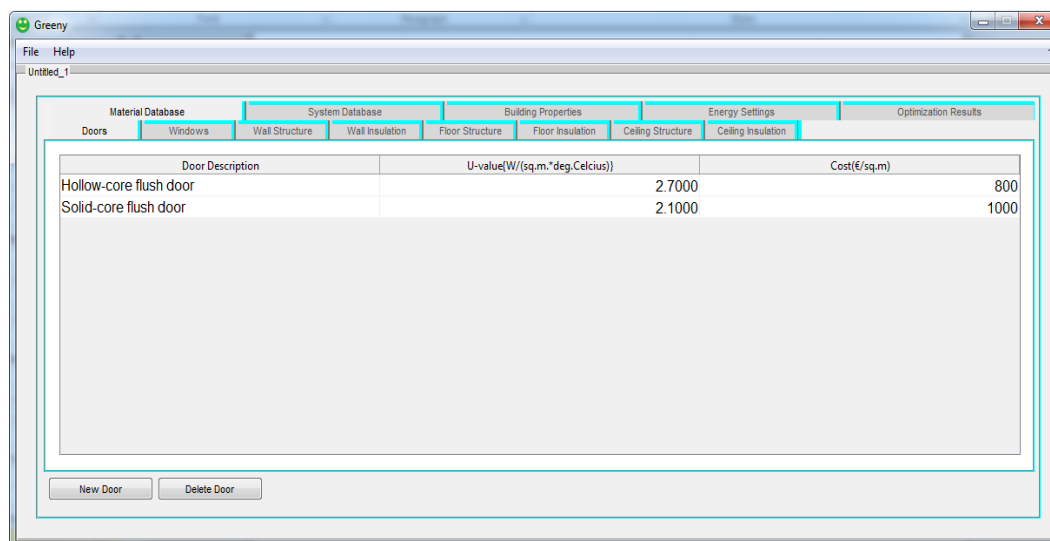
5. Εφαρμογή GREENY

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ GREENY[©]

Το GREENY είναι το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιώντας τον γενετικό αλγόριθμο του τέταρτου κεφαλαίου, δίνει την ευκαιρία στον χρήστη να επιλύσει το μαθηματικό πρότυπο που παρουσιάστηκε στο τρίτο κεφάλαιο μέσα σε ένα σύγχρονο γραφικό περιβάλλον το οποίο δημιουργήθηκε σε περιβάλλον MATLAB. Η λειτουργία του GREENY χωρίζεται σε 2 στάδια:

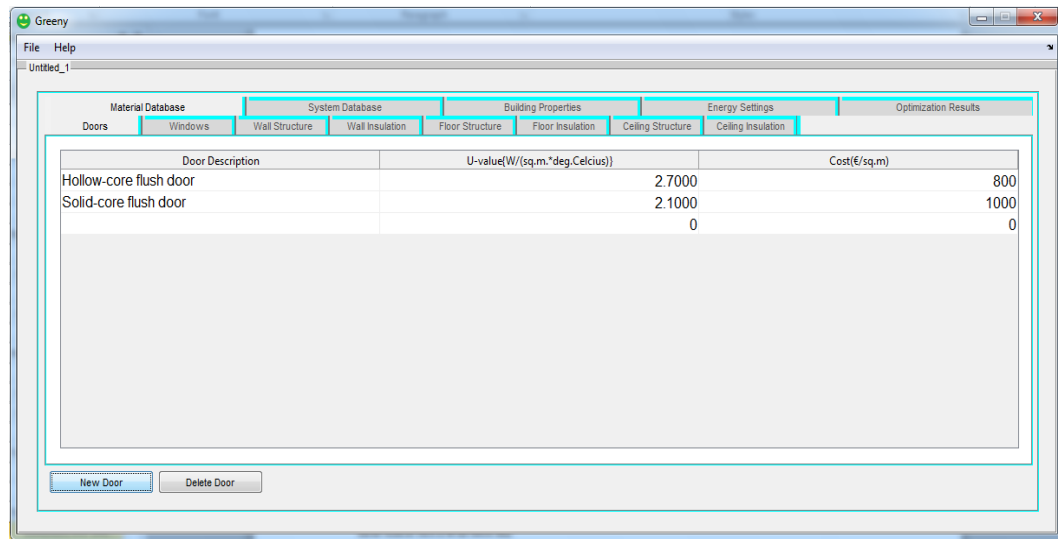
1. **Εισαγωγή δεδομένων:** Το GREENY κατά την εκκίνηση του, δημιουργεί ένα καινούργιο project και φορτώνει την βάση δεδομένων(στο παράρτημα Α παρουσιάζεται η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για το GREENY) για τα:
α)Υλικά (Material Database), β)Συστήματα (System database) και τις Ενεργειακές ρυθμίσεις (Energy Data). Τα χαρακτηριστικά του κτιρίου (Building properties) παραμένουν κενά ώστε ο χρήστης να τα συμπληρώσει. Η δυνατότητα αλλαγής στοιχείων και τιμών της παρούσας βάσης δίνεται στον χρήστη μέσα από την αποθήκευση του project του (File->Save). Οι αλλαγές που προκύπτουν στη βάση αποτυπώνονται μόνο στο συγκεκριμένο project και μπορούν να ανακτηθούν οποιαδήποτε στιγμή φορτώνοντας το (File->load). Στο σχήμα 5.1 εμφανίζεται η καρτέλα με τους εναλλακτικούς τύπους πόρτας κατά την εκκίνηση του GREENY. Παρατηρούμε ότι ο πρώτος τύπος πόρτας (Hollow-core flush door) κοστίζει λιγότερο και συνεπώς συμβάλει στη μείωση της τιμής του κριτηρίου του κόστους επένδυσης, παρουσιάζει όμως μεγαλύτερη τιμή θερμικής διαπερατότητας η οποία θα επιφέρει αύξηση στις τιμές των κριτηρίων ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO_2 . Ο δεύτερος τύπος πόρτας (Solid-core flush door) κοστίζει περισσότερο και επιφέρει αύξηση στην τιμή του κριτηρίου του κόστους

επένδυσης, παρουσιάζει όμως μικρότερη τιμή θερμικής διαπερατότητας και συμβάλει στην μείωση των κριτηρίων ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO_2 .



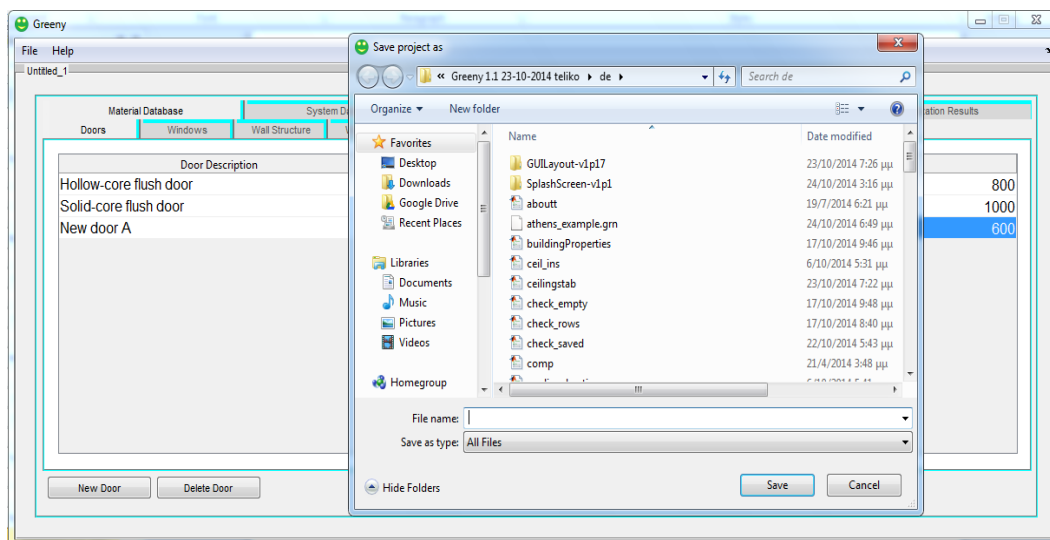
Σχήμα 5.1: Εκκίνηση GREENY, εναλλακτικοί τύποι πόρτας

Για να προστεθεί νέα πόρτα, ο χρήστης επιλέγει το “New door”. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2, δημιουργείται νέα πόρτα χωρίς χαρακτηριστικά τα οποία ο χρήστης πρέπει να εισάγει:



Σχήμα 5.2: Εισαγωγή πόρτας

Μετά την εισαγωγή των τιμών στα κατάλληλα κελιά, ο χρήστης αποθηκεύει τις αλλαγές στη βάση δημιουργώντας το δικό του project (File->Save). Σε αυτή την περίπτωση, το σχετικό παράθυρο διαλόγου εμφανίζεται ώστε ο χρήστης να επιλέξει το όνομα του project και την τοποθεσία αποθήκευσής του (σχήμα 5.3):



Σχήμα 5.3: Αποθήκευση project

Όπως προαναφέρθηκε, ο χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση στο συγκεκριμένο project οποιαδήποτε στιγμή, απλά κάνοντας (File->load).

Η εισαγωγή δεδομένων ακολουθεί την ίδια διαδικασία στις καρτέλες “Material Database” και “System Database” ενώ για την αφαίρεση δεδομένων ο χρήστης επιλέγει το στοιχείο που θέλει να διαγράψει και χρησιμοποιεί το button “Delete door” για να το διαγράψει. Διαφοροποίηση έχουμε μόνο στις καρτέλες της δομής τοιχοποιίας, στέγης και δαπέδου. Σε αυτές τις καρτέλες κάθε δομή χρησιμοποιεί το δικό της πίνακα γι’ αυτό το λόγο πρέπει να επιλέγεται κάθε φορά η δομή στην οποία θέλουμε να αφαιρέσουμε ή να προσθέσουμε layer ενώ η εισαγωγή νέας δομής γίνεται απλά πατώντας το button “New structure”. Η διαγραφή μιας δομής γίνεται διαγράφοντας όλα τα layers της (για λόγους ασφαλείας και αποφυγής λαθών του χρήστη, δεν μπορεί να διαγραφεί μία δομή πριν διαγραφούν τα layer της). Επίσης, πρέπει πάντα να υπάρχουν δύο δομές, οπότε δεν δίνεται η δυνατότητα διαγραφής όλων των δομών. Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η καρτέλα

“Wall structure”. Βλέπουμε ότι η δεύτερη δομή (Structure 2) κοστίζει λιγότερο και συνεπώς θα οδηγήσει στη μείωση της τιμής του κριτηρίου του κόστους επένδυσης, παρουσιάζει όμως μεγαλύτερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας και συμβάλει στην αύξηση της τιμής των κριτηρίων ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO_2 . Η πρώτη δομή (Structure 1) κοστίζει περισσότερο και θα επιφέρει αύξηση της τιμής του κριτηρίου του κόστους επένδυσης, παρουσιάζει όμως μικρότερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας με συνέπεια τη μείωση της τιμής των κριτηρίων ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO_2 .

Structure 1		Thickness(m)	K-value(W/(m.deg.Celcius))	Cost(€/cb.m)
Plaster		0.0250	0.8700	10
Brick(complex)		0.1500	0.7200	23
Plaster		0.0250	0.8700	10

Structure 2		Thickness(m)	K-value(W/(m.deg.Celcius))	Cost(€/cb.m)
Plaster		0.0250	0.8700	10
Brick(simple)		0.0600	0.7200	6.2000
Brick(simple)		0.0600	0.7200	6.2000
Plaster		0.0250	0.8700	10

Σχήμα 5.4: Καρτέλα “Wall structure”

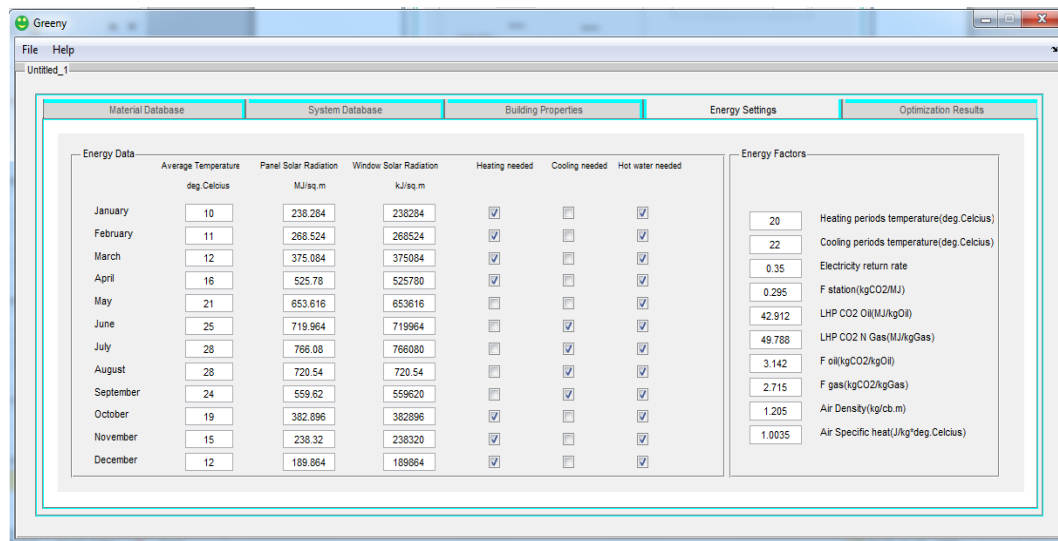
Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η καρτέλα “Building properties” που αφορά τα χαρακτηριστικά του κτιρίου και τα δεδομένα χρήσης του. Στο πεδίο envelope data, εισάγεται το εμβαδόν των δομικών στοιχείων, το εμβαδόν του ηλιακού πάνελ, ο μειωτικός συντελεστής τους (προκαθορισμένη τιμή 1) και τα όρια της μόνωσης για τα δομικά στοιχεία. Στο πεδίο “Building Use Data” εισάγεται ο

αριθμός των κατοίκων του κτιρίου, η λανθάνουσα θερμότητα του ατόμου και ο ρυθμός εξαερισμού του κτιρίου:

The screenshot shows the 'Greeny' software window with the 'Building Properties' tab active. The interface is organized into a menu bar (File, Help) and a toolbar. The main workspace contains several input fields for building parameters. On the left, under 'Envelope Data', there are fields for 'Total Area(sq.m)', 'Doors', 'Windows', 'Walls', 'Floor', 'Ceiling', 'Solar Panel', 'Insulation Width(m)', 'Temperature', and 'Correction Factor'. On the right, under 'Building Use Data', there are fields for 'Building Occupancy(persons)', 'Internal Heat Gain(W/person/day)', and 'Air Space Renewal Rate(cb.m/month)'. The 'Optimization Results' tab is also visible at the bottom of the window.

Σχήμα 5.5: Καρτέλα “Building Properties”

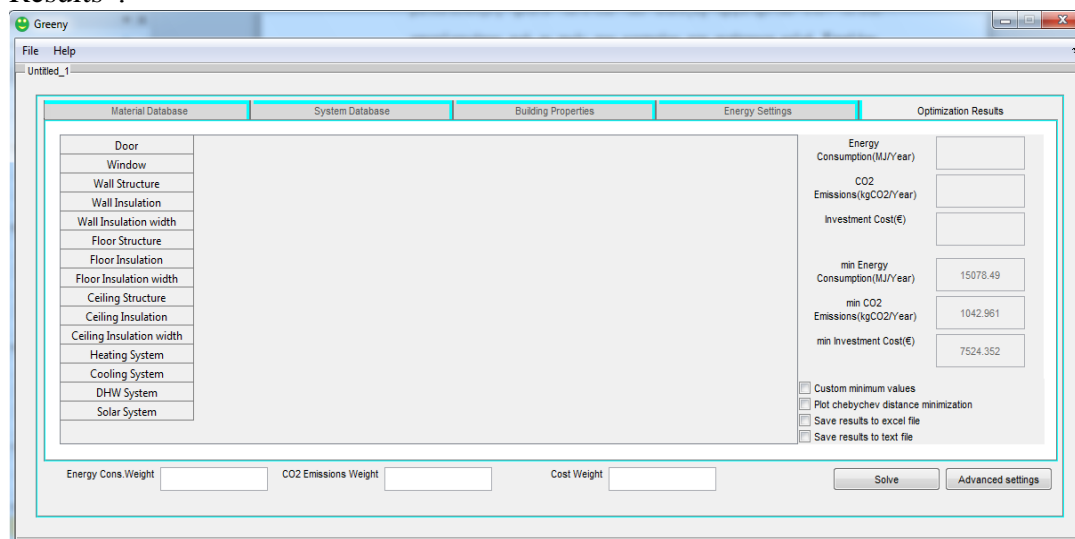
Στο σχήμα 5.6 εμφανίζεται η καρτέλα “Energy settings” η οποία αφορά τα ενεργειακά στοιχεία και συγκεκριμένα τις μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος, την ηλιακή ακτινοβολία για το ηλιακό panel αλλά και τα παράθυρα, την ανάγκη για θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό, τη θερμοκρασία για τους ζεστούς και κρύους μήνες, την απόδοση του ηλεκτρικού σταθμού ενέργειας, τους συντελεστές μετατροπής καυσίμων σε ενέργεια και CO₂ και κάποιες σταθερές όπως την πυκνότητα και την ειδική θερμότητα του αέρα:



Σχήμα 5.6: Καρτέλα “Energy Settings”

2. **Βελτιστοποίηση και αποτελέσματα:** Η βελτιστοποίηση στο GREENY γίνεται με απλό και εύκολο τρόπο. Ο χρήστης εισάγει τα βάρη και επιλέγει “Solve”. Πριν όμως ξεκινήσει η βελτιστοποίηση, ενεργοποιούνται διάφοροι έλεγχοι για τη σωστή και επαρκή εισαγωγή δεδομένων από το χρήστη. Αν ο χρήστης έχει κάνει κάποιο λάθος κατά την εισαγωγή δεδομένων (κενό πεδίο, ανεπαρκής αριθμός συστημάτων ή υλικών, λάθος εισαγωγή βαρών κ.λπ.), προβάλλονται τα αντίστοιχα “errors” και “warnings” τα οποία ενημερώνουν το χρήστη για το πρόβλημα και η βελτιστοποίηση δεν ξεκινά. Διαφορετικά, η βελτιστοποίηση ξεκινά κανονικά και οι επιλογές εμφανίζονται στον πίνακα αποτελεσμάτων ενώ οι τιμές των κριτηρίων στα αντίστοιχα κελιά. Επίσης, προσφέρονται επιπλέον δυνατότητες τις οποίες ενεργοποιεί ο χρήστης πριν από τη βελτιστοποίηση, όπως η εισαγωγή νέων ελαχίστων τιμών, η ζωντανή ελαχιστοποίηση των τιμών σε γράφημα και η αποθήκευση των αποτελεσμάτων σε excel η text. Τέλος, για χρήστες με εμπειρία στους γενετικούς αλγορίθμους, δίνεται η δυνατότητα

αλλαγής των ρυθμίσεων του αλγορίθμου (κεφάλαιο 4) πατώντας το button “Advanced settings”. Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η καρτέλα “Optimization Results”:



Σχήμα 5.7: Καρτέλα “Optimization Results”

5.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Για τον έλεγχο του προτύπου που χρησιμοποιήσαμε, χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δεδομένα (Πίνακας 5.1):

Πίνακας 5.1: Δομικά στοιχεία

Εμβαδόν δαπέδου	100 m ²
Εμβαδόν στέγης	100 m ²
Εμβαδόν τοιχοποιίας	108 m ² (2 πλευρές x 24 m ² και 2 πλευρές 30 m ²)
Εμβαδόν πόρτας	6 m ²
Εμβαδόν παραθύρου	6 m ²
Εμβαδόν ηλιακού πάνελ	2 m ²

Για τα παραπάνω δομικά στοιχεία, γίνεται η παραδοχή ότι βρίσκονται σε άμεση επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον και επομένως οι αντίστοιχοι μειωτικοί συντελεστές τους είναι ίσοι με 1. Για τα επίπεδα της μόνωσης το πάχος ορίζεται από 0-10cm (σχήμα 5.8).

The screenshot shows the 'Greeny' software window with the 'Building Properties' tab selected. The interface is divided into several sections:

- Material Database**: A tab at the top.
- System Database**: A tab at the top.
- Building Properties**: The active tab, containing:
 - Envelope Data**: A table with columns 'Total Area(sq.m)' and 'Temperature Correction Factor'.

	Total Area(sq.m)	Temperature Correction Factor
Doors	6	1
Windows	6	1
Walls	108	1
Floor	100	1
Ceiling	100	1
Solar Panel	2	1
 - Building Use Data**: A table with columns for building use parameters.

Building Occupancy(persons)	4
Internal Heat Gain(W/person/day)	70
Air Space Renewal Rate(cb.m/month)	30000
 - Insulation Width(m)**: A section with 'Minimum' (0.000) and 'Maximum' (0.100) values.
- Energy Settings**: A tab at the top.
- Optimization Results**: A tab at the top.

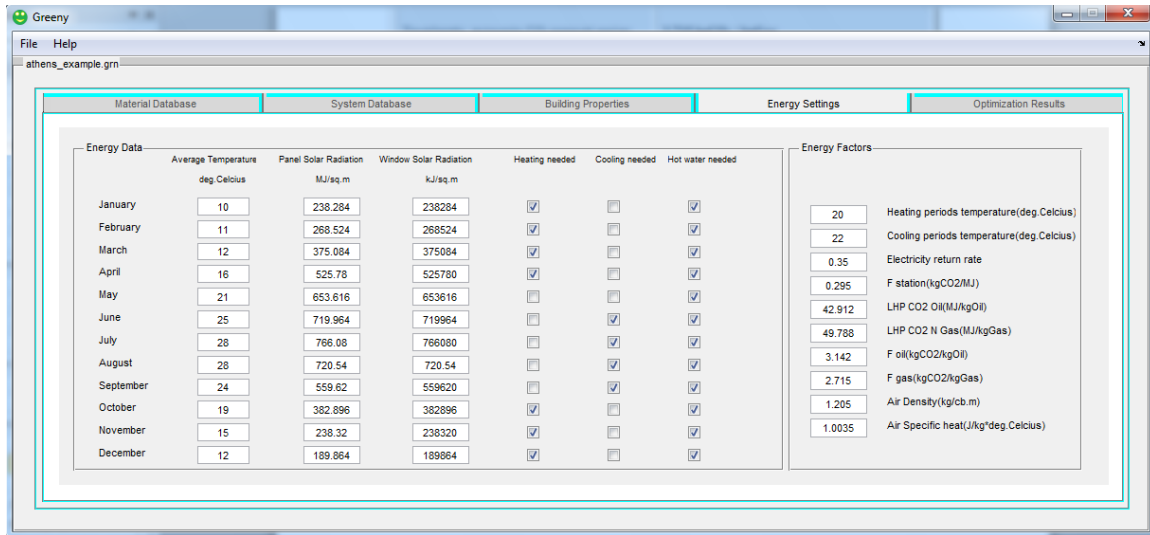
Σχήμα 5.8: Δεδομένα δομικών στοιχείων και στοιχείων χρήσης του κτιρίου

Το κτίριο που χρησιμοποιήσαμε, θεωρήθηκε ότι θα κατασκευαστεί στην Αθήνα ενώ για τις ανάγκες θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού, οι ενεργειακές πηγές που λήφθηκαν υπόψη είναι η ηλεκτρική ενέργεια, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και η ηλιακή ενέργεια. Για την περιοχή της Αθήνας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας από το αντίστοιχο παράδειγμα των Diakaki et al. (2010) όπως επίσης και οι ενεργειακοί παράμετροι όπως φαίνονται στον πίνακα 5.2:

Πίνακας 5.2:Ενεργειακοί παράμετροι

Επιθυμητή θερμοκρασία για ζεστές περιόδους	20°C
Επιθυμητή θερμοκρασία για ψυχρές περιόδους	22°C
Επιθυμητή θερμοκρασία για DHW	55 °C
Αρχική θερμοκρασία νερού	13 °
Κάτοικοι κτιρίου	4
Εκπομπή θερμότητας κατοίκου	70 W
Εξαερισμός κτιρίου	30000 m ³ / μήνα
Κατανάλωση DHW	10000 m ³ / μήνα
Πυκνότητα αέρα	1.205 kg / m ³
Θερμότητα αέρα	1.0035 J / kg°C
Πυκνότητα νερού	1000 kg/ m ³
Θερμότητα νερού	4.2 J / kg°C
Συντελεστής απόδοσης του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	0.35
Συντελεστής εκπομπών CO ₂ για ηλεκτρική ενέργεια	0.295 kgCO ₂ / MJ
Συντελεστής απόδοσης ενέργειας πετρελαίου	42.913 MJ / kgOil
Συντελεστής εκπομπών CO ₂ πετρελαίου	3.142 kgCO ₂ / kgOil
Συντελεστής απόδοσης ενέργειας φυσικού αερίου	49.788 MJ / kgGas
Συντελεστής εκπομπών CO ₂ φυσικού αερίου	2.715 kgCO ₂ / kgGas

Στο σχήμα 5.9 μπορούμε να δούμε την καρτέλα “Energy settings” με όλα τα στοιχεία από τον παρακάτω πίνακα για το παράδειγμα μας:



Σχήμα 5.9: Ενεργειακά στοιχεία για το παράδειγμα μας στην καρτέλα “Energy settings”

Οι αποφάσεις σχετικά με το κτίριο υπό εξέταση αφορούν την επιλογή:

- Τύπου πόρτας και παραθύρου
- Δομή τοιχοποιίας, στέγης και δαπέδου
- Πάχους υλικών και υλικών τοιχοποιίας, στέγης και δαπέδου
- Συστήματος θέρμανσης
- Συστήματος ψύξης
- Συστήματος DHW

Αναλυτικότερα:

- Για τις πόρτες και τα παράθυρα, οι εναλλακτικές παρουσιάζονται στο σχήμα 5.10 και 5.11 αντίστοιχα:

Material Database		System Database		Building Properties		Energy Settings		Optimization Results
Doors	Windows	Wall Structure	Wall Insulation	Floor Structure	Floor Insulation	Ceiling Structure	Ceiling Insulation	
Door Description		U-value(W/(sq.m.*deg.Celsius))				Cost(€/sq.m)		
Hollow-core flush door		2.7000				800		
Solid-core flush door		2.1000				1000		

Σχήμα 5.10: Εναλλακτικές επιλογές πορτών

Παρατηρούμε ότι ο πρώτος τύπος πόρτας (Hollow-core flush door) κοστίζει λιγότερο και συνεπώς συμβάλει στη μείωση της τιμής του κριτηρίου του κόστους επένδυσης, παρουσιάζει όμως μεγαλύτερη τιμή θερμικής διαπερατότητας η οποία θα επιφέρει αύξηση στις τιμές των κριτηρίων ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO_2 . Ο δεύτερος τύπος πόρτας (Solid-core flush door) κοστίζει περισσότερο και επιφέρει αύξηση στην τιμή του κριτηρίου του κόστους επένδυσης, παρουσιάζει όμως μικρότερη τιμή θερμικής διαπερατότητας και συμβάλει στη μείωση των κριτηρίων ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO_2 .

Material Database		System Database		Building Properties		Energy Settings		Optimization Results	
Doors		Windows		Wall Structure		Wall Insulation		Floor Structure	
Ceiling Structure		Ceiling Insulation		Floor Insulation		Ceiling Structure		Ceiling Insulation	
Window Description	U-value(W/(sq.m.*deg.Celcius))	Transmittance(%)	Cost(€/sq.m)						
Single Glazing-Typical	5	0.8000	40						
Double Glazing-Uncoated	2.6000	0.7200	55						
Coated	1.6000	0.7600	65						

☐ No windows
 Frame factor
 Shade factor
 Correction factor

Σχήμα 5.11: Εναλλακτικές επιλογές παραθύρων

- Τα παράθυρα με τις μικρότερες τιμές θερμικής διαπερατότητας και ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. παράθυρο Coated) αποτελούν καλύτερες επιλογές όσον αφορά τη βελτιστοποίηση των κριτηρίων της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών CO_2 αλλά κοστίζουν περισσότερο, αυξάνοντας την τιμή του κριτηρίου του κόστους επένδυσης. Ο συντελεστής πλαισίου του παραθύρου τέθηκε ίσος με 0.7, ενώ οι συντελεστές σκίασης τέθηκαν ίσοι με 1.
- Για την τοιχοποιία, τη στέγη και το δάπεδο, οι εναλλακτικές παρουσιάζονται στα σχήματα 5.12 ως και 5.15:

Material Database		System Database		Building Properties		Energy Settings		Optimization Results	
Doors	Windows	Wall Structure	Wall Insulation	Floor Structure	Floor Insulation	Ceiling Structure	Ceiling Insulation		
Structure 1		Thickness(m)	K-value(W/(m.deg.Celsius))		Cost(€/cb.m)				
Plaster		0.0250	0.8700		10				
Brick(complex)		0.1500	0.7200		23				
Plaster		0.0250	0.8700		10				
Structure 2		Thickness(m)	K-value(W/(m.deg.Celsius))		Cost(€/cb.m)				
Plaster		0.0250	0.8700		10				
Brick(simple)		0.0600	0.7200		6.2000				
Brick(simple)		0.0600	0.7200		6.2000				
Plaster		0.0250	0.8700		10				
New Structure		New layer in structure:		1	Remove selected layer from structure:		1		

Σχήμα 5.12: Εναλλακτικές επιλογές τοιχοποιίας

Material Database		System Database		Building Properties		Energy Settings		Optimization Results	
Doors	Windows	Wall Structure	Wall Insulation	Floor Structure	Floor Insulation	Ceiling Structure	Ceiling Insulation		
Structure 1		Thickness(m)	K-value(W/(m.deg.Celsius))		Cost(€/cb.m)				
Tiles		0.0200	1		55				
Concrete		0.1500	0.7200		55				
Structure 2		Thickness(m)	K-value(W/(m.deg.Celsius))		Cost(€/cb.m)				
Tiles		0.0200	1		55				
Wood		0.0300	0.1700		70				
New Structure		New layer in structure:		1	Remove selected layer from structure:		1		

Σχήμα 5.13: Εναλλακτικές επιλογές στέγης

Material Database		System Database		Building Properties		Energy Settings		Optimization Results	
Doors	Windows	Wall Structure	Wall Insulation	Floor Structure	Floor Insulation	Ceiling Structure	Ceiling Insulation		
Structure 1		Thickness(m)	K-value(W/(m.deg.Celcius))		Cost(€/cb.m)				
Tiles			0.0100	1		55			
Concrete			0.1500	0.7200		55			
Structure 2		Thickness(m)	K-value(W/(m.deg.Celcius))		Cost(€/cb.m)				
Wood			0.0200	0.1700		85			
Concrete			0.1500	0.7200		55			

Σχήμα 5.14: Εναλλακτικές επιλογές δαπέδου

Για τις δομές τοιχοποιίας, στέγης και δαπέδου, οι δομές με τις μικρότερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας θα οδηγήσουν σε μείωση της τιμής των κριτηρίων της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών CO_2 , αποτελούν όμως και ακριβότερες επιλογές που θα επιφέρουν αύξηση στην τιμή του κριτηρίου του κόστους επένδυσης.

Για την μόνωση, ίδιες εναλλακτικές χρησιμοποιούνται για όλα τα δομικά στοιχεία γι' αυτό το λόγο παρουσιάζονται μόνο οι εναλλακτικές επιλογές της τοιχοποιίας (Σχήμα 5.15).

Σχήμα 5.16: Εναλλακτικές επιλογές ηλεκτρικών συστημάτων που προσφέρουν θέρμανση

Material Database		System Database		Building Properties		Energy Settings		Optimization Results	
Heating Systems		Heating/Cooling Systems		DHW Systems		Heating-DHW Systems			
Electrical Heating	Oil Heating Systems	Natural Gas							
System			Generation Efficiency(%)				Cost(£)		
Condensing			0.8300				5300		
Standard oil boiler			0.6200				4700		

Σχήμα 5.17: Εναλλακτικές επιλογές συστημάτων με βάση το πετρέλαιο που προσφέρουν θέρμανση

Material Database		System Database		Building Properties		Energy Settings		Optimization Results	
Heating Systems		Heating/Cooling Systems		DHW Systems		Heating-DHW Systems			
Electrical Heating	Oil Heating Systems	Natural Gas							
System		Generation Efficiency(%)				Cost(£)			
Condensing		0.8500				5800			
Floor mounted boiler		0.5500				4500			

Σχήμα 5.18: Εναλλακτικές επιλογές συστημάτων με βάση το φυσικό αέριο που προσφέρουν θέρμανση

5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ

Για την εφαρμογή του προτύπου απόφασης (70) απαιτείται ο καθορισμός μεταβλητών απόφασης που αντιπροσωπεύουν τις διαθέσιμες επιλογές για το χρήστη. Τα κριτήρια απόφασης του προτύπου είναι ανταγωνιστικά αφού η μείωση στην τιμή του ενός, συνεπάγεται την αύξηση της τιμής του άλλου.

Ο πίνακας 5.3 παρουσιάζει τη βελτιστοποίηση του κάθε κριτηρίου χωριστά, όπου φαίνεται η ισχυρή ανταγωνιστική σχέση τους:

Πίνακας 5.3:Ανεξάρτητη βελτιστοποίηση κριτηρίων

Τύπος λύσης	Q_T (MJ /year)	EM_{CO_2} (kgCO ₂ / year)	INCOST (€)
$[min]g_1(x)$	15078.49	1553.729	21986.60
$[min]g_2(x)$	15406.44	1042.961	27636.60
$[min]g_3(x)$	355605.30	36302.140	7524.35

Παρατηρούμε ότι η σχέση μεταξύ των κριτηρίων είναι εξαιρετικά ανταγωνιστική, με τις τιμές των κριτηρίων να παρουσιάζουν πολύ μεγάλες διαφορές κατά την ανεξάρτητη βελτιστοποίηση τους. Η επίλυση του πίνακα 5.3 για το παράδειγμα μας, μας οδηγεί στην επιλογή των μεταβλητών απόφασης όπως φαίνεται στον πίνακα 5.4 ενώ οι τιμές των κριτηρίων για διάφορα σετ βαρών δίνεται στον πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.4: Επιλογή υλικών και συστημάτων για το συγκεκριμένο παράδειγμα

Τύπος λύσης	Πόρτα-Παράθυρο		
	Τύπος πόρτας	Παράθυρο	
	Παράθυρο	Κατηγορία	Τύπος
$[\min]g_1(x)$	2	2	2
$[\min]g_2(x)$	2	2	2
$[\min]g_3(x)$	1	1	1
Τύπος λύσης	Τοιχοποιία		
	Δομή	Πάχος μόνωσης (m)	Υλικό μόνωσης
$[\min]g_1(x)$	1	0.10	3
$[\min]g_2(x)$	1	0.10	3
$[\min]g_3(x)$	2	0.00	-
Τύπος λύσης	Στέγη		
	Δομή	Πάχος μόνωσης (m)	Υλικό μόνωσης
$[\min]g_1(x)$	1	0.10	3
$[\min]g_2(x)$	1	0.10	3
$[\min]g_3(x)$	2	0.00	-
Τύπος λύσης	Δάπεδο		
	Δομή	Πάχος μόνωσης (m)	Υλικό μόνωσης
$[\min]g_1(x)$	2	0.10	3
$[\min]g_2(x)$	2	0.10	3
$[\min]g_3(x)$	1	0.00	-
Τύπος λύσης	Σύστημα θέρμανσης		
	Τύπος συστήματος	Κατηγορία	Τύπος
$[\min]g_1(x)$	Ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης/ ψύξης	1	3
$[\min]g_2(x)$	Μη-ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης	2	1
$[\min]g_3(x)$	Ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης/ ψύξης	1	1

Τύπος λύσης	Σύστημα ψύξης		
	Τύπος συστήματος	Κατηγορία	Τύπος
$[\min]g_1(x)$	Ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης/ ψύξης	1	3
$[\min]g_2(x)$	Ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης/ ψύξης	1	3
$[\min]g_3(x)$	Ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης/ ψύξης	1	1
Τύπος λύσης	Σύστημα DHW		
	Τύπος συστήματος	Κατηγορία	Τύπος
$[\min]g_1(x)$	Μη-ηλεκτρικό σύστημα DHW	1	1
$[\min]g_2(x)$	Μη-ηλεκτρικό σύστημα DHW	2	1
$[\min]g_3(x)$	Μη-ηλεκτρικό σύστημα DHW	2	2
Τύπος λύσης	Ηλιακό θερμικό σύστημα		
	Κατηγορία		Τύπος
$[\min]g_1(x)$	1		1
$[\min]g_2(x)$	1		1
$[\min]g_3(x)$	Κανένα		

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα

P1	P2	P3	Q _T (MJ /year)	EM _{CO2} (kgCO ₂ / year)	INCCOST (€)
1	0	0	15078,49	1553,73	21986,59
0,8	0	0,2	15374,35	1570,46	20129,35
0,8	0,2	0	15406,44	1042,961	27636,6
0,6	0	0,4	17026,09	1741,002	18075,67
0,6	0,2	0,2	15374,35	1570,46	20129,35
0,6	0,4	0	15406,45	1042,961	27636,59
0,4	0	0,6	23362,84	2375,909	14911,49
0,4	0,2	0,4	16156,9	1651,258	18777,59
0,4	0,4	0,2	15693,44	1059,317	25929,34
0,4	0,6	0	15406,44	1042,961	27636,6
0,2	0	0,8	44059,28	4135,011	11366,58
0,2	0,2	0,6	21504,78	2184,064	15601,76
0,2	0,4	0,4	16114,98	1646,929	18814,31
0,2	0,6	0,2	15693,44	1059,317	25929,34
0,2	0,8	0	15406,44	1042,961	27636,6
0	0	1	355605,3	36302,14	7524,352
0	0,2	0,8	37116,99	3418,219	12417,83
0	0,4	0,6	20129,2	2042,035	16226,05
0	0,6	0,4	16114,94	1646,926	18814,34
0	0,8	0,2	15693,45	1059,317	25929,34
0	1	0	15406,45	1042,961	27636,59

Παρατηρούμε ότι όταν βελτιστοποιείται ανεξάρτητα το κριτήριο της ενεργειακής κατανάλωσης, επιλέγονται οι πόρτες και τα παράθυρα με τις χαμηλότερες τιμές θερμοδιαπερατότητας και ηλιακής ακτινοβολίας για τα παράθυρα. Η τοιχοποιία, το δάπεδο και η στέγη επιλέγονται ώστε να προκύψει ο χαμηλότερος συντελεστής θερμοδιαπερατότητας του κτιρίου. Δηλαδή, επιλέγονται υλικά και δομές με τις μεγαλύτερες θερμικές αντιστάσεις και για το επίπεδο της μόνωσης, επιλέγεται το βέλτιστο θερμομονωτικό υλικό μεγίστου πάχους. Ταυτόχρονα η επιλογή συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και DHW περιλαμβάνει τα συστήματα με τη μέγιστη απόδοση, ενώ επιλέγεται η χρήση ηλιοθερμικού συστήματος για το DHW αφού έχει συγκεκριμένο ενεργειακό όφελος. Λόγω του υψηλού κόστους αυτών των επιλογών, παρατηρούμε σημαντική αύξηση της τιμής του κριτηρίου του κόστους επένδυσης, ενώ το κριτήριο των εκπομπών CO₂ λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή από την τιμή που είχε κατά την ανεξάρτητη βελτιστοποίηση γιατί εξαρτάται όχι μόνο από το μέγεθος της καταναλισκόμενης ενέργειας, αλλά και από το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια, αναμένεται να παράγει περισσότερες εκπομπές από ένα σύστημα ίδιας η χαμηλότερης (σε κάποιες περιπτώσεις) απόδοσης το οποίο χρησιμοποιεί κάποια εναλλακτική μορφή ενέργειας όπως το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο.

Όταν το κριτήριο των εκπομπών CO₂ βελτιστοποιείται, οι αποφάσεις που λαμβάνονται, έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλή κατανάλωση ενέργειας όσον αφορά το κτιριακό κέλυφος. Αντίθετα, για τα συστήματα θέρμανσης ψύξης και DHW η επιλογή αφορά τα συστήματα με τον υψηλότερο συντελεστή απόδοσης. Αν υποθέσουμε ότι τα συστήματα θέρμανσης και DHW (για την ψύξη έχουμε μόνο ηλεκτρικά συστήματα) έχουν κοινή απόδοση στις διάφορες κατηγορίες, τότε επιλέγεται σύστημα φυσικού αερίου γιατί για δεδομένη

κατανάλωση ενέργειας, η χρήση φυσικού αερίου συνεπάγεται τις ελάχιστες εκπομπές CO₂. Επομένως σε αυτήν την περίπτωση η επιλογή των συστημάτων οδηγεί στη σχετικά μικρή αύξηση του κριτηρίου της κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με την ελάχιστη τιμή του κριτηρίου αυτού αλλά και σε σχετικά υψηλά επίπεδα την τιμή του κριτηρίου του κόστους επένδυσης.

Τέλος, στην περίπτωση βελτιστοποίησης του κριτηρίου κόστους επένδυσης, οι επιλογές που οδηγούν στη μείωση του κόστους, έχουν ως συνέπεια την ταυτόχρονη αύξηση των τιμών των κριτηρίων ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO₂.

Συμπεράσματα

Η αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας στον κτιριακό τομέα αποτελεί ένα από κυριότερα θέματα που απασχολούν την ανθρωπότητα σήμερα καθώς η ενέργεια του αντιστοιχεί στο 40% της συνολικής κατανάλωσης, ενισχύοντας την εκπομπή επικίνδυνων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και γενικότερα την υπερθέρμανση του πλανήτη.

Για τη βελτίωση της ενεργειακής διαχείρισης των κτιρίων, υπάρχει πλήθος διαφορετικών μέτρων και ο αποφασίζων καλείται να σταθμίσει ενεργειακούς, περιβαλλοντικούς, οικονομικούς και άλλους παράγοντες για να λάβει τη βέλτιστη απόφαση. Η δυσκολία εδώ εντοπίζεται στην ύπαρξη ανταγωνιστικών κριτηρίων τα οποία διαμορφώνουν ένα πολυστοχικό πρόβλημα το οποίο προσεγγίζεται ελλιπώς με τη χρήση προσομοίωσης και τεχνικών πολυκριτήριας ανάλυσης.

Η παρούσα εργασία εντάσσει τους γενετικούς αλγορίθμους στην προσπάθεια επίλυσης του προβλήματος της ενεργειακής διαχείρισης κτιρίων δίνοντας τη δυνατότητα χρησιμοποίησης μεγάλου αριθμού μεταβλητών με τα αποτελέσματα να δείχνουν ίδιες ή και καλύτερες τιμές των κριτηρίων σε σχέση με αποτελέσματα τεχνικών πολυκριτήριας ανάλυσης σε πολύ μικρό χρόνο. Μελλοντικά, η χρήση αυτού ή τέτοιου είδους αλγορίθμου θα μπορούσε ίσως να οδηγήσει σε πολύ καλύτερα αποτελέσματα καθώς δίνεται η δυνατότητα επέμβασης στη συνάρτηση μετάλλαξης αλλά και σε όλα τα τεχνικά στοιχεία του αλγορίθμου (crossover, πληθυσμός κ.α.). Αυτό μας οδηγεί σε πάρα πολλές εναλλακτικές ρυθμίσεις λειτουργίας και θα μπορούσε να ερευνηθεί ξεχωριστά.

Για τη διαχείριση των επιλογών και τη χρήση του αλγορίθμου, δημιουργήθηκε η εφαρμογή Greeny η οποία δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα να δημιουργεί διαφορετικά project για διαφορετικά κτίρια και να χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο για διάφορα σενάρια.

Η αυτόματα αναβαθμιζόμενη βάση δεδομένων αλλά και η σύνδεση σε διαδικτυακή υπηρεσία για τη λήψη μετεωρολογικών δεδομένων ανά περιοχή είναι δύο βελτιώσεις που θα μπορούσαν να ερευνηθούν για την εφαρμογή Greeny.

Γενικότερα, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εκμετάλλευση της δυνατότητας του αλγορίθμου να χειριστεί ακόμα μεγαλύτερο αριθμό μεταβλητών, ενσωματώνοντας πρόσθετα κριτήρια απόφασης, όπως της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος και του λειτουργικού κόστους.

Βιβλιογραφία

- Alanne, K. (2004) 'Selection of renovation actions using multi-criteria 'knapsack' model', *Automation in Construction*, vol 13, no 3, pp377–391
- Alanne, K., Salo, A., Saari, A. and Gustafsson, S. I. (2007) 'Multi-criteria evaluation of residential energy supply systems', *Energy and Buildings*, vol 39, pp1218–1226
- Atthajariyakul, S. and Leephakpreeda, T. (2004) 'Real-time determination of optimal indoor-air condition for thermal comfort, air quality and efficient energy usage', *Energy and Buildings*, vol 36, no 7, pp720–733
- Becker, R., Goldberger, I. and Paciuk, M. (2007) 'Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation', *Building and Environment*, vol 42, no 9, pp3261–3276
- Blondeau, P., Sperandio, M. and Allard, F. (2002) 'Multi-criteria analysis of ventilation in summer period', *Building and Environment*, vol 37, no 2, pp165–176
- Bluyssen, P. M. (2000) 'EPIQR and IEQ: Indoor environment quality in European apartment buildings', *Energy and Buildings*, vol 31, no 2, pp103–110
- Bouchlaghem, N. (2000) 'Optimising the design of building envelopes for thermal performance', *Automation in Construction*, vol 10, no 1, pp101–112
- Chen, Z., Clements-Croome, D., Hong, J., Li, H. and Xu, Q. (2006) 'A multi-criteria lifespan energy efficiency approach to intelligent building assessment', *Energy and Buildings*, vol 38, no 5, pp393–409
- Clark, J. A. (2001) *Energy Simulation in Building Design*, 2nd edn, Butterworth-Heinemann, London
- D'Cruz, N. A. and Radford, A. D. (1987) 'A multi-criteria model for building performance and design', *Building and Environment*, vol 22, no 3, pp167–179

- Diakaki, C., Grigoroudis, E. and Kolokotsa, D. (2008) 'Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings', *Energy and Buildings*, vol 40, no 9, pp1747–1754
- Diakaki, C., Grigoroudis, E., Kolokotsa, D., Kabelis, N., Kalaitzakis, K., Stavrakakis, G., (2010) 'A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings', vol 35, pp5483-5496
- Doukas, H., Patlitzianas, K.D., Iatropoulos, K., Psarras, J. (2007) 'Intelligent building energy management system using rule sets', *Building and Environment*, vol 42, no 10, pp3562–3569
- Doukas, H., Nychtis, C. and Psarras, J. (2008) 'Assessing energy-saving measures in buildings through an intelligent decision support model', *Building and Environment*, vol 44, no 2, pp290–298
- EC (European Community) (2003) Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the Energy Performance of Buildings, L1/65, Official Journal of the European Communities
- Ehrgott, M. (2005) *Multi-criteria Optimization*, 2nd edn, Springer, Berlin
- Fonseca, C. M. and Flemming, P. J. (1998) 'Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms – Part 1: A unified formulation', *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, vol 28, no 1, pp26–37
- Gero, J. S., Neville, D. C. and Radford, A. D. (1983) 'Energy in context: A multi-criteria model for building design', *Building and Environment*, vol 18, no 3, pp99–107
- Gholap, A. K. and Khan, J. A. (2007) 'Design and multi-objective optimization of heat exchangers for refrigerators', *Applied Energy*, vol 84, no 12, pp1226–1239

- Homoud Al, M. S. (2001) 'Computer-aided building energy analysis techniques', Building and Environment, vol 36, no 4, pp421–433
- ISO (International Organization for Standardization) (1984) Moderate Thermal Environments – Determination of PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort, ISO Standard 7730-84, ISO, Geneva
- Jaggs, M. and Palmer, J. (2000) 'Energy performance indoor environmental quality retrofit – a European diagnosis and decision making method for building refurbishment', Energy and Buildings, vol 31, no 2, pp97–101
- Jedrzejuk, H. and Marks, W. (2002) 'Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilisation example', Building and Environment, vol 37, no 12, pp1249–1253
- Kalogirou, S. A. (2006) 'Artificial neural networks in energy applications in buildings', International Journal of Low Carbon Technologies, vol 1, no 3, pp201–216
- Keeney, R. and Raiffa, H. (1993) Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Tradeoffs, Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Kolokotsa, D. (2003) 'Comparison of the performance of fuzzy controllers for the management of the indoor environment', Building and Environment, vol 38, no 12, pp1439–1450
- Kolokotsa, D. (2007) 'Artificial intelligence in buildings: A review on the application of fuzzy logic', Advances in Building Energy Research, vol 1, pp29–54
- Kolokotsa, D., Tsiavos, D., Stavrakakis, G., Kalaitzakis, K. and Antonidakis, E. (2001) 'Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings' occupants' thermal–visual comfort and indoor air quality satisfaction', Energy and Buildings, vol 33, no 6, pp531–543

- Kolokotsa, D., Diakaki, C., Kalaitzakis, K., Stavrakakis, G. and Grigoroudis, E. (2009) 'Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings, vol 3, pp121–146
- Kolokotsa, D., Niachou, K., Geros, V., Kalaitzakis, K., Stavrakakis, G. and Santamouris, M. (2005) 'Implementation of an integrated indoor environment and energy management system', *Energy and Buildings*, vol 37, no 1, pp93–99
- Krarti, M. (2000) *Energy Audit of Building Systems*, CRC Press, Boca Raton, London, New York
- Martinaitis V., Rogoza, A. and Bikmaniene, I. (2004) 'Criterion to evaluate the “twofold benefit” of the renovation of buildings and their elements', *Energy and Buildings*, vol 36, no 1, pp3–8
- Mathews, E. H., Arndt, D. C., Piani, C. B. and van Heerden, E. (2000) 'Developing cost efficient control strategies to ensure optimal energy use and sufficient indoor comfort', *Applied Energy*, vol 66, no 2, pp135–159
- Mavrotas, G., Diakoulaki, D., Florios, K. and Georgiou, P. (2008) 'A mathematical programming framework for energy planning in services' sector buildings under uncertainty in load demand: The case of a hospital in Athens', *Energy Policy*, vol 36, no 7, pp 2415-2429, pp2415–2429
- Nelder, J. A. and Mead, R. (1965) 'A simplex method for function minimization', *Computer Journal*, vol 7, no 15, pp308–313
- Radford, A. D. and Gero, J. S. (1980) 'Tradeoff diagrams for the integrated design of the physical environment in buildings', *Building and Environment*, vol 15, no 2, pp3–15
- Rey, E. (2004) 'Office building retrofitting strategies: Multi-criteria approach of an architectural and technical issue', *Energy and Buildings*, vol 36, no 4, pp367–372

- Rosenfeld, Y. and Shohet, I. M. (1999) 'Decision support model for semi-automated selection of renovation alternatives', *Automation in Construction*, vol 8, no 4, pp503–510
- Roulet, C. A., Flourentzou, F., Labben, H. H., Santamouris, M., Koronaki, I., Dascalaki, E. and Richalet, V. (2002) 'ORME: A multi-criteria rating methodology for buildings', *Building and Environment*, vol 37, no 6, pp579–586
- Roy, B. (1991) 'The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods', *Theory and Decision*, vol 31, pp49–73
- Rutman, E., Inard, C., Bailly, A. and Allard, F. (2005) 'A global approach of indoor environment in an air-conditioned office room', *Building and Environment*, vol 40, no 1, pp29–37
- Storn, R., Price, K. (1997) "Differential evolution: A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces", *Journal of Global Optimization* 11, 341 – 359.
- Wang, W., Zmeureanu, R. and Rivard, H. (2005) 'Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization', *Building and Environment*, vol 40, no 11, pp1512–1525
- Wilde, P. and van der Voorden, M. (2004) 'Providing computational support for the selection of energy saving building components', *Energy and Buildings*, vol 36, no 8, pp749–758
- Wong, J. K. W. and Li, H. (2008) 'Application of the analytic hierarchy process (AHP) in multi-criteria analysis of the selection of intelligent building systems', *Building and Environment*, vol 43, no 1, pp108–125

- Wright, J. A., Loosemore, H. A. and Farmani, R. (2002) 'Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm', *Energy and Buildings*, vol 34, no 9, pp959–972
- Zhu, Y. (2006) 'Applying computer-based simulation energy auditing: A case study', *Energy and Buildings*, vol 38, no 5, pp421–428