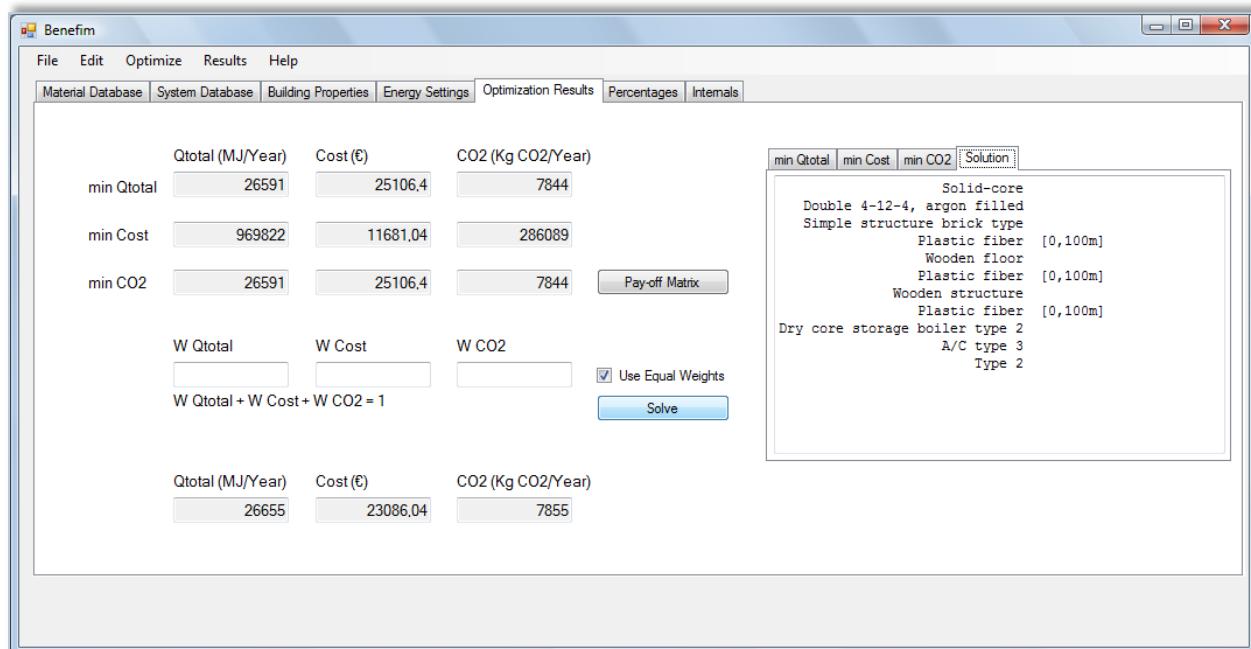


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ | ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ
ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την απόκτηση
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης
υπό¹
Νικόλαο Καμπέλη



Χανιά, 2011

Τριμελής επιτροπή:

Γρηγορούδης Ευάγγελος – Επίκουρος Καθηγητής (επιβλέπων), ΜΠΔ

Δούμπος Μιχάλης – Επίκουρος Καθηγητής, ΜΠΔ

Κολοκοτσά Διονυσία – Επίκουρος Καθηγήτρια, ΜΗΠΕΡ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	6
1. Εισαγωγή	7
1.1 Περιγραφή ερευνητικού αντικειμένου.....	7
1.2 Πρωτοτυπία και αναγκαιότητα αναπτυχθέντος ΣΥΑ	8
1.3 Στόχοι και δομή της εργασίας.....	9
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	12
2.1 Εισαγωγή	12
2.2 Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (ΠΑΑ)	15
2.2.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο	15
2.2.2 Βασικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις λήψης αποφάσεων	17
2.3 Κριτήρια στη λήψη αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων	18
2.4 Τεχνικές λήψης αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων .	21
2.4.1 Μεθοδολογίες αξιολόγησης ενεργειακής απόδοσης κτιρίων	22
2.5 Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές.....	35
3. Μαθηματικό πρότυπο	38
3.1 Βασικές αρχές	38
3.2 Μεταβλητές απόφασης & περιορισμοί.....	39
3.2.1 Μεταβλητές απόφασης & περιορισμοί του κτιριακού κελύφους	39
3.2.2 Μεταβλητές απόφασης & περιορισμοί των συστημάτων.....	43
3.3 Κριτήρια απόφασης	46
3.3.1 Ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας	46
3.3.2 Εκπομπές CO ₂	53
3.3.3 Κόστος επένδυσης	53
3.4 Διαδικασία επίλυσης προτύπου απόφασης.....	55
4. Μελέτη περίπτωσης	57

4.1 Εισαγωγή στο Benefim [©]	57
4.2 Παράδειγμα εφαρμογής	65
4.2 Ανάπτυξη και επίλυση πρότυπου.....	75
5. Συμπεράσματα	82
Βιβλιογραφία	84
Παράρτημα Α: Βάση δεδομένων υλικών, δομικών στοιχείων & συστημάτων του Benefim [©]	90
Παράρτημα Β: Βασικές εξισώσεις υπολογισμού μοντέλου	95

Ευχαριστίες

Οφείλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα για τη συνεισφορά τους στην παρούσα ερευνητική εργασία τον επιβλέποντα καθηγητή του τμήματος ΜΠΔ του Πολυτεχνείου Κρήτης (Π.Κ.) Ευάγγελο Γρηγορούδη, την καθηγήτρια του ΤΕΙ Κρήτης Χριστίνα Διακάκη, την καθηγήτρια του τμήματος Περιβάλλοντος του Π.Κ. Ντένια Κολοκοτσά, καθώς και τους καθηγητές του τμήματος ΗΜΜΥ του Π.Κ. Γεώργιο Σταυρακάκη και Γεώργιο Καλαϊτζάκη. Τέλος, θερμά ευχαριστώ τον Θωμά Σαρμή για την υποστήριξή του σε θέματα προγραμματισμού και ανάπτυξης λογισμικού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρούσα εργασία χρηματοδοτήθηκε από τον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας (Ε.Λ.Κ.Ε.) του Πολυτεχνείου Κρήτης στο πλαίσιο του προγράμματος Βασική Έρευνα 2007.

Περίληψη

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, όπου η κατανάλωση ενέργειας προσεγγίζει το 40% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας και παρουσιάζει αυξητικές τάσεις, αποτελεί κεντρικό στόχο της ενεργειακής πολιτικής της Ε.Ε. και άλλων ανεπτυγμένων κρατών. Τα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια ποικίλουν και ο αποφασίζων καλείται να προβεί στη βέλτιστη επιλογή τους σε σχέση με κριτήρια όπως η ενεργειακή κατανάλωση, το οικονομικό κόστος, το περιβαλλοντικό κόστος, η αισθητική κ.α. Η ύπαρξη διάφορων και κατά κανόνα ανταγωνιστικών μεταξύ τους κριτηρίων καθιστούν την επιλογή μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας σε ένα κτίριο, πολυυστοχικό πρόβλημα λήψης αποφάσεων. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην πράξη όπως η προσομοίωση αλλά και τεχνικές πολυκριτήριας ανάλυσης εξετάζουν ένα πεπερασμένο πλήθος εναλλακτικών μέτρων και έχουν περιορισμένη αποτελεσματικότητα. Το πολυυστοχικό σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (ΣΥΑ) που αναπτύχθηκε και αναλύεται στην παρούσα εργασία, στοχεύει στην υπέρβαση των περιορισμών των υφιστάμενων μεθόδων και αποτελεί χρήσιμο εργαλείο κατά την επιλογή των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες προτιμήσεις του αποφασίζοντος. Τα κριτήρια που αναπτύχθηκαν και ενσωματώθηκαν στο ΣΥΑ είναι η ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, το κόστος επένδυσης και οι ετήσιες εκπομπές CO₂. Η βελτιστοποίηση των τριών κριτηρίων υλοποιείται βάσει συναινετικού προγραμματισμού, μιας τεχνικής επίλυσης πολυυστοχικών προβλημάτων με ευρεία εφαρμογή σε διάφορους τομείς. Το ΣΥΑ για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων αναπτύχθηκε ως λογισμικό το οποίο κάνει χρήση της εφαρμογής βελτιστοποίησης Lindo API και ο χειρισμός του γίνεται μέσω γραφικού περιβάλλοντος.

Αρχικά, αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο, ακολουθεί η βιβλιογραφική ανασκόπηση, το μαθηματικό πρότυπο και εν συνεχείᾳ παρατίθεται μελέτης περίπτωσης. Τα αποτελέσματα του ΣΥΑ από τη μελέτη περίπτωσης οδηγούν σε συμπεράσματα και προτάσεις για τη βελτίωση και περαιτέρω επέκταση του.

1. Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή ερευνητικού αντικειμένου

Η ανάγκη για αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας των κτιρίων, η οποία αντιστοιχεί στο 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, αποτελεί προτεραιότητα της ενεργειακής πολιτικής της Ε.Ε. και άλλων ανεπτυγμένων κρατών. Η αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια ευθύνεται για την εκπομπή επικίνδυνων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, επηρεάζοντας ταυτόχρονα μακροοικονομικά και μικροοικονομικά φαινόμενα όπως η ενεργειακή εξάρτηση των κρατών, το υψηλό λειτουργικό κόστος των κτιρίων αντίστοιχα κ.α.

Προς την κατεύθυνση της εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια, διεθνείς και ευρωπαϊκοί φορείς (IEA, ISO, CEN κ.α.) έχουν πρόσφατα εντείνει τις προσπάθειές τους προωθώντας κατευθυντήριες γραμμές σε επίπεδο στρατηγικής, μία σειρά προτύπων και εργαλείων σε επιχειρησιακό επίπεδο καθώς και δράσεις πληροφόρησης σε επίπεδο ευαισθητοποίησης. Κάποιες ενδεικτικές δράσεις περιλαμβάνουν τη θέσπιση της οδηγίας 2002/91/ΕC περί ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, τη δημιουργία σειράς προτύπων για την ενεργειακή διαχείριση στα κτίρια, την αύξηση της χρηματοδότηση για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των υφιστάμενων κτιρίων και τη δημιουργία του θεσμικού πλαισίου ώστε κάθε νέο κτίριο στο εγγύς μέλλον να είναι κατ' ελάχιστον μηδενικής κατανάλωσης.

Τα «συμβατικά» μέτρα που λαμβάνονται για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε α) μέτρα που αφορούν στο σχεδιασμό, την κατασκευή ή παρεμβάσεις επί υφιστάμενου κτιριακού κελύφους όπως π.χ. ο προσανατολισμός, η σκίαση, ο φυσικός αερισμός, η τοποθέτηση μόνωσης κλπ. και β) μέτρα που αφορούν στο σχεδιασμό και υλοποίηση, ρύθμιση και συντήρηση των ενεργειακών εγκαταστάσεων του κτιρίου όπως τα συστήματα για θέρμανση, ψύξη, ζεστό νερό χρήσης, φωτισμό, κλπ. Πέραν των «συμβατικών» μέτρων, μέσω της επιστημονικής έρευνα και της τεχνολογικής εξέλιξης, αναδεικνύονται συνεχώς νέες δυνατότητες όπως τα Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης Κτιρίων (Σ.Ε.Δ.Κ.), η παραγωγή ενέργειας από συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.) και υβριδικά συστήματα, συστήματα συμπαραγωγής, εφαρμογές νανοτεχνολογίας κ.α.

Κρίσιμος παράγοντας για τον σχεδιασμό των κτιρίων αλλά και για την υλοποίηση παρεμβάσεων επί υφιστάμενων κτιρίων είναι η αξιολόγηση, η επιλογή και προσαρμογή των εναλλακτικών μέτρων βάσει κριτηρίων όπως η ενεργειακή κατανάλωση, το οικονομικό κόστος (επένδυσης και

λειτουργικό), το περιβαλλοντικό κόστος, η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος, η οπτικοακουστική άνεση, η αισθητική, κοινωνικοί παράγοντες κ.α. Είναι επομένως σαφές ότι το πρόβλημα της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη πολλαπλών και σε πολλές περιπτώσεις ανταγωνιστικών στόχων (π.χ. η μείωση του κόστους επένδυσης οδηγεί κατά κανόνα σε μείωση της ενεργειακής απόδοση του κτιρίου) κάθε ένας από τους οποίους οφείλει να βελτιστοποιηθεί για ένα σύνολο εφικτών διαθέσιμων λύσεων που περιγράφονται από ένα σύνολο παραμέτρων και περιορισμών (π.χ. διαθέσιμα υλικά, μέγιστο ανεκτό κόστος κλπ.). Στην ουσία το πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο αποφασίζων είναι πρόβλημα πολυστοχικού μαθηματικού προγραμματισμού (Ehrgott & Wiecek, 2005). Στα προβλήματα πολυστοχικού προγραμματισμού, οι στόχοι (κριτήρια) είναι ανταγωνιστικοί ή αλληλοεξαρτώμενοι με γραμμικές ή μη σχέσεις, καθιστώντας την εύρεση λύσης που ικανοποιεί ταυτόχρονα όλους τους στόχους αδύνατη. Για τον λόγο αυτό, τα πολυστοχικά προβλήματα απόφασης ανήκουν στην κατηγορία των προβλημάτων χαμηλού βαθμού δόμησης, είναι δηλαδή προβλήματα στα οποία η ορθολογική λύση δεν προϋπάρχει αλλά αποτελεί αντικείμενο προοδευτικής αναζήτησης, συνήθως μέσα από μία διαδικασία δοκιμής-σφάλματος, ενώ οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυσή τους έχουν ως στόχο την εξεύρεση μιας ενδιάμεσης αποτελεσματικής (κυρίαρχης ή μη κυριαρχούμενης) λύσης.

1.2 Πρωτοτυπία και αναγκαιότητα αναπτυχθέντος ΣΥΑ

Τα ΣΥΑ βρίσκουν ευρεία εφαρμογή μέχρι σήμερα τόσο στο πεδίο της ενεργειακής απόδοσης όσο και στη βελτίωση του εσωτερικού περιβάλλοντος των κτιρίων. Ο Gero et al. (1983) ήταν οι πρώτοι που συμπεριέλαβαν τεχνικές βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης σε μορφή κριτηρίων και πρότειναν ένα πρότυπο βελτιστοποίησης του σχεδιασμού των κτιρίων ώστε να γίνουν κατανοητοί οι βαθμοί παραχώρησης μεταξύ των ανταγωνιστικών κριτηρίων. Συστήματα και πρότυπα απόφασης έχουν εφαρμοστεί επίσης στην παρακολούθηση της λειτουργίας των κτιρίων για τη ρύθμιση των συστημάτων υποστήριξης (θέρμανσης, ψύξης, κλπ.) (Doukas et al., 2006), όπως και για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του χρήστη σε σχέση με τη θερμική άνεση, την οπτική άνεση και την ποιότητα αέρα (Kolokotsa et al., 2002). Στο ίδιο πλαίσιο βρίσκονται και οι προσπάθειες ενσωμάτωσης του ενεργειακού κόστους επένδυσης, του κόστους λειτουργίας κτιρίων και της θερμικής άνεσης ή της ποιότητας αέρα σε ένα ενιαίο ΣΥΑ (Wright et al., 2002; Blondeau et al., 2002). Η υποστήριξη αποφάσεων για την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας

στον κτιριακό τομέα είναι ένα επίσης σημαντικό αντικείμενο έρευνας. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η εργασία των Bazillion & Deo Prasad (2002) όπου μελετάται η απόδοση εγκατάστασης φωτοβολταϊκών στοιχείων σε συνδυασμό με σύστημα συμπαραγωγής. Η απόδοση και οι προδιαγραφές της εγκατάστασης μελετώνται από ένα ΣΥΑ με στόχο την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Επιπλέον, η απόφαση για την χρήση τεχνολογιών ηλιακής ενέργειας στο αστικό περιβάλλον (π.χ. συστήματα θέρμανσης νερού χρήσης, φωτοβολταϊκά και παθητικά ηλιακά συστήματα) έχει μελετηθεί από τον Rylatt et al. (2001). Στο εν λόγω σύστημα γίνεται πρόβλεψη του δυναμικού ηλιακής ενέργειας και υποστηρίζεται η απόφαση για τη χρήση τέτοιων τεχνολογιών. Παράλληλα, το 2006, η Kolokotsa et al. επιχείρησαν να αυτοματοποιήσουν τη διαδικασία ενεργειακής επιθεώρησης με την ανάπτυξη ενός ΣΥΑ στη βάση του οποίου βρίσκεται ένα πρότυπο απόφασης βασισμένο στη θεωρία του Bayes εμπλουτισμένου με τεχνικές ασαφούς λογικής. Το ΣΥΑ είχε ως στόχο την ενεργειακή και περιβαλλοντική κατάταξη κτιρίων και την πρόταση εναλλακτικών σεναρίων βελτίωσης των εσωτερικών τους συνθηκών.

Η παρούσα εργασία καλείται να συμβάλλει στην προσπάθεια για ανάπτυξη μίας μεθοδολογίας ευέλικτης και εφαρμόσιμης σε ένα ευρύ φάσμα κτιρίων κάνοντας χρήση πολυστοχικού προγραμματισμού, μίας επιστημονικής περιοχής που παρέχει πληθώρα τεχνικών με μεγάλες δυνατότητες επίλυσης πολύπλοκων προβλημάτων απόφασης. Ο πολυστοχικός προγραμματισμός έχει χρησιμοποιηθεί σε μια πληθώρα εφαρμογών που αφορούν ενεργειακά και περιβαλλοντικά θέματα και θέματα αειφόρου ανάπτυξης. Η Diakoulaki et al. (2005) και Munda (2005), περιγράφουν και συνοψίζουν τέτοιους είδους εφαρμογές παρέχοντας παράλληλα μία πλούσια βιβλιογραφία στο συγκεκριμένο θέμα.

1.3 Στόχοι και δομή της εργασίας

Στην πράξη σήμερα, το πρόβλημα της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων αντιμετωπίζεται με δύο κυρίως μεθόδους (Kolokotsa et al., 2009). Σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο, διενεργείται ενεργειακή ανάλυση του κτιρίου με χρήση προσομοίωσης για ένα 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. μηχανικό σχετικής ειδίκευσης). Κατά τη δεύτερη προσέγγιση γίνεται χρήση τεχνικών πολυκριτήριας ανάλυσης σε συνδυασμό με προσομοίωση για την επιλογή μέτρων που έχουν και σε αυτή την περίπτωση διαμορφωθεί από τον σύμβουλο σε θέματα ενέργειας κτιρίων. Το μειονέκτημα και των δύο

παραπάνω στρατηγικών αντιμετώπισης του προβλήματος είναι ότι η διαδικασία και επομένως η λύση βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην εμπειρία και στις γνώσεις του ενεργειακού συμβούλου. Επίσης, ο αποφασίζων (π.χ. ιδιοκτήτης κτιρίου) δεν έχει τη δυνατότητα να συμμετέχει ενεργά στη διαδικασία, μη έχοντας πλήρη εικόνα των δυνατοτήτων που οδηγούν στη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση του κτιρίου.

Το ΣΥΑ που παρουσιάζεται στη συνέχεια υπερβαίνει τους παραπάνω περιορισμούς παρέχοντας τη δυνατότητα αξιολόγησης μη πεπερασμένου αριθμού μέτρων και επιλογής της βέλτιστης (μη κυριαρχούμενη) λύσης βάσει των προτιμήσεων του αποφασίζοντος σε σχέση με συγκεκριμένα μετρήσιμα κριτήρια απόφασης. Ο πολυστοχικός προγραμματισμός (Collette & Siarry, 2004; Ehrgott, 2005) είναι μία επιστημονική περιοχή που προσφέρει χρήσιμα εργαλεία για την αντιμετώπιση πολύπλοκων προβλημάτων απόφασης. Ακολουθώντας τις αρχές του πολυστοχικού προγραμματισμού η Diakaki et al. (2008), διενήργησαν προκαταρκτική έρευνα όσον αφορά την δυνατότητα ανάπτυξης ενός πολυστοχικού πρότυπου υποστήριξης αποφάσεων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων. Το πρότυπο που αναπτύσσεται στην παρούσα ερευνητική εργασία, διαμορφώθηκε με βάση τις αρχές λειτουργίας της πρώτης αυτής προσπάθειας και επεκτάθηκε ώστε να συμπεριλάβει μεταβλητές απόφασης που αφορούν το κτιριακό κέλυφος συνολικά και τα ενεργειακά του συστήματα σε κτίρια στη φάση του σχεδιασμού. Το ΣΥΑ που αναπτύχθηκε υπό μορφή φιλικού στη χρήση λογισμικού αφορά τα παρακάτω κριτήρια απόφασης:

A) Η ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας

B) Το κόστος επένδυσης

Γ) Οι ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2)

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση όπου τίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο και συνοψίζονται οι μέχρι σήμερα τεχνικές αντιμετώπισης του προβλήματος της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μαθηματικό πρότυπο του ΣΥΑ και γίνονται οι απαραίτητες διευκρινήσεις π.χ. παραδοχές. Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται μία απλή μελέτη περίπτωσης για την κατανόηση των αρχών λειτουργίας και της χρησιμότητας του ΣΥΑ και η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Στο πέμπτο κεφάλαιο, αναπτύσσονται τα συμπεράσματα καθώς και οι προοπτικές για μελλοντική έρευνα και επέκταση. Στη συνέχεια παρατίθεται η βιβλιογραφία και ακολουθεί το παράρτημα A, το οποίο παρουσιάζει μία βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε κατά την εκπόνηση της εργασίας και το

παράρτημα Β το οποίο περιλαμβάνει τις αρχικές εξισώσεις και τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του ΣΥΑ.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Στον κτιριακό τομέα καταναλώνεται σημαντικό ποσοστό της πρωτογενούς ενέργειας, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας παράγεται από συμβατικά καύσιμα και συνοδεύεται από την συγκέντρωση επικίνδυνων ποσοτήτων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Η βελτιστοποίηση της ενεργειακής διαχείρισης των κτιρίων είναι ένα απαραίτητο μέσο για την προστασία των φυσικών πόρων ενώ συνδέεται και με οικονομικά κίνητρα. Κατά τον σχεδιασμό νέου υπό ανέγερση κτιρίου αλλά και κατά την ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενου κτιρίου οι βασικότεροι στόχοι είναι:

- Συμμόρφωση του κτιρίου με τους κανονισμούς που διέπουν το σχεδιασμό ή τις λειτουργικές παραμέτρους του κτιρίου.
- Ενσωμάτωση του κτιρίου στο φυσικό περιβάλλον και υιοθέτηση των αρχών της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής.
- Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου ανά τομέα (π.χ. θέρμανση) ή συνολικά.
- Βελτίωση του εσωτερικού περιβάλλοντος (π.χ. θερμικής ή οπτικής άνεσης, ποιότητας αέρα, κλπ.).
- Μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του κτιρίου.
- Μείωση του ενεργειακού κόστους.

Ειδικότερα, κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός κτιρίου, το ζητούμενο είναι η επίτευξη της βέλτιστης ισορροπίας μεταξύ των κρίσιμων παραμέτρων σχεδιασμού σε σχέση με ένα σύνολο κριτηρίων που υπόκεινται σε συγκεκριμένους περιορισμούς. Οι βασικές μεταβλητές απόφασης που συμβάλλουν στο ενεργειακό και περιβαλλοντικό φορτίο ενός κτιρίου και επηρεάζουν την άνεση των κατοίκων αλλά και την ενεργειακή ζήτηση είναι:

- Οι διαστάσεις, ο προσανατολισμός, το σχήμα, η μάζα του κτιρίου
- Τα ανοίγματα και οι διαστάσεις τους
- Η σκιάση
- Ο εξαερισμός

Κατά κανόνα στην πράξη, ο ενεργειακός σύμβουλος χρησιμοποιεί τεχνικές μοντελοποίησης και προσομοίωσης για να διερευνήσει προδιαγεγραμμένες εναλλακτικές οι οποίες υπόκεινται στις προτιμήσεις του αποφασίζοντος (κόστος επένδυσης, ενεργειακή απόδοση, αισθητική κ.α.). Κατά τη

λειτουργική περίοδο ενός κτιρίου, οι αποφάσεις για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου γίνονται συνήθως βάσει ενεργειακού ελέγχου και έρευνας (Krarti, 2000). Ο ενεργειακός έλεγχος ενός κτιρίου είναι δυνατόν να περιλαμβάνει από μία σύντομη περιήγηση και έρευνα έως λεπτομερή ωριαία προσομοίωση ενεργειακού μοντέλου του κτιρίου σε υπολογιστή.

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται τα στάδια της διαδικασίας βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου κατά τη λειτουργία του:



Σχήμα 2.1: Στάδια ενεργειακής επιθεώρησης και ανάλυσης κτιρίου

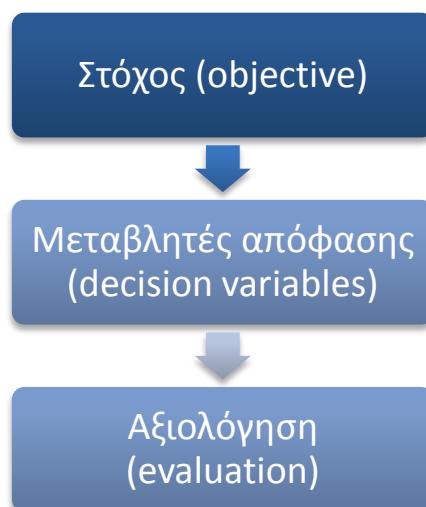
- Ανάλυση κτιρίου:** Βασικός στόχος της ανάλυσης κτιρίου είναι η αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κελύφους και της απόδοσης των ενεργειακών συστημάτων. Στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση του κτιρίου προέρχονται από τα αρχιτεκτονικά και ηλεκτρομηχανολογικά σχέδια καθώς και από αρχεία που αφορούν τις καταναλώσεις π.χ. λογαριασμοί ρεύματος, τιμολόγια πετρελαίου κλπ. Η ανάλυση δεδομένων διαδοχικών παρελθόντων ετών δίδει τη δυνατότητα διερεύνησης εποχικών φαινομένων που επηρεάζουν τις ενεργειακές καταναλώσεις.
- Επιτόπιος έλεγχος:** Δυνάμει μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου εντοπίζονται συχνά κατά τον επιτόπιο έλεγχο. Ο επιτόπιος έλεγχος λαμβάνει χώρα ως μία σύντομη περιήγηση και καταγραφή τυχόν κρίσιμων παραμέτρων ή ως λεπτομερής και αναλυτική διαδικασία ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του επιθεωρούμενου κτιρίου. Κάποια από τα οφέλη της διαδικασίας είναι:
 - Προσδιορισμός των ιδιαίτερων αναγκών του αποφασίζοντος π.χ. ιδιοκτήτη κτιρίου.
 - Έλεγχος των διαδικασιών λειτουργίας και συντήρησης του κτιρίου.
 - Εξακρίβωση των συνθηκών λειτουργίας των κύριων ενεργειακών συστημάτων του κτιρίου π.χ. συστήματα φωτισμού, θέρμανσης, ψύξης, εξαερισμού, ζεστού νερού χρήσης κλπ.

- Εκτίμηση της έντασης χρήσης του κτιρίου σε σχέση με τον αριθμό των χρηστών, το χρόνο χρήσης, τη συχνότητα κλπ.
- Δημιουργία μοντέλου:** Η δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο προσομοιώνει με σχετική ακρίβεια την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου στην πράξη είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση των εναλλακτικών μέτρων από τον ενεργειακό σύμβουλο.
 - Αξιολόγηση (εναλλακτικών) μέτρων:** Στο στάδιο αυτό, αξιολογούνται οι επιδόσεις των εναλλακτικών μέτρων στα κριτήρια απόφασης που περιλαμβάνει η ανάλυση π.χ. ενεργειακή κατανάλωση, κόστος επένδυσης, κόστος λειτουργίας, περιβαλλοντικό κόστος κλπ.

Ανεξάρτητα από τη φάση της ανάλυσης δηλαδή εάν αυτή αφορά υπό σχεδιασμό κτίριο ή υφιστάμενο, η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου είναι ιδιαίτερα απαιτητική και πολύπλοκη εργασία. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στην αλληλεπίδραση των επί μέρους υποσυστημάτων που καθορίζουν την ενεργειακή απόδοση κάθε κτιρίου όπως:

- Δομικά στοιχεία και υλικά
- Ενεργειακά συστήματα όπως θέρμανσης, ψύξης, εξαερισμού, φωτισμού κ.α.
- Συστήματα & διαδικασίες ενεργειακής διαχείρισης και λοιποί παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση.

Επομένως, η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων απαιτεί μία συνολική στρατηγική η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2:



Σχήμα 2.2: Στάδια βελτιστοποίησης ενεργειακής απόδοσης κτιρίου

Οι τεχνικές υποστήριξης αποφάσεων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων διακρίνονται σε α) τεχνικές που χρησιμοποιούν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και αφορούν τη

ρύθμιση παραμέτρων της λειτουργίας του κτιρίου και β) σε 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 απόφασης εστιάζεται στην επιλογή υλικών και συστημάτων κατά τον σχεδιασμό ενός νέου κτιρίου με στόχο τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής του απόδοσης.

2.2 Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (ΠΑΑ)

2.2.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο

Η ΠΑΑ είναι ο εξελισσόμενος χώρος της επιχειρησιακής έρευνας που αφορά τη σύνθεση των πολλαπλών διαστάσεων ενός προβλήματος απόφασης και την αξιολόγησή του με γνώμονα το σύστημα προτιμήσεων και αξιών, το οποίο συνειδητά ή ασυνείδητα χρησιμοποιεί ο αποφασίζων. Σε γενικές γραμμές η αντιμετώπιση ενός πολυκριτήριου προβλήματος αποφάσεων περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

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

Για την επιτυχή υλοποίηση των παραπάνω σταδίων ο Roy (1996) πρότεινε ένα γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο περιγράφει τη διαδικασία αντιμετώπισης πολυκριτήριων προβλημάτων (Σχήμα 2.3):



Σχήμα 2.3: Μεθοδολογικό πλαίσιο πολυκριτήριας ανάλυσης

Αντικείμενο Απόφασης

Το Αντικείμενο απόφασης περιγράφει το στάδιο κατά το οποίο προσδιορίζονται οι εναλλακτικές δράσεις προς αξιολόγηση. Το σύνολο των εναλλακτικών μπορεί να είναι διακριτό, συνεχές ή συνδυασμός των δύο. Στην περίπτωση διακριτού συνόλου είναι εφικτή η εξαντλητική περιγραφή των εναλλακτικών ενώ στην περίπτωση του συνεχούς συνόλου οι εναλλακτικές προσδιορίζονται από τους περιορισμούς του προβλήματος. Μετά τον προσδιορισμό του συνόλου των εναλλακτικών δραστηριοτήτων, απαιτείται ο καθορισμός της προβληματικής της ανάλυσης (decision problematic) η οποία εντάσσεται σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες με βάση το εξεταζόμενο πρόβλημα:

1. Επιλογή (choice): Επιλέγεται μία ή περισσότερες εναλλακτικές οι οποίες θεωρούνται ως οι πλέον κατάλληλες.
2. Ταξινόμηση (classification/sorting): Γίνεται ταξινόμηση των εναλλακτικών δραστηριοτήτων σε προκαθορισμένες ομοιογενείς κατηγορίες
3. Κατάταξη (ranking): Οι εναλλακτικές κατατάσσονται από τις καλύτερες προς τις χειρότερες.
4. Περιγραφή (description): Οι εναλλακτικές περιγράφονται από τις επιδόσεις τους στα επιμέρους κριτήρια.

Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι χρήσιμος ο συνδυασμός δύο προβληματικών για την αντιμετώπιση ενός προβλήματος.

Συνεπής οικογένεια κριτηρίων

Στο δεύτερο στάδιο της διαδικασίας καθορίζεται μια συνεπής οικογένεια κριτηρίων (consistent family of criteria). Ως κριτήριο νοείται μια μονότονη συνάρτηση $f(x)$, τέτοια ώστε για κάθε δύο εναλλακτικές x και y να ισχύει:

$$f(x) > f(y) \Leftrightarrow \text{η εναλλακτική } x \text{ προτιμάται της εναλλακτικής } y$$
$$f(x) = f(y) \Leftrightarrow \text{υπάρχει αδιαφορία μεταξύ των εναλλακτικών } x \text{ και } y$$

Για να διαμορφωθεί μία συνεπής οικογένεια κριτηρίων πρέπει να ισχύουν οι εξής προϋποθέσεις:

1. Μονοτονία (monotonicity): Η μονοτονία σε ένα σύνολο κριτηρίων ισχύει εάν και μόνο εάν για οποιεσδήποτε δύο εναλλακτικές x και y τέτοιες ώστε $f_i(x) > f_i(y)$ για κάποιο κριτήριο i και $f_j(x) = f_j(y)$ για κάθε άλλο κριτήριο $j \neq i$, συμπεραίνεται ότι η εναλλακτική x προτιμάται της εναλλακτικής y .

2. Επάρκεια (exhaustivity): Ένα σύνολο κριτηρίων διαθέτει την ιδιότητα της επάρκειας εάν και μόνο εάν για οποιεσδήποτε δύο εναλλακτικές x και y τέτοιες ώστε $f_i(x) = f_i(y)$ για κάθε κριτήριο i συμπεραίνεται ότι υπάρχει αδιαφορία μεταξύ των εναλλακτικών.
3. Μη πλεονασμός (non-redundancy): Ένα σύνολο κριτηρίων διαθέτει την ιδιότητα του μη-πλεονασμού εάν και μόνο εάν η διαγραφή ενός οποιουδήποτε κριτηρίου οδηγεί σε παραβίαση των ιδιοτήτων της μονοτονίας ή της επάρκειας.

Πρότυπο ολικής προτίμησης

Το τρίτο στάδιο αφορά τη δημιουργία ενός προτύπου ολικής προτίμησης (global evaluation model) το οποίο συνθέτει όλα τα κριτήρια ώστε να καταστεί εφικτός ο στόχος της ανάλυσης σε σχέση με την προβληματική που έχει καθοριστεί. Το πρότυπο ολικής προτίμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για:

1. Τον προσδιορισμό μιας συνολικής αξιολόγησης μιας εναλλακτικής.
2. Την πραγματοποίηση διμερών συγκρίσεων μεταξύ των εναλλακτικών.
3. Τη διερεύνηση του συνόλου των εναλλακτικών λύσεων όταν αυτό είναι συνεχές.

Η ανάπτυξη του πρότυπου ολικής προτίμησης μπορεί να γίνει είτε αλληλεπιδραστικά μέσω της συνεργασίας του αναλυτή με τον αποφασίζοντα είτε αναλύοντας τις αποφάσεις που λαμβάνει ο αποφασίζων.

Υποστήριξη απόφασης

Στο στάδιο υποστήριξης της απόφασης γίνεται παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων και σε περίπτωση μη αποδοχής από τον αποφασίζοντα επανεξετάζονται τα προηγούμενα στάδια για τυχόν διορθώσεις ή βελτιώσεις.

2.2.2 Βασικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις λήψης αποφάσεων

Ο Pardalos et al. (1995) πρότειναν την ακόλουθη κατηγοριοποίηση για τις διάφορες μεθοδολογικές προσεγγίσεις λήψης αποφάσεων που έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες:

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 υπεροχής και η αναλυτική – συνθετική προσέγγιση χρησιμοποιούνται στην αντιμετώπιση διακριτών προβλημάτων λήψης αποφάσεων για τη σύνθεση των κριτηρίων απόφασης και την αξιολόγηση ενός πεπερασμένου συνόλου εναλλακτικών δραστηριοτήτων σύμφωνα με τις προβληματικές της επιλογής, της κατάταξης ή της ταξινόμησης. Αντίθετα, ο πολυκριτήριος μαθηματικός προγραμματισμός βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην περίπτωση όπου απαιτείται η βελτιστοποίηση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων διακριτών και μη, όπως είναι το πρόβλημα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων που αναλύεται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

2.3 Κριτήρια στη λήψη αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων

Τα κριτήρια για τη λήψη αποφάσεων σε σχέση με την βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων όπως καταγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία διακρίνονται σε πέντε βασικές κατηγορίες (Σχήμα 2.4):



Σχήμα 2.4: Κατηγορίες κριτηρίων στη βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης κτιρίων

Τα ενεργειακά κριτήρια που έχουν χρησιμοποιηθεί ως σήμερα είναι:

- Θερμικό και ψυκτικό φορτίο για κλιματιζόμενα κτίρια (Buchlaghem, 2000; D'Cruz & Radford, 1987)

- Κανονικοποιημένη ετήσια ενεργειακή κατανάλωση και ενέργεια θέρμανσης σε kWh/m² (Zhu, 2006; Rey, 2004)
- Ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση σε kWh/m² (Rey, 2004)
- Ενσωματωμένη ενέργεια (Chen et al., 2006)
- Δείκτης ενέργειας – χρόνου (Chen et al., 2006)
- Εξοικονόμηση ενέργειας (Gholap & Khan, 2007)

Τα κριτήρια που αφορούν το οικονομικό κόστος στη διεθνή βιβλιογραφία είναι:

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

Τα κριτήρια που σχετίζονται με το φυσικό περιβάλλον είναι:

- Ετήσιες εκπομπές CO₂ (δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη σε kg_{eq}CO₂) (Rey, 2004)
- Μείωση δυναμικού εκπομπών υπερθέρμανσης του πλανήτη (Alanne, 2004)
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κύκλου ζωής (Wang et al., 2005)
- Δυναμικό τοξικότητας σε kg_{eq}SO₂/m² (Rey, 2004; Alanne et al., 2007)
- Χρήση νερού (Alanne et al., 2007)

Τα κριτήρια που αφορούν την ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος (ή εσωτερική άνεση) διακρίνονται σε αυτά που σχετίζονται με τη θερμική άνεση, την οπτική άνεση, την ποιότητα εσωτερικού αέρα και την ακουστική άνεση.

Όσον αφορά 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 & Palmer, 2000)
- Ωρες μη-άνεσης κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ή του χειμώνα (Roulet et al., 2002)
- Ημερήσια υπερθέρμανση σε °K (Rey, 2004)

- Ποσοστιαία μη ικανοποίηση ατόμων (Rutman et al., 2005)
- Δείκτης έντασης θερμικής δυσανεξίας (Becker et al., 2007)

Για την οπτική άνεση τα κριτήρια που αναφέρονται στη βιβλιογραφία είναι:

- Διαθεσιμότητα φυσικού φωτός (Radford & 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 τα κριτήρια είναι:

- Δείκτης συγκέντρωσης CO₂ (Kolokotsa et al., 2001; Doukas et al., 2007)
- Μέγιστος λόγος μέσης συγκέντρωσης μολυσματικής ουσίας προς τη χρονική διάρκεια παραμονής και την τιμή κατωφλίου για έκθεση βραχείας ή μακράς διάρκειας.
- Ρυθμός εξαερισμού (Blondeau et al., 2002)

Για την ακουστική άνεση τα κριτήρια που έχουν εφαρμοσθεί είναι:

- Επίπεδα θορύβου σε dB στους χώρους εργασίας (Rey, 2004)
- Δείκτης κατάταξης θορύβου (Rutman et al., 2005)

Λοιπά κριτήρια που έχουν χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της επίδοσης των κτιρίων σε σχέση με την ενεργειακή τους απόδοση είναι:

- Διάρκεια κατασκευής (Rosenfeld & Shohet, 1999)
- Αξιολόγηση και ταξινόμηση λειτουργικότητας σε σχέση με τις βέλτιστες πρακτικές (Rosenfeld & Shohet, 1999)
- Παράγοντες αβεβαιότητας (Rosenfeld & Shohet, 1999)
- Κόστος επικοινωνίας μεταξύ χώρων (Homoud, 2001)
- Χωροθέτηση δραστηριοτήτων εντός χώρων (Homoud, 2001)
- Εργονομία (Alanne, 2004) σε σχέση με:
 - Βαθμός ευκολίας υλοποίησης της δράσης βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης
 - Αποτελεσματικότητα όσον αφορά την άνεση
 - Απαιτήσεις χώρου
 - Προσαρμοστικότητα στην υφιστάμενη κατασκευή
 - Χρηστικότητα
 - Εξυπηρετικότητα

- Απόδοση και αξιοπιστία συστήματος διαχείρισης ενεργειακής απόδοσης κτιρίου και ευφυών συστημάτων (Wong & Li, 2008)
- Ασφάλεια, π.χ. πυρός, διαδικασιών ασφάλειας (Wong & Li, 2008)

2.4 Τεχνικές λήψης αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων

Για τον προσδιορισμό εναλλακτικών που ανταποκρίνονται στις προτιμήσεις και απαιτήσεις του αποφασίζοντος έχει χρησιμοποιηθεί πληθώρα τεχνικών υποστήριξης αποφάσεων που αφορούν είτε τη φάση σχεδιασμού είτε λειτουργίας ενός κτιρίου.

Μία μέθοδος υποστήριξης αποφάσεων που αφορά την επιλογή δράσεων εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια κατά τον αρχικό σχεδιασμό προτάθηκε από τους Wilde & Van der Voorden (2004). Οι εναλλακτικές στην έρευνα περιελάμβαναν ηλιακή τοιχοποιία, εξελιγμένους τύπους υαλοστασίων, φωταγωγούς και συστοιχίες φωτοβολταϊκών. Ο Becker et al. (2007) εξέτασε την επιρροή των μεταβλητών σχεδιασμού του κτιρίου και της βελτιστοποίησης του συστήματος εξαερισμού στη θερμική απόδοση, την ποιότητα του εσωτερικού αέρα και την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Οι εναλλακτικές σε αυτή την έρευνα συνδέονται αφενός με τον σχεδιασμό του κτιρίου πχ. προσανατολισμός, μέγεθος παραθύρων, θερμομόνωση, μάζα, χρώμα προσόψεων και αφετέρου με τις διάφορες τεχνικές εξαερισμού. Προσπάθειες αξιολόγησης των εναλλακτικών δράσεων εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια βάσει ΣΥΑ έχουν γίνει από τον Alanne (2004) και Doukas et al. (2008) και μεταξύ άλλων αφορούν δράσεις όπως:

- Αναβάθμιση συστημάτων φωτισμού όπως αντικατάσταση λαμπτήρων και χρήση συστημάτων ελέγχου φωτισμού.
- Αναβάθμιση συστημάτων θέρμανσης - ψύξης όπως εγκατάσταση ειδικών συσκευών ελέγχου, εισαγωγή συστημάτων φυσικού αερίου, ηλιακός κλιματισμός κλπ.
- Αναβάθμιση με χρήση ηλεκτρομηχανικών διατάξεων όπως η διόρθωση της ποιότητας ισχύος κλπ.
- Λοιπές αναβαθμίσεις πχ. εγκατάσταση ΑΠΕ, μόνωση κλπ.

Μια στρατηγική αξιολόγησης συνόλου εναλλακτικών παρέχεται από τους Rosenfeld & Shohet (1999) και περιλαμβάνει πλήρη αναβάθμιση, μερική αναβάθμιση, εξαρχής ανακατασκευή του κτιρίου και κατασκευή νέου κτιρίου σε κοντινή περιοχή.

Επιπλέον, όσον αφορά τις στρατηγικές ο Rey (2004) πρότεινε:

- Στρατηγική σταθεροποίησης, η οποία αποτελείται από σύνολο ενεργειών που δεν αλλοιώνουν την εμφάνιση ενός κτιρίου.
- Στρατηγική αντικατάστασης η οποία αποτελείται από σύνολο ενεργειών που αναδιαμορφώνουν την εμφάνιση ενός κτιρίου.
- Στρατηγική όψεων δυο επιπέδων η οποία αφορά στην προώθηση νέας γυάλινης πρόσοψης.

Όσον αφορά τις εφαρμογές τεχνικών λήψης αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, είναι σαφές ότι επικεντρώνονται σε συγκεκριμένες εναλλακτικές δράσεις ή κατηγορίες εναλλακτικών και δεν υπάρχει κάποια προσέγγιση του προβλήματος συνολικά.

2.4.1 Μεθοδολογίες αξιολόγησης ενεργειακής απόδοσης κτιρίων

Τα προβλήματα αποφάσεων γενικώς βασίζονται στην περιγραφή των συνόλων των εναλλακτικών και ορίζονται ως (Ehrgott, 2005)

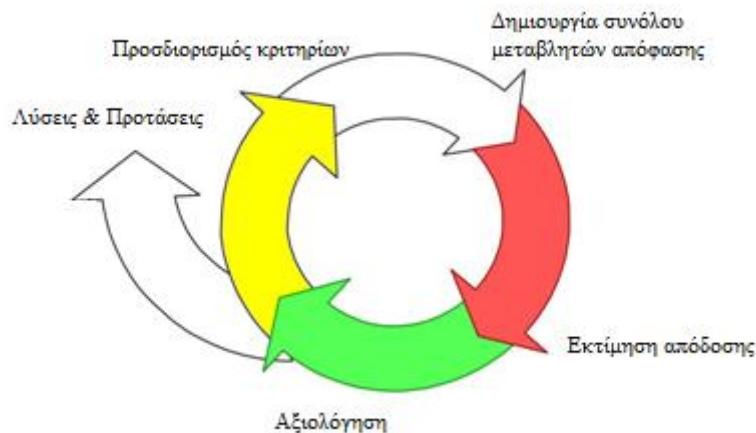
- Προβλήματα με ορισμένο αριθμό γνωστών εναλλακτικών. Συνήθως ο στόχος είναι η επιλογή της βέλτιστης εναλλακτικής σύμφωνα με το πρότυπο προτίμησης του αποφασίζοντος.
- Διακριτά προβλήματα όπου το σύνολο των εναλλακτικών περιγράφεται από περιορισμούς με την μορφή μαθηματικών συναρτήσεων.
- Συνεχή προβλήματα όπου το σύνολο των εναλλακτικών προσδιορίζεται από περιορισμούς υπό μορφή μαθηματικών σχέσεων.

Ο προσδιορισμός της βέλτιστης απόφασης εντάσσεται στις διαδικασίες βελτιστοποίησης. Βελτιστοποίηση είναι η τεχνική μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης συγκεκριμένων αντικειμενικών συναρτήσεων από περιορισμούς. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις δομούνται με τρόπο τέτοιο ώστε να αντιπροσωπεύουν τα κριτήρια της απόφασης. Επομένως η επιλογή της τεχνικής βελτιστοποίησης εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος. Όσον αφορά το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, η φάση της αξιολόγησης περιλαμβάνει κυρίως την βαθμολόγηση προδιαγεγραμμένων εναλλακτικών ή στρατηγικών ως προς τα προς εξεταζόμενα κριτήρια απόφασης.

Τα κυριότερα ζητήματα που ανακύπτουν είναι (Homoud, 2001):

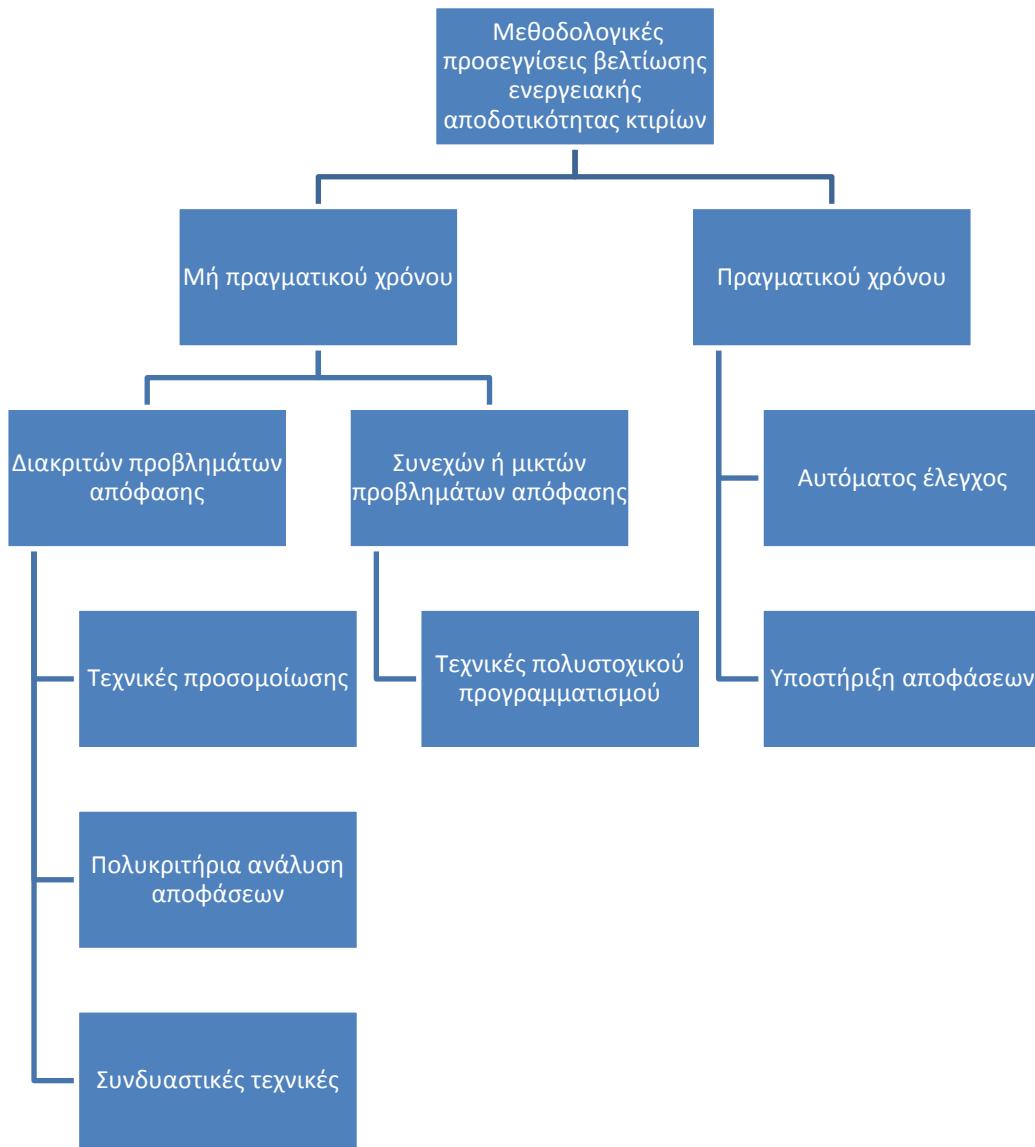
- Τα κριτήρια είναι περισσότερα του ενός και ανταγωνιστικά (ενέργεια, ενεργειακή κατανάλωση, κόστος επένδυσης κτλ.)

- Υπάρχει πληθώρα εναλλακτικών και στρατηγικών σεναρίων τα οποία δεν εξετάζονται στο σύνολο τους.
- Συνεχείς μεταβλητές: Το πρόβλημα έχει άπειρες λύσεις, επομένως η αξιολόγηση είναι μια επαναληπτική διαδικασία που επηρεάζεται καθοριστικά από τα κριτήρια αποφάσεων τις εναλλακτικές και τον αποφασίζοντα. Γραφική αναπαράσταση της διαδικασίας αποδίδεται στο Σχήμα 2.5 που ακολουθεί:



Σχήμα 2.5: Η επαναληπτική διαδικασία υποστήριξης αποφάσεων (Alanne, 2004)

Οι μέθοδοι αντιμετώπισης του προβλήματος της αναβάθμισης της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων που συναντώνται στη σχετική βιβλιογραφία διακρίνονται στο Σχήμα 2.6:



Σχήμα 2.6: Κατηγοριοποίηση μεθοδολογικών προσεγγίσεων για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας στα κτίρια.

Η βασική κατηγοριοποίηση των μεθοδολογικών προσεγγίσεων γίνεται με γνώμονα το εάν αυτές αλληλεπιδρούν με τον αποφασίζοντα σε πραγματικό χρόνο ή όχι. Οι μη πραγματικού χρόνου μεθοδολογικές προσεγγίσεις στοχεύουν στον προσδιορισμό εναλλακτικών όπως η επιλογή υλικών μόνωσης, δομής τοιχοποιίας, τύπου καυστήρα κλπ. και εφαρμόζονται είτε κατά την φάση του σχεδιασμού είτε κατά την φάση της ενεργειακής αναβάθμισης υφιστάμενου κτιρίου. Αντίθετα, οι προσεγγίσεις πραγματικού χρόνου χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό παραμέτρων που αφορούν τις ρυθμίσεις λειτουργίας των ενεργειακών συστημάτων του κτιρίου. Οι ρυθμίσεις καθορίζονται, σε επίπεδο λογισμικού, βάσει στρατηγικών βελτιστοποίησης που λαμβάνουν υπόψη

δεδομένα μετρήσεων μέσω αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο. Στη συνέχεια οι βέλτιστες αποφάσεις που αφορούν τις ρυθμίσεις λειτουργίας των ενεργειακών συστημάτων υλοποιούνται μέσω επενεργοποιητών και ειδικών ολοκληρωμένων διατάξεων όπως τα Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης Κτιρίων (Σ.Ε.Δ.Κ.). Τα Σ.Ε.Δ.Κ. παρέχουν ανάλογα με τις ειδικές τους προδιαγραφές τη δυνατότητα σχεδιασμού των στρατηγικών ή της δυναμικής βελτιστοποίησης των ρυθμίσεων.

Προσεγγίσεις μη-πραγματικού χρόνου

Οι προσεγγίσεις μη πραγματικού χρόνου διακρίνονται σε εκείνες που βρίσκουν εφαρμογή σε προβλήματα διακριτών μεταβλητών και σε άλλες που εφαρμόζονται σε προβλήματα με συνεχείς μεταβλητές ή μεικτά (με συνεχείς και διακριτές μεταβλητές). Τα διακριτά προβλήματα απόφασης αντιμετωπίζονται με τεχνικές ικανές να διαχειριστούν μεγάλα αλλά πεπερασμένα σύνολα εναλλακτικών ή σεναρίων. Η τελική αξιολόγηση και επιλογή γίνεται με χρήση τεχνικών πολυκριτήριας ανάλυσης και πολυστοχικού προγραμματισμού σε συνδυασμό συχνά με προσομοίωση.

Οι τεχνικές προσομοίωσης διακρίνονται σε αναλυτικές και λεπτομερείς (ή αριθμητικές) και συνήθως υλοποιούνται μέσω κάποιου προγράμματος λογισμικού (Clark, 2001). Στις απλοποιημένες μεθόδους αναφέρονται ενδεικτικά η μέθοδος βαθμο-ημερών ή μεταβλητών βαθμο-ημερών, η μέθοδος bin και η τροποποιημένη μέθοδος bin (Homoud, 2001, Kreider et al. 2002). Οι τεχνικές προσομοίωσης βασίζονται στην ανάπτυξη ενός βασικού σεναρίου για το οποίο μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, καθορίζεται μια σειρά προτάσεων κάνοντας χρήση ενεργειακής προσομοίωσης – ανάλυσης έως ότου επιτευχθεί η ενεργειακή μετάβαση του κτιρίου από την αρχική κατάσταση σε μια θεωρητικά βέλτιστη κατάσταση. Οι προτάσεις αυτές περιλαμβάνουν την αύξηση της θερμομονωτικότητας του κτιρίου, τη διαμόρφωση του σχήματος και του προσανατολισμού, τη χρήση υλικών και συστημάτων υψηλής ενεργειακής απόδοσης κ.α. Τα προγράμματα αναλυτικής προσομοίωσης παρουσιάζονται εκτενώς στη βιβλιογραφία (Hong et al. 2000, Homoud 2001), ενώ επισκόπηση των υπολογιστικών εργαλείων υποστήριξης αποφάσεων για την ενεργειακή απόδοση κτιρίων παρέχεται από τους Wilde & van der Voorden (2004). Τα κριτήρια επιλογής του κατάλληλου λογισμικού ενεργειακής προσομοίωσης σε γενικές γραμμές είναι:

- Τύπος κριτηρίων απόφασης
- Απαιτούμενη ακρίβεια
- Ευκολία χρήσης

- Διαθεσιμότητα απαιτούμενων δεδομένων
- Είδος μελέτης (αρχικού σχεδιασμού ή παρεμβάσεων επί υφισταμένου κτιρίου)

Ενδεικτικά εργαλεία ενεργειακής ανάλυσης και προσομοίωσης είναι τα TRNSYS, DOE-2, EnergyPlus, BLAST, ESP-r κ.α. Το λογισμικό TRNSYS χρησιμοποιείται από ένα μέρος αναλυτών και ερευνητών. Ο Florides et al., χρησιμοποιεί το TRNSYS με στόχο τη μείωση του θερμικού φορτίου, για την εξέταση μέτρων όπως ο φυσικός και ο ελεγχόμενος εξαερισμός, η σκίαση, εναλλακτικοί τύποι παραθύρων, ο προσανατολισμός, το σχήμα του κτιρίου και η θερμική του μάζα ενώ ο Zurigat et al. (2003) για την αξιολόγηση παθητικών μέτρων που στοχεύουν στη μείωση των ψυκτικών φορτίων αιχμής. Το Energyplus χρησιμοποιείται από τον Becker et al. για να εξετάσει συγκεκριμένους παράγοντες κτιριακού σχεδιασμού όπως ο προσανατολισμός και ο τύπος παραθύρων, η θερμική αντίσταση της τοιχοποιίας καθώς και πλήθος στρατηγικών εξαερισμού για την ενεργειακή κατανάλωση και απόδοση σε σχολεία. Το Visual Doe χρησιμοποιείται από τους Tavares και Martins (2007) για τη διεξαγωγή ανάλυσης ενασθησίας που οδηγεί σε ενεργειακά αποδοτικές λύσεις αρχικού σχεδιασμού. Ένας αξιόλογος αριθμός προδιαγεγραμμένων λύσεων, μοντελοποιούνται και αξιολογούνται στο πλαίσιο της έρευνάς τους.

Επίσης, η ΠΑΑ εφαρμόζεται από πολλούς ερευνητές για την υποστήριξη αποφάσεων που αφορούν την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων και περιλαμβάνει τεχνικές όπως η θεωρία της πολλαπλής χρησιμότητας (Keeney & Raifa, 1993) και η μέθοδος κατάταξης ELECTRE (Roy, 1991). Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των μεθόδων που εντάσσονται στην ΠΑΑ, είναι ότι παρέχουν τη δυνατότητα ανάπτυξης και ενσωμάτωσης ενός προτύπου προτιμήσεων το οποίο βασίζεται στη λογική λήψης αποφάσεων του αποφασίζοντος.

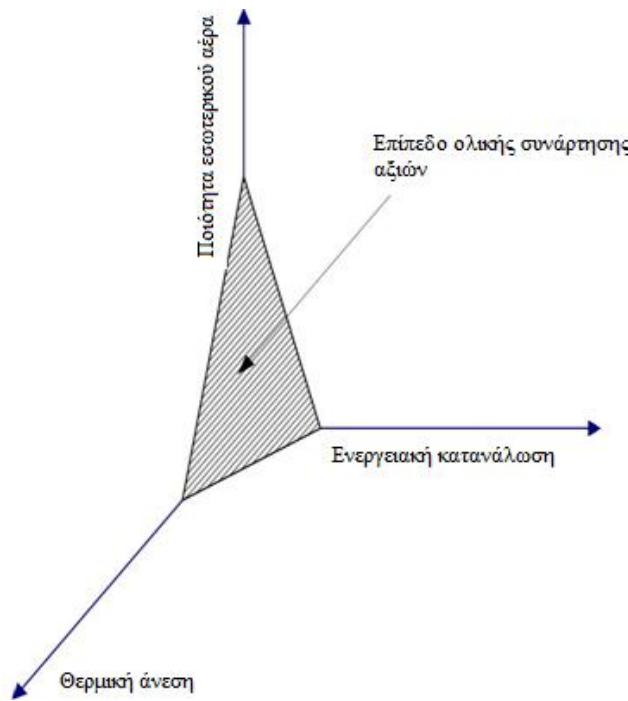
Για τον ενεργειακό σχεδιασμό κτιρίων, τεχνικές ΠΑΑ έχουν μελετηθεί από τους:

- Gero et al. (1983) με στόχο τη διερεύνηση του βέλτιστου προσανατολισμού και του λόγου της επιφάνειας των παραθύρων προς τη συνολική επιφάνεια του κτιρίου. Τα κριτήρια απόφασης της έρευνας είναι το κόστος επένδυσης και η κατάταξη του συνολικού θερμικού φορτίου.
- Jedrzejuk & Marks (2002) για την εύρεση της βέλτιστης λύσης μέσω επαναληπτικής διαδικασίας, όσον αφορά το σχήμα του κτιρίου, την εσωτερική του διαρρύθμιση και τη βέλτιστοποίηση των συστημάτων θέρμανσης σε πολυκατοικίες.

Η ΠΑΑ χρησιμοποιείται από πολλούς ακόμα ερευνητές κατά τη διερεύνηση λύσεων βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης υφιστάμενων κτιρίων. Συνδυαστικές τεχνικές και μέθοδοι κατάταξης έχουν χρησιμοποιηθεί από τον Blondeau et al. (2002) σε σχέση με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα, τη θερμική άνεση και την ενεργειακή κατανάλωση όπου κάθε πιθανή δράση αξιολογείται μέσω μίας συνάρτησης αξιών. Στη συνέχεια, οι εναλλακτικές συγκρίνονται αρχικά σε ζεύγη και η τελική κατάταξη γίνεται με βάση τη σύγκριση των επί μέρους κατατάξεων από πάνω προς τα κάτω και αντίστροφα. Η σύνθεση των συναρτήσεων αξιών I_{area} , προκύπτει από το επίπεδο που σχηματίζουν οι επιμέρους συναρτήσεις αξιών στο ορθογώνιο σύστημα αξόνων (Σχήμα 2.7).

Μια παρόμοια προσέγγιση από τον Rutman et al. (2005) κάνει χρήση της μεθόδου ELECTRE για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης, της ακουστικής άνεσης και της κατανομής του εσωτερικού αέρα σε κλιματιζόμενο χώρο γραφείων. Ο σκοπός της μεθόδου είναι η δημιουργία κανόνων σχεδιασμού των συστημάτων κλιματισμού και ταυτόχρονη ικανοποίηση των απαιτήσεων εσωτερικής άνεσης. Ο Rey (2004), χρησιμοποίησε τη μέθοδο ELECTRE III για την κατάταξη τριών στρατηγικών αναβάθμισης της ενεργειακής απόδοσης. Η τελική κατάταξη γίνεται μόνο όταν οι στρατηγικές λαμβάνουν την ίδια θέση στην προς τα άνω και στην προς τα κάτω κατάταξη. Επιπλέον, η μεθοδολογία αξιολόγησης γραφείων που προτάθηκε από τον Roulet et al. (2002) κάνει χρήση του αλγορίθμου της ELECTRE για την κατάταξη γραφείων με κριτήρια την άνεση, τη σπατάλη και την κατανάλωση ενέργειας. Η μέθοδος εισάγει την εναλλακτική βαθμολογία απόδοσης που ορίζεται ως:

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



Σχήμα 2.7: Επίπεδο συναρτήσεων αξιών

Μια απλοποιημένη εφαρμογή ΠΑΑ που εξετάζει τα οικονομικά οφέλη των επενδύσεων βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων είναι η μέθοδος δυο παραγόντων που προτείνεται από τον Martinaitis et al., (2007). Η μέθοδος χρησιμοποιεί δυο κριτήρια, παρακάμπτοντας τη χρήση πολύπλοκων τεχνικών ΠΑΑ ενώ οι εναλλακτικές επενδύσεις διακρίνονται σε αυτές που συνδέονται με την ενεργειακή αναβάθμιση και εκείνες για ανακαίνιση. Το κόστος και το ενεργειακό όφελος των μέτρων αξιολογούνται με βάση τον συντελεστή αποκατάστασης του κτιρίου και τον δείκτη του κόστους διατήρησης της ενέργειας. Ο Kaklauskas et al. (2005) εφάρμοσε πολυπαραγοντικό σχεδιασμό με χρήση ΠΑΑ για την ανακαίνιση του κτιριακού κελύφους και την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων. Οι Pasanini & Ojalvo (2008) ανέπτυξαν το Reflex, ένα εργαλείο πολυκριτήριας ανάλυσης για την κατάταξη των εναλλακτικών σύμφωνα με την οπτική του τελικού χρήστη και την ικανοποίηση του παρόχου ενέργειας. Άλλα εργαλεία που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος των κτιρίων βασιζόμενα στην ΠΑΑ είναι το EPIQR για κατοικίες (Jaggs & Palmer 2000, Flourentzou & Roulet 2002) και το TOBUS για γραφεία (Caccaveli & Guggerli, 2002)

Συνδυαστικές Τεχνικές

Το πρότυπο συνδυαστικής βελτιστοποίησης του σακιδίου προτείνεται από την Alanne (2004) για την υποστήριξη αποφάσεων αναβάθμισης και ανακαίνισης κτιρίων. Το πρόβλημα του σακιδίου οφείλει το όνομα του στη βέλτιστη επιλογή αντικειμένων που μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα σακίδιο ταξιδίου. Στην προσέγγιση από την Alanne (2004) 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.

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

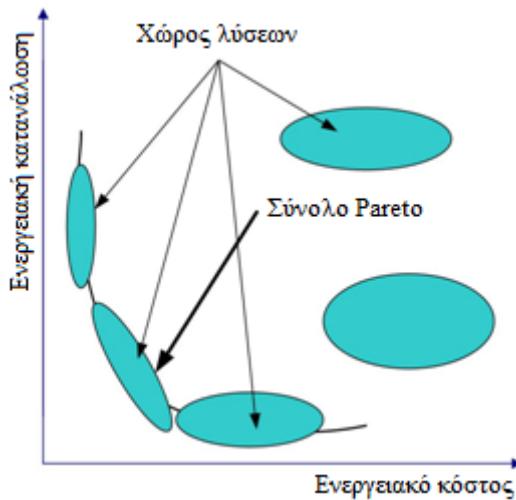
Οπου a_i η δράση ανακαίνισης i και S_i η βαθμολογία της. Το πρότυπο είναι κατάλληλο όταν ο αριθμός δράσεων ανακαίνισης είναι μεγάλος και οι δυνατοί συνδυασμοί οδηγούν σε ιδιαίτερα μεγάλο αριθμό λύσεων που δεν είναι εφικτή η αξιολόγηση τους με υπολογισμούς.

Τεχνικές προβλημάτων απόφασης συνεχών ή μικτών μεταβλητών

Παρά το γεγονός ότι η εμπειρία και οι γνώσεις του ενεργειακού συμβούλου αποτελούν αναντικατάστατες αξίες για την αποτελεσματικότητα οποιαδήποτε τεχνικής, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη εργαλείων υποστήριξης αποφάσεων για την εξέταση του συνόλου των εναλλακτικών μέτρων όπως περιγράφονται από τους περιορισμούς του προβλήματος. Σε αυτό το πλαίσιο κινείται η βελτιστοποίηση του θερμικού σχεδιασμού των κτιρίων με χρήση της μεθόδου downhill simplex (Nelder and Mead, 1965) και της non-random complex (Mitchell και Kaplan, 1969 από Boughlagem (2000). Η μέθοδος Nelder - Mead ελαχιστοποιεί μια αντικειμενική συνάρτηση η οποία κινείται σε πολυδιάστατο χώρο. Η διαδικασία υποστήριξης απόφασης ακολουθεί τρία στάδια: α) προσδιορισμός του κτιριακού κελύφους, β) προσομοίωση και γ) βελτιστοποίηση μέσω αλληλεπίδρασης ώστε να εξαχθούν οι βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης που ικανοποιούν το κριτήριο της άνεσης.

Τεχνικές Πολυστοχικού Προγραμματισμού (ΠΠ)

Στον Πολυστοχικό Προγραμματισμό (ΠΠ) είναι δυνατή η δημιουργία μαθηματικών μοντέλων με περισσότερες από μια αντικειμενικές συναρτήσεις (Mavrotas et al., 2008) όπου δεν υπάρχει μια μοναδική βέλτιστη λύση αλλά ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων (Pareto frontier). Στο σύνολο των βέλτιστων λύσεων αντικατοπτρίζονται οι δυνατές παραχωρήσεις μεταξύ των κριτηρίων βελτιστοποίησης (Kalyanmoy, 2001). Ο σκοπός εφαρμογής του πολυστοχικού προγραμματισμού είναι διττός: Αφενός έγκειται στην εύρεση λύσεων που προσεγγίζουν κατά το δυνατό το ιδανικό σύνολο Pareto και αφετέρου στην εύρεση λύσεων εντός ενός πολυεπίπεδου που ορίζεται από συγκεκριμένους περιορισμούς (Fonseca & Fleming, 1998).



Σχήμα 2.8: Το σύνολο Pareto για 2 κριτήρια

Πρόσφατα η βελτίωση του κτιριακού κελύφους κατά τη διάρκεια σχεδιασμού ή λειτουργίας με χρήση πολυστοχικού προγραμματισμού προτάθηκε από τους Diakaki et al., (2008). Η αναπτυχθείσα μέθοδος είναι μικτού-ακέραιου πολυστοχικού προγραμματισμού με δύο ανταγωνιστικά κριτήρια (κόστος και ενεργειακή απόδοση). Το πρόβλημα επιλύεται με τρείς διαφορετικές τεχνικές : α) συναινετικός προγραμματισμός β) μέθοδος ολικού κριτηρίου και γ) προγραμματισμός στόχων.

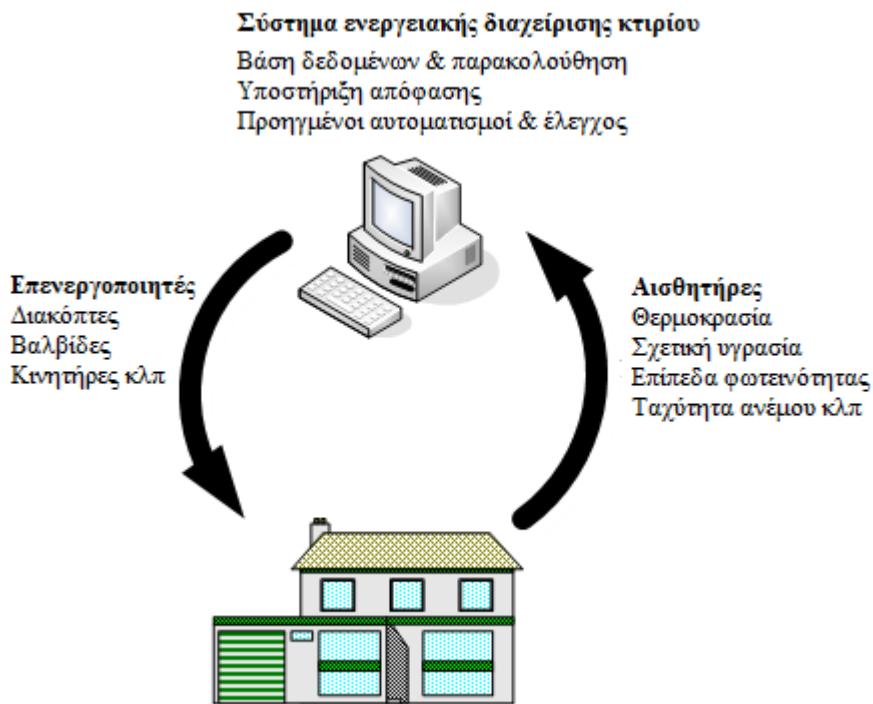
Η πολυπλοκότητα του προβλήματος απόφασης η οποία προκύπτει από τη διερεύνηση πολλαπλών κριτηρίων και τη δομή του προβλήματος απόφασης ως συνεχούς ή μικτού ακεραίου, έχει οδηγήσει μέρος ερευνητών στη χρήση γενετικών αλγόριθμων (Γ.Α.) σε συνδυασμό με εργαλεία προσομοίωσης. Το αξιοσημείωτο πλεονέκτημα των Γ.Α. σε σχέση με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης είναι η δυνατότητα εξερεύνησης του συνόλου του χώρου απόφασης όπου

προσδιορίζονται οι βέλτιστες ή σχεδόν βέλτιστες λύσεις. Εφαρμογές πολυντοχικών γενετικών αλγόριθμων στον τομέα της ενέργειας κτιρίων περιλαμβάνονται στις παρακάτω έρευνες:

- Ο Wright et al. (2002) χρησιμοποιούν Γ.Α. για την εύρεση του συνόλου Pareto και τη μελέτη των παραχωρήσεων μεταξύ του ενεργειακού κόστους των συστημάτων θέρμανσης / εξαερισμού / ψύξης και της άνεσης των κατοίκων. Απλοποιημένο πρότυπο χρησιμοποιείται στην έρευνα αυτή για τους σχετικούς υπολογισμούς.
- Οι Wang et al. (2005) χρησιμοποιούν Γ.Α. για τον σχεδιασμό κτιρίων. Οι δύο αντικειμενικές συναρτήσεις που ελαχιστοποιούνται είναι το οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος του κύκλου ζωής. Οι Γ.Α. δημιουργούν ταυτόχρονα ένα σύνολο λύσεων και ερευνούν τον χώρο των λύσεων με βάση τις αρχές της εξέλιξης (μετάλλαξη) και της διασταύρωσης (Michalewicz, 1994). Το σύνολο Pareto όπως εξάγεται από την συγκεκριμένη διαδικασία βελτιστοποίησης προσδιορίζει τις βέλτιστες λύσεις κάθε κριτηρίου στο στάδιο του σχεδιασμού καθώς και τις παραχωρήσεις μεταξύ του οικονομικού και του περιβαλλοντικού κόστους ανά κύκλο ζωής.
- Οι Verbeeck & Hens (2007), πρότειναν μια διαφορετική προσέγγιση βασισμένη σε Γ.Α. Οι εναλλακτικές σχεδιασμού των κτιρίων ενσωματώνονται σε ένα χρωμόσωμα. Η συνάρτηση προσαρμοστικότητας αντιπροσωπεύει τρείς αντικειμενικές συναρτήσεις και συγκεκριμένα α) την πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας β) την καθαρή παρούσα αξία και γ) το δυναμικό της παγκόσμιας υπερθέρμανσης. Κατά τη διαδικασία αξιολόγησης κάθε λύσης κατατάσσεται σύμφωνα με την προσαρμοστικότητα της στα τρία κριτήρια. Η διαδικασία υποστηρίζεται με προσομοίωση στο TRNSYS. Η κατάταξη βασίζεται στη βαθμολογία Pareto της λύσης η οποία προκύπτει με βάση τον αριθμό των λύσεων από τις οποίες η συγκεκριμένη λύση κυριαρχείται. Ο συνδυασμός της μεθοδολογίας Pareto και Γ.Α. δεν οδηγεί σε μοναδικό βέλτιστο αλλά σε παραχωρήσεις μεταξύ των κριτηρίων.

Τεχνικές πραγματικού χρόνου

Στα υφιστάμενα κτίρια, κατά τη λειτουργία τους, υπάρχουν διαδικασίες για τη βελτίωση της ενέργειακής απόδοσης που συλλέγουν δεδομένα και επενεργούν στις ρυθμίσεις των ενέργειακών συστημάτων των κτιρίων σε πραγματικό χρόνο. Οι διαδικασίες αυτές εφαρμόζονται μέσω ολοκληρωμένων συστημάτων ενέργειακής διαχείρισης κτιρίων (Σ.Ε.Δ.Κ.). Η αρχιτεκτονική ενός Σ.Ε.Δ.Κ. παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9:



Σχήμα 2.9: Σύστημα ενεργειακής διαχείρισης κτιρίου

Τα Σ.Ε.Δ.Κ συμβάλλουν σε σημαντικές μειώσεις των ενεργειακών καταναλώσεων των κτιρίων καθώς και σε βελτιώσεις των εσωτερικών συνθηκών μέσω ανεπτυγμένων τεχνικών ελέγχου (Kolokotsa et al., 2005). Τα σύγχρονα συστήματα ελέγχου παρέχουν βελτιωμένη λειτουργικότητα των ενεργειακών συστημάτων ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις εσωτερικής άνεσης. Συγκριτική αξιολόγηση των διαφόρων τεχνικού ελέγχου στα κτίρια παρέχεται από την Kolokotsa (2003). Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης (νευρωνικά δίκτυα, ασαφής λογική, γενετικοί αλγόριθμοι κλπ.) παρέχουν σημαντικά οφέλη σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές ελέγχου. Αναλυτική επισκόπηση της συνεισφοράς της ασαφούς λογικής στον έλεγχο εσωτερικής άνεσης από συστήματα θέρμανσης / εξαερισμού / κλιματισμού γίνεται στην σχετική μελέτη από την Kolokotsa (2007). Ο ρόλος των νευρωνικών δικτύων στα κτίρια αναλύεται από τον Kalogirou (2006) ενώ μία στρατηγική εποπτείας και ελέγχου λειτουργίας κτιρίου σε πραγματικό χρόνο παρουσιάζεται από τους Ma et al. (2008). Συνοπτικά, οι διαδικασίες ενεργειακής βελτιστοποίησης που υλοποιούνται μέσω Σ.Ε.Δ.Κ. είναι (Doukas et al., 2007; Mathews et al., 2000):

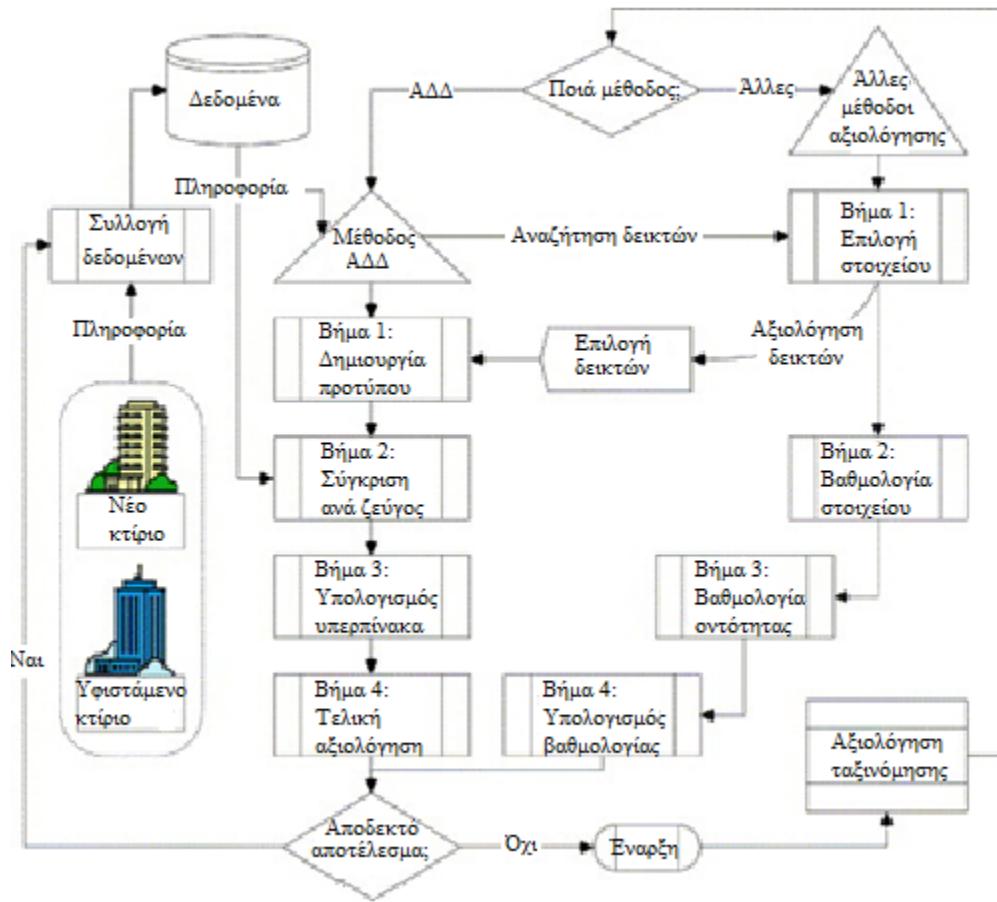
- Βελτιστοποίηση έναρξης/διακοπής λειτουργίας : περιλαμβάνει κανόνες που διέπουν την έναρξη και διακοπή λειτουργίας των ενεργειακών συστημάτων ή ομαλή αδρανοποίηση του

συστήματος βάσει διαφόρων παραμέτρων όπως π.χ ο όγκος ενός χώρου, οι ώρες λειτουργίας του, η ανάγκη προθέρμανσης του, κτλ.

- Στρατηγικές ενεργειακής διαχείρισης σημειακών ρυθμίσεων: Κανόνες μείωσης ενεργειακής κατανάλωσης με χρήση σημειακών ρυθμίσεων (θερμοκρασίας, ενθαλπίας, προσαρμοστικού ελέγχου, άνεσης).
- Διαδικαστική ιεραρχία: Κανόνες που προσδιορίζουν την ιεραρχία παρεμβάσεων που αφορούν τη θερμοκρασία, υγρασία, ποιότητα αέρα και ένταση φωτισμού.
- Βελτιστοποίηση ενεργειακής διαχείρισης: Κανόνες που διαχειρίζονται τα συστήματα για την καλύτερη αντιμετώπιση περιόδων αιχμής (περίοδος καταναλώσεων, μετατόπιση φορτίων κλπ).

Τα Σ.Ε.Δ.Κ. συνδυάζονται με προηγμένες τεχνικές λήψης αποφάσεων κατά την παρακολούθηση και τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου σε πραγματικό χρόνο όπως οι αναφερόμενες ενδεικτικά παρακάτω:

- Αναλυτική ιεραρχική διαδικασία (Analytical Hierarchical Processing) Wong & Li (2008) η οποία αξιολογεί τα πιο κρίσιμα κριτήρια επιλογής για τα έξυπνα κτίρια. Στη σχετική έρευνα το κριτήριο απόδοσης έργου (πχ. αξιοπιστία συστήματος, συμβατότητα κλπ) προκύπτει ως το κρισιμότερο, με επόμενα τα κριτήρια της εσωτερικής άνεσης, της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας κόστους.
- Αναλυτική δικτυακή διαδικασία (Analytic Network Process), μια τεχνική ΠΑΑ για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης ζωής του ευφυούς κτιρίου (Chen et al., 2006). Η διαδικασία υλοποιείται σε τέσσερα βήματα (Σχήμα 2.10): α) Δημιουργία μοντέλου, β) σύγκριση σε ζεύγη μεταξύ δυο κόμβων, γ) υπολογισμός υπερπινάκων βάσει αποτελεσμάτων της σύγκρισης ανά ζεύγη και δ) ανάλυση αποτελεσμάτων. Δύο εναλλακτικές αξιολογούνται κάθε φορά και η εναλλακτική με τη μεγαλύτερη βαθμολογία καθορίζει την απόδοση της ενεργειακής ζωής του κτιρίου όσον αφορά τις ενεργειακές υπηρεσίες, την ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση, το ελάχιστο ποσοστό σπατάλης ενέργειας και τις ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.



Σχήμα 2.10: Το πρώτυπο ANP για την ενεργειακή απόδοση κτιρίων (Chen et al., 2006)

- Πολυστοχικός αλγόριθμος υποστήριξης απόφασης βάσει αναζήτησης κλίσης προτείνεται από τους Atthajariyakul & Leephakpreeda (2004) για τη βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο των συστημάτων θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού με κριτήρια την θερμική άνεση, τη συγκέντρωση CO₂ και την ενεργειακή κατανάλωση. Τα κριτήρια πολλαπλασιάζονται με συντελεστές βαρύτητας και προστίθενται για να κατασκευαστεί η αντικειμενική συνάρτηση η οποία βελτιστοποιείται κατά τη διαδικασία υποστήριξης αποφάσεων. Τα βάρη τίθενται από τον αποφασίζοντα και τα αποτελέσματα της διαδικασίας αφορούν στις ρυθμίσεις των συστημάτων οι οποίες οδηγούν σε βέλτιστη απόδοση όσον αφορά τη θερμική άνεση, την ποιότητα εσωτερικού αέρα και την ενεργειακή κατανάλωση.

2.5 Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, του εσωτερικού περιβάλλοντος και η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κτιρίων είναι βασικές προτεραιότητες των ενεργειακών και περιβαλλοντικών πολιτικών παγκοσμίως. Στη διαδικασία λήψης αποφάσεων ποικίλα μέτρα είναι διαθέσιμα και ο αποφασίζων καλείται να λάβει υπόψη του ενεργειακές, περιβαλλοντικές και άλλες παραμέτρους για να καταλήξει σε μια βέλτιστη απόφαση όσον αφορά στο σχεδιασμό ή τη λειτουργία ενός κτιρίου. Το πρόβλημα του αποφασίζοντος χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη πολλαπλών και σε πολλές περιπτώσεις αντικρουόμενων στόχων κάθε ένας εκ των οποίων βελτιστοποιείται σε σχέση με ένα σύνολο ρεαλιστικών και διαθέσιμων εναλλακτικών.

Επομένως, ο αποφασίζων καλείται να επιλύσει ένα πρόβλημα πολυστοχικού προγραμματισμού που ως σήμερα μόνο μερικώς αντιμετωπίζεται από τις υφιστάμενες τεχνικές που εστιάζονται σε συγκεκριμένες πτυχές του.

Το πρόβλημα των βιώσιμων αποφάσεων είναι συνήθως μη δομημένο και ατελώς ορισμένο ενώ χαρακτηρίζεται από ανταγωνιστικά κριτήρια και εμπλέκει διάφορους αποφασίζοντες και αβέβαιες διαδικασίες με περιορισμένα χρονοδιαγράμματα για την λήψη σημαντικών αποφάσεων. Επίσης η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη οδηγεί σε ολοένα αυξανόμενες εναλλακτικές λύσεις.

Οι αποφασίζοντες όπως είναι οι τελικοί χρήστες των κτιρίων, οι ομάδες σχεδιασμού, οι ομάδες λειτουργίας και συντήρησης, οι οργανωτικές ομάδες κλπ συνήθως έχουν αντίθετες υποκειμενικές προτιμήσεις και διαφορετικές γνώσεις και ικανότητες.

Επομένως, ο ρόλος της υποστήριξης των αποφάσεων είναι κρίσιμος, ενώ παρά το γεγονός ότι τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων είναι χρήσιμα εργαλεία στα χέρια του συμβούλου και του αποφασίζοντος, στην πράξη υπάρχει ο κίνδυνος η εσφαλμένη χρήση τους να οδηγήσει σε περιορισμό των εναλλακτικών λύσεων και αποπροσανατολισμό. Αντίθετα, η διερεύνηση περισσότερων του ενός κριτηρίου απόφασης και η ελευθερία στην εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων και παραμέτρων σε ένα ΣΥΑ αυξάνει την ευελιξία του συστήματος και οδηγεί σε αποτελεσματικότερες λύσεις.

Με βάση τα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας και περιβαλλοντικής συμπεριφοράς το πρόβλημα απόφασης ενδέχεται να είναι διακριτής ή μικτής φύσης επομένως οι τεχνικές που είναι κατάλληλες για την αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων είναι:

- Τεχνικές ΠΑΑ όπου μια βέλτιστη λύση επιλέγεται ή κατατάσσεται για πεπερασμένο σύνολο εναλλακτικών βάσει συνόλου κριτηρίων. Η μεθοδολογία αυτή είναι χρήσιμη για τα προβλήματα διακριτών μεταβλητών αλλά και για συνεχείς μεταβλητές στην περίπτωση που διακριτοποιηθούν πρώτα. Το πλεονέκτημα των τεχνικών ΠΑΑ είναι ότι δίνεται η δυνατότητα στον αποφασίζοντα να αντιληφθεί το πρόβλημα σε βάθος και να εκφράσει τις προτιμήσεις του. Αντίθετα, το κύριο μειονέκτημα είναι ότι όταν απαιτείται μεγάλος αριθμός εναλλακτικών στοιχείο δημιουργούνται εμπόδια στην επίλυση του προβλήματος. Σε πολλές περιπτώσεις οι ερευνητές διεξάγουν μια προκαταρκτική διαδικασία αποκλεισμού των εναλλακτικών με περιορισμένη ή αμελητέα συνεισφορά στα κριτήρια (Blondeau et al., 2002; Becker et al., 2007).

-Τεχνικές βελτιστοποίησης πολυστοχικού προγραμματισμού οι οποίες οδηγούν σε βελτιστοποίηση ενός συνόλου αντικειμενικών συναρτήσεων υποκείμενων σε γραμμικούς ή μη περιορισμούς. Παρά το γεγονός ότι οι τεχνικές χρησιμοποιούνται κυρίως για προβλήματα συνεχών μεταβλητών είναι δυνατή η υλοποίηση τους και σε πρόβλημα διακριτών μεταβλητών απόφασης. Στον πολυστοχικό προγραμματισμό το πρόβλημα δομείται ως ένα μαθηματικό πρόβλημα ακεραίου η μικτού ακεραίου. Το κυριότερο πλεονέκτημα των τεχνικών Π.Π. είναι η ολιστική αντιμετώπιση του προβλήματος. Επίσης ο αριθμός των εναλλακτικών και ο χώρος λύσεων που διερευνάται δεν προσδιορίζεται από την τεχνική βελτιστοποίησης δεδομένου ότι το σύνολο των εναλλακτικών δεν απαιτείται να έχει καταγραφεί. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι αφενός η δυσκολία μοντελοποίησης του προβλήματος και αφετέρου η αυξημένη πολυπλοκότητα και ο υπολογιστικός φόρτος σε περίπτωση λεπτομερούς μοντελοποίησης.

-Συνδυασμός τεχνικών ΠΑΑ και Π.Π:

- Σε πρώτη φάση γίνεται χρήση τεχνικών Π.Π για την εύρεση του συνόλου Pareto και στη συνέχεια χρήση ΠΑΑ για την επιλογή τελικών λύσεων.
- Σε πρώτη φάση χρησιμοποιούνται τεχνικές ΠΑΑ για την αξιολόγηση συγκεκριμένων εναλλακτικών σε δεδομένα κριτήρια και εκτίμηση της συνολικής βαθμολογίας η οποία εισάγεται σε πρόβλημα Π.Π με μια μοναδική αντικειμενική συνάρτηση για τον προσδιορισμό της τελικής λύσεως.

Ένα κρίσιμο συμπέρασμα που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση είναι ότι ο ρόλος της προσομοίωσης για τη λήψη αποφάσεων στον τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια

παραμένει σημαντικός ακόμα και στις περιπτώσεις που γίνεται χρήση προηγμένων τεχνικών υποστήριξης αποφάσεων όπως ΠΑΑ και ΠΠ. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες υπήρξαν σοβαρές προσπάθειες ανάπτυξης εργαλείων προσομοίωσης δυναμικών μοντέλων ενέργειας κτιρίων και εσωτερικού περιβάλλοντος. Παρά τις αξιόλογες αναλυτικές σχεδιαστικές μεθόδους που αναπτύχθηκαν λίγες είναι εκείνες οι οποίες διαχειρίζονται ταυτόχρονα τις θερμικές, οπτικές και εσωτερικού περιβάλλοντος παραμέτρους σε συνδυασμό με την ενεργειακή απόδοση και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Ένα επίσης κρίσιμο συμπέρασμα είναι ότι συνήθως οι μεταβλητές απόφασης είναι προδιαγεγραμμένες και αξιολογούνται σε σχέση με ένα σύνολο κριτηρίων απόφασης. Αυτή η διαδικασία ισχύει και κατά τη φάση σχεδιασμού αλλά και λειτουργίας ενός κτιρίου. Δεδομένου ότι οι προσχεδιασμένες εναλλακτικές καθορίζονται από ειδικούς, η διαδικασία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την σχετική τους πείρα και τις γνώσεις τους. Επομένως σε κάποιο βαθμό οι λύσεις καθοδηγούνται από την πείρα και τις υποκειμενικές προτιμήσεις των ειδικών και η γνώμη των τελικών χρηστών περιορίζεται στην επιλογή της τελικής λύσης με οικονομικά κυρίως κριτήρια. Οι συμβατικοί οικονομικοί δείκτες όπως η καθαρή παρούσα αξία ή η εσωτερική απόδοση επένδυσης δεν είναι πάντα αντιπροσωπευτικοί για το πρόβλημα του ενεργειακού σχεδιασμού των κτιρίων. Το κόστος της διατήρησης ενέργειας (Martinaitis et al., 2004) παρέχει μια διαφορετική οπτική του κόστους που σχετίζεται με τις αποφάσεις διαχωρίζοντας τις σε εκείνες που αφορούν την ανακαίνιση του κτιρίου και άλλες που αφορούν την ενεργειακή του απόδοση.

Συμπερασματικά, διαπιστώνεται η ανάγκη για περαιτέρω ανάπτυξη των Σ.Υ.Α. ώστε να παρέχεται στους ειδικούς η δυνατότητα διερεύνησης λύσεων ανεξάρτητα των υποκειμενικών τους πεποιθήσεων και γνώσεων εντάσσοντας ταυτόχρονα τον τελικό χρήστη στη διαδικασία λήψης των αποφάσεων.

3. Μαθηματικό πρότυπο

3.1 Βασικές αρχές

Το προτεινόμενο πρότυπο λήψης αποφάσεων χρησιμοποιείται στη φάση του σχεδιασμού κτιρίων ενώ υπάρχει δυνατότητα τροποποίησής του στο μέλλον ώστε να περιλαμβάνει και υφιστάμενα κτίρια. Με βάση τα αρχιτεκτονικά σχέδια του κτιρίου, τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εναλλακτικών υλικών και συστημάτων αλλά και διάφορες ρυθμίσεις που παρουσιάζονται εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο, το πρότυπο αναπτύχθηκε για να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες όσον αφορά αποφάσεις για την κατασκευή του κτιριακού κελύφους και τις εγκαταστάσεις θέρμανσης, ψύξης και ZNX. Ο στόχος είναι η λήψη βέλτιστων αποφάσεων ώστε να επιτευχθεί η ελάχιστη ετήσια κατανάλωση ενέργειας, ταυτόχρονα με τις ελάχιστες δυνατές εκπομπές CO₂, και το χαμηλότερο οικονομικό κόστος επένδυσης. Συνήθως όμως στην πράξη κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό δεδομένου ότι τα υλικά και συστήματα με ανώτερα ενεργειακά/περιβαλλοντικά τεχνικά χαρακτηριστικά έχουν υψηλότερο κόστος προμήθειας. Επίσης, ένα υλικό/σύστημα υψηλής ενεργειακής απόδοσης δεν είναι κατ' ανάγκη αυτό με τη βέλτιστη περιβαλλοντική επίδοση λόγω τεχνολογικών και άλλων παραμέτρων.

Για την υλοποίηση ενός προτύπου λήψης αποφάσεων απαιτείται ο καθορισμός κατάλληλων μεταβλητών απόφασης, κριτηρίων απόφασης και περιορισμών καθώς και η επιλογή της τεχνικής επίλυσης του προβλήματος. Οι μεταβλητές απόφασης, διακριτές και συνεχείς, αντιπροσωπεύουν το σύνολο των εναλλακτικών μέτρων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου. Τα κριτήρια (ή στόχοι) του πολυστοχικού προτύπου καθορίζονται υπό μορφή μαθηματικών γραμμικών ή μη συναρτήσεων. Οι εφικτές λύσεις περιορίζονται από το σύνολο γραμμικών ή μη περιορισμών οι οποίοι αφορούν είτε τις μεταβλητές απόφασης και τις μεταξύ τους σχέσεις, είτε τα κριτήρια-στόχους του προβλήματος. Στο πρότυπο που αναπτύχθηκε (Diakaki et al., 2010), η διαδικασία επίλυσης καθορίστηκε με βάση την πολυστοχική φύση του προβλήματος απόφασης, σε συνδυασμό με τη μη-γραμμικότητα των κριτηρίων που αποτελούνται από διακριτές και συνεχείς μεταβλητές όπως αναλύεται διεξοδικά στη συνέχεια.

3.2 Μεταβλητές απόφασης & περιορισμοί

3.2.1 Μεταβλητές απόφασης & περιορισμοί του κτιριακού κελύφους

Το κτιριακό κέλυφος απαρτίζεται από τα δομικά στοιχεία του κτιρίου, τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ του εσωτερικού του κτιρίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Η κατασκευή του κτιριακού κελύφους είναι καθοριστική της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου και αποτελεί βασικό γνώμονα των ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση και ψύξη. Τα δομικά στοιχεία του κτιρίου διακρίνονται στα ομοιογενή και τα σύνθετα. Τα ομοιογενή στοιχεία, χρησιμοποιούνται αυτοτελώς στο κτιριακό κέλυφος, χωρίς να συνδυάζονται με άλλα, και έχουν μοναδική τιμή θερμικής διαπερατότητας, U ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), η οποία προσδιορίζει τη θερμική τους απόδοση. Ομοιογενή δομικά στοιχεία, σύμφωνα με τον προηγούμενο ορισμό, θεωρούνται τα παράθυρα και οι πόρτες του κτιρίου. Σύνθετα θεωρούνται τα δομικά στοιχεία τα οποία απαρτίζονται από τουλάχιστον δύο επίπεδα διαφορετικών υλικών (π.χ. σύνθετο στοιχείο 3 επιπέδων: επίχρισμα - μόνωση – σκυρόδεμα). Στην τελευταία περίπτωση η θερμική διαπερατότητα του σύνθετου δομικού στοιχείου U_T , υπολογίζεται βάσει της θερμικής αντίστασης κάθε επιπέδου σύμφωνα με τη σχέση:

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

Οπου:

U_T : Ολική θερμοδιαπερατότητα σύνθετου δομικού στοιχείου ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

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

d : Πάχος υλικού (m)

i : Επίπεδο δομικού στοιχείου

R : Θερμική αντίσταση επιπέδου

Με βάσει τα προαναφερθέντα, η θερμική απόδοση του κτιριακού κελύφους εξαρτάται αφενός από τα υλικά στην περίπτωση των ομοιογενών δομικών στοιχείων αφετέρου από το συνδυασμό των υλικών και το πάχος του κάθε επιπέδου για τα σύνθετα δομικά στοιχεία. Ως εκ τούτου το προτεινόμενο πρότυπο περιλαμβάνει μεταβλητές απόφασης που αφορούν την επιλογή υλικού αλλά και το πάχος κάθε υλικού εξετάζοντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς τόσο για τα ομοιογενή όσο και για τα σύνθετα δομικά στοιχεία. Οι μεταβλητές απόφασης παρουσιάζονται στη συνέχεια αναλυτικά και είναι οι εξής:

- Μεταβλητές απόφασης που αφορούν την επιλογή τύπου πόρτας.

- Μεταβλητές απόφασης που αφορούν την επιλογή τύπου παραθύρου.
- Μεταβλητές απόφασης που αφορούν τον αριθμό των διαφορετικών επιπέδων στα σύνθετα κατασκευαστικά στοιχεία όπως η τοιχοποιία, το δάπεδο και η στέγη.
- Μεταβλητές απόφασης που αφορούν τα εναλλακτικά υλικά για χρήση στα σύνθετα κατασκευαστικά στοιχεία.

Για λόγους απλούστευσης, γίνεται η παραδοχή ότι για τα ομοιογενή δομικά στοιχεία όπως η πόρτα και το παράθυρο, ένα τύπος επιλέγεται κάθε φορά για το σύνολο του κτιρίου. Ομοίως, ο αριθμός των επιπέδων και η επιλογή των υλικών για κάθε ένα από τα σύνθετα κατασκευαστικά στοιχεία όπως είναι η τοιχοποιία, το δάπεδο και η στέγη, αφορά το σύνολο του κτιρίου. Πιο συγκεκριμένα οι μεταβλητές απόφασης ορίζονται σε μαθηματική μορφή ως εξής:

Δεδομένης διαθεσιμότητας V εναλλακτικών τύπων πόρτας και S εναλλακτικών κατηγοριών παραθύρου (π.χ. μονού, διπλού και τριπλού υαλοπίνακα) κάθε μία εκ των οποίων περιλαμβάνει T_s όπου $s = 1, \dots, S$ διαφορετικούς τύπους παραθύρου (π.χ. με ενσωματωμένο αέρα ή αργό), δυαδικές μεταβλητές x_v^{DOR} όπου $v = 1, \dots, V$ και x_{st}^{WIN} όπου $t = 1, \dots, T_s$ ορίζονται ως εξής:

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

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

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

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

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

Όσον αφορά την τοιχοποιία, γίνεται επιλογή μεταξύ W εναλλακτικών δομών (π.χ. 1^η δομή: οπτόπλινθος – μόνωση, 2^η δομή: οπτόπλινθος – μόνωση – οπτόπλινθος κλπ). Επομένως, η μεταβλητή απόφασης x_w^{WAL} σε αυτή την περίπτωση 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 επιλέγεται κάθε φορά, ισχύει ο περιορισμός:

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

Κάθε μία 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°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_{wy}^{mWAL} όπου $c = 1, \dots, C_{wy}$ σε αυτή την περίπτωση ορίζεται ως εξής:

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

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

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

Συμπληρωματικά, για κάθε επίπεδο για 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 . Εξάλλου, είναι εφικτή η κατάργηση κάποιου επιπέδου με τον μηδενισμό του πάχους του π.χ. κατά την ελαχιστοποίηση του αρχικού κόστους επένδυσης. Με άλλα λόγια, είναι εφικτό για κάποια επίπεδα σε μία δομή που είναι ενεργή το x_{wy}^{dWAL} να γίνει ίσο με μηδέν. Για τον ορθό προσδιορισμό του πεδίου τιμών των μεταβλητών απόφασης που αφορούν το πάχος της μόνωσης στην τοιχοποιία τέθηκε ο περιορισμός:

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

Κατά την ίδια λογική, 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 $kk_{d,kcl}^{dCEIL}$ ($\text{W/m}^\circ\text{C}$) 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 $\alpha = 1, \dots, A_{df}$ ορίζεται ως εξής:

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

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

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

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

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

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

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

Τέλος, ορίζονται οι μεταβλητές απόφασης x_{df}^{dCEIL} και x_{he}^{dFLO} οι οποίες αντιπροσωπεύουν τα πάχη θερμομόνωσης των επιπέδων στέγης και δαπέδου, $f = 1, \dots, F_d$ d και $e = 1, \dots, Eh$ 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:

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

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

3.2.2 Μεταβλητές απόφασης & περιορισμοί των συστημάτων

Για τις ανάγκες θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού τα συστήματα κατηγοριοποιήθηκαν σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες:

- **Συστήματα θέρμανσης (HS):** Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται συστήματα που χρησιμοποιούνται μόνο για θέρμανση, παρά το γεγονός ότι κάποια εξ αυτών παρέχουν επιπλέον δυνατότητα για ψύξη ή ζεστό νερό. Διακρίνονται σε ηλεκτρικά και μη-ηλεκτρικά εκ των οποίων τα μη-ηλεκτρικά διακρίνονται περαιτέρω με βάση το καύσιμο που χρησιμοποιούν.
- **Συστήματα ψύξης (CS):** Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται μόνο για παροχή ψύξης παρά το γεγονός ότι τα περισσότερα παρέχουν και θέρμανση. Λειτουργούν αποκλειστικά με ηλεκτρική ενέργεια.
- **Συστήματα ζεστού νερού χρήσης (DHW):** Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει συστήματα τα οποία λογίζονται μόνο για τις ανάγκες DHW, παρά το γεγονός ότι κάποια εξ αυτών δύνανται να χρησιμοποιηθούν και για την παροχή θέρμανσης. Διακρίνονται σε ηλεκτρικά και μη-ηλεκτρικά εκ των οποίων τα μη-ηλεκτρικά διακρίνονται περαιτέρω με βάση το καύσιμο που χρησιμοποιούν.
- **Συστήματα θέρμανσης – ψύξης (HC):** Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται συστήματα τα οποία παρέχουν θέρμανση και ψύξη. Λειτουργούν αποκλειστικά με ηλεκτρική ενέργεια.
- **Συστήματα θέρμανσης - ζεστού νερού χρήσης (HDHW):** Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται συστήματα που χρησιμοποιούνται για παροχή θέρμανσης και DHW. Διακρίνονται σε ηλεκτρικά και μη-ηλεκτρικά και τα τελευταία με βάση το καύσιμο που χρησιμοποιούν.
- **Θερμικά ηλιακά συστήματα (SDHW):** Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται συστήματα που χρησιμοποιούνται για παροχή DHW με χρήση ηλιακής ακτινοβολίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω κατηγοριοποίηση είχε ως στόχο την δυνατότητα διερεύνησης όλων των πιθανών συνδυασμών για την παροχή θέρμανσης, ψύξης και DHW. Είναι πιθανόν 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 εάν πρόκειται να ληφθεί υπόψη μόνο για θέρμανση, εντάσσεται μόνο στην κατηγορία των συστημάτων θέρμανσης. Για τη δυνατότητα επιλογής των παραπάνω συστημάτων, ορίζονται διάφορες μεταβλητές απόφασης και σχετικοί περιορισμοί όπως αναφέρονται διεξοδικά στη συνέχεια: Υποθέτοντας EHI κατηγορίες ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης κάθε μία εκ των οποίων περιλαμβάνει EHJ_{ehi} διαφορετικά συστήματα, όπου $ehi = 1, \dots, EHI, NEHI$ κατηγορίες μη-ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης κάθε μία εκ των οποίων περιλαμβάνει $NEHJ_{nehi}$ διαφορετικά συστήματα όπου $nehi = 1, \dots, NEHI, ECI$ κατηγορίες ηλεκτρικών συστημάτων ψύξης κάθε μία εκ των οποίων περιλαμβάνει ECJ_{eci} διαφορετικά συστήματα, όπου $eci = 1, \dots, ECI, EWI$ κατηγορίες ηλεκτρικών συστημάτων DHW, κάθε μία εκ των οποίων περιλαμβάνει EWJ_{ewi} διαφορετικά συστήματα όπου $ewi = 1, \dots, EWI, NEWI$ κατηγορίες μη-ηλεκτρικών συστημάτων DHW κάθε μία εκ των οποίων περιλαμβάνει $NEWJ_{newi}$ διαφορετικά συστήματα, όπου $newi = 1, \dots, NEWI, EHCI$ κατηγορίες ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης – ψύξης κάθε μία εκ των οποίων περιλαμβάνει $EHCJ_{ehci}$ διαφορετικά συστήματα, όπου $ehci = 1, \dots, EHCI, EHW$ κατηγορίες ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης – DHW κάθε μία εκ των οποίων περιλαμβάνει $EHWJ_{ehwi}$ διαφορετικά συστήματα όπου $ehwi = 1, \dots, EHWI$ και $NEHW$ κατηγορίες μη ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης – DHW κάθε μία 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:

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

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

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

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

$$x_{newi,newj}^{NEW} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται μή - ηλεκτρικό σύστημα } ZNX \text{ newj κατηγορίας } newi \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (25)$$

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

$$x_{ehwi,ehwj}^{EHW} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγεται ηλεκτρ. σύστ. θέρμανσης - ZNX } ehwj \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (27)$$

$$x_{nehwi,nehwj}^{NEHW} = \begin{cases} 1, & \text{επιλέγ. μή ηλεκτρ. σύστ. θέρμανσης - ZNX } nehwj \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (28)$$

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 ψύξης 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, θέρμανσης/ψύξης και θέρμανσης/DHW:

$$\sum_{ehi=1}^{EHI} \sum_{ehj=1}^{EHJ_{ehi}} x_{ehi,ehj}^{EH} + \sum_{ehci=1}^{EHC} \sum_{ehcj=1}^{EHCJ_{ehci}} x_{ehci,ehcj}^{EHC} + \sum_{ehwi=1}^{EHWI} \sum_{ehwj=1}^{EHWJ_{ehwi}} x_{ehwi,ehwj}^{EHW} + \sum_{nehi=1}^{NEHI} \sum_{nehj=1}^{NEHJ_{nehi}} x_{nehi,nehj}^{NEH}$$

$$+ \sum_{nehwi=1}^{NEHWI} \sum_{nehwj=1}^{NEHWJ_{nehwi}} x_{nehwi,nehwj}^{NEHW} = 1 \quad (29)$$

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

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

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

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

Υποθέτοντας διαθεσιμότητα U κατηγοριών ηλιακών θερμικών συστημάτων, κάθε μία 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 δυνατότητα επιλογής ή μη, ηλιακού θερμικού συστήματος:

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

3.3 Κριτήρια απόφασης

3.3.1 Ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας

Οι κύριες ενεργειακές καταναλώσεις σε ένα κτίριο αφορούν τη 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 εναλλακτικών καυσίμων (π.χ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κλπ).

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

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

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

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 ($fuel = 1, \dots, FUEL$) 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 τη 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 $Q_{AINHG,n}$ και της προσπίπτουσας στα ανοίγματα ηλιακής ακτινοβολίας $Q_{SL,n}$. Η μηνιαία ενεργειακή ζήτηση για θέρμανση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_n^{HD} = \begin{cases} HS_n(Q_{T,n} + Q_{VEN,n} - Q_{AINHG,n} - Q_{SL,n}), & \text{εάν θετικός} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (41)$$

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

HS_n είναι η παράμετρος που καθορίζει εάν 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 ($\text{W}/^\circ\text{C}$), θ_{IH} και $\theta_{E,n}$ η εσωτερική (επιθυμητή) θερμοκρασία και η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^\circ\text{C}$) αντίστοιχα για κάθε μήνα n της περιόδου κατά τη διάρκεια της οποίας απαιτείται θέρμανση, T_n η διάρκεια (s) του μήνα n , ρ_{air} , c_{air} , V_{air} η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3), η ειδική θερμότητα του αέρα ($\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$) και ο μηνιαίος όγκος αέρα που ανανεώνεται (m^3) αντίστοιχα, $Q_{AINHG,n}$ η μέση τιμή λανθάνουσας ενέργειας ($\text{W}/\text{μήνα}$) 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 τη διάρκεια του μηνός n ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{μήνα}$) 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 $BLC = \sum_{com} A_{com} U_{com} b_{com}$ (Kharti, 2000), όπου com είναι το κτιριακό κατασκευαστικό στοιχείο (component), A_{com} και U_{com} η επιφάνεια (m^2) και η θερμοδιαπερατότητα του κατασκευαστικού στοιχείου ($\text{W}/\text{m}^{20}\text{C}$) αντίστοιχα και b_{com} είναι ο μειωτικός συντελεστής θερμοκρασίας και ισούται με 1 για στοιχεία που είναι σε άμεση επαφή με το έξωτερικό περιβάλλον και μειώνεται για επιφάνειες σε επαφή με το έδαφος, ή επιφάνειες σε επαφή με μη θερμαινόμενους χώρους όπως μεσοτοιχίες, σοφίτες, υπόγεια κλπ. (Berben et al., 2001).

Εισάγοντας στην παραπάνω σχέση τις μεταβλητές απόφασης της ενότητας 2.2.1 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 πολύ-επίπεδου 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:

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

Στη (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 ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) πόρτας τύπου v και παραθύρου υποκατηγορίας t , τύπου s , αντίστοιχα και k_{wyc}^{mWAL} , k_{dfa}^{mCEIL} , k_{heg}^{mFLO} είναι οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας ($W/m \text{ } ^\circ C$) των αντίστοιχων στοιχείων.

διαθέσιμων υλικών c του επιπέδου y της δομής τοιχοποιίας w , των διαθέσιμων υλικών α 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 παράθυρα αντίστοιχα, ενώ ο τρίτος, τέταρτος και πέμπτος όρος αφορούν τα σύνθετα στοιχεία της τοιχοποιίας, των στεγών και 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 μίας δομής τοιχοποιίας, στέγης και δαπέδου, με συγκεκριμένα επίπεδα και υλικά από 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 Agency, 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:

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

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

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

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

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

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 επιλεχθέντος 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 μία παράμετρος που

δείχνει για ποιόν 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 ($^{\circ}\text{C}$).

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 Agency, 2000):

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

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):

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

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

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:

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

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

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 τη (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 $DQ_{dDHW,n}$ (MJ):

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

Οπου WS_n είναι μία παράμετρος η οποία προσδιορίζει για ποιόν μήνα η υπάρχει ζήτηση DHW ($WS_n = 1$) και για ποιόν 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:

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

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):

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

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

Όπου, V_{water} , ρ_{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 ($^{\circ}C$) χρήσης 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 ($MJ/m^2\mu\text{ήνα}$) 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 CO₂ (kg CO₂ / έτος) 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 Agency (2000)):

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

$F_{station}$ (kg CO₂ / MJ) είναι ο συντελεστής εκπομπών του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, F_{fuel} (kg CO₂ / kg καυσίμου) ο συντελεστής μετατροπής καυσίμου σε εκπομπές CO₂, 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 CO₂ 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:

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

Οπου $COST_{DOR}$, $COST_{WIN}$, $COST_{WAL}$, $COST_{CEIL}$, $COST_{FLO}$, 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 επί μέρους κόστη:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Όπου C_v^{DOR} και C_{st}^{WIN} είναι το κόστος ($\text{€}/\text{m}^2$) της πόρτας τύπου v και του παραθύρου τύπου t κατηγορίας s αντίστοιχα, $CK_{w,kwl}^{mWAL}$, $CK_{d,kcl}^{mCEIL}$, $CK_{h,kfl}^{mFLO}$ είναι το κόστος του υλικού ($\text{€}/\text{m}^3$) 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} , C_{heg}^{mFLO} το κόστος ($\text{€}/\text{m}^3$) για το υλικό c του επιπέδου y της δομής τοιχοποιίας w , για το υλικό α 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 $CST_{nehwj,nehwj}^{NEHW}$ 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 $nehwj$ αντίστοιχα, και $CST_{u,b}^{SLC}$ το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης ($\text{€}/\text{m}^2$) 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 Διαδικασία επίλυσης προτύπου απόφασης

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

$$\begin{aligned} [min] g_1(x) &= Q_T \\ [min] g_2(x) &= EM_{CO_2} \\ [min] g_3(x) &= INCOST \end{aligned} \tag{70}$$

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 αλλά και της παρούσας έρευνας, άλλες τεχνικές εν δυνάμει χρήσιμες για το συγκεκριμένο πρόβλημα απόφασης είναι οι συνθετικές προσεγγίσεις (ϵ -constraint method), αλληλεπιδραστικές τεχνικές κ.α..

$$[min] z = \lambda$$

ν.π.

του πολυστοχικού προβλήματος (70) και

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

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

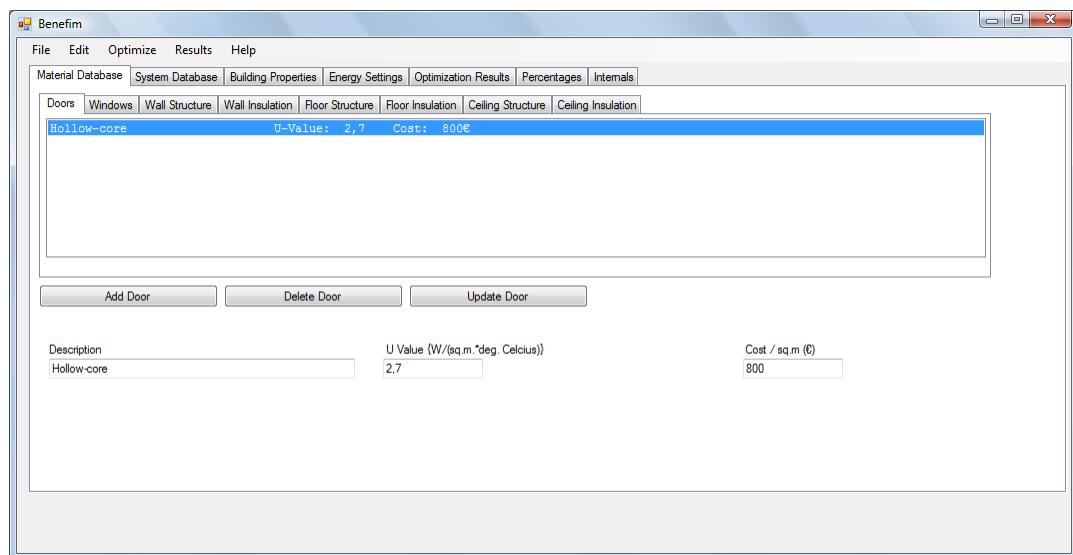
- $g_i(x) - g_{i\min}$: Απόσταση (Tchebyshev) αντικειμενικής συνάρτησης g_i από την ελάχιστη (βέλτιστη) τιμή της, όπου $i = 1, 2, 3$
- p_i : Βάρος της αντικειμενικής συνάρτησης i που δηλώνει το βαθμό παραχώρησης (ή τη σχετική βαρύτητα) της.
- λ : Όρος που χρησιμοποιείται για την ενιαία βελτιστοποίηση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

4. Μελέτη περίπτωσης

4.1 Εισαγωγή στο Benefim[©]

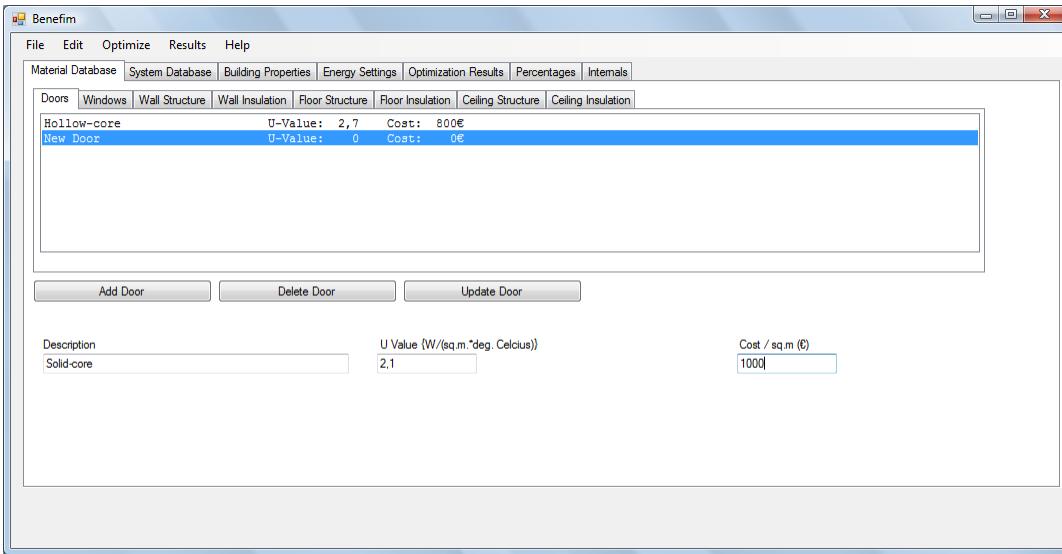
Το Benefim[©] (Building Energy Efficiency Improvement) είναι το λογισμικό το οποίο παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα χρήσης του μαθηματικού πρότυπου που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μέσα από ένα αλληλεπιδραστικό γραφικό περιβάλλον. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης παρέχεται από την εφαρμογή Lindo API (Application Programming Interface) ενώ η αρχή λειτουργίας του Benefim[©] περιγράφεται από 3 στάδια:

1. **Εισαγωγή δεδομένων:** Το Benefim[©] φορτώνει τις παρακάτω βάσεις δεδομένων κατά την εκκίνηση του: α) Υλικά (Materials), β) Συστήματα (Energy Systems), γ) Ιδιότητες κτιρίου (Building Properties), δ) Ενεργειακές ρυθμίσεις (Energy Settings). Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επέμβει στις βάσεις δεδομένων μέσα από τις ομώνυμες καρτέλες στο γραφικό περιβάλλον του Benefim[©] διαφοροποιώντας τις ενεργειακές ρυθμίσεις, κλιματολογικά δεδομένα και λοιπές παραμέτρους, τις ιδιότητες του κτιρίου, τα εναλλακτικά υλικά και συστήματα κλπ. Για να διατηρηθούν οι όποιες αλλαγές κατά την επόμενη εκκίνηση του προγράμματος πρέπει ο χρήστης να αποθηκεύσει τις επικαιροποιημένες βάσεις δεδομένων από το σχετικό μενού (File->Save->Database). Στο Σχήμα 4.1 εμφανίζεται το παράθυρο με τους εναλλακτικούς τύπους της εξωτερικής πόρτας του κτιρίου. Αρχικά, εμφανίζεται μόνο μία εναλλακτική (Hollow-core) με την τιμή θερμοπερατότητας της U σε W/m² και το κόστος σε €/m².



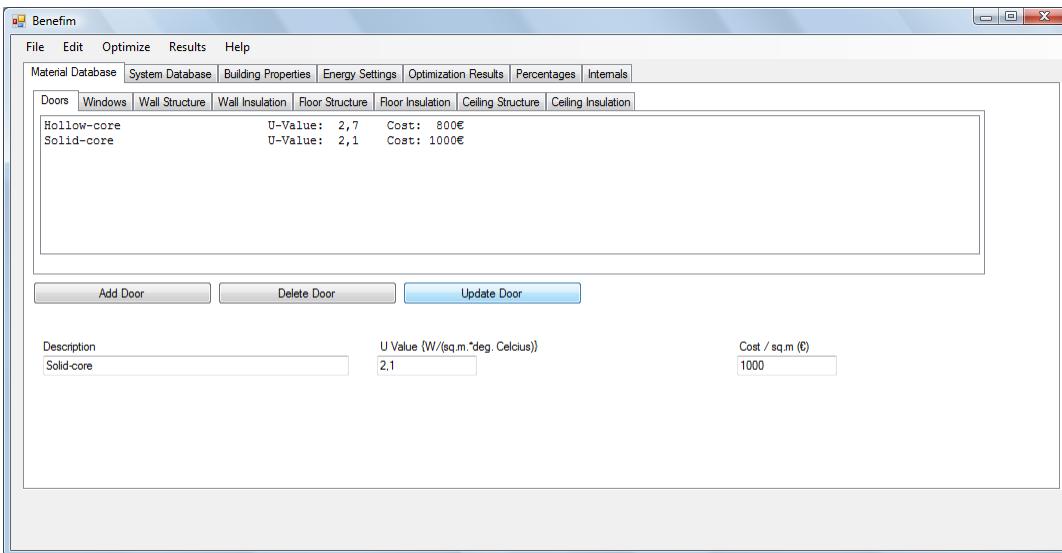
Σχήμα 4.1: Λίστα εναλλακτικών τύπων πόρτας του Benefim[©]

Για να προστεθεί μία δεύτερη εναλλακτική, ο χρήστης ενεργοποιεί το “Add Door” και δημιουργεί μία νέα καταχώρηση όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2 που ακολουθεί:



Σχήμα 4.2: Προσθήκη καταχώρησης στη λίστα εναλλακτικών τύπων πόρτας του Benefim®

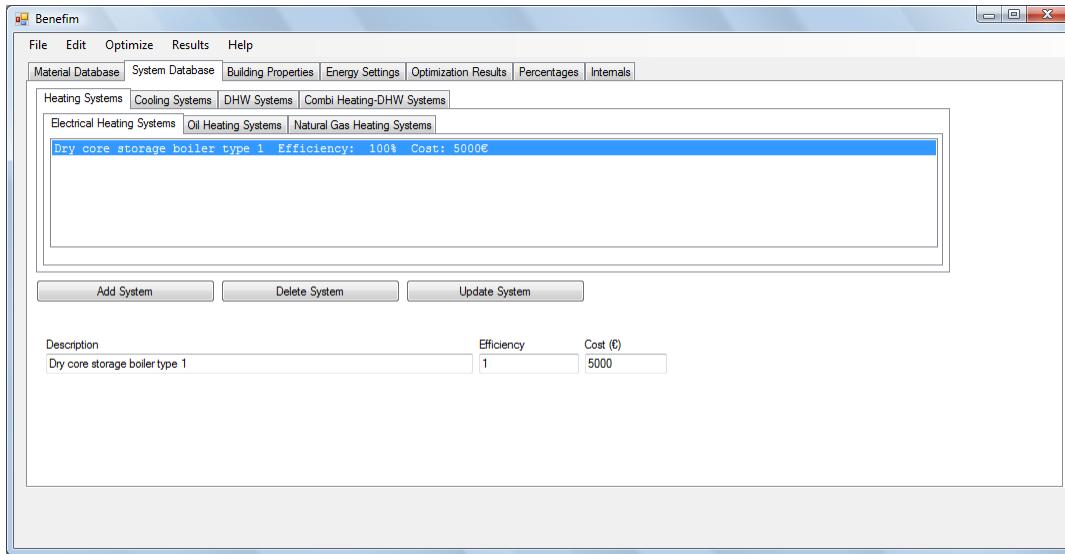
Αφού επιλεγεί η νέα καταχώρηση όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2 (New Door, U-Value:0, Cost:0), εισάγονται τα νέα δεδομένα στα σχετικά πεδία και συγκεκριμένα η ονομασία (Description), η τιμή U σε W/m² και το κόστος σε €/m².



Σχήμα 4.3: Αποθήκευση καταχώρησης στη λίστα εναλλακτικών τύπων πόρτας του Benefim®

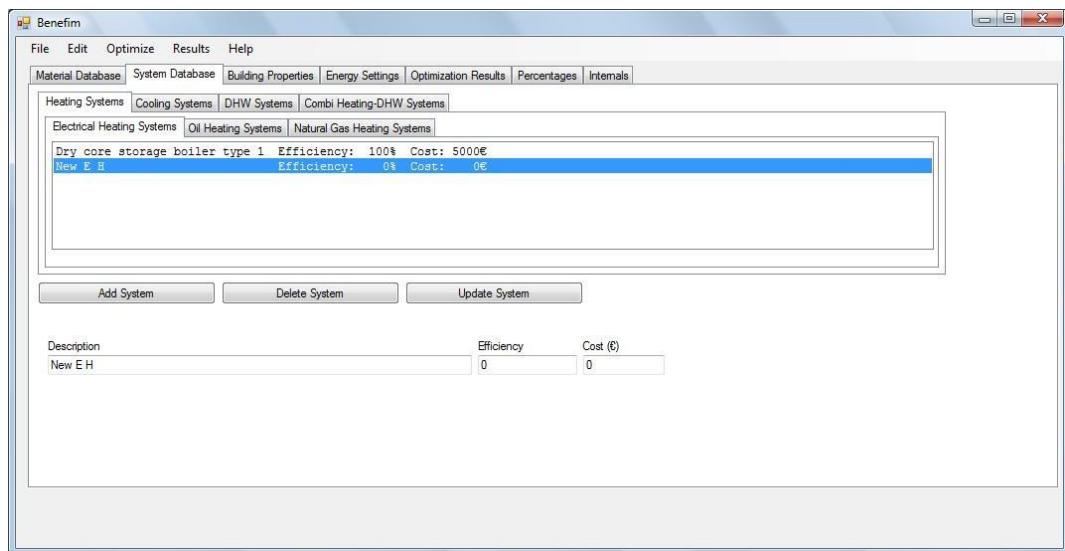
Ενεργοποιώντας το “Update Door” οι εισηγμένες στα σχετικά πεδία τιμές αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων και προβάλλεται η νέα καταχώρηση στη λίστα με τις υπό εξέταση εναλλακτικές (Σχήμα 4.3).

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η οθόνη του Benefim[®] με τα ηλεκτρικά συστήματα θέρμανσης όπου υπάρχει καταχωρημένο ένα εναλλακτικό σύστημα στη συγκεκριμένη κατηγορία με την ονομασία του, την απόδοση του και το κόστος του.



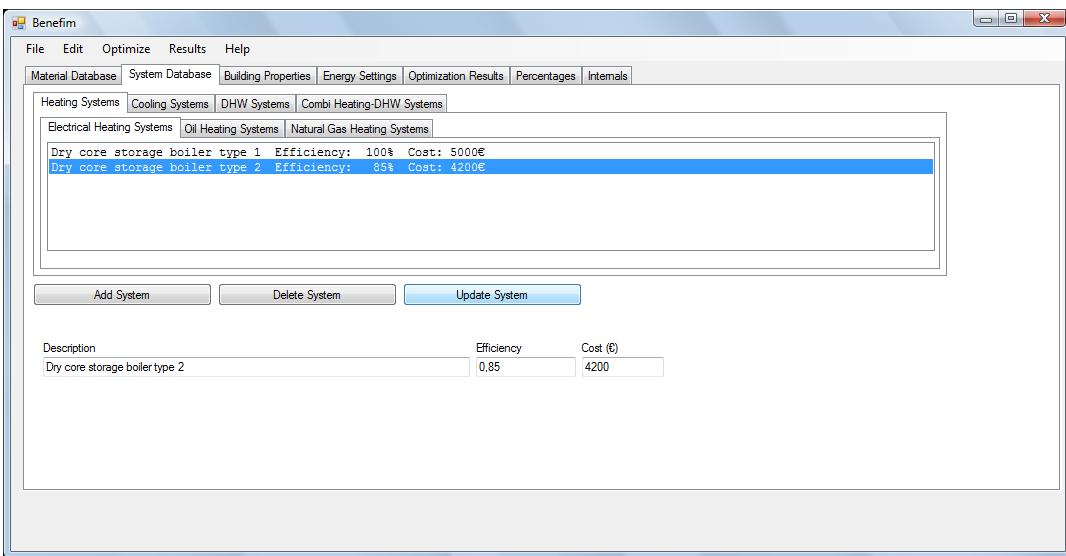
Σχήμα 4.4: Λίστα εναλλακτικών ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης του Benefim[®]

Κατά την ίδια λογική, εφόσον απαιτείται, δημιουργείται μία νέα καταχώρηση ενεργοποιώντας το “Add System” όπως φαίνεται στη συνέχεια στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Προσθήκη καταχώρησης στη λίστα εναλλακτικών τύπων ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης του Benefim[®]

Επιλέγοντας τη νέα καταχώρηση (New E H) και αφού εισαχθούν τα δεδομένα που αφορούν την περιγραφή, την απόδοση και το κόστος του νέου συστήματος στα σχετικά πεδία (Description, Efficiency, Cost), ο χρήστης ενεργοποιεί το “Update System” και αποθηκεύει την εναλλακτική ώστε να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6: Αποθήκευση καταχώρησης στη λίστα εναλλακτικών τύπων πόρτας του Benefim®

Στο παράρτημα Α, παρουσιάζεται η βάση δεδομένων που αφορά υλικά και συστήματα όπως δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας για να χρησιμοποιηθεί στο Benefim®.

Στο Σχήμα 4.7, παρουσιάζεται η οθόνη που αφορά τα δεδομένα του κτιριακού σχεδιασμού και της χρήσης του κτιρίου. Στο πεδίο “Envelope Data”, ο χρήστης εισάγει το εμβαδόν κάθε δομικού στοιχείου με τον μειωτικό συντελεστή που το προσδιορίζει εφόσον είναι διαφορετικός του 1 (προκαθορισμένη τιμή) καθώς και τα ώρια του πάχους της μόνωσης σε τοιχοποιία, δάπεδο και οροφή. Στο πεδίο “Building Use Data”, εισάγονται δεδομένα που αφορούν την χρήση του κτιρίου και συγκεκριμένα ο αριθμός των κατοίκων του κτιρίου, η λανθάνουσα θερμότητα του ατόμου και ο ρυθμός εξαερισμού του κτιρίου. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διαφοροποιήσει τις παραπάνω παραμέτρους και εφόσον το επιθυμεί να τις αποθηκεύσει χρησιμοποιώντας την εντολή “Save” από το μενού “File”.

The screenshot shows the 'Building Properties' tab of the Benefim software. On the left, under 'Envelope Data', there are two columns: 'Total Area (sq. m.)' and 'Temperature Correction Factor'. The first column contains data for Doors (6.00), Windows (6.00), Walls (108.00), Floor (100.00), and Ceiling (100.00). The second column contains values 1, 1, 1, 1, and 1 respectively. On the right, under 'Building Use Data', there are three input fields: Building Occupancy (persons) set to 4, Internal heat gain (W/person/day) set to 70, and Air Space Renewal Rate (cb.m./month) set to 30000.

Σχήμα 4.7: Δεδομένα σχεδιασμού και χρήσης κτιρίου στο Benefim[©]

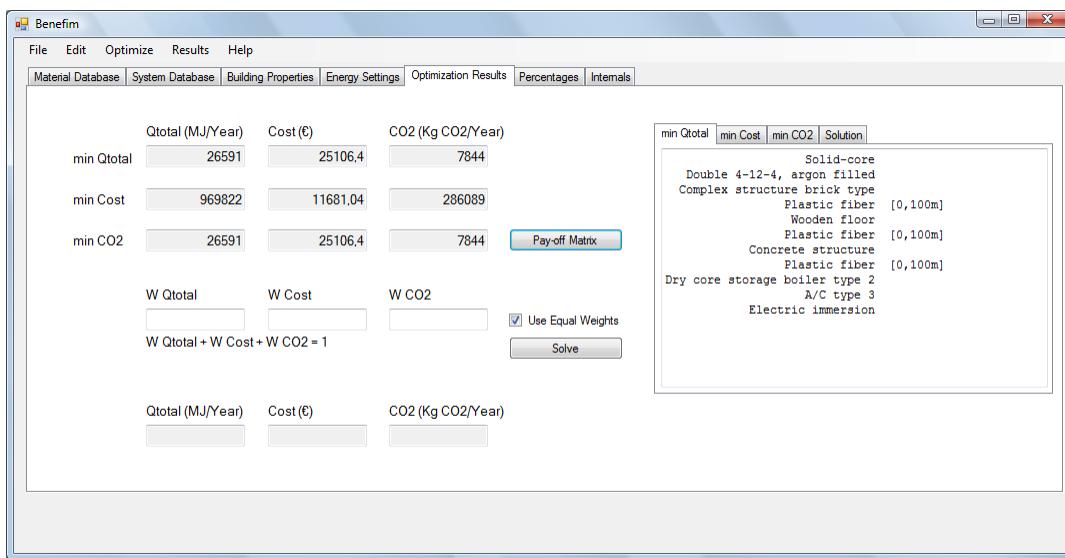
Στο Σχήμα 4.8, εμφανίζεται η οθόνη που αφορά τα ενεργειακά δεδομένα και ειδικότερα τις μηνιαίες τιμές σχετικές με την θερμοκρασία περιβάλλοντος, την εσωτερική (επιθυμητή) θερμοκρασία του κτιρίου, την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία ψυχρού νερού και άλλες παραμέτρους όπως η επιθυμητή θερμοκρασία ζεστού νερού χρήσης, ο απαιτούμενος όγκος ζεστού νερού, η απόδοση του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι συντελεστές μετατροπής καυσίμων σε ενέργεια και CO₂ καθώς και κάποιες σταθερές όπως οι τιμές πυκνότητας και ειδικής θερμότητας του νερού και του αέρα. Κάθε μία από τις προαναφερθείσες παραμέτρους δύναται να διαφοροποιηθεί από τον χρήστη και να καταχωρηθεί για να φορτώνεται αυτόματα κατά την εκκίνηση του προγράμματος.

The screenshot shows the 'Energy Settings' tab of the Benefim software. It displays a table of monthly parameters for a year. The columns are: External Temperature (deg. Celsius), Internal Temperature (deg. Celsius), Solar Radiation (kWh/sq.m.), DCW Temperature (deg. Celsius), DHW Temperature (deg. Celsius), DHW Volume (cb.m.), Electricity Return Rate, F CO2 Station (kgCO2/MJ), F CO2 Oil (kgCO2/kgOil), F CO2 N.Gas (kgCO2/kgN.Gas), LHP CO2 Oil (MJ/kgOil), LHP CO2 N.Gas (MJ/kgN.Gas), Air Density (kg/cb.m.), Air Specific Heat(J/kg*deg Celcius), Water Density (kg/cb.m.), and Water Specific Heat(J/kg*deg Celcius). The data is as follows:

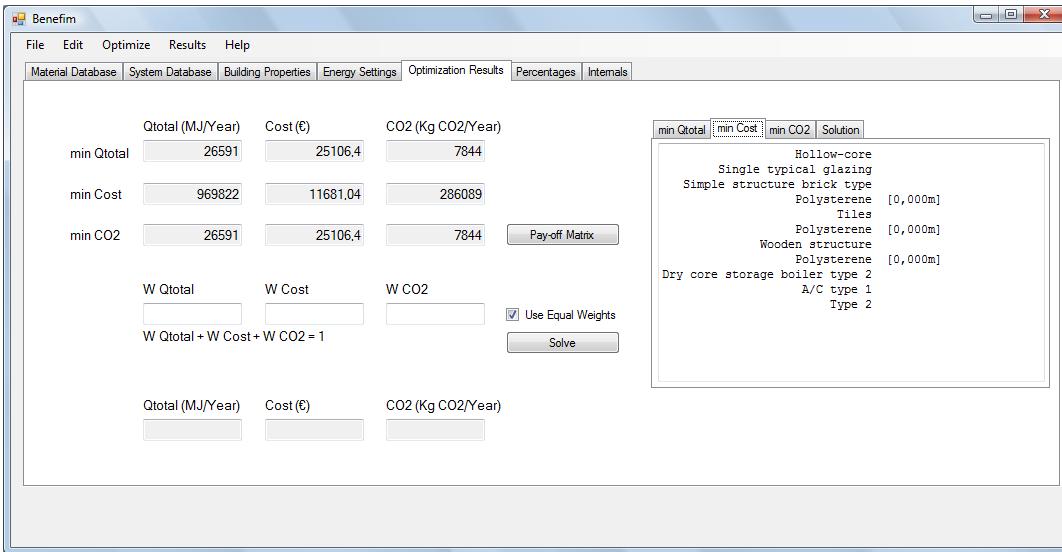
	External Temperature (deg. Celsius)	Internal Temperature (deg. Celsius)	Solar Radiation (kWh/sq.m.)	DCW Temperature (deg. Celsius)	DHW Temperature (deg. Celsius)	DHW Volume (cb.m.)	Electricity Return Rate	F CO2 Station (kgCO2/MJ)	F CO2 Oil (kgCO2/kgOil)	F CO2 N.Gas (kgCO2/kgN.Gas)	LHP CO2 Oil (MJ/kgOil)	LHP CO2 N.Gas (MJ/kgN.Gas)	Air Density (kg/cb.m.)	Air Specific Heat(J/kg*deg Celcius)	Water Density (kg/cb.m.)	Water Specific Heat(J/kg*deg Celcius)
January	9	20	150	14	55											
February	7	20	154	14	10											
March	11	20	164	14	0.35											
April	15	20	206	14	0.295											
May	22	20	220	14	3.142											
June	25	25	236	14	2.715											
July	30	25	250	14	42.912											
August	28	25	267	14	49.788											
September	23	25	252	14	1.2											
October	19	20	193	14	1,0035											
November	14	20	142	14	1000											
December	12	20	117	14	4.2											

Σχήμα 4.8: Ενεργειακά δεδομένα του Benefim[©]

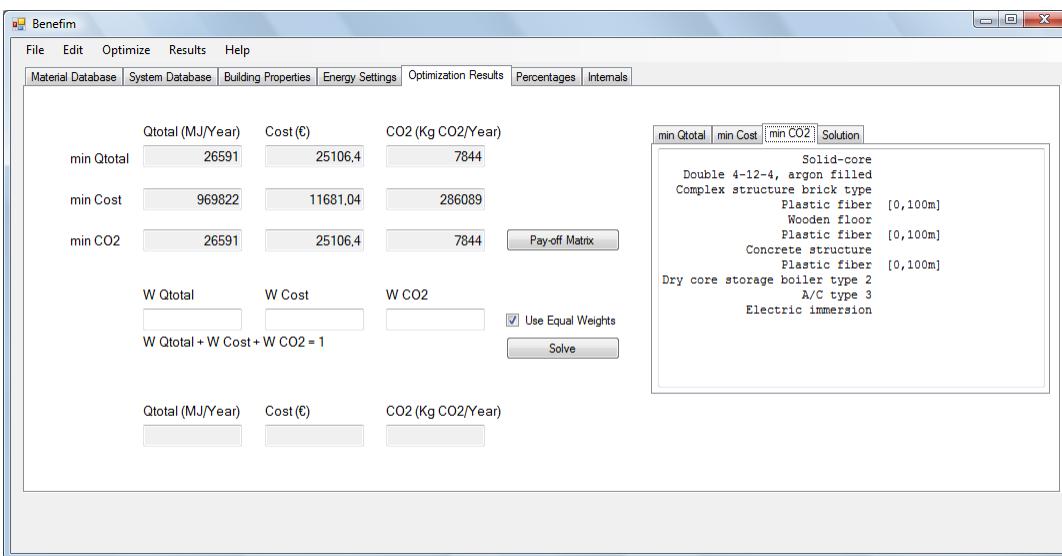
2. **Βελτιστοποίηση & αποτελέσματα:** Η βελτιστοποίηση στο Benefim[©] γίνεται κανονικά σε 2 βήματα. Αρχικά ο χρήστης εξάγει τον πίνακα πληρωμών (Σχήμα 4.9) και στη συνέχεια αφού εισάγει βάρη στα κριτήρια λαμβάνει την τελική λύση (Σχήμα 4.12). Η διαδικασία είναι αλληλεπιδραστική υπό την έννοια ότι ο χρήστης παρατηρώντας τα αποτελέσματα του πίνακα πληρωμών σε σχέση με τις τιμές των κριτηρίων, εισάγει συντελεστές βαρύτητας στα κριτήρια, ώστε να υπολογισθεί η βέλτιστη λύση η οποία ανταποκρίνεται στις προτιμήσεις του. Ο πίνακας πληρωμών δίδει τη δυνατότητα στον αποφασίζοντα να έχει σαφή εικόνα της συνολικής διακύμανσης κάθε κριτηρίου και της επιλογής τέτοιου συντελεστή βαρύτητας σε κάθε ένα από αυτά, ώστε η τελική λύση να προσεγγίζει τις όποιες απαιτήσεις του. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή όπως φαίνεται από τον πίνακα πληρωμών η διακύμανση της τιμής του κριτηρίου της ετήσιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας είναι από 26.59GJ έως 969.82GJ, του κριτηρίου του κόστους επένδυσης από 11,681.04€ έως 25,106.40€ και των ετήσιων εκπομπών CO₂ από 7,844kg CO₂ έως 286,089kg CO₂. Η επιλογή υλικών και συστημάτων για τον πίνακα πληρωμών εμφανίζεται στις καρτέλες ‘min Qtotal’, ‘min Cost’ και ‘min CO₂’ στα σχήματα 4.9, 4.10 και 4.11 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.9: Επιλογή υλικών και συστημάτων κατά την ελαχιστοποίηση του κριτηρίου της ενέργειας στο Benefim[©]

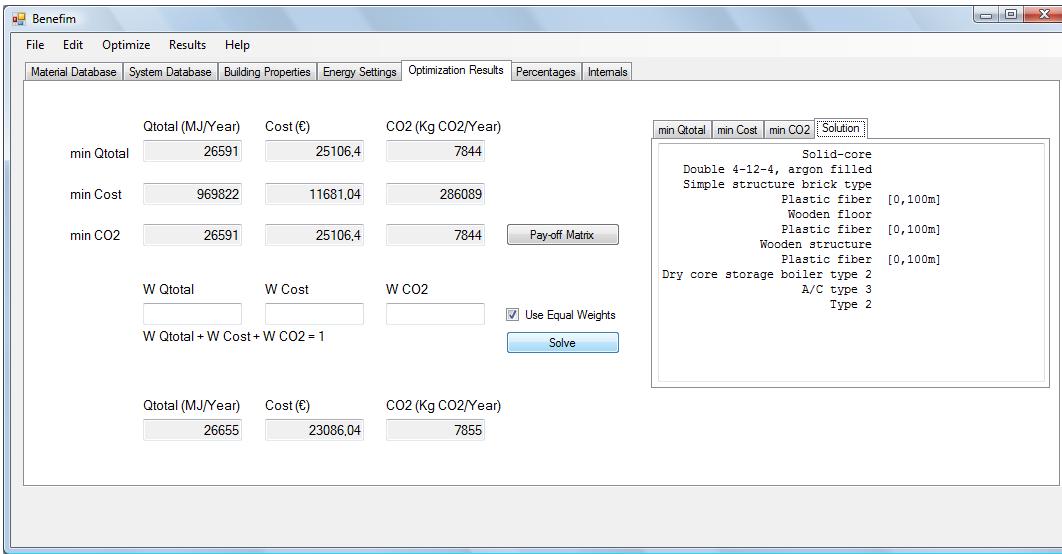


Σχήμα 4.10: Επιλογή υλικών και συστημάτων κατά την ελαχιστοποίηση του κριτηρίου του κόστους στο Benefim[©]



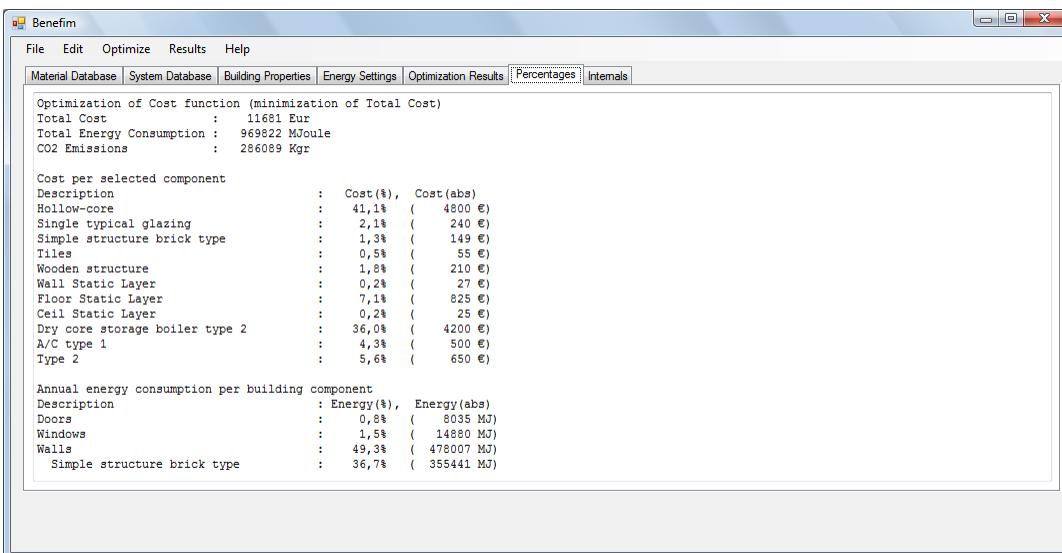
Σχήμα 4.11: Επιλογή υλικών και συστημάτων κατά την ελαχιστοποίηση του κριτηρίου των εκπομπών CO₂ στο Benefim[©]

Για την τελική βελτιστοποίηση, ο χρήστης επιλέγει συντελεστή βαρύτητας από 0 έως και 1 για κάθε κριτήριο, δηλώνοντας με τον τρόπο αυτό την προτίμησή του για την ελαχιστοποίηση της τιμής του ενός κριτηρίου έναντι των άλλων. Εάν για παράδειγμα το ζητούμενο για τον αποφασίζοντα ήταν η ελαχιστοποίηση της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας, τότε η τιμή για τον συντελεστή βαρύτητας του κριτηρίου (W Qtotal) θα ήταν ίση με 1. Τα αποτελέσματα σε αυτή την περίπτωση θα ήταν ίδια με αυτά της καρτέλας ‘min Qtotal’ (Σχήμα 4.9). Στο Σχήμα 4.12, παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα και η επιλογή των υλικών & συστημάτων (καρτέλα ‘Solution’) για ίσους συντελεστές βαρύτητας και στα 3 κριτήρια απόφασης του Benefim[©].



Σχήμα 4.12: Αποτελέσματα και επιλογή υλικών & συστημάτων για ίσους συντελεστές βαρύτητας στα 3 κριτήρια απόφασης του Benefim[©]

3. Ανάλυση αποτελεσμάτων: Για την ενδελεχή κατανόηση και μελέτη των αποτελεσμάτων το Benefim[©] υπολογίζει την ποσοτική και ποσοστιαία συμμετοχή των επιλεγμένων υλικών και συστημάτων στα κριτήρια απόφασης και προβάλει τις πληροφορίες αυτές στην καρτέλα ‘Percentages’ όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13.



Σχήμα 4.13: Ποσοστιαία συμμετοχή επιλεγμένων υλικών και συστημάτων στα κριτήρια απόφασης του Benefim[©]

Επίσης, πληροφορίες που αφορούν εσωτερικούς υπολογισμούς και τον έλεγχο καλής λειτουργίας του προγράμματος όπως οι τιμές των μεταβλητών απόφασης σε κωδικοποιημένη μορφή, ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης, των περιορισμών καθώς και οι αναλυτικοί υπολογισμοί του μαθηματικού προτύπου παρουσιάζονται στην οθόνη “Internals” του σχήματος 4.14.

The screenshot shows the Benefim software window with the title bar 'Benefim'. The menu bar includes 'File', 'Edit', 'Optimize', 'Results', and 'Help'. Below the menu is a tab bar with 'Material Database', 'System Database', 'Building Properties', 'Energy Settings', 'Optimization Results', 'Percentages', and 'Internals' (which is selected). The main area displays the following text:

```

Objective Function Optimized Value = 11681,0400543213

Decision Variables: 48
Constants : 276
Constraints : 12
Op Code : 527

Hollow-core X[ 0] = 1
Solid-core X[ 1] = 0

Single typical glazing X[ 2] = 1
Double 4-20-4, air filled X[ 3] = 0
Double 4-12-4, argon filled X[ 4] = 0

Simple structure brick type X[ 5] = 1
Complex structure brick type X[ 6] = 0

Polysterene X[ 8] = 1 (W)X[ 7] = 0,000mm
Mineral fiber X[ 9] = 0 (W)X[ 7] = N/A
Plastic fiber X[10] = 0 (W)X[ 7] = N/A

Tiles X[11] = 1
Wooden floor X[12] = 0

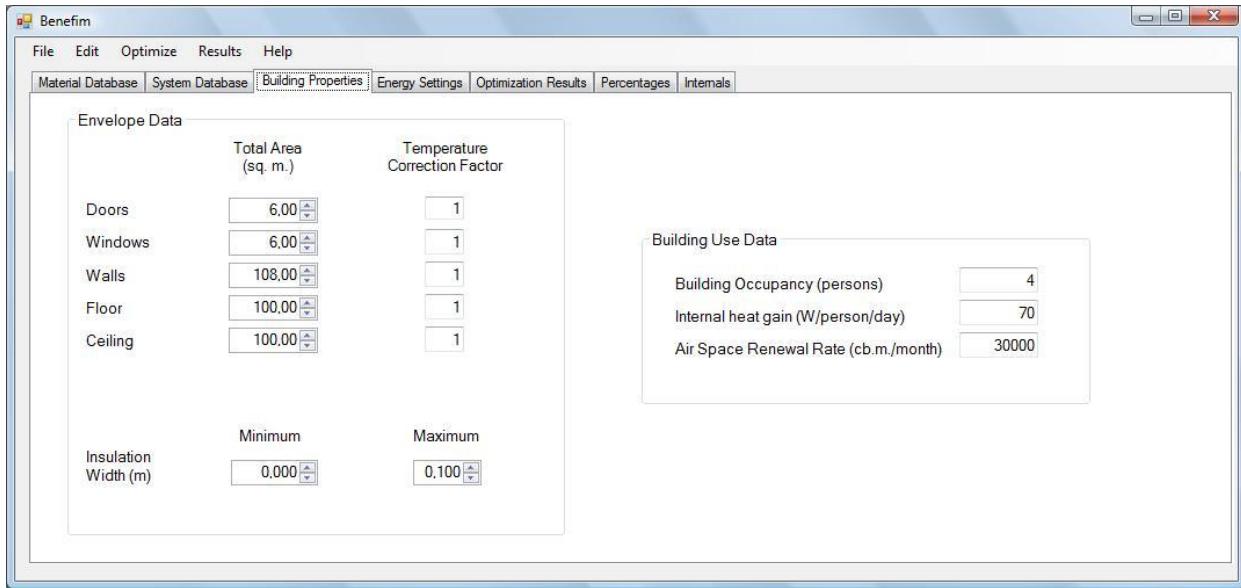
Polysterene X[14] = 1 (W)X[13] = 0,000mm

```

Σχήμα 4.14: Δεδομένα προβλήματος και έλεγχος καλής λειτουργίας του Benefim®

4.2 Παράδειγμα εφαρμογής

Για τη μελέτη της αποτελεσματικότητας του αναπτυχθέντος πρότυπου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του απλού κτιρίου το οποίο περιγράφεται στη συνέχεια. Το εμβαδόν του δαπέδου και της στέγης του κτιρίου, διαστάσεων μήκους 10m και πλάτους 10m, είναι 100m². Η τοιχοποιία είναι συνολικού εμβαδού 108m² και περιλαμβάνει δύο πλευρές επιφάνειας 24m² η κάθε μία και δύο πλευρές επιφάνειας 30m² ενώ οι εξωτερικές πόρτες έχουν επιφάνεια 6m² και τα παράθυρα 6m². Επίσης, γίνεται η παραδοχή ότι όλες οι παραπάνω επιφάνειες δηλ. πόρτες, παράθυρα, τοιχοποιία, δάπεδο και οροφή βρίσκονται σε άμεση επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον και επομένως οι αντίστοιχοι μειωτικοί συντελεστές b_{dr}^{DOR} , b_{wn}^{WIN} , b_{wl}^{WAL} , b_{ce}^{CEIL} και b_{fl}^{FLO} είναι ίσοι με 1. Για τα επίπεδα της μόνωσης σε τοιχοποιία, οροφή και δάπεδο το πάχος ορίζεται από 0-10cm (Σχήμα 4.15).



Σχήμα 4.15: Δεδομένα σχεδιασμού κτιριακών δομικών στοιχείων και χρήσης κτιρίου παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim®

Το κτίριο θεωρείται ότι πρόκειται να κατασκευαστεί στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών στην Ελλάδα, περιοχή για την οποία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μέσης μηνιαία θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας από το λογισμικό METEONORM (METEOTEST et al., 2009). Επιπρόσθετα, οι εσωτερικές (επιθυμητές) θερμοκρασίες για τις περιόδους θέρμανσης (θ_{IH}) και ψύξης (θ_{IC}) τέθηκαν στους 20°C και 25°C αντίστοιχα, ενώ οι θερμοκρασίες για το DHW (θ_{DHW}) (επιθυμητή) και το νερό στην αρχική του θερμοκρασία (θ_{DCW}) τέθηκαν στους 55°C και 14°C αντίστοιχα με βάση τα σχετικά όρια υγείας και άνεσης (Neufert, 2002).

Η ετήσια λανθάνουσα ενέργεια υπολογίστηκε με δεδομένο ότι το κτίριο κατοικείται από 4 άτομα κάθε ένα εκ των οποίων εκπέμπει θερμότητα με ρυθμό 70W, ενώ ο εξαερισμός του κτιρίου ορίστηκε σε 30.000m³ μηνιαίως δηλαδή 3,33 πλήρεις εναλλαγές του αέρα του κτιρίου σε ημερήσια βάση. Επιπλέον, η μηνιαία κατανάλωση για DHW υπολογίστηκε στα 10m³ ενώ η πυκνότητα και η θερμοκρασία αέρα και νερού υπολογίστηκαν με βάση τις τιμές $\rho_{air} = \frac{1,2kg}{m^3}$, $\rho_{water} = \frac{1000kg}{m^3}$, $c_{air} = \frac{1,0035J}{kg°C}$, $c_{water} = \frac{4,2J}{kg°C}$ αντίστοιχα. Για τις ανάγκες θέρμανσης, ψύξης και DHW, οι ενεργειακές πηγές που λήφθηκαν υπόψη είναι η ηλεκτρική ενέργεια, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και η ηλιακή ακτινοβολία. Όσον αφορά την ηλεκτρική ενέργεια, ο συντελεστής εκπομπών CO₂ και ο συντελεστής απόδοσης του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθορίστηκαν σε τιμές $F_{station} = 0,295kgCO2/MJ$ και $n_{el} = 0,35$, αντίστοιχα (US Department of Energy and Environmental Protection Agency, 2000). Επίσης, αναφορικά με τα εναλλακτικά καύσιμα οι

συντελεστές εκπομπών CO_2 και απόδοσης ενέργειας είναι $F_1 = \frac{3,142 \text{kgCO}_2}{\text{kg πετρελαίου}}$ και $F_2 = \frac{2,715 \text{kgCO}_2}{\text{kg φυσικού αερίου}}$ καθώς και $LHP_1 = \frac{42,912 \text{MJ}}{\text{kg πετρελαίου}}$ και $LHP_2 = \frac{49,788 \text{MJ}}{\text{kg φυσικού αερίου}}$ αντίστοιχα (Σχήμα 4.16).

The screenshot shows the Benefim software window with the 'Energy Settings' tab selected. The table displays monthly values for various parameters:

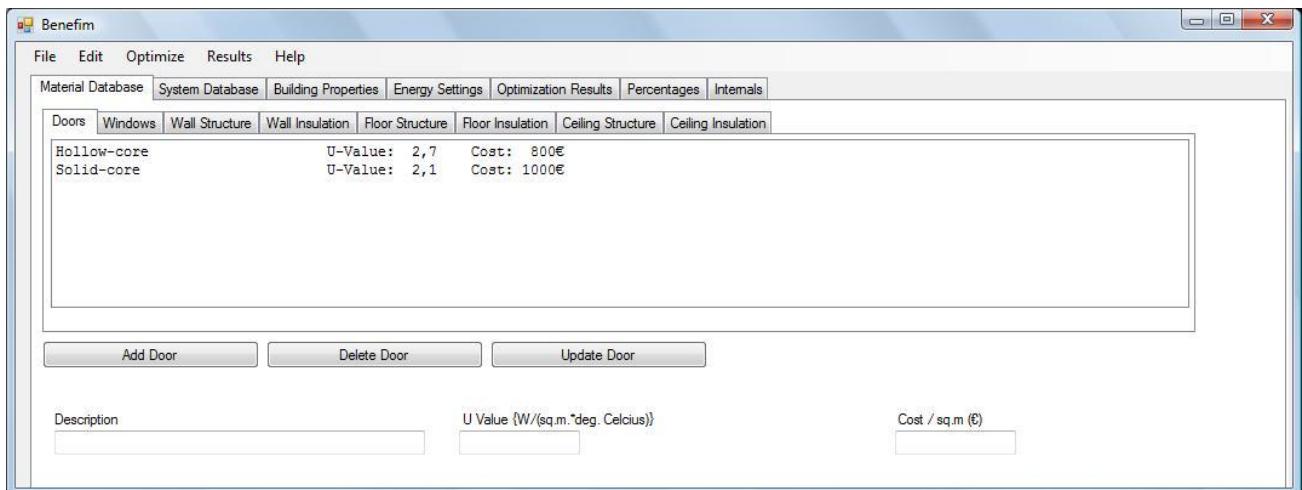
	External Temperature (deg. Celcius)	Internal Temperature (deg. Celcius)	Solar Radiation (MJ/sq.m.)	DCW Temperature (deg. Celcius)		
January	9	20	324	14	55	DHW Temperature (deg. Celcius)
February	7	20	360	14	10	DHW Volume (cb.m)
March	11	20	446	14	0,35	Electricity Return Rate
April	15	20	522	14	0,295	F CO2 Station (kgCO2/MJ)
May	22	20	590	14	3,142	F CO2 Oil (kgCO2/kgOil)
June	25	25	597	14	2,715	F CO2 N.Gas (kgCO2/kgN.Gas)
July	30	25	651	14	42,912	LHP CO2 Oil (MJ/kgOil)
August	28	25	669	14	49,788	LHP CO2 N.Gas (MJ/kgN.Gas)
September	23	25	615	14	1,2	Air Density (kg/cb.m)
October	19	20	493	14	1,0035	Air Specific Heat(J/kg°C)
November	14	20	421	14	1000	Water Density (kg/cb.m)
December	12	20	342	14	4,2	Water Specific Heat(J/kg*deg.Celcius)

Σχήμα 4.16: Ενεργειακές ρυθμίσεις & δεδομένα παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim[®]

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

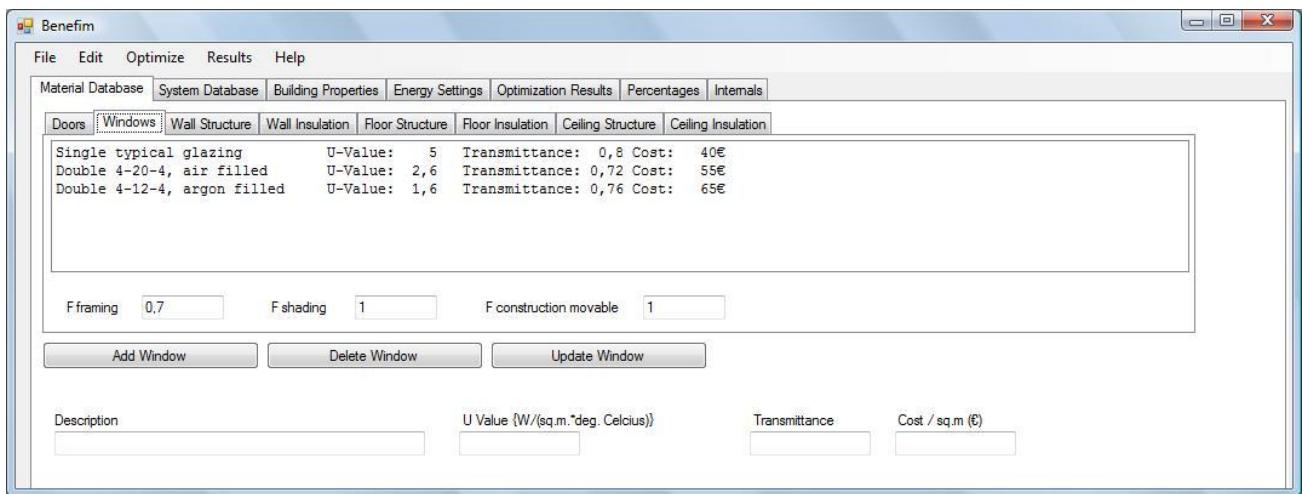
- Τύπου πόρτας και παραθύρου
- Δομή τοιχοποιίας, στέγης και δαπέδου
- Πάχους υλικών και υλικών τοιχοποιίας, στέγης και δαπέδου
- Συστήματος θέρμανσης
- Συστήματος ψύξης
- Συστήματος DHW

Αναλυτικότερα, όσον αφορά τις πόρτες και τα παράθυρα, οι εναλλακτικές παρουσιάζονται στα σχήματα 4.17 και 4.18 αντίστοιχα.



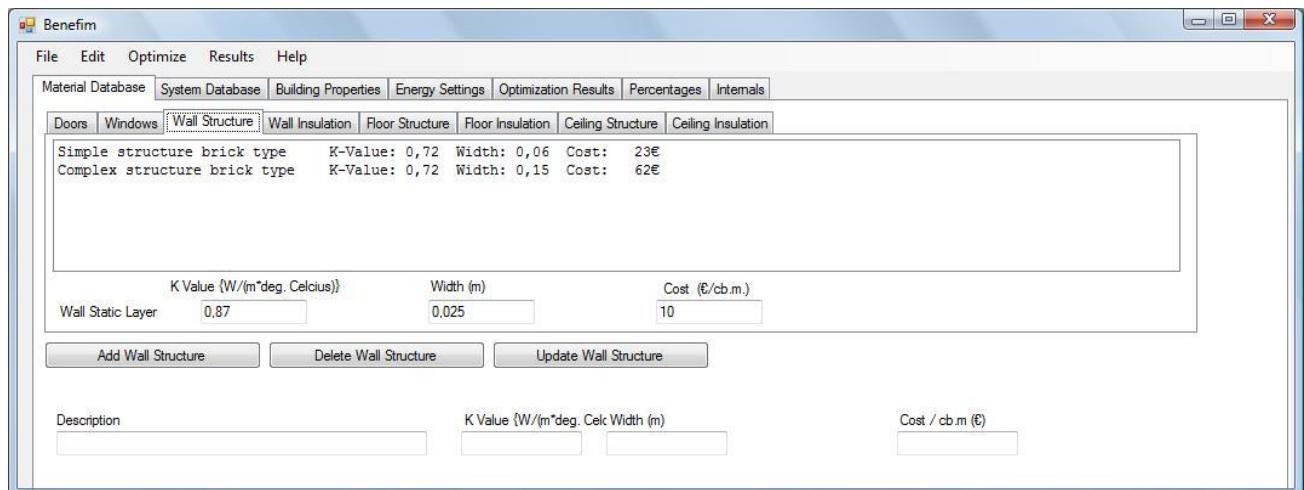
Σχήμα 4.17: Εναλλακτικοί τύποι πόρτας παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim®

Ειδικά για το παράθυρο, ο συντελεστής πλαισίου $F_{F,wn}$ τέθηκε ίσος με 0.7, ενώ οι συντελεστές σκίασης $F_{S,wn}$ και $F_{CM,wn}$ τέθηκαν ίσοι με 1 (Σχήμα 4.18).

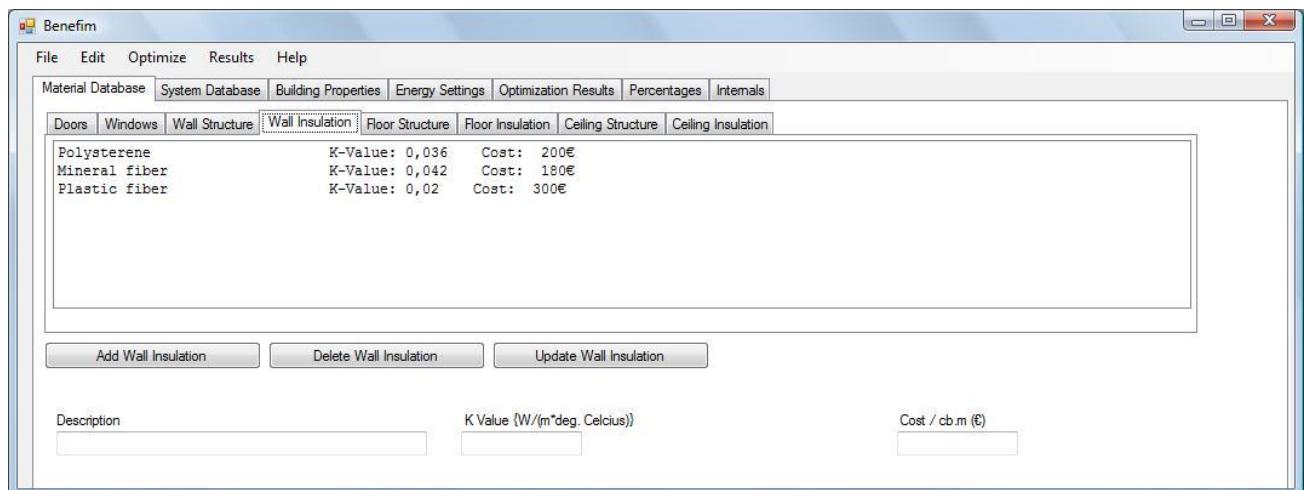


Σχήμα 4.18: Εναλλακτικοί τύποι παραθύρου παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim®

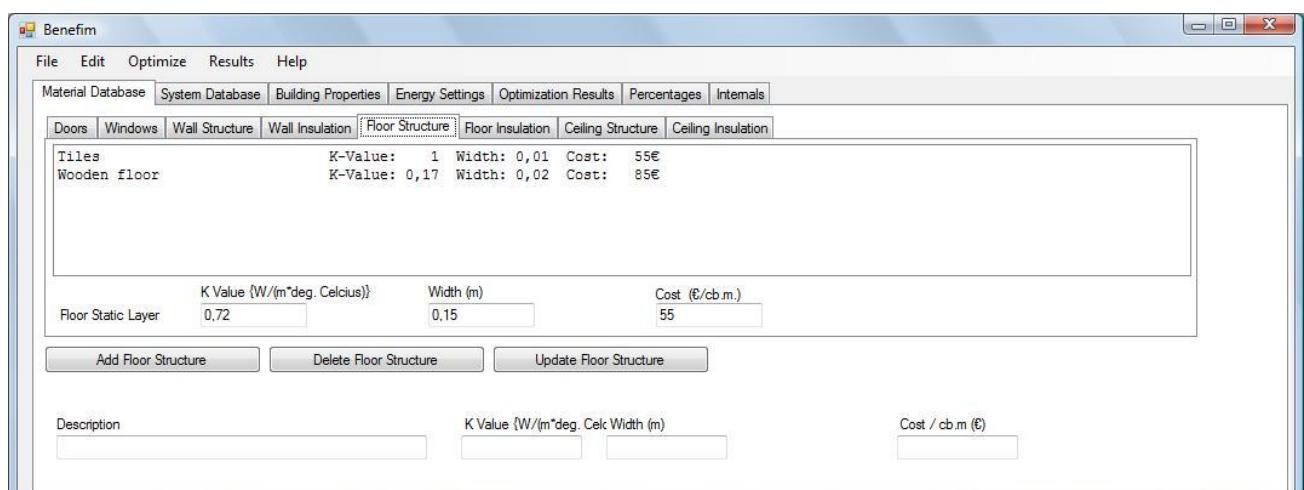
Οσον αφορά την τοιχοποιία, τη στέγη και το δάπεδο οι εναλλακτικές δομές και οι διαφορετικοί τύποι μόνωσης παρουσιάζονται στα σχήματα 4.19 έως 4.24.



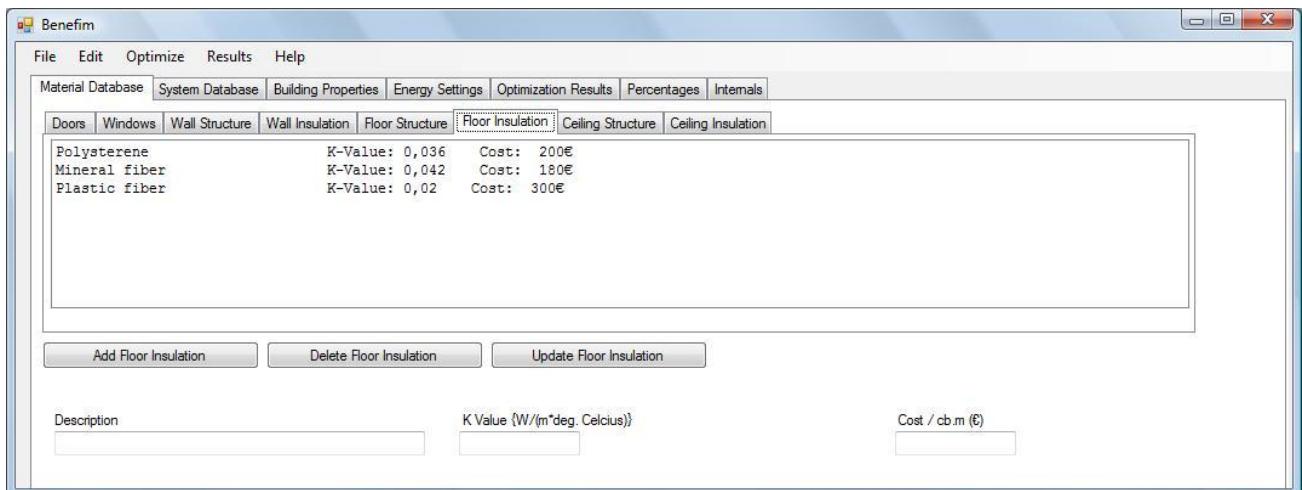
Σχήμα 4.19: Εναλλακτικές δομές τοιχοποίιας παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim[©]



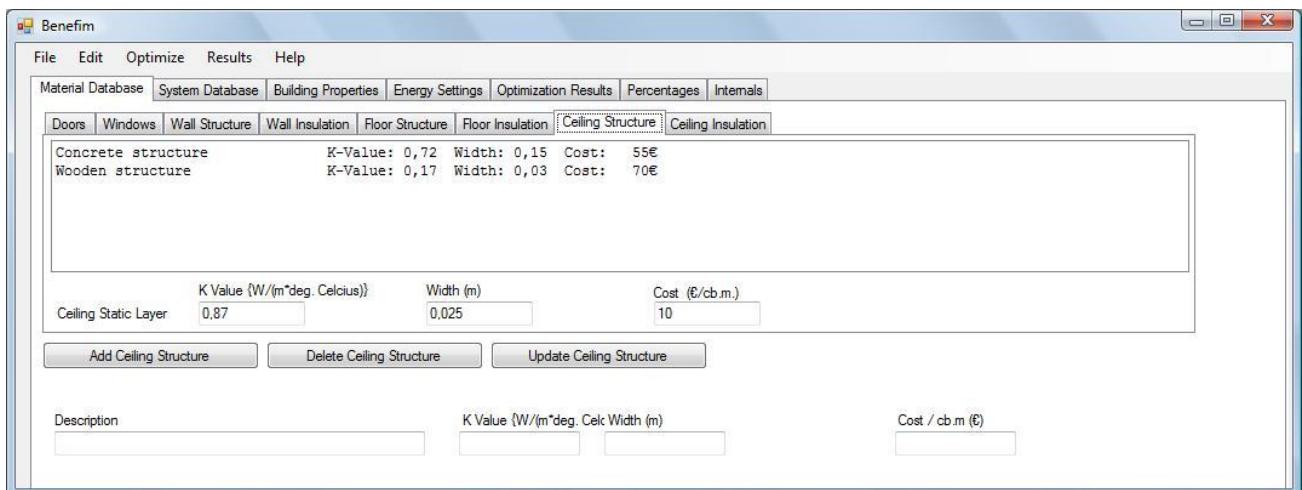
Σχήμα 4.20: Εναλλακτικοί τύποι μόνωσης τοιχοποίιας παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim[©]



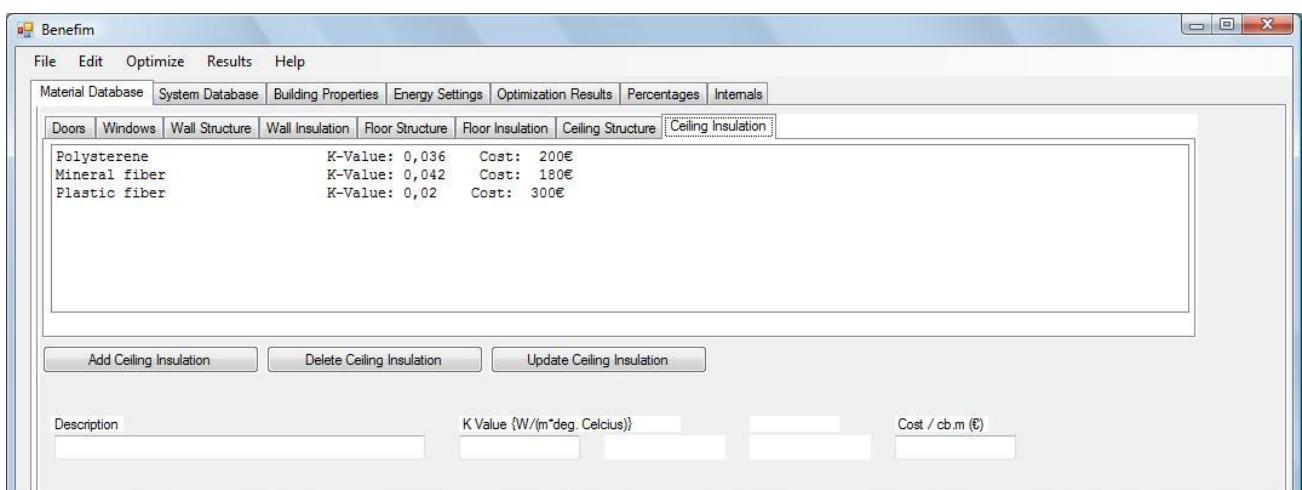
Σχήμα 4.21: Εναλλακτικές δομές δαπέδου παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim[©]



Σχήμα 4.22: Εναλλακτικοί τύποι μόνωσης δαπέδου παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim®



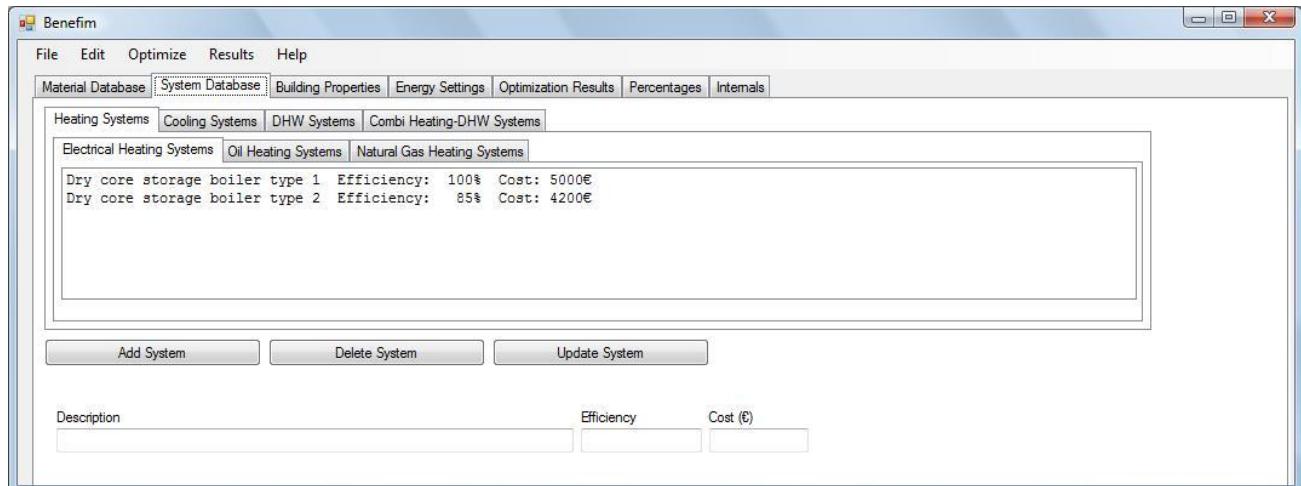
Σχήμα 4.23: Εναλλακτικές δομές οροφής παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim®



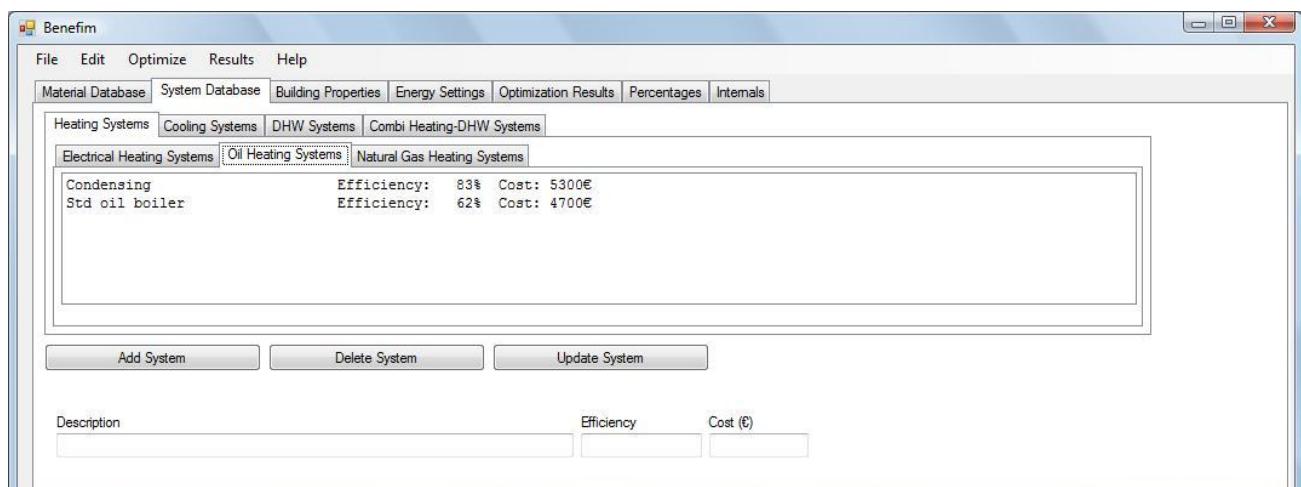
Σχήμα 4.24: Εναλλακτικοί τύποι μόνωσης οροφής παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim®

Για τις ανάγκες θέρμανσης, ψύξης και DHW, η επιλογή των συστημάτων γίνεται με τους ακόλουθους κανόνες:

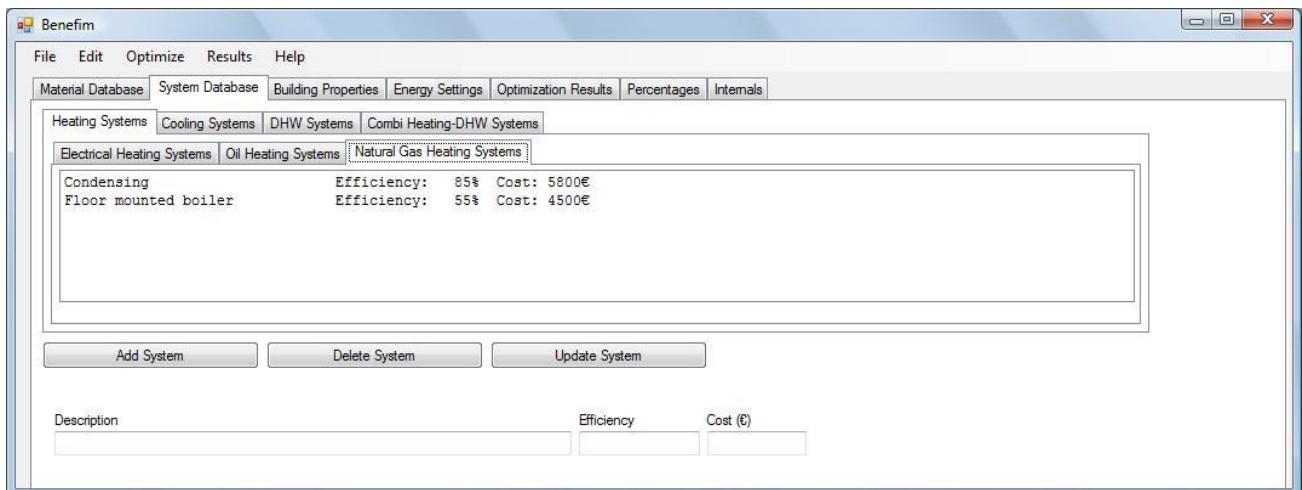
- Για τις ανάγκες θέρμανσης ένα σύστημα επιλέγεται μεταξύ αυτών που παρέχουν μόνο θέρμανση και θέρμανση με ταυτόχρονη παραγωγή DHW (Combi Heating-DHW Systems) όπως παρουσιάζονται στα σχήματα 4.25 έως 4.27 και 4.33 έως 4.35 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.25: Εναλλακτικοί τύποι ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim[©]

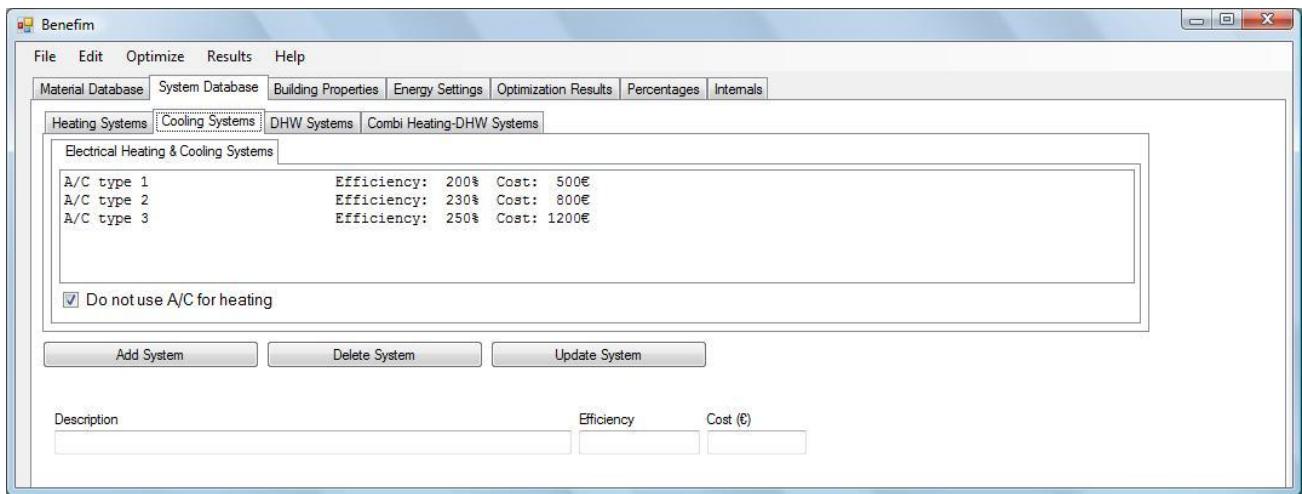


Σχήμα 4.26: Εναλλακτικοί τύποι συστημάτων θέρμανσης πετρελαίου παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim[©]



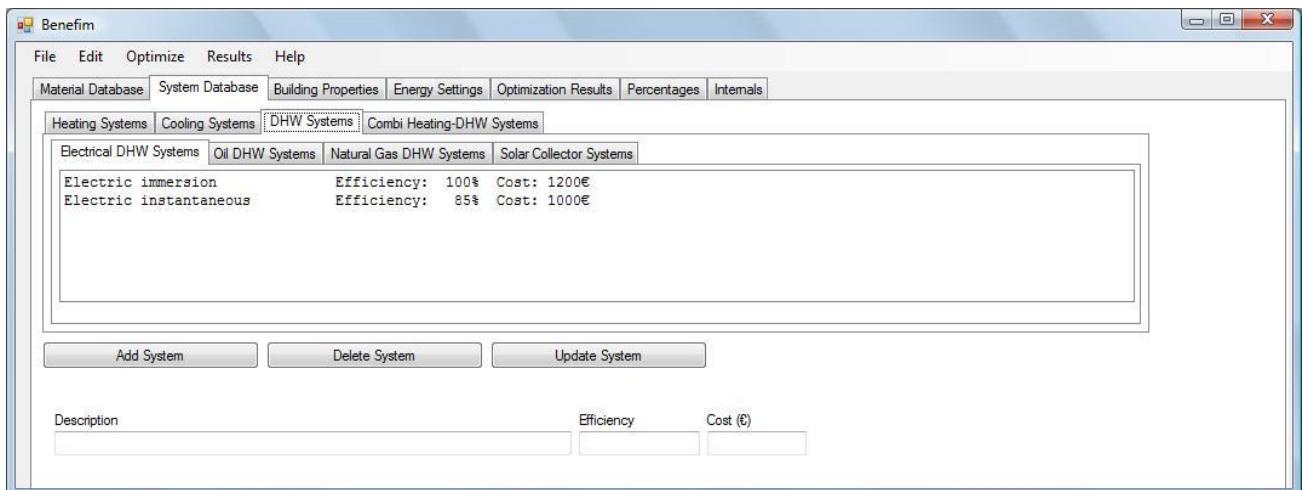
Σχήμα 4.27: Εναλλακτικοί τύποι συστημάτων θέρμανσης φυσικού αερίου παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim[®]

- Για τις ανάγκες ψύξης, ένα σύστημα επιλέγεται μεταξύ αυτών που παρέχουν ψύξη όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.28.

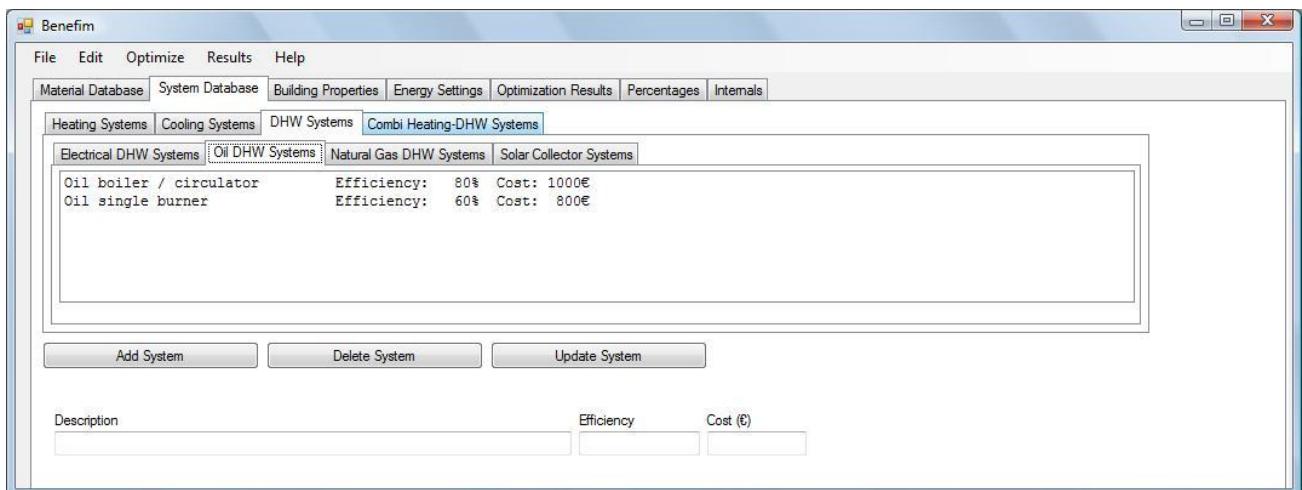


Σχήμα 4.28: Εναλλακτικοί τύποι ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης & ψύξης παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim[®]

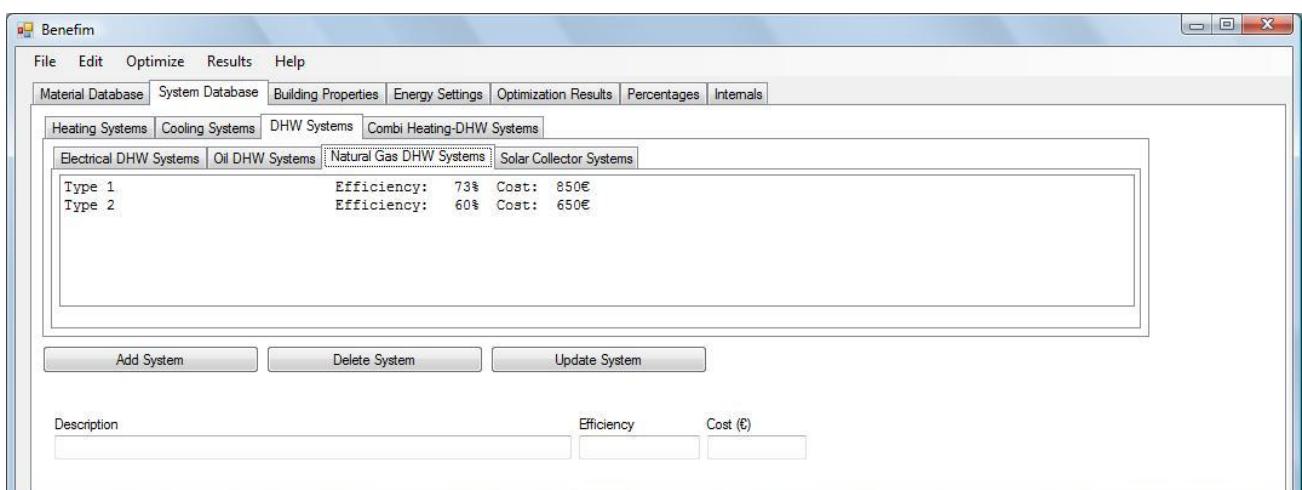
- Για τις ανάγκες DHW, ένα σύστημα επιλέγεται μεταξύ εκείνων που παρέχουν μόνο DHW όπως παρουσιάζονται στα σχήματα 4.29 έως 4.31, και μεταξύ αυτών που παρέχουν θέρμανση και DHW (Combi Heating-DHW Systems) 4.33 έως 4.35, ενώ προαιρετική είναι η επιλογή ενός συστήματος DHW ηλιακού συλλέκτη (Σχήμα 4.32).



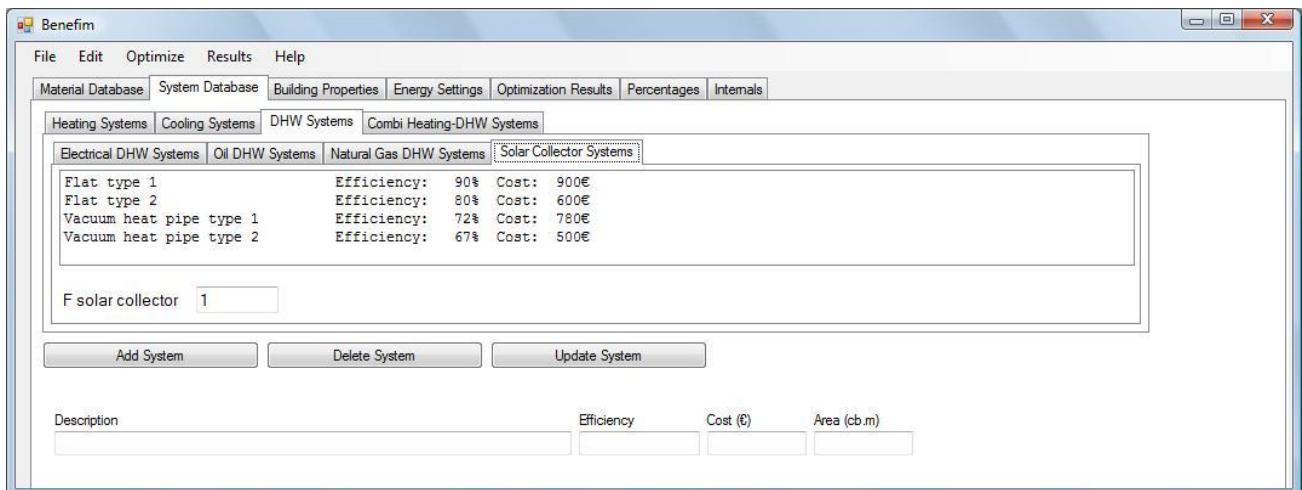
Σχήμα 4.29: Εναλλακτικοί τύποι ηλεκτρικών συστημάτων DHW παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim®



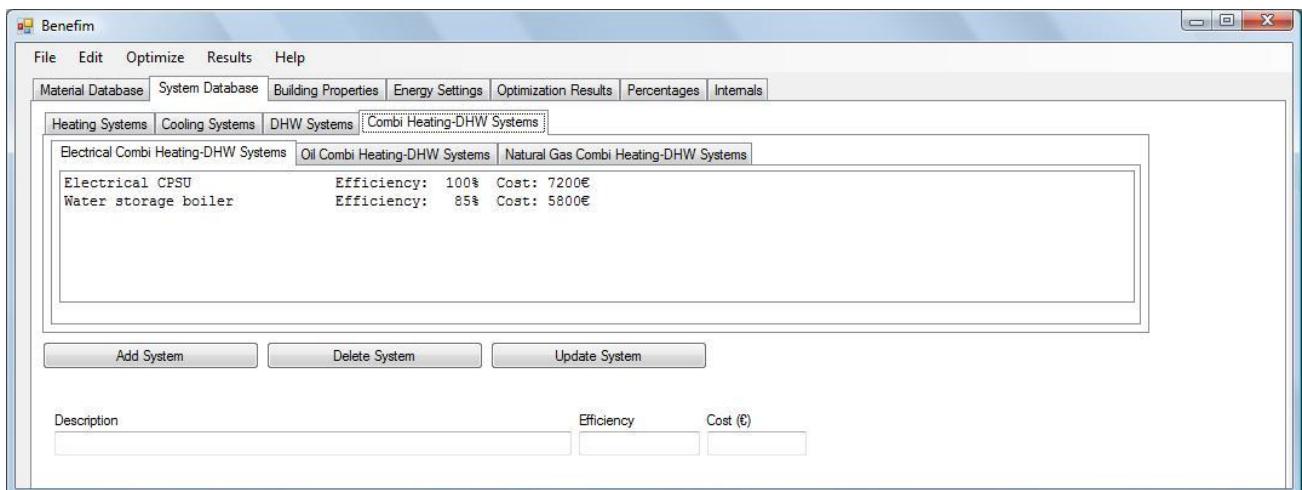
Σχήμα 4.30: Εναλλακτικοί τύποι συστημάτων DHW πετρελαίου παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim®



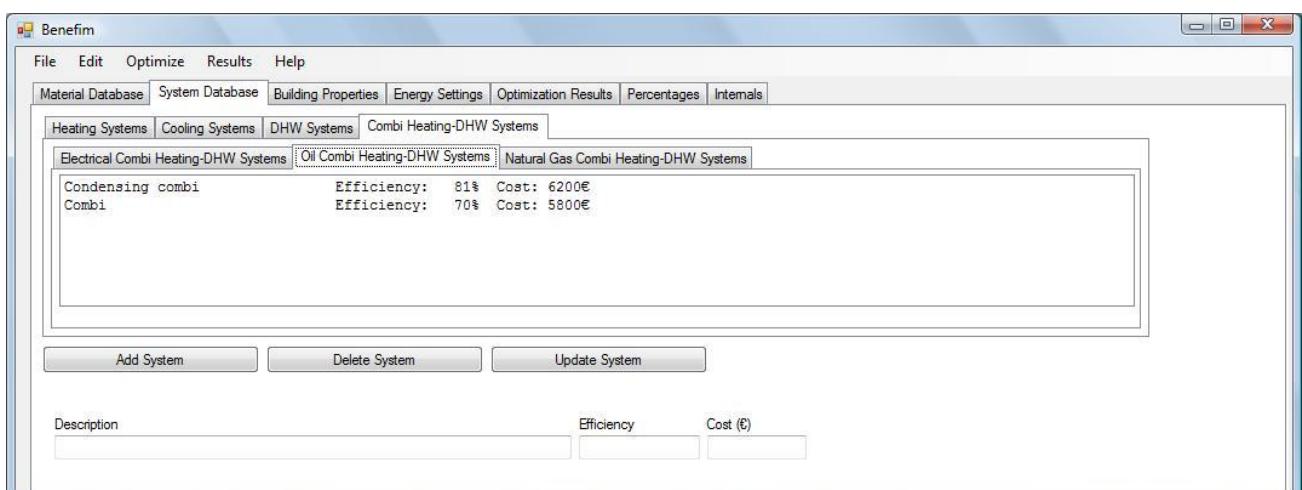
Σχήμα 4.31: Εναλλακτικοί τύποι συστημάτων DHW φυσικού αερίου παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim®



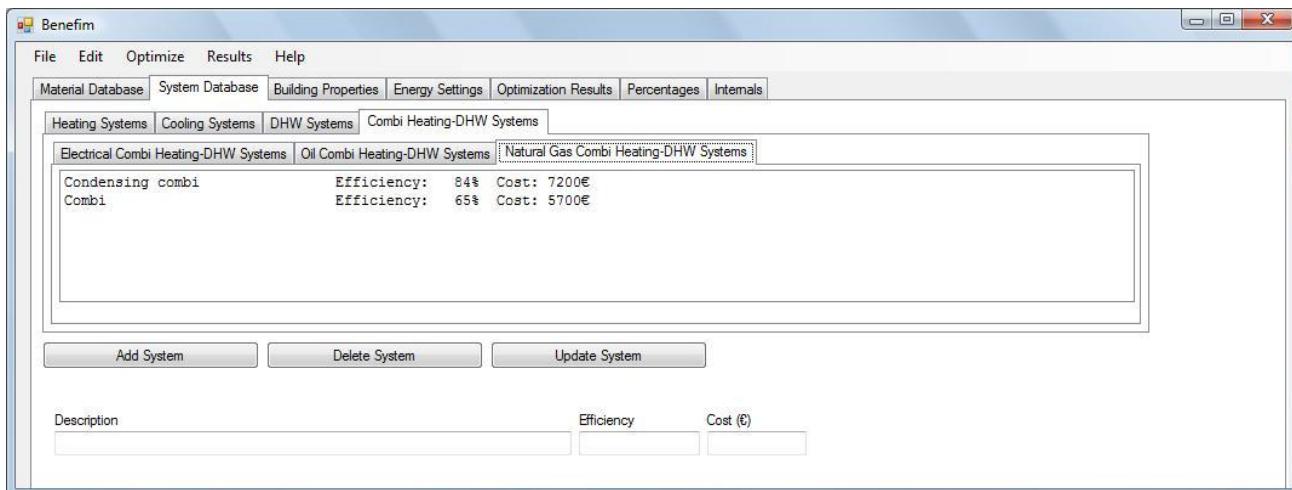
Σχήμα 4.32: Εναλλακτικοί τύποι συστημάτων DHW ηλιακού συλλέκτη παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim[©]



Σχήμα 4.33: Εναλλακτικοί τύποι ηλεκτρικών συστημάτων θέρμανσης - DHW παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim[©]



Σχήμα 4.34: Εναλλακτικοί τύποι συστημάτων θέρμανσης - DHW πετρελαίου παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim[©]



Σχήμα 4.35: Εναλλακτικοί τύποι συστημάτων θέρμανσης - DHW φυσικού αερίου παραδείγματος εφαρμογής στο Benefim®

4.2 Ανάπτυξη και επίλυση πρότυπου

Η εφαρμογή του πρότυπου απόφασης (70) απαιτεί τον καθορισμό των απαραίτητων μεταβλητών απόφασης που αντιπροσωπεύουν τις επιλογές διαθέσιμες στον αποφασίζοντα, για την κατασκευή του κτιρίου και την απόκτηση και εγκατάσταση των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, DHW.

Με βάση τα δεδομένα της ενότητας 3.1, δομείται το συγκεκριμένο πρόβλημα αποφάσεων. Το αναπτυχθέν πρόβλημα αποτελείται από 18 συνεχείς και 57 δυαδικές (0-1) μεταβλητές οι οποίες συμμετέχουν σε 68 γραμμικούς και μη περιορισμούς και 3 κριτήρια απόφασης.

Τα κριτήρια απόφασης είναι ανταγωνιστικά δεδομένου ότι η μείωση σε ένα κριτήριο συνοδεύεται από αύξηση στα υπόλοιπα κριτήρια. Στον πίνακα 4.1, όπου παρουσιάζεται ο πίνακας πληρωμών για την ανεξάρτητη βελτιστοποίηση κάθε κριτηρίου, γίνεται εμφανής η ανταγωνιστικότητα μεταξύ των κριτηρίων απόφασης (Kabelis et al., 2010).

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

Πίνακας 4.1: Πίνακας πληρωμών

Η επίλυση του πίνακα πληρωμών οδηγεί στην επιλογή των μεταβλητών απόφασης του πίνακα 4.2 ενώ για διάφορα σετ τιμών των συντελεστών βαρύτητας δίδονται οι τιμές των κριτηρίων απόφασης στον πίνακα 4.3.

Τύπος λύσης	Πόρτα – παράθυρο		
	Τύπος πόρτας	Παράθυρο	
		Κατηγορία	Τύπος
$[\min] g_1(\mathbf{x})$	2	2	2
$[\min] g_2(\mathbf{x})$	2	2	2
$[\min] g_3(\mathbf{x})$	1	1	1
Τύπος λύσης	Τοιχοποιία		
	Δομή	Πάχος μόνωσης (m)	Υλικό μόνωσης
$[\min] g_1(\mathbf{x})$	1	0.10	3
$[\min] g_2(\mathbf{x})$	1	0.10	3
$[\min] g_3(\mathbf{x})$	2	0.00	-
Τύπος λύσης	Στέγη		
	Δομή	Πάχος μόνωσης (m)	Υλικό μόνωσης
$[\min] g_1(\mathbf{x})$	1	0.10	3
$[\min] g_2(\mathbf{x})$	1	0.10	3
$[\min] g_3(\mathbf{x})$	2	0.00	-
Τύπος λύσης	Δάπεδο		
	Δομή	Πάχος μόνωσης (m)	Υλικό μόνωσης
$[\min] g_1(\mathbf{x})$	2	0.10	3
$[\min] g_2(\mathbf{x})$	2	0.10	3
$[\min] g_3(\mathbf{x})$	1	0.00	-
Τύπος λύσης	Σύστημα θέρμανσης		
	Τύπος συστήματος	Κατηγορία	Τύπος

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

Πίνακας 4.2 Μεταβλητές απόφασης κτιριακού κελύφους και συστημάτων

p_1	p_2	p_3	Q_T (MJ/year)	EM_{CO_2} (kg CO ₂ /year)	$INCOST$ (€)
0.0	1.0	0.0	15406.44	1042.961	27636.60
0.0	0.8	0.2	22423.74	1527.946	21519.86
0.0	0.6	0.4	18456.17	1869.295	17214.95
0.0	0.4	0.6	24570.63	2500.613	14535.08
0.0	0.2	0.8	38809.28	3592.948	12123.51
0.0	0.0	1.0	355605.30	36302.140	7524.35
0.2	0.8	0.0	15396.46	1044.361	27786.60
0.2	0.6	0.2	15843.72	1599.560	19814.35
0.2	0.4	0.4	21643.78	2198.416	15860.28
0.2	0.2	0.6	35297.87	3230.396	12784.70
0.2	0.0	0.8	45190.58	4251.818	11280.93
0.4	0.6	0.0	15396.46	1044.361	27786.60
0.4	0.4	0.2	17485.99	1788.487	18414.35
0.4	0.2	0.4	27366.26	2789.262	13823.62
0.4	0.0	0.6	31633.07	3229.810	13031.64
0.6	0.4	0.0	15078.49	1553.729	21986.60
0.6	0.2	0.2	15078.49	1553.729	21986.60
0.6	0.0	0.4	15078.49	1553.729	21986.60
0.8	0.2	0.0	15078.49	1553.729	21986.60
0.8	0.0	0.2	15078.49	1553.729	21986.60
1.0	0.0	0.0	15078.49	1553.729	21986.60

Πίνακας 2.3 Ενδεικτικές λύσεις προβλήματος

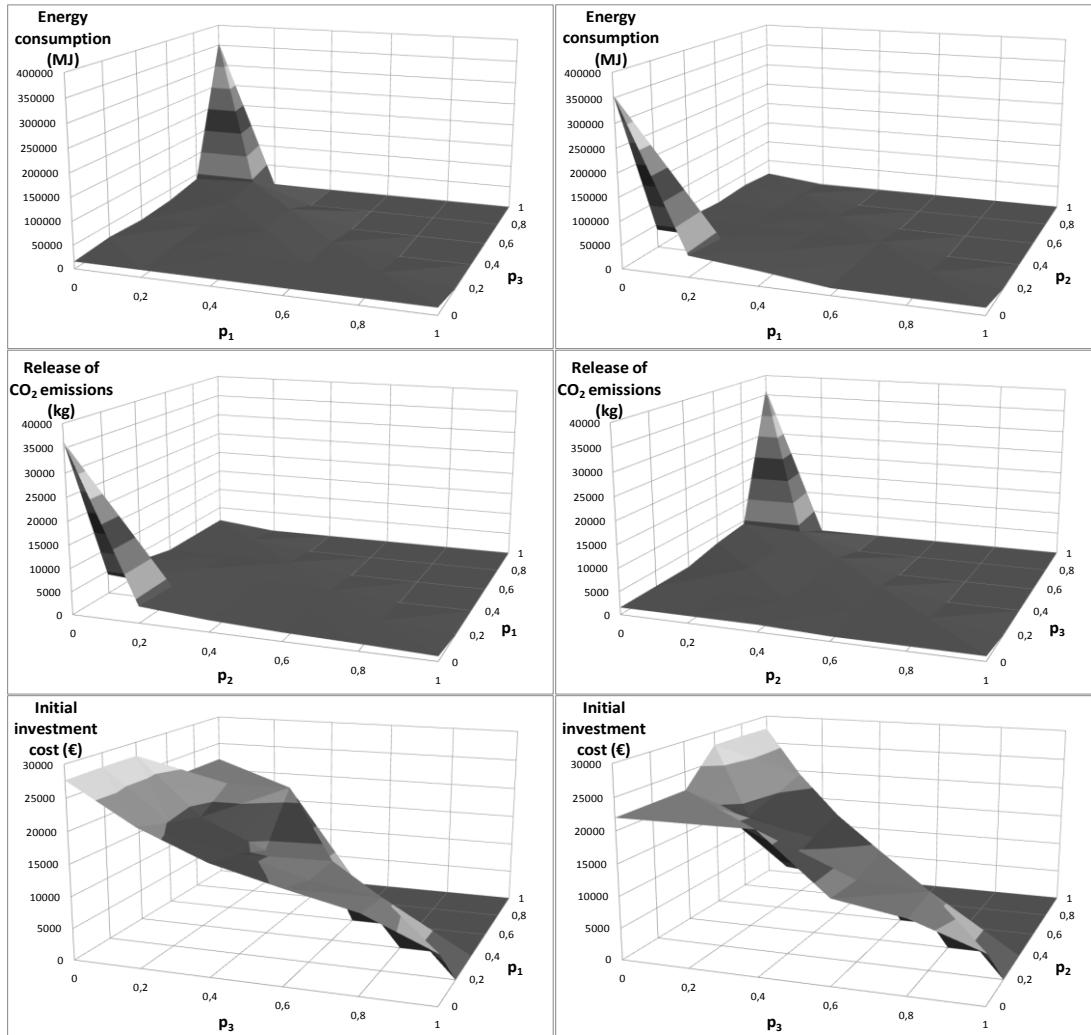
Όταν το κριτήριο της ενεργειακής κατανάλωσης βελτιστοποιείται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα, επιλέγονται οι πόρτες και τα παράθυρα με τις χαμηλότερες τιμές θερμοδιαπερατότητας και διαπερατότητας ηλιακής ακτινοβολίας (για τα παράθυρα). Ταυτόχρονα, η τοιχοποιία, η στέγη και το δάπεδο επιλέγονται ώστε να προκύψει ο χαμηλότερος συντελεστής θερμοδιαπερατότητας του κτιρίου. Συνεπώς επιλέγονται δομές και υλικά με τις μεγαλύτερες θερμικές αντιστάσεις αλλά και

για το ενδιάμεσο επίπεδο της μόνωσης το βέλτιστο θερμομονωτικό υλικό μέγιστου πάχους. Παράλληλα, η επιλογή συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και DHW περιλαμβάνει συστήματα με τη μέγιστη απόδοση ενώ για τις ανάγκες του DHW επιλέγεται συμπληρωματικά η χρήση ηλιοθερμικού συστήματος δεδομένου ότι συνεπάγεται συγκεκριμένο ενεργειακό όφελος. Οι προαναφερθείσες επιλογές του συστήματος, λεπτομέρειες των οποίων παρατίθενται στους πίνακες A1 και A2 του παραρτήματος, προκαλούν ιδιαίτερη αύξηση του κριτηρίου του κόστους επένδυσης αφού αποτελούν επιλογές υψηλότατου κόστους. Ταυτόχρονα, το κριτήριο των εκπομπών CO₂ λαμβάνει υψηλότερη τιμή από ότι κατά την ανεξάρτητη, από τα υπόλοιπα κριτήρια, βελτιστοποίησή του δεδομένου ότι οι εκπομπές CO₂ εξαρτώνται όχι μόνο από το μέγεθος της καταναλισκόμενης ενέργειας αλλά και από το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιείται. Συνέπεια αυτού είναι ότι π.χ. ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια αναμένεται να παράγει περισσότερες εκπομπές CO₂ από ότι ένα σύστημα ίδιας (ή και χαμηλότερης σε ορισμένες περιπτώσεις) απόδοσης το οποίο χρησιμοποιεί κάποια εναλλακτική πηγή ενέργειας όπως πετρέλαιο ή φυσικό αέριο.

Κατά τη βελτιστοποίηση του κριτηρίου των εκπομπών CO₂ λαμβάνονται αποφάσεις που έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και ταυτίζονται με τη βελτιστοποίηση του κριτηρίου κατανάλωσης ενέργειας όσον αφορά το κτιριακό κέλυφος. Αντίθετα, για τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης και DHW η επιλογή αφορά τα συστήματα με τον υψηλότατο συντελεστή απόδοσης από τις κατηγορίες συστημάτων των οποίων η λειτουργία συνεπάγεται μειωμένες εκπομπές CO₂. Πιο συγκεκριμένα, εάν υποτεθεί ότι η απόδοση είναι κοινή μεταξύ των συστημάτων θέρμανσης και DHW (για την ψύξη υπάρχουν μόνο ηλεκτρικά συστήματα) στις διάφορες κατηγορίες (συστημάτων ηλεκτρικών, πετρελαίου και φυσικού αερίου) τότε επιλέγεται σύστημα φυσικού αερίου διότι για δεδομένη κατανάλωση ενέργειας, η χρήση φυσικού αερίου συνεπάγεται τις ελάχιστες εκπομπές CO₂. Επομένως σε αυτή την περίπτωση η επιλογή των συστημάτων όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 4.2, οδηγεί σε σχετικά μικρή αύξηση το κριτήριο της κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με την ελάχιστη τιμή σε αυτό το κριτήριο αλλά σε αρκετά υψηλά επίπεδα την τιμή του κριτηρίου του κόστους επένδυσης.

Τέλος, στην περίπτωση βελτιστοποίησης του κριτηρίου κόστους επένδυσης, οι εναλλακτικές που οδηγούν στο χαμηλότερο δυνατό κόστος όσον αφορά το κτιριακό κέλυφος και τα συστήματα έχουν ως συνέπεια την ταυτόχρονη κατακόρυφη αύξηση των τιμών των κριτηρίων ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO₂.

Όπως είναι λογικό, η αύξηση του συντελεστή βαρύτητας ενός κριτηρίου από το 0 έως το 1 οδηγεί στη σταδιακή μείωση της τιμής του κριτηρίου μέχρι την επίτευξη της βέλτιστης τιμής του. Για ενδιάμεσες τιμές των συντελεστών βαρύτητας, εξάγονται διάφορες λύσεις δημιουργώντας ένα εύρος λύσεων που ενισχύουν το ένα κριτήριο ή το άλλο και από τις οποίες λύσεις ο αποφασίζων καλείται τελικά να επιλέξει εκείνη που αρμόζει περισσότερο στις ανάγκες του.



Σχήμα 4.36: α) Ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με τις εκπομπές CO₂ β) Ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με το κόστος επένδυσης γ) Εκπομπές CO₂ σε σχέση με ενεργειακή κατανάλωση δ) Εκπομπές CO₂ σε σχέση με το κόστος επένδυσης ε) Κόστος επένδυσης σε σχέση με την ενεργειακή κατανάλωση, στ) Κόστος επένδυσης σε σχέση με τις εκπομπές CO₂

Αυτή η δυνατότητα παρουσιάζεται στις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 4.36, όπου αποδίδεται με τη βοήθεια γραφικών παραστάσεων η διακύμανση των κριτηρίων σε σχέση με τις τιμές των συντελεστών βαρύτητας. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι όταν ο συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου της ενεργειακής κατανάλωσης λαμβάνει τιμή από 0.6 και άνω, οι προκύπτουσες λύσεις είναι οι ίδιες με αυτές στην περίπτωση που το κριτήριο αυτό βελτιστοποιείται ανεξάρτητα από τα

υπόλοιπα γεγονός το οποίο οφείλεται στον χαμηλό αριθμό εναλλακτικών μέτρων της μελέτης περίπτωσης.

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα καθιστούν εμφανές ότι όσο σημαντικότερο θεωρείται ένα κριτήριο τόσο περισσότερο οι τελικές επιλογές ενισχύουν την επίτευξη του στόχου σε αυτό το κριτήριο που δεν είναι άλλο από την επίτευξη μίας σχετικά βελτιωμένης ή και βέλτιστης τιμής. Η εφαρμογή του συναινετικού προγραμματισμού αποδείχθηκε αποτελεσματική για την επίλυση του προβλήματος απόφασης υπό μελέτη, και ανέδειξε τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της χρήσης τέτοιου είδους τεχνικών για το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων. Η συστηματική προσέγγιση που ακολουθήθηκε επιτρέπει τη διερεύνηση, χωρίς τον πρότερο προσδιορισμό εναλλακτικών μέτρων ή συνδυασμών αυτών, κάθε δυνατής λύσης. Η προσέγγιση ενσωματώνει κάθε δυνάμει λογικό, αντικειμενικό, τεχνικό ή άλλου είδους περιορισμό επιτρέποντας παράλληλα στον αποφασίζοντα τον προσδιορισμό των λύσεων που αρμόζουν στις ιδιαίτερες ανάγκες και προτιμήσεις του.

5. Συμπεράσματα

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων αποτελεί βασική προτεραιότητα της ενεργειακής πολιτικής της Ε.Ε. και του δυτικού κόσμου όπως προκύπτει από πρόσφατες εξελίξεις όπως καταγράφονται σε θεσμικό επίπεδο, κανονιστικά πλαίσια, πρότυπα κλπ.

Για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων υπάρχει μία ευρεία γκάμα εναλλακτικών μέτρων και ο αποφασίζων καλείται να σταθμίσει ενεργειακούς, περιβαλλοντικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες για να λάβει τη βέλτιστη απόφαση προσαρμοσμένη στις ιδιαίτερές του ανάγκες.

Το πρόβλημα του αποφασίζοντος χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη πολλαπλών και σε πολλές περιπτώσεις ανταγωνιστικών κριτηρίων, κάθε ένα εκ των οποίων περιγράφεται από ένα σύνολο παραμέτρων και περιορισμών. Με άλλα λόγια ο αποφασίζων αντιμετωπίζει ένα πολυστοχικό πρόβλημα που προσεγγίζεται ελλιπώς στην πράξη με τη χρήση προσομοίωσης ή τεχνικών πολυκριτήριας ανάλυσης με περιορισμένη αποτελεσματικότητα.

Σε αντίθεση με τις προαναφερόμενες τεχνικές, το πρότυπο απόφασης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας υπερβαίνει τους περιορισμούς που προκύπτουν από την ανάγκη προεπιλογής εναλλακτικών μέτρων και σεναρίων επιτρέποντας τη διερεύνηση του συνόλου των εναλλακτικών λύσεων χωρίς τη χρήση κάποιας συμπληρωματικής μεθόδου. Η λειτουργία του πρότυπου για μία απλή μελέτη περίπτωσης παρουσιάστηκε και τα αποτελέσματα ανέδειξαν τη χρησιμότητα του ΣΥΑ για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η δυνατότητα ανάπτυξης ενός πολυστοχικού ΣΥΑ με χρήση συναινετικού προγραμματισμού λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια της ετήσιας πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης, του κόστους επένδυσης και των ετήσιων εκπομπών CO₂. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα λειτουργεί αποτελεσματικά και με αξιοπιστία ως προς την ανάδειξη βέλτιστης λύσης για διαφοροποιούμενες απαιτήσεις του αποφασίζοντος. Σημαντικό πλεονέκτημα της αναπτυχθείσας μεθόδου είναι ότι ο ειδικός επί των ενεργειακών θεμάτων των κτιρίων (αλλά και ο αποφασίζων) έχει σαφή εικόνα των δυνατοτήτων όσον αφορά την επιλογή υλικών και συστημάτων σε ένα κτίριο σε σχέση με τις επιπτώσεις στα κριτήρια απόφασης ενώ χρήσιμη για την ενδελεχή μελέτη του προβλήματος είναι και η ποσοστιαία ανάλυση των εναλλακτικών στα κριτήρια απόφασης.

Τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα του ΣΥΑ για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων συνοδεύονται από συγκεκριμένες προτάσεις βελτίωσης και επέκτασής του. Η διευρυμένη μελέτη

του συστήματος σε περιπτώσεις μεγάλου αριθμού εναλλακτικών για κάθε μεταβλητή απόφασης καθώς και η επαλήθευση των αποτελεσμάτων του συστήματος με προγράμματα ενεργειακής προσομοίωσης, η οποία έγινε μόνο για τη μελέτη περίπτωσης στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, πρόκειται να αναδείξει επιπλέον χρήσιμα συμπεράσματα για τα ισχυρά και ασθενή σημεία της αναπτυχθείσας μεθόδου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η ενσωμάτωση πρόσθετων κριτηρίων απόφασης όπως της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος και του λειτουργικού κόστους για την αξιολόγηση των αποφάσεων από την άποψη της άνεσης των κατοίκων του κτιρίου και της κόστους του κύκλου ζωής του κτιρίου αντίστοιχα. Περαιτέρω, άλλες προτάσεις για επέκταση του συστήματος αφορούν τη δυνατότητα χρήσης του σε υφιστάμενα κτίρια καθώς και την ενσωμάτωση της ενεργειακής κατάταξης του κτιρίου σύμφωνα με τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί από τη σχετική οδηγία της Ε.Ε.

Βιβλιογραφία

- Alanne K., (2004) Selection of renovation actions using multi-criteria “knapsack” model, Automation in Construction, vol. 13, no 3, pp 377-391
- Alanne K., Salo A., Saari A., Gustafsson, S.I. (2007) Multi-criteria evaluation of residential energy supply systems, Energy and Buildings, vol. 39, pp 1218-1226
- Atthajariyakul S., 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, pp 720-733
- Becker R., Goldberger I., Paciuk M. (2007) ‘Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation’, Building and Environment, vol. 42, no 9, pp 3261-3276
- Berben J.J.L., Vis I., Witchen K., Grau K. (2004) EPA-ED Formulas: Calculation Scheme. Report number 040538jo, Energy Performance Assessment Method for Existing Dwellings Project
- Blondeau P., Sperandio M., Allard F. (2002) Multicriteria analysis of ventilation in summer period, Building and Environment, vol. 37, no 2, pp 165-176
- Bluyssen P.M., (2000) EPIQR and IEQ: indoor environment quality in European apartment buildings, Energy and Buildings, vol. 31, no 2, pp 103-110
- Bouchlaghem N., (2000) Optimising the design of building envelopes for thermal performance, Automation in Construction, vol. 10, no 1, pp 101-112
- Bazillian M.D., Prasad D., (2002) Modelling of a photovoltaic heat recovery system and its role in a design decision support tool for building professionals, Renewable Energy, vol. 27, pp 57-68.
- Chen Z., Clements-Croome, D., Hong J., Li H., Xu Q. (2006) A multicriteria lifespan energy efficiency approach to intelligent building assessment, Energy and Buildings, vol. 38, no 5, pp 393-409
- Clark J.A., (2001) Energy Simulation in Building Design, second edition, Butterworth-Heinemann, London
- Collette V., Siarry P. (2004). Multiobjective Optimization. Springer, Berlin
- D’Cruz N.A., Radford A.D. (1987) A multicriteria model for building performance and design, Building and Environment, vol. 22, no 3, pp 167-179

- Diakaki C., Grigoroudis E., Kolokotsa D. (2008), Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. Energy and Buildings, vol. 40, pp 1747-1754
- Diakaki C., Grigoroudis E., Kabelis N., Kolokotsa D., Kalaitzakis K., Stavrakakis G. (2010) A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings, Energy, vol. 35, pp 5483-5496
- Diakoulaki D., Henggeler Antunes C., Martins A.G. (2005). MCDA and Energy Planning. In J. Doukas H., Patlitzianas K.D., Iatropoulos K., Psarras J. (2006) Intelligent building energy management system using rule sets. Building and Environment
- 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, pp 3562-3569
- Doukas H., Nychtis C., Psarras J. (2008) Assessing energy-saving measures in buildings through an intelligent decision support model, Building and Environment
- Ehrgott M. (2005), Multicriteria Optimization, second edition, Springer, Berlin
- Ehrgott M., Wiecek M. (2005) Multiobjective programming. In: Figueira J et al.(eds) Multiple criteria decision analysis, International Series Operational Research Management Science 78 Springer, New York, pp 667-722
- Florides G.A., Tassou S.A., Kalogirou S.A., Wrobel L.C. (2002) Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness, Applied Energy, vol. 73, no 3-4, pp 299-328
- Flourentzou F., Roulet C.A. (2002) Elaboration of retrofit scenarios, Energy and Buildings, vol 34, no 2, pp 185-192
- Fonseca C.M., Flemming PJ. (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, pp 26-37
- Gero J.S., D'Cruz N., Radford A.D., Energy in context: A multicriteria model for building design
Original Research Article
Building and Environment, vol. 18, no 3, 1983, pp 99-107
- Gholap A.K., Khan J.A. (2007) Design and multi-objective optimization of heat exchangers for refrigerators, Applied Energy, vol 84, no 12, pp 1226-1239

- Homoud A., M.S. (2001) Computer-aided building energy analysis techniques, *Building and Environment*, vol. 36, no 4, pp 421-433
- Hong T., Chou S.K., Bong T.Y. (2000) Building simulation: an overview of developments and information sources, *Building and Environment*, vol. 35, no 4, pp 347-361
- ISO (1984) Moderate Thermal Environments - Determination of PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort, ISO Standard, International Organization for Standardization, Geneva, pp 7730-84
- Jaggs M., 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, pp 97-101
- Jedrzejuk H., 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, pp 1249-1253
- Kabelis N., Grigoroudis E., Diakaki C., Kolokotsa D., Kalaitzakis K., Stavrakakis G. (2010) A multi-objective decision support system for the improvement of energy efficiency in buildings, proceedings of Clima 2010 - 10th REHVA World Congress "Sustainable Energy Use in Buildings", Antalya, Turkey, 9-12 May, 2010, 10th Rehva World Congress
- Kaklauskas A., Zavadskas E.K., Raslanas S. (2005) Multivariant design and multiple criteria analysis of building refurbishments, *Energy and Buildings*, vol. 37, no 4, pp 361-372
- Kalyanmoy D. (2001) Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, Wiley and Sons, New York
- Keeney R., Raiffa H. (1993) Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Tradeoffs, Cambridge University Press, Cambridge GB
- Kolokotsa D., G. S. Stavrakakis, K. Kalaitzakis, D. Agoris (2002), Genetic algorithms optimized fuzzy controller for the indoor environmental management in buildings implemented using PLC and local operating networks, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol.15, pp 417-428
- Kolokotsa D. (2003) 'Comparison of the performance of fuzzy controllers for the management of the indoor environment', *Building and Environment*, vol. 38, no 12, pp 1439-1450

- Kolokotsa D., Niachou K., Geros V., Kalaitzakis K., Stavrakakis G., Santamouris M., (2005) ‘Implementation of an integrated indoor environment and energy management system’, Energy and Buildings, vol. 37, no 1, pp 93-99
- Kolokotsa D., Saridakis G., Pouliezos A., Stavrakakis G.S., (2006) Design and installation of an advanced EIB™ fuzzy indoor comfort controller using Matlab™, Energy and Buildings vol. 38, no 9, pp. 1084-1092,
- Kolokotsa D. (2007) Artificial intelligence in buildings: A review on the application of fuzzy logic, Advances in Building Energy Research, vol. 1, pp 29-54
- Kolokotsa D., Diakaki C., Grigoroudis E., Stavrakakis G., Kalaitzakis, K., (2009) Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings. Advances in Building Energy Research, vol 3, pp 121-146.
- Krarti M., (2000) Energy Audit of Building Systems, CRC Press, Boca Raton
- Kreider J.F., Curtiss P., Rabl A. (2002) Heating and Cooling for Buildings, Design for Efficiency, McGraw-Hill, New York
- Ma Z., Wang S., Xu X. Xiao F. (2008) A supervisory control strategy for building cooling water systems for practical and real time applications, Energy Conversion and Management, vol. 49, no 8, pp 2324-2336
- Martinaitis V., Rogoža A., Bikmaniene I. (2004) Criterion to evaluate the “twofold benefit” of the renovation of buildings and their elements, Energy and Buildings, vol 36, no 1, pp 3-8
- Martinaitis V., Kazakevicius E., Vitkauskas A., (2007) A two-factor method for appraising building renovation and energy efficiency improvement projects, Energy Policy, vol 35, no 1, pp 192-201
- Mathews E.H., Arndt D.C., Piani C.B., van Heerden E., (2000) Developing cost efficient control strategies to ensure optimal energy use and sufficient indoor comfort, Applied Energy, vol 66, no 2, pp 135-159
- Mavrotas G., Diakoulaki D., Florios K., Georgiou P. (2008) A mathematical programming framework for energy buildings under uncertainty in load demand: The case of a hospital in Athens, Energy Policy, vol 36, no 7, pp 2415-2429
- METEOTEST, Remund J., Kunz S., Schilter C., Müller S. (2009) METERONORM v6.0 Handbook part I: Software and Handbook part II: Theory, METEOTEST, Bern.

- Michalewicz Z. (1994) Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, second edition, Springer, New York
- Mitchell R.A., Kaplan J.L. (1969) Non linear constrained optimization by a non-random complex method, Journal of Research of the National Bureau of Standards, C7, pp 24-258
- Munda G. (2005), Multiple Criteria Decision Analysis: State of the art surveys, International Series in Operations Research & Management Science, vol. 78, no VII, pp 953-986
- Neufert E. and Neufert P. (2002). Architects' Data. Blackwell Science Ltd, Oxford
- Nelder J.A., Mead R. (1965) A simplex method for function minimization, Computer Journal, vol. 7, no 15, pp 308-313
- Pardalos P.M., Siskos Y., Zopounidis C. (1995) Advances in multicriteria analysis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 247
- Pasanini A., Ojalvo J. (2008) A multi-criteria decision tool to improve the energy efficiency of residential buildings, Foundations of Computing and Decision Sciences, vol. 33, no 1, pp 71-82
- Radford A.D., Gero J.S. (1980) Tradeoff diagrams for the integrated design of the physical environment in buildings, Building and Environment, vol. 15, no 2, pp 3-15
- Rey E. (2004) Office building retrofitting strategies: multicriteria approach of an architectural and technical issue, Energy and Buildings, vol. 36, no 4, pp 367-372
- Rosenfeld Y., Shohet I.M. (1999) Decision support model for semi-automated selection of renovation alternatives, Automation in Construction, vol. 8, no 4, pp 503-510
- Roulet C.A., Flourentzou F., Labben H.H., Santamouris M., Koronaki I., Dascalaki E., Richalet V. (2002) ORME: A multicriteria rating methodology for buildings, Building and Environment, vol. 37, no 6, pp 579-58
- Roy B., (1991) The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods, Theory and Decision, vol. 31, pp 49-73
- Roy B., (1996) Multicriteria for Decision Aiding. Kluwer Academic Publishers, London
- Rutman E., Inard C., Bailly A., Allard F. (2005) A global approach of indoor environment in an air-conditioned office room, Building and Environment, vol. 40, no 1, pp 29-37
- Rylatt M., Gadsden S., Lomas K., (2001) GIS-based decision support for solar energy planning in urban environments, Computers Environment and Urban Systems vol 25, no 6, pp 579-603

- Tavares P.F.A.F., Martins, A.M.O.G. (2007) Energy efficient building design using sensitivity analysis-A case study, *Energy and Buildings*, vol. 39, no 1, pp 23-31
- US Department of Energy and Environmental Protection Agency (2000) Carbon Dioxide Emissions from the Generation of Electric Power in the United States, Washington DC
- Verbeeck G., Hens H. (2007) Life cycle optimization of extremely low energy dwellings, *Journal of Building Physics*, vol. 31, no 2, pp 143-177
- Wang W., Zmeureanu R., Rivard H. (2005) Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization, *Building and Environment*, vol. 40, no 11, pp 1512-1525
- Wilde P., van der Voorden M. (2004) Providing computational support for the selection of energy saving building components, *Energy and Buildings*, vol. 36, no 8, pp 749-758
- Wong J.K.W., 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, pp 108-125
- Wright, J.A., Loosemore H.A., Farmani R. (2002) Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm, *Energy and Buildings*, vol. 34, no 9, pp 959-972
- Wulffinghoff D.R., (1999) Energy Efficiency Manual, Energy Institute Press, Wheaton
- Zhu Y. (2006) Applying computer-based simulation energy auditing: A case study, *Energy and Buildings*, vol. 38, no 5, pp 421-428
- Zurigat Y.H., Al-Hinai H., Jubran B.A., Al-Masoudi Y.S. (2003) Energy efficient building strategies for school buildings in Oman, *International Journal of Energy Research*, vol. 27, no 3, pp 241-253

Παράρτημα Α: Βάση δεδομένων υλικών, δομικών στοιχείων & συστημάτων του Benefim[©]

Door Types		U-value (W/m2K)	width d(m)	Cost/m2 (€)
Xd,1	Hollow-core flush door	2,7	0,35	800
Xd,2	Solid-core flush door	2,2	0,35	700
Xd,3	Solid-core flush door	1,9	0,44	950
Xd,4	Solid-core flush door with single glazing (17% glass)	2,6	0,44	800
Xd,5	Solid-core flush door with single glazing (17% glass)	2,1	0,44	1000
Window Types		U-value (W/m2K)	Transmittance	Cost/m2 (€)
Xwin,1	typical glazing	5	0,8	40
Xwin,2,1	4-16-4, low-e coated, air filled	1,7	0,72	60
Xwin,2,2	4-16-4 uncoated glass, air filled	2,7	0,76	50
Xwin,2,3	4-20-4, uncoated, air filled	2,6	0,72	55
Xwin,2,4	4-12-4 uncoated glass, air filled	2,8	0,76	50
Xwin,2,5	4-12-4 low-e, air filled	1,9	0,72	55
Xwin,2,6	4-12-4, coated, argon filled	1,6	0,76	65
Xwin,2,7	4-16-4 coated, argon filled	1,5	0,76	70
Xwin,2,8	Window - typical building	3,3	0,68	45
Insulation Types		k-value (W/mK)	width d(m)	cost/m3(€)
Xins_type,1	polystyrene type 1	0,036		
Xins_type,2	polystyrene type 2	0,029		
Xins_type,3	fiberglass	0,036		

Xins_type,4	mineral fiber	0,042		
Xins_type,5	plastic fibers	0,02		
Xins_type,6	polyurethane	0,023		
Brick Types		k-value (W/mK)	width d(m)	cost/m2(€)
Xbrick,1,1	6x9x19	0,72	0,06	6,2
Xbrick,1,2	6x12x19	0,72	0,06	6
Xbrick,1,3	7x15x24	0,72	0,07	6,5
Xbrick,1,4	7x15x32	0,72	0,07	6,4
Xbrick,1,5	8x18x19	0,72	0,08	7
Xbrick,1,6	9x15x24	0,72	0,09	7
Xbrick,1,7	9x15x32	0,72	0,09	7,3
Xbrick,1,8	9x19x19	0,72	0,09	7,4
Xbrick,1,9	9x19x23	0,72	0,09	7,5
Xbrick,2,1	15x18x32	0,72	0,15	23
Xbrick,2,2	15x25x32	0,72	0,15	21
Xbrick,2,3	15x28x32	0,72	0,15	20
Xbrick,2,4	15x30x24	0,72	0,15	20
Xbrick,2,5	18x18x32	0,72	0,18	25
Xbrick,2,6	19x8x19	0,72	0,19	26
Xbrick,2,7	19x9x19	0,72	0,19	26
Stone Types		k-value (W/mK)	width d(m)	cost/m2(€)
Xsto,1	stone 400mm	2	0,4	40
Xsto,2	stone 500mm	2	0,5	40
Ceiling Structure Layer		k-value (W/mK)	width d(m)	cost/m2(€)
Xcl_str,1	concrete structure	0,72	0,15	55
Xcl_str,2	wooden structure	0,17	0,3	10
Ceiling Outer Layer		k-value (W/mK)	width d(m)	cost/m2(€)
Xc_out,1	tiles	1	0,1	55
Xc_out,2	concrete	0,72	0,15	55
Xc_out,3	glass			

Floor Structure Layer		k-value (W/mK)	width d(m)	cost/m2(€)
Xfl_str,1	concrete	0,72	0,15	55
Floor Inner Layer		k-value (W/mK)	width d(m)	cost/m2(€)
Xfl_in,1	tiles	1,05	0,02	45
Xfl_in,2	timber	0,17	0,03	85
Xfl_in,3	granite	3,49	0,03	100

Πίνακας Α1: Βάση δεδομένων υλικών και δομικών στοιχείων κτιριακού κελύφους του Benefim®

			Efficiency	Cost (euros)
Electric Heating Systems	Xeh,1	Direct acting electric boiler	1	4800
	Xeh,2	Dry core storage boiler type 1	1	5000
	Xeh,3	Dry core storage boiler type 2	0.85	5000
			Efficiency (COP)	Cost (euros)
Electric Heating/Cooling Systems	Xehc,1	type a	3	3500
	Xehc,2	type b	2.9	3100
	Xehc,3	type c	2.8	2800
	Xehc,4	type d	2.7	2600
	Xehc,5	type e	2.6	2200
	Xehc,6	type f	2.5	2000
	Xehc,7	type g	2.4	1800
	Xehc,8	type h	2.3	1600
	Xehc,9	type i	2.2	1200
	Xehc,10	type j	2	1000
			Efficiency	Cost (euros)
Oil Heating Systems	Xneh,o,1	Standard oil boiler type 1	0.65	4800
	Xneh,o,2	Standard oil boiler type 2	0.7	4850
	Xneh,o,3	Standard oil boiler type 3	0.79	4900
	Xneh,o,4	Condensing	0.83	4950
	Xneh,o,5	Oil room heater + boiler type 1	0.65	5000

	Xneh,o,6	Oil room heater + boiler type 2	0.7	5100
			Efficiency	Cost (euros)
Natural Gas Heating Systems	Xneh,ng,1	Natural gas boiler	0.65	5000
	Xneh,ng,2	Low thermal capacity	0.72	5550
	Xneh,ng,3	High or unknown thermal capacity	0.68	5500
	Xneh,ng,4	Condensing	0.85	5800
	Xneh,ng,5	Wall mounted	0.65	4600
	Xneh,ng,6	Floor mounted type 1	0.55	4500
	Xneh,ng,7	Floor mounted type 2	0.65	4550
			Efficiency	Cost (euros)
Electric Domestic Hot Water Systems	Xew,1	Electric immersion	1	1200
	Xew,2	Direct acting electric heating	0.95	1100
	Xew,3	Electric instantaneous at point of use	0.85	1000
			Efficiency	Cost (euros)
Oil Domestic Hot Water Systems	Xnew,o,1	Oil, single burner	0.6	800
	Xnew,o,2	Oil, twin burner type 1	0.7	900
	Xnew,o,3	Oil, twin burner type 2	0.75	950
	Xnew,o,4	Oil boiler/circulator for water heating only	0.7	950
			Efficiency	Cost (euros)
Natural Gas Domestic Hot Water Systems	Xnew,ng,1	Back boiler (hot water only), gas	0.65	700
	Xnew,ng,2	From a circulator built into a gas warm air system type 1	0.65	650
	Xnew,ng,3	From a circulator built into a gas warm air system type 2	0.73	750
	Xnew,ng,4	Single-point gas water heater	0.7	730
	Xnew,ng,5	Multi-point gas water heater	0.65	800
			Efficiency	Cost (euros)
Electric Heating/DHW Systems	Xew,1	Electric CPSU	1	7200
	Xew,2	Water storage boiler type 1	1	7000
	Xew,3	Water storage boiler type 2	0.85	5800
			Efficiency	Cost (euros)

Oil Heating/DHW Systems	Xnew,o,1	Combi, type 1	0.7	5800
	Xnew,o,2	Combi type 2	0.76	6000
	Xnew,o,3	Condensing combi	0.81	5900
				Efficiency Cost (euros)
Natural Gas Heating/DHW Systems	Xnew,ng,1	Non-condensing (including combis) with automatic ignition	0.73	6000
	Xnew,ng,2	Condensing (including combis) with automatic ignition	0.83	6300
	Xnew,ng,3	Non-condensing (including combis) with permanent pilot light	0.69	5850
	Xnew,ng,4	Condensing (including combis) with permanent pilot light	0.79	6000
	Xnew,ng,5	Combi	0.7	6000
	Xnew,ng,6	Condensing combi	0.84	7200
	Xnew,ng,7	Combi	0.65	5800
				Efficiency Cost (euros)
Solar Collector Systems	Xslc,1	Flat collector 1	0.9	900
	Xslc,2	Flat collector 2	0.8	600
	Xslc,3	Flat CPC collector 1	0.85	650
	Xslc,4	Flat CPC collector 2	0.75	550
	Xslc,5	Vacuum direct flow collector 1	0.87	650
	Xslc,6	Vacuum direct flow collector 2	0.92	900
	Xslc,7	Vacuum heat pipe collector 1	0.82	850
	Xslc,8	Vacuum heat pipe collector 2	0.85	850
	Xslc,9	Vacuum direct flow CPC collector 1	0.77	800
	Xslc,10	Vacuum direct flow CPC collector 2	0.8	820
	Xslc,11	Vacuum heat pipe CPC collector 1	0.72	780
	Xslc,12	Vacuum heat pipe CPC collector 2	0.67	500

Πίνακας Α2: Βάση δεδομένων ενεργειακών συστημάτων του Benefim®

Παράρτημα Β: Βασικές εξισώσεις υπολογισμού μοντέλου

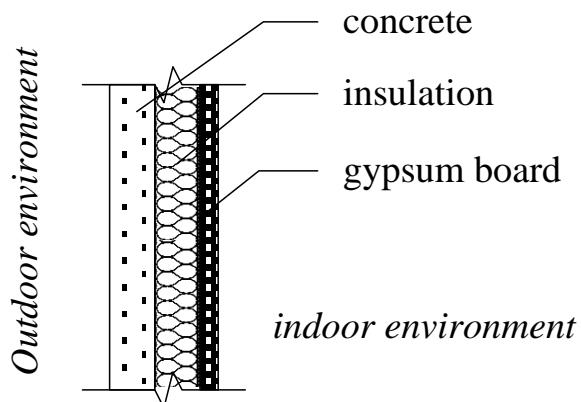
Το πρότυπο αφορά την υποστήριξη αποφάσεων κατά τον σχεδιασμό κτιρίων με χρήση κατοικίας. Η επέκταση του προτύπου σε υφιστάμενα κτίρια καθώς και κτίρια διαφορετικής χρήσης όπως α) κτίρια γραφείων και β) κτίρια βιομηχανικής χρήσης εντάσσεται σε μελλοντική έρευνα.

Κτιριακό κέλυφος

Εξετάζονται οι παρακάτω κατηγορίες :

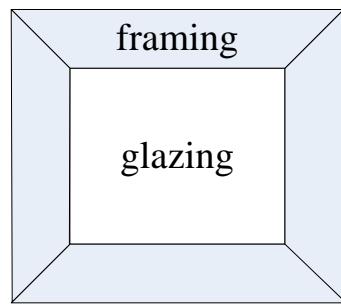
1. Ομοιογενή δομικά στοιχεία. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται:
 - Πόρτες
 - Παράθυρα
2. Σύνθετα δομικά στοιχεία. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται:
 - Τοιχοποιία
 - Δώματα / Στέγη
 - Δάπεδο

Για κάθε ομοιογενές ή σύνθετο δομικό στοιχείο ένα η περισσότερα εναλλακτικά υλικά λαμβάνονται υπόψη.



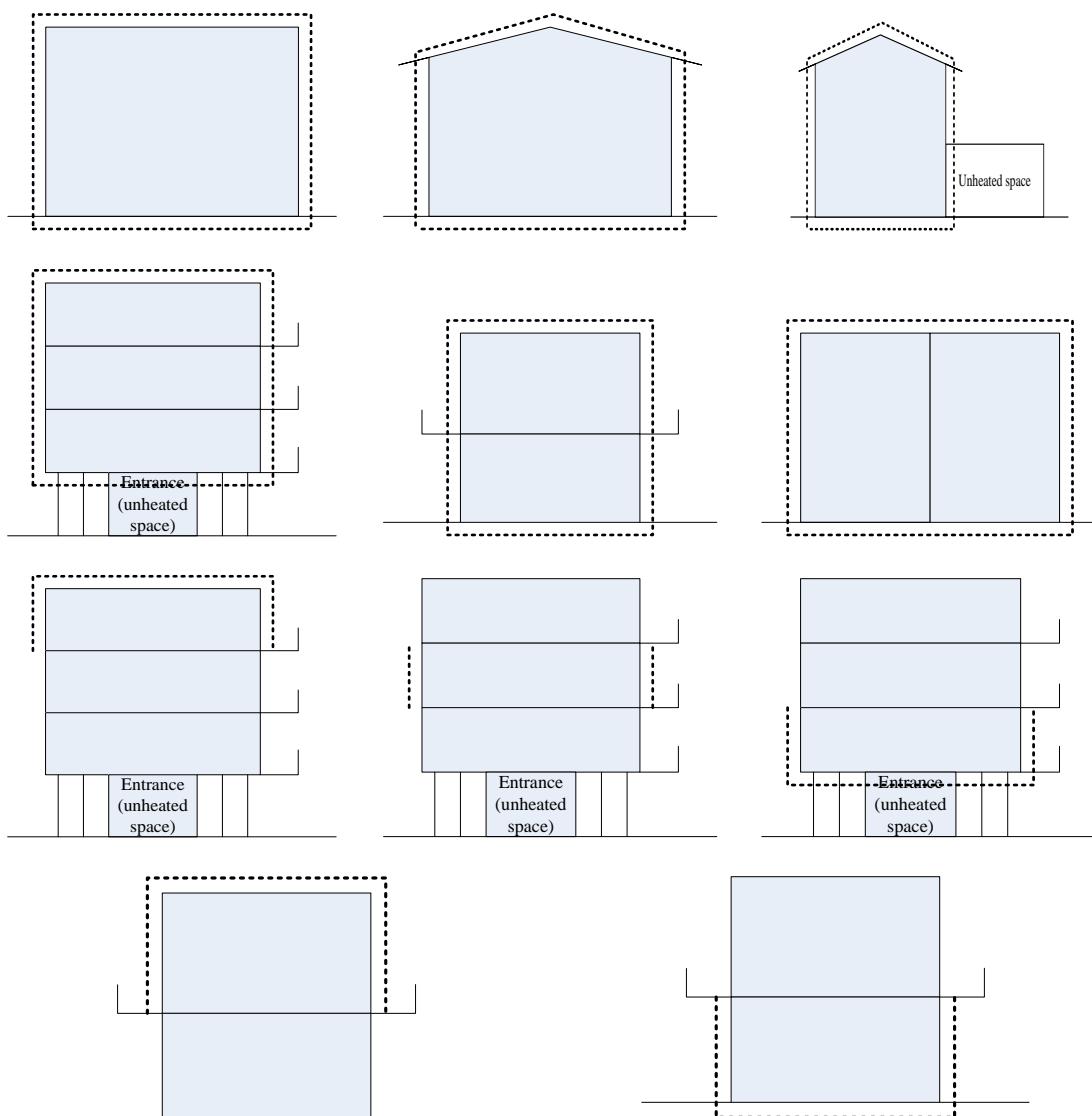
Σχήμα Β1: Υπόδειγμα τοιχοποιίας τριών επιπέδων: σκυρόδεμα, μόνωση, γυψοσανίδα

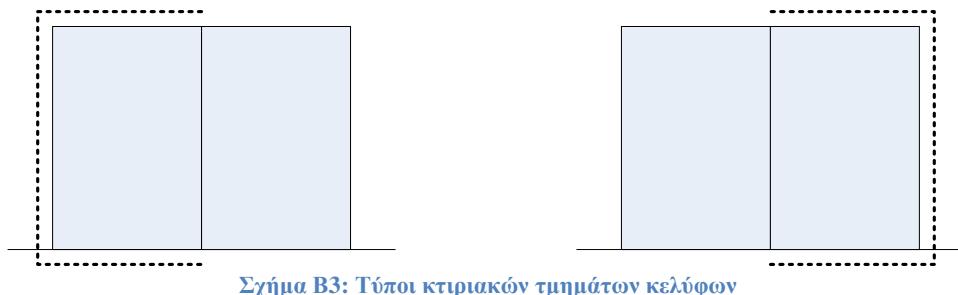
Στην περίπτωση της θερμοδιαπερατότητας των παραθύρων χρησιμοποιείται η τιμή U και ο παράγοντας πλαισίου για να προσδιοριστεί με ακρίβεια η γυάλινη επιφάνεια.



Σχήμα B2: Υπόδειγμα παραθύρου με πλαίσιο

Η ανάλυση του κτιριακού κελύφους εξαρτάται από τον τύπο ή μέρος του κτιρίου που αφορά. Υποδείγματα διάφορων τύπων κτιριακών κελυφών παρουσιάζονται στο Σχήμα B3:

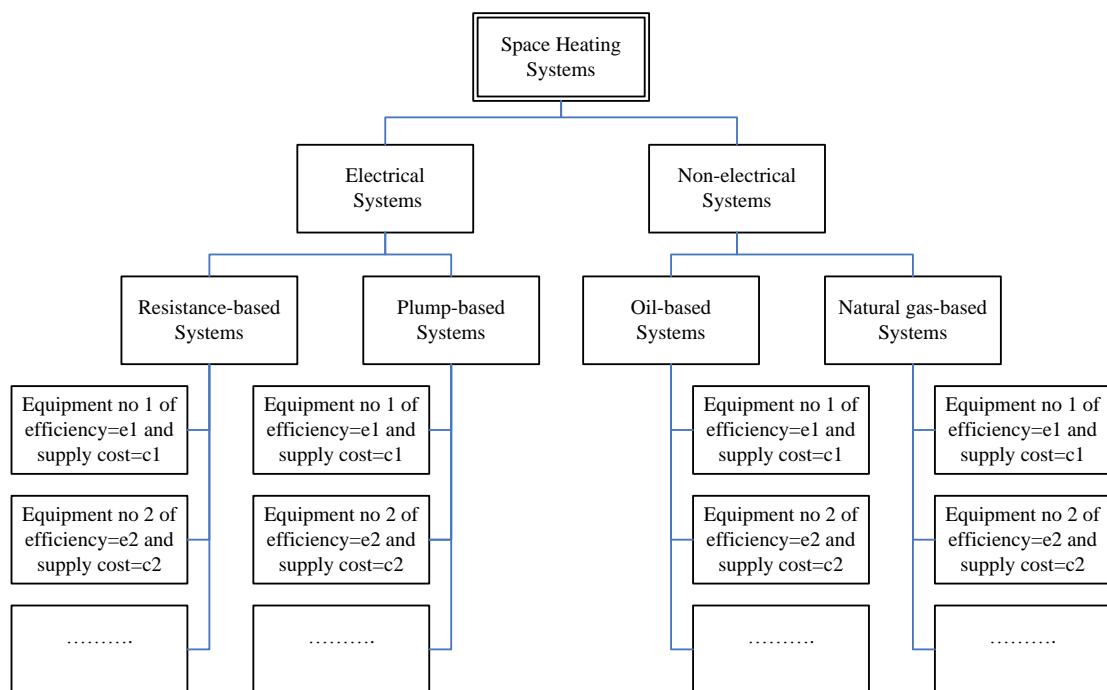




Σχήμα Β3: Τόποι κτιριακών τμημάτων κελύφων

Συστήματα θέρμανσης / ψύξης / ζεστού νερού χρήσης

Τα συστήματα θέρμανσης / ψύξης / ζεστού νερού χρήσης διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους όπως η χρήση καυσίμου ή η τεχνολογία κατασκευής και λειτουργίας τους όπως φαίνεται στο Σχήμα Β4 για τα συστήματα θέρμανσης:



Σχήμα Β4: Υπόδειγμα κατηγοριοποίησης συστημάτων θέρμανσης

Ο χρήστης προσδιορίζει τον αριθμό των κατηγοριών και των εναλλακτικών κάθε κατηγορίας που εξετάζονται από το σύστημα. Επιπλέον, το πρότυπο περιλαμβάνει τη δυνατότητα επιλογής κοινού συστήματος στις περιπτώσεις συστημάτων που παρέχουν θέρμανση και ψύξη ή θέρμανση και ζεστό νερό χρήσης.

1. Ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (Berben et al., 2004)

$$Q_T = Q_H + Q_C + Q_{DHW} \quad (\text{B.1})$$

Περιγραφή

<i>Μεταβλητή</i>	<i>Περιγραφή</i>	<i>Μονάδα</i>	<i>Σχόλια</i>
Q_T	Συνολική ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας	MJ/έτος	Αποτέλεσμα(B.1)
Q_H	Συνολική ετήσια κατανάλωση θέρμανσης	MJ/έτος	Υπολογίζεται από (B1.1)
Q_C	Συνολική ετήσια κατανάλωση ψύξης	MJ/έτος	Υπολογίζεται από (B1.2)
Q_{DHW}	Συνολική ετήσια κατανάλωση οικιακού ζεστού νερού	MJ/έτος	Υπολογίζεται από (B1.3)
Q_A	Συνολική ετήσια κατανάλωση για βιοθητικούς σκοπούς (συσκευές θέρμανσης, ψύξης)	MJ/έτος	Υπολογίζεται από (B1.4)
Q_L	Συνολική ετήσια κατανάλωση φωτισμού	MJ/έτος	Υπολογίζεται από (B1.5)

1.1. Ετήσια κατανάλωση θέρμανσης (Berben et al., 2004)

$$Q_H = \sum_{n_H=1}^{N_H} Q_{H,n_H} = \sum_{n_H=1}^{N_H} \left(\sum_{s_H=1}^{S_H} Q_{H,n_H,s_H} \right) \quad (\text{B1.1})$$

Εάν $S_H = 0$ τότε $Q_H = 0$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_H	Συνολική ετήσια κατανάλωση θέρμανσης	MJ/ έτος	Αποτέλεσμα (B1.1), εισάγεται (B1)
Q_{H,n_H}	Κατανάλωση θέρμανσης το μήνα n_H	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.1)
Q_{H,n_H,s_H}	Κατανάλωση ενέργειας συστήματος θέρμανσης s_H , κατά τη διάρκεια του μήνα n_H	MJ/ μήνα	Υπολογίζεται από (B1.1.1)
N_H	Μήνες περιόδου θέρμανσης	-	Δεδομένα που προσδιορίζονται από την τοποθεσία του κτιρίου
n_H	Δείκτης για το μήνα θέρμανσης $n_H = 1, 2, \dots, N_H$	-	Δείκτης προσδιορίζεται αυτόματα σύμφωνα με N_H
S_H	Αριθμός των υφιστάμενων ή υπό εγκατάσταση συστημάτων θέρμανσης του κτιρίου	-	Προσδιορίζεται από τον χρήστη
s_H	Δείκτης υφιστάμενων ή υπό εγκατάσταση συστημάτων θέρμανσης, $s_H = 1, 2, \dots, S_H$	-	Δείκτης, προσδιορίζεται αυτόματα σύμφωνα με S_H

1.1.1. Μηνίαια κατανάλωση θέρμανσης από κάθε ένα σύστημα θέρμανσης (Berben et al., 2004)

$$Q_{H,n_H,s_H} = \frac{F_{H,s_H} Q_{HD,n_H}}{e_{g,s_H}} \quad (\text{B1.1.1})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_{H,n_H,s_H}	Κατανάλωση ενέργειας του συστήματος θέρμανσης s_H , για το μήνα n_H	MJ/μήνα	Αποτέλεσμα (B1.1.1), εισάγεται (B1.1)
Q_{HD,n_H}	Zήτηση θέρμανσης το μήνα n_H	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.1.1.1)
F_{H,s_H}	Ποσοστό ζήτησης θέρμανσης που παρέχεται από το σύστημα θέρμανσης s_H	%	Προσδιορίζεται από το πρότυπο ή από το χρήστη
e_{g,s_H}	Αποδοτικότητα παραγωγής του συστήματος θέρμανσης s_H	%	Προσδιορίζεται από το πρότυπο σύμφωνα με τις προδιαγραφές των συστημάτων θέρμανσης σε DB

1.1.1.1. Μηνιαία ζήτηση θερμαντικής ενέργειας (Berben et al., 2004)

$$Q_{HD,n_H} = Q_{T,n_H} + Q_{VEN,n_H} - Q_{SL,n_H} - Q_{INHG,n_H} \quad (\text{B1.1.1.1})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_{HD,n_H}	Ζήτηση θερμαντικής ενέργειας το μήνα n_H	MJ/μήνα	Αποτέλεσμα (B1.1.1.1), εισάγεται (B1.1.1)
Q_{T,n_H}	Απώλεια θέρμανσης λόγω μεταφοράς κατά τη διάρκεια του μηνά n_H	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.1.1.1)
Q_{VEN,n_H}	Απώλεια θέρμανσης λόγω εξαερισμού κατά τη διάρκεια του μηνά n_H	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.1.1.2)
Q_{SL,n_H}	Ηλιακό όφελος που μειώνει τις απαιτήσεις ενέργειας θέρμανσης το μήνα n_H	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.1.1.3)
Q_{INHG,n_H}	Λανθάνουσα θερμότητα n_H	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.1.1.4)

1.1.1.1.1. Μηνιαία απώλεια θερμότητας λόγω μετάδοσης κατά την περίοδο θέρμανσης (Berben et al., 2004)

$$Q_{T,n_H} = BLC \left(\theta_{IH} - \theta_{E,n_H} \right) T_{n_H} \quad (\text{B1.1.1.1.1})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_{T,n_H}	Απώλεια μετάδοσης θερμότητας το μήνα n_H	MJ/μήνα	Αποτέλεσμα(B1.1.1.1.1), εισάγεται (B1.1.1.1)
BLC	Συντελεστής θερμοδιαπερατότητας	W/K	Υπολογίζεται από (B2)
θ_{IH}	Εσωτερική θερμοκρασία κατά την περίοδο θέρμανσης	°C	Συνεχής μεταβλητή με άνω και κάτω όρια
θ_{E,n_H}	Μέση εξωτερική θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του μήνα n_H	°C	Προσδιορισμένο από το χρήστη σύμφωνα με την τοποθεσία του κτιρίου
T_{n_H}	Διάρκεια μήνα n_H	Ms	2678 για μήνα 31 ημερών , 2592 για μήνα 30 ημερών , 2419 για Φεβρουάριο

1.1.1.1.2. Μηνιαία απώλεια θερμότητας λόγω εξαερισμού κατά την περίοδο θέρμανσης (Berben et al., 2004)

$$Q_{VEN,n_H} = \rho_{air} c_{air} V_{air} (\theta_{IH} - \theta_{E,n_H}) \quad (\text{B1.1.1.1.2})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_{VEN,n_H}	Απώλεια θερμότητας λόγω εξαερισμού το μήνα n_H	MJ/μήνα	Αποτέλεσμα(B1.1.1.1.2), εισάγεται (B1.1.1.1)
ρ_{air}	Πυκνότητα αέρα	kg/m ³	Προσδιορίζεται από το χρήστη σύμφωνα με την τοποθεσία του κτιρίου
c_{air}	Θερμότητα αέρα	J/kgK	Προσδιορίζεται από το χρήστη σύμφωνα με την τοποθεσία του κτιρίου
V_{air}	Όγκος αέρα	m ³	Προσδιορίζεται από το χρήστη
θ_{IH}	Εσωτερική θερμοκρασία κατά την περίοδο θέρμανσης	°C	Συνεχής μεταβλητή με άνω και κάτω όρια
θ_{E,n_H}	Μέση εξωτερική θερμοκρασία κατά τη διαρκεια του μήνα n_H	°C	Προσδιορίζεται από το χρήστη σύμφωνα με την τοποθεσία του κτιρίου

1.1.1.1.3. Μηνιαίο ηλιακό όφελος που μειώνει τις θερμαντικές απαιτήσεις (Berben et al., 2004)

$$Q_{SL,n_H} = Q_{SL,T,n_H} = \sum_{tc=1}^{TC} A_{tc} F_{F,tc} F_{S,tc} F_{HM,tc} g_{tc} I_{SL,tc,n_H} \quad (\text{B1.1.1.3})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_{SL,n_H}	Μηνιαίο ηλιακό όφελος που μειώνει τις θερμαντικές απαιτήσεις το μήνα n_H	MJ/μήνα	Αποτέλεσμα (B1.1.1.3), εισάγεται (B1.1.1.1)
Q_{SL,T,n_H}	Μηνιαίο ηλιακό όφελος μέσω των διαφανών δομικών στοιχείων μερών του κτιριακού κελύφους κατά τη διάρκεια του μήνα n_H	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.1.1.3)
A_{tc}	Περιοχή των διαφανών δομικών στοιχείων tc	m^2	Προσδιορίζεται από το χρήστη σύμφωνα με την περιγραφή του κτιρίου
$F_{F,tc}$	Παράγοντας πλαισίου διαφανούς δομικού υλικού tc	%	Προσδιορίζεται από το χρήστη
$F_{S,tc}$	Διορθωτικός παράγοντας διαφανούς δομικού στοιχείου μέρους tc για σκίαση	%	Προσδιορίζεται από το χρήστη
$F_{HM,tc}$	Διορθωτικός παράγοντας διαφανούς δομικού στοιχείου μέρους tc για κινητές συσκευές κατά την περιόδο θέρμανσης	%	Προσδιορίζεται από το χρήστη
g_{tc}	Διαπερατότητα ηλιακής ακτινοβολίας διαφανούς δομικού στοιχείου tc		Προσδιορίζεται από τις κατασκευαστικές προδιαγραφές
I_{SL,tc,n_H}	Ηλιακή ακτινοβολία σε διαφανές δομικό στοιχείο μέρους tc , συγκεκριμένου προσανατολισμού και κλίσης κατά το μήνα n_H	MJ/ m^2 /μήνα	Προσδιορίζεται από το χρήστη σε συνάρτηση με την τοποθεσία του κτιρίου
TC	Αριθμός των διαφανών δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους		Προσδιορίζεται από το χρήστη
tc	Δείκτης των διαφανών δομικών στοιχείων, $tc = 1, 2, \dots, TC$		Δείκτης, προσδιορίζεται αυτόματα σύμφωνα με TC

1.1.1.1.4. Μηνιαία λανθάνουσα θερμότητα κατά την περίοδο θέρμανσης (Berben et al., 2004)

$$Q_{INHG,n_H} = Q_{AINHG} T_{n_H} \quad (\text{B1.1.1.1.4})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_{INHG,n_H}	Λανθάνουσα θερμότητα το μήνα n_H	MJ/μήνα	Αποτέλεσμα (B1.1.1.4), εισάγεται (B1.1.1)
Q_{AINHG}	Μέσο μηνιαίο κέρδος λόγω λανθάνουσας θερμότητας	W	Προσδιορίζεται από το χρήστη
T_{n_H}	Διάρκεια μήνα n_H	Ms	2678 για μήνα 31 ημερών, 2592 για μήνα 30 ημερών, 2419 για Φεβρουάριο

1.2. Ετήσια κατανάλωση ενέργειας για ψύξη (Berben et al., 2004)

$$Q_C = \sum_{n_C=1}^{N_C} Q_{C,n_C} = \sum_{n_C=1}^{N_C} \left(\sum_{s_C=1}^{S_C} Q_{C,n_C,s_C} \right) \quad (\text{B1.2})$$

Εάν $S_C = 0$ τότε $Q_C = 0$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_C	Συνολική ετήσια κατανάλωση ψύξης	MJ/έτος	Αποτέλεσμα (B1.2), εισάγεται (B1)
Q_{C,n_C}	Κατανάλωση ψύξης το μήνα n_C	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.2)
Q_{C,n_C,s_C}	Κατανάλωση ενέργειας συστήματος ψύξης s_C , κατά τη διάρκεια του μήνα n_C	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.2.1)
N_C	Μήνες περιόδου ψύξης	-	Δεδομένα που προσδιορίζονται από την τοποθεσία του κτιρίου
n_C	Δείκτης για το μήνα ψύξης, $n_C = 1, 2, \dots, N_C$	-	Δείκτης προσδιορίζεται αυτόματα σύμφωνα με το N_C
S_C	Αριθμός συστημάτων ψύξης	-	Προσδιορίζονται από τον χρήστη
s_C	Δείκτης συστημάτων ψύξης, $s_C = 1, 2, \dots, S_C$	-	Δείκτης, προσδιορίζεται αυτόματα σύμφωνα με S_C

1.2.1. Μηνιαία κατανάλωση ενέργειας συστήματος θέρμανσης (Berben et al., 2004)

$$Q_{C,n_C,s_C} = \frac{F_{C,s_C} Q_{CD,n_C}}{e_{g,s_C}} \quad (\text{B1.2.1})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_{C,n_C,s_C}	Κατανάλωση ενέργειας του συστήματος ψύξης s_C , για το μήνα n_C	MJ/μήνα	Αποτέλεσμα (B1.2.1), εισάγεται (B1.2)
Q_{CD,n_C}	Zήτηση ψύξης το μήνα n_C	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.2.1.1)
F_{C,s_C}	Ποσοστό ζήτησης θέρμανσης που παρέχεται από το σύστημα ψύξης s_C	%	Προσδιορίζεται από το πρότυπο ή από το χρήστη
e_{g,s_C}	Απόδοση παραγωγής του συστήματος ψύξης s_C	%	Προσδιορίζεται από τις κατασκευαστικές προδιαγραφές των συστημάτων ψύξης

1.2.1.1. Μηνιαία ζήτηση ψυκτικής ενέργειας (Berben et al., 2004)

$$Q_{CD,n_C} = Q_{SL,n_C} + Q_{INHG,n_C} - Q_{T,n_C} - Q_{VEN,n_C} \quad (\text{B1.2.1.1})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_{CD,n_C}	Ζήτηση ψυκτικής ενέργειας το μήνα n_C	MJ/μήνα	Αποτέλεσμα (B1.2.1.1), εισάγεται (B1.2.1)
Q_{SL,n_C}	Ηλιακό όφελος που αυξάνει την ζήτηση για ψυκτική ενέργεια το μήνα n_C	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.2.1.1.1)
Q_{INHG,n_C}	Λανθάνουσα θερμότητα n_C	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.2.1.1.2)
Q_{T,n_C}	Απώλεια θέρμανσης λόγω μεταφοράς κατά τη διάρκεια του μηνά n_C	MJ/ μήνα	Υπολογίζεται από (B1.2.1.1.3)
Q_{VEN,n_C}	Απώλεια θέρμανσης λόγω εξαερισμού κατά τη διάρκεια του μηνά n_C	MJ/ μήνα	Υπολογίζεται από (B1.2.1.1.4)

1.2.1.1.1. Μηνιαίο ηλιακό θερμικό φορτίο κατά την περίοδο ψύξης (Berben et al., 2004)

$$Q_{SL,n_C} = Q_{SL,T,n_C} = \sum_{tc=1}^{TC} A_{tc} F_{F,tc} F_{S,tc} F_{CM,tc} g_{tc} I_{SL,tc,n_C} \quad (\text{B1.2.1.1.1})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_{SL,n_C}	Μηνιαίο ηλιακό θερμικό φορτίο κατά την περίοδο ψύξης για το μήνα n_C	MJ/μήνα	Αποτέλεσμα (B1.2.1.1.1), εισάγεται (B1.2.1.1)
Q_{SL,T,n_C}	Μηνιαίο ηλιακό κέρδος μέσω των διαφανών δομικών στοιχείων του κελύφους κατά τη διάρκεια του μήνα n_C	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.2.1.1.1)
A_{tc}	Επιφάνεια των διαφανών δομικών στοιχείων	m^2	Προσδιορίζεται από το χρήστη σύμφωνα με την περιγραφή του κτιρίου
$F_{F,tc}$	Παράγοντας πλαισίου διαφανούς δομικού υλικού tc	%	Προσδιορίζεται από το χρήστη
$F_{S,tc}$	Διορθωτικός παράγοντας διαφανούς δομικού στοιχείου μέρους tc για σκίαση	%	Προσδιορίζεται από το χρήστη
$F_{CM,tc}$	Διορθωτικός παράγοντας διαφανούς δομικού στοιχείου μέρους tc για κινητές συσκευές κατά την περίοδο ψύξης	%	Προσδιορίζεται από το χρήστη
g_{tc}	Θερμότητα λόγω ηλιακής ακτινοβολίας σε διαφανές δομικό στοιχείο μέρους tc		Προσδιορίζεται από το πρότυπο σύμφωνα με τις κατασκευαστικές προδιαγραφές
I_{SL,tc,n_C}	Ηλιακή ακτινοβολία σε διαφανές δομικό στοιχείο μέρους tc , έχοντας συγκεκριμένο προσανατολισμό και κλίση γωνίας κατά το μήνα n_C	MJ/m ² /μήνα	Προσδιορίζεται από το χρήστη σε συνάρτηση με την τοποθεσία του κτιρίου
TC	Αριθμός των διαφανών δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους	-	Προσδιορίζεται από το χρήστη
tc	Δείκτης των διαφανών δομικών στοιχείων, $tc = 1, 2, \dots, TC$	-	Δείκτης, προσδιορίζεται αυτόματα σύμφωνα με TC

1.2.1.1.2. Μηνιαία λανθάνουσα θερμότητα (Berben et al., 2004)

$$Q_{INHG,n_c} = Q_{AINHG} T_{n_c} \quad (\text{B1.2.1.1.2})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_{INHG,n_c}	Λανθάνουσα θερμότητα το μήνα n_c	MJ/μήνα	Αποτέλεσμα (B1.2.1.1.2), εισάγεται (B1.2.1.1)
Q_{AINHG}	Μέσο μηνιαίο θερμικό κέρδος λόγω λανθάνουσας θερμότητας	W	Προσδιορίζεται από το χρήστη
T_{n_c}	Διάρκεια μήνα n_c	Ms	2678 για μήνα 31 ημερών, 2592 για μήνα 30 ημερών, 2419 για Φεβρουάριο

1.2.1.1.3. Μηνιαία απώλεια θερμότητας λόγω μεταφοράς κατά την περίοδο ψύξης (Berben et al., 2004)

$$Q_{T,n_c} = BLC \left(\theta_{E,n_c} - \theta_{IC} \right) T_{n_c} \quad (\text{B1.2.1.1.3})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_{T,n_c}	Απώλεια μετάδοσης θερμότητας το μήνα n_c	MJ/μήνα	Αποτέλεσμα (B1.2.1.1.3), εισάγεται (B1.2.1.1)
BLC	Συντελεστής θερμοδιαπερατότητας	W/K	Υπολογίζεται από (B2)
θ_{IC}	Εσωτερική θερμοκρασία κατά την περίοδο ψύξης	°C	Συνεχής μεταβλητή με άνω και κάτω όρια
θ_{E,n_c}	Μέση εξωτερική θερμοκρασία κατά τη διαρκεια του μήνα n_c	°C	Προσδιορίζεται από τον χρήστη σύμφωνα με την τοποθεσία του κτιρίου
T_{n_c}	Διάρκεια μήνα n_c	Ms	2678 για μήνα 31 ημερών, 2592 για μήνα 30 ημερών, 2419 για Φεβρουάριο

1.2.1.1.4. Μηνιαία απώλεια θερμότητας λόγω εξαερισμού κατά την περίοδο ψύξης (Berben et al., 2004)

$$Q_{VEN,n_C} = \rho_{air} c_{air} V_{air} (\theta_{IC} - \theta_{E,n_C}) \quad (\text{B1.2.1.1.4})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_{VEN,n_C}	Απώλεια θερμότητας λόγω εξαερισμού το μήνα n_C	MJ/μήνα	Αποτέλεσμα (B1.2.1.1.4), εισάγεται (B1.2.1.1)
ρ_{air}	Πυκνότητα αέρα	kg/m ³	Προσδιορίζεται από το χρήστη σύμφωνα με την τοποθεσία του κτιρίου
c_{air}	Ειδική θερμότητα αέρα	J/kgK	Προσδιορίζεται από το χρήστη σύμφωνα με την τοποθεσία του κτιρίου
V_{air}	Όγκος αέρα	m ³	Προσδιορίζεται από το χρήστη
θ_{IC}	Εσωτερική θερμοκρασία κατά την περίοδο ψύξης	°C	Συνεχής μεταβλητή με άνω και κάτω όρια
θ_{E,n_C}	Μέση εξωτερική θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του μήνα n_C	°C	Προσδιορίζεται από το χρήστη σύμφωνα με την τοποθεσία του κτιρίου

1.3. Ετήσια κατανάλωση Ζεστού Νερού Χρήσης (DHW) (Berben et al., 2004)

$$Q_{DHW} = \sum_{n_{DHW}=1}^{N_{DHW}} Q_{DHW,n_{DHW}} = \sum_{n_{DHW}=1}^{N_{DHW}} \left(\sum_{s_{DHW}}^{S_{DHW}} Q_{DHW,n_{DHW},s_{DHW}} \right) \quad (\text{B1.3})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_{DHW}	Συνολική ετήσια κατανάλωση για DHW	MJ/χρόνο	Αποτέλεσμα (B1.3), εισάγεται (B1)
$Q_{DHW,n_{DHW}}$	Κατανάλωση ενέργειας για DHW για το μήνα n_{DHW}	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.3)
$Q_{DHW,n_{DHW},s_{DHW}}$	Κατανάλωση ενέργειας για DHW για το μήνα n_{DHW} , από υφιστάμενο σύστημα s_{DHW}	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.3.1)
N_{DHW}	Αριθμός μηνών ζήτησης DHW	-	Κανονικά $N_{DHW} = 12$, εκτός αν ο χρήστης προσδιορίσει διαφορετική περίοδο (π.χ. κτίριο το οποίο χρησιμοποιείται μόνο το καλοκαίρι ή το χειμώνα)
n_{DHW}	Δείκτης για τον αριθμό των μηνών που απαιτείται DHW $n_{DHW} = 1, 2, \dots, N_{DHW}$	-	Δείκτης, που προσδιορίζεται αυτόματα σύμφωνα με N_{DHW}
S_{DHW}	Αριθμός των διαφορετικών συστημάτων DHW	-	Προσδιορίζεται από το χρήστη
s_{DHW}	Δείκτης των διαφορετικών συστημάτων DHW $s_{DHW} = 1, 2, \dots, S_{DHW}$	-	Δείκτης, που προσδιορίζεται αυτόματα σύμφωνα με S_{DHW}

1.3.1. Μηνιαία κατανάλωση συστήματος DHW (Berben et al., 2004)

$$Q_{DHW,n_{DHW},s_{DHW}} = \begin{cases} F_{DHW,s_{DHW}} \frac{Q_{MDHWD} - Q_{SLC,n_{DHW}}}{e_{g,s_{DHW}}}, & \text{if } Q_{DHW,dem,n_{DHW}} \geq Q_{SLC,n_{DHW}} \\ 0 & \text{, else} \end{cases} \quad (\text{B1.3.1})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
$Q_{DHW,n_{DHW},s_{DHW}}$	Κατανάλωση ενέργειας του συστήματος ζεστού νερού για το μήνα n_{DHW} , που διανέμεται από υφιστάμενο σύστημα s_{DHW}	MJ/μήνα	Αποτέλεσμα (B1.3.1), εισάγεται (B1.3)
$F_{DHW,s_{DHW}}$	Ποσοστό ζεστού νερού που διανέμεται από υφιστάμενο σύστημα s_{DHW}	%	Προσδιορίζεται από το πρότυπο ή από το χρήστη
Q_{MDHWD}	Μέση μηνιαία ενεργειακή ζήτηση για ζεστό νερό	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.3.1.1)
$Q_{SLC,n_{DHW}}$	Εισφορά του ηλιακού συλλέκτη για ζεστό νερό οικιακής για μήνα n_{DHW}	MJ/μήνα	Υπολογίζεται από (B1.3.1.2)
$e_{g,s_{DHW}}$	Παραγωγικότητα συστήματος ζεστού νερού s_{DHW}	%	Προσδιορίζεται από το πρότυπο σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ζεστού νερού οικιακής χρήσης συστήματος σε DB

1.3.1.1. Μέση μηνιαία ζήτηση ενέργειας DHW (Berben et al., 2004)

$$Q_{MDHWD} = \frac{V_{DHW} \rho_{water} c_{water} (\theta_{DHW} - \theta_{DCW})}{N_{DHW}} \quad (\text{B1.3.1.1})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
Q_{MDHWD}	Μέση μηνιαία ζήτηση ενέργειας DHW	MJ/μήνα	Αποτέλεσμα (B1.3.1.1), εισάγεται (B1.3.1)
V_{DHW}	Ετήσιος όγκος DHW	m ³ /έτος	Προσδιορίζεται από το χρήστη σύμφωνα με τον αριθμό των κατοίκων και τις απαιτήσεις τους.
ρ_{water}	Πυκνότητα νερού	kg/m ³	Δεδομένα που προσδιορίζονται από την τοποθεσία του κτιρίου
c_{water}	Ειδική θερμοκρασία νερού	J/kgK	Δεδομένα που προσδιορίζονται από την τοποθεσία του κτιρίου
θ_{DHW}	Θερμοκρασία DHW	°C	Συνεχής μεταβλήτη με άνω και κάτω όρια
θ_{DCW}	Θερμοκρασία ψυχρού νερού	°C	Δεδομένα που προσδιορίζονται από την τοποθεσία του κτιρίου

1.3.1.2. Μηνιαία ηλιακά θερμικά κέρδη DHW (Berben et al., 2004)

$$Q_{SLC,n_{DHW}} = A_{SLC} e_{SLC} I_{SL,SLC,n_{DHW}} F_{S,SLC} \quad (\text{B1.3.1.2})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
$Q_{SLC,n_{DHW}}$	Εισφορά ηλιακού συλλέκτη στο ζεστό νερό οικιακής χρήσης για το μήνα n_{DHW}	MJ/μήνα	Αποτέλεσμα (B1.3.1.2), εισάγεται (B1.3.1)
A_{SLC}	Εμβαδόν του ηλιακού συλλέκτη	m^2	Προσδιορίζεται από τον χρήστη
e_{SLC}	Απόδοση ηλιακού συλλέκτη	%	Προσδιορίζεται από τις προδιαγραφές του ηλιακού συλλέκτη
$I_{SL,SLC,n_{DHW}}$	Ηλιακή ακτινοβολία	$\text{MJ/m}^2/\text{μήνα}$	Δεδομένα που προσδιορίζονται από την τοποθεσία του κτιρίου
$F_{S,SLC}$	Διορθωτικός παράγοντας για τη σκίαση του ηλιακού συλλέκτη	%	Προσδιορίζεται από τον χρήστη

2. Συντελεστής θερμοδιαπερατότητας κτιρίου - BLC (Berben et al., 2004)

$$BLC = \sum_{d=1}^D A_d U_d b_d + \sum_{wi=1}^{WI} A_{wi} U_{wi} b_{wi} + \sum_{wl=1}^{WL} A_{wl} U_{wl} b_{wl} + \sum_{f=1}^F A_f U_f b_f + \sum_{c=1}^C A_c U_c b_c \quad (B2)$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
<i>BLC</i>	Θερμοδιαπερατότητα κτιρίου	W/K	Αποτέλεσμα (B2), εισάγεται (B1.2.1.1.2)
<i>A</i>	Επιφάνεια κτιριακού του κελύφους	m ²	Προσδιορίζεται από το χρήστη σύμφωνα με την περιγραφή του κτιρίου
<i>U</i>	Θερμική διαπερατότητα κτιριακού κελύφους	W/m ² K	Για μονο-επίπεδα δομικά στοιχεία όπως πόρτες και παράθυρα U_d και U_{wi} δίδονται από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή ενώ για τα πολύ-επίπεδα δομικά στοιχεία δώματα, τοιχοποιία, δάπεδα, U_{wl} , U_f , και U_c υπολογίζονται με (B2.1)
<i>b</i>	Συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας δομικού στοιχείου	-	Προσδιορίζεται από τον χρήστη και λαμβάνει τιμές από 1 για κατασκευές σε άμεση επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον $b_d = b_{wi} = b_{wl} = b_c = 1$, έως και 0, για κατασκευές σε επαφή με το έδαφος ή μη θερμαινόμενους χώρους όπως υπόγεια, σοφίτες κλπ. (i.e. $b_f < 1$)
<i>D, WI, WL, F, C</i>	Αριθμός διαφορετικών ομογενών δομικών στοιχείων όπως πόρτες, παράθυρα, τοίχοι, δάπεδα και στέγες / οροφές αντίστοιχα.		
<i>d, wi, wl, f, c</i>	Δείκτες δομικών στοιχείων κελύφους: $d = 1, 2, \dots, D$, $wi = 1, 2, \dots, WI$, $wl = 1, 2, \dots, WL$, $f = 1, 2, \dots, F$ and $c = 1, 2, \dots, C$		

2.1. Θερμική διαπερατότητα πολύ-επίπεδων δομικών στοιχείων (Krarti, 2000)

$$U_e = \frac{1}{R_e} = \frac{1}{\sum_{e_n=1}^{E_n} R_{e_n}} = \frac{1}{\sum_{e_n=1}^{E_n} \frac{d_{e_n}}{k_{e_n}}} \quad (\text{B2.1})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
U_e	Θερμική διαπερατότητα πολύ-επίπεδου δομικού στοιχείου κελύφους e	$\text{W/m}^2\text{K}$	Αποτέλεσμα της (B2.1), εισάγεται σε (B2)
R_e	Ολική θερμική αντίσταση πολύ-επίπεδου δομικού στοιχείου κελύφους e	$\text{m}^2\text{K/W}$	Υπολογίζεται από (B2.1)
R_{e_n}	Θερμική αντίσταση (R -τιμή) ομογενούς επιπέδου e_n πολύ-επίπεδου e	$\text{m}^2\text{K/W}$	Υπολογίζεται από (B2.1)
d_{e_n}	Πάχος ομογενούς επιπέδου e_n πολύ-επίπεδου δομικού στοιχείου e	m	
k_{e_n}	Θερμική αγωγιμότητα ομογενούς επιπέδου e_n πολύ-επίπεδου δομικού στοιχείου e	W/mK	
E_n	Αριθμός επιπέδων πολύ-επίπεδου δομικού στοιχείου e :		
	$E_n = \begin{cases} WL_n, & \text{τοιχοποιία} \\ F_n, & \text{δάπεδο} \\ C_n, & \text{στέγη} \end{cases}$		
e_n	Δείκτης επιπέδων πολύ-επίπεδων δομικών στοιχείων κελύφους e :		
	$e_n = \begin{cases} wl_n, & \text{τοιχοποιία} \\ f_n, & \text{δάπεδο} \\ c_n, & \text{στέγη} \end{cases}$		

3. Ετήσια κατανάλωση καυσίμου (Berben et al., 2004)

$$FLC_{fl} = \sum_{n_H=1}^{N_H} \left(\sum_{s_H=1}^{S_H} \frac{F_{fl,s_H} Q_{H,n_H,s_H}}{F_{EN,fl}} \right) + \sum_{n_C=1}^{N_C} \left(\sum_{s_C=1}^{S_C} \frac{F_{fl,s_C} Q_{C,n_C,s_C}}{F_{EN,fl}} \right) + \sum_{n_{DHW}=1}^{N_{DHW}} \left(\sum_{s_{DHW}=1}^{S_{DHW}} \frac{F_{fl,s_{DHW}} Q_{DHW,n_{DHW},s_{DHW}}}{F_{EN,fl}} \right) \quad (\text{B3})$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
FL	Αριθμός διαφορετικών καυσίμων που χρησιμοποιούνται από τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης, DHW προς επιλογή		
fl	Δείκτης καυσίμου που χαρακτηρίζει τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης, DHW προς επιλογή: $fl = 1, 2, \dots, FL$		
FLC_{fl}	Ετήσια κατανάλωση καυσίμου fl	$\text{m}^3/\text{έτος}$	Αποτέλεσμα της (B3), εισάγεται στην (B4)
$F_{EN,fl}$	Συντελεστής μετατροπής καυσίμου fl σε πρωτογενή ενέργεια	MJ/m^3	
F_{fl,s_H}	1 εάν το σύστημα θέρμανσης s_H χρησιμοποιεί καύσιμο fl , διαφορετικά 0		
Q_{H,n_H,s_H}	Ενεργειακή κατανάλωση συστήματος θέρμανσης s_H , κατά τον μήνα n_H	$\text{MJ}/\mu\text{ήνα}$	Υπολογίζεται από (B1.1.1)
F_{fl,s_C}	1 εάν το σύστημα s_C χρησιμοποιεί καύσιμο fl , διαφορετικά 0		
Q_{C,n_C,s_C}	Ενεργειακή κατανάλωση συστήματος ψύξης s_C , κατά τον μήνα n_C	$\text{MJ}/\mu\text{ήνα}$	Υπολογίζεται από (B1.2.1)
$F_{fl,s_{DHW}}$	1 εάν το σύστημα DHW s_{DHW} χρησιμοποιεί καύσιμο fl , διαφορετικά 0		
$Q_{DHW,n_{DHW},s_{DHW}}$	Κατανάλωση ενέργειας DHW κατά τον μήνα n_{DHW} , από σύστημα s_{DHW}	$\text{MJ}/\mu\text{ήνα}$	Υπολογίζεται από (B1.3.1)

4. Ελαχιστοποίηση εκπομπών CO₂ (Berben et al., 2004)

$$EM_{CO_2} = \sum_{fl=1}^{FL} F_{fl,CO_2} FLC_{fl} \quad (B4)$$

Περιγραφή

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα	Σχόλια
EM_{CO_2}	Ετήσιες εκπομπές CO ₂	kg/έτος	Αποτέλεσμα της (B4)
FLC_{fl}	Ετήσια κατανάλωση καυσίμου	Unit of fuel/year	Υπολογίζεται από την (B3)
$F_{CO_2,fl}$	Συντελεστής μετατροπής καυσίμου – εκπομπών CO ₂	kg/m ³	