

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



**Σχεδιασμός & Ανάπτυξη πληροφοριακού συστήματος
ασαφούς υποστήριξης απόφασης στην εφαρμογή
εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης ενέργειας σε κτίρια**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Παναγιώτης Ν.Χριστιάς

Χανιά 2003

Πρόλογος

Έναυσμα για την εκπόνηση της εργασίας αποτέλεσε η συμμετοχή του Εργαστηρίου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης, στο επιστημονικό πρόγραμμα “Μελέτη & Ανάπτυξη Ολοκληρωμένου Συστήματος Λογισμικού για την e-διαχείριση του Εσωτερικού Περιβάλλοντος & της Ενέργειας στα Κτίρια”. Στα πλαίσια αυτής της συμμετοχής, απαιτείται η μελέτη, σχεδίαση και ανάπτυξη ενός πληροφοριακού συστήματος το οποίο θα πιστοποιεί ενεργειακά και περιβαλλοντικά κτιριακές εγκαταστάσεις και επιπλέον θα προτείνει ενεργειακές παρεμβάσεις μέσω ενός ασαφούς «έξυπνου» συστήματος υποστήριξης απόφασης.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους καθηγητές μου Κα Κολοκοτσά, Κο Σταυρακάκη και Κο Καλαϊτζάκη, για την πίστη που έδειξαν στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου την υλοποίηση αυτής της εφαρμογής.

Ιδιαίτερα, ευχαριστώ θερμά τον Κο Σταυρακάκη για την επιστημονική καθοδήγηση στην αναζήτηση λύσεων στη σχεδίαση και την Κα Κολοκοτσά για την ενασχόληση και την παροχή υλικού δεδομένων, πολύτιμα για την υλοποίηση.

Περίληψη

Στη συγκεκριμένη διατριβή περιγράφεται μια ολοκληρωμένη εφαρμογή λογισμικού, η οποία θα κατασκευαστεί για να λειτουργεί στο διαδίκτυο και να διαχειρίζεται την ενέργεια και το εσωτερικό περιβάλλον στα κτίρια.

Η εφαρμογή θα φιλοξενείται σε ένα διακομιστή εφαρμογών (application server) και αναλαμβάνει τις εξής υπηρεσίες:

1. Παρακολούθηση, μετάδοση, συλλογή και αποθήκευση δεδομένων, τα οποία καταφθάνουν από αισθητήρες οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στα εξεταζόμενα κτίρια.
2. Ενεργειακή και περιβαλλοντική πιστοποίηση των κτιρίων.
3. Πρόταση εναλλακτικών παρεμβάσεων για τη βελτίωση της ενεργειακής εικόνας που παρουσιάζει το κτίριο.

Για την πρώτη υπηρεσία γίνεται απλώς μια πλήρης περιγραφή της σχεδιαστικής προσέγγισης. Για τη δεύτερη, περιγράφονται οι παράμετροι που ορίζουν τα εξεταζόμενα πεδία και τα επίπεδα των πιστοποιήσεων. Επιπλέον, περιγράφεται αναλυτικά το τμήμα της υλοποίησης. Η τρίτη υπηρεσία αναλύεται διεξοδικά στα στάδια της μελέτης, ενώ περιγράφονται αναλυτικότερα η μελέτη και η υλοποίηση της.

Περιεχόμενα

4. Εισαγωγή.....	1
5. Η Πληροφοριακή Εφαρμογή.....	3
2.1 Το σύστημα Ενεργειακής και Περιβαλλοντικής Διαχείρισης Κτιρίων.....	3
2.2 Ανάλυση των απαιτήσεων.....	5
2.3 Βασικές λειτουργίες του πληροφοριακού συστήματος.....	5
2.3.1 Προδιαγραφές.....	5
2.3.2 Περιγραφή.....	7
2.4 Η Βάση Δεδομένων	10
2.4.1 Το υποσύστημα Διαχείρισης Δεδομένων	10
2.4.2 Το Σχεσιακό Μοντέλο & το Διάγραμμα Οντοτήτων – Συσχετίσεων (Entity-Relation). Αρχική Προσέγγιση.....	11
2.4.3 Το Διάγραμμα Οντοτήτων – Συσχετίσεων. Δεύτερη Προσέγγιση.....	13
2.4.4 Το Διάγραμμα Οντοτήτων – Συσχετίσεων. Τρίτη Προσέγγιση.....	15
2.4.5 Ανάλυση του Σχεδιασμού.....	17
2.4.6 Περιορισμοί Κλειδιού και Περιορισμοί Συμμετοχής.....	18
2.5 Λειτουργικότητα της βάσης δεδομένων και η σχέση με το διάγραμμα οντοτήτων-συσχετίσεων.. ..	19
6. Οι Πιστοποιήσεις.....	21
3.1 Η Ενεργειακή Πιστοποίηση.....	21
3.2 Η Περιβαλλοντική Πιστοποίηση	24
7. Το Σύστημα Υποστήριξης Απόφασης.....	29
4.1 Γενικά.....	29
4.2 Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος.....	29
4.3 Η Μοντελοποίηση του Κτιρίου.....	32
4.3.1 Γενικά.....	32
4.4 Σ.Υ.Α – Αρχική Προσέγγιση.....	32
4.4.1 Γενικά.....	32
4.4.2 Σχεδιασμός.....	32

4.5	Η Διαδικασία Απόφασης.....	36
4.6	Η Προσέγγιση με Πολυκριτήρια Μεθοδολογία.....	38
4.6.1	Γενικά.....	38
4.6.2	Σχεδιασμός.....	38
4.6.3	Υλοποίηση.....	42
4.6.4	Αναλυτική περιγραφή του κώδικα.....	43
8.	Το Ασαφές (Fuzzy) Σ.Υ.Α.....	49
5.1	Αβεβαιότητα και Ανακρίβεια.....	49
5.2	Ασαφή Σύνολα και Συναρτήσεις Συμμετοχής.....	51
5.3	Πιθανότητα και Αβεβαιότητα.....	53
5.4	Κλασσικά και Ασαφή Σύνολα.....	54
5.5	Ασαφής Υποστήριξη Απόφασης βασισμένη στη Θεωρία Bayes.....	55
5.6	Οι Λόγοι Επιλογής της Ασαφούς Προσέγγισης.....	56
5.7	Υλοποίηση	57
5.7.1	Bayes.....	57
5.7.2	Ανάθεση Τιμών Χρησιμότητας.....	58
5.7.3	Χρήση Δευτερογενούς Πληροφορίας.....	61
5.7.4	Ασαφοποίηση (Fuzzification) των Μελλοντικών Καταστάσεων.....	65
9.	Συμπεράσματα.....	62
6.1	Συνολικά.....	73
6.2	Fuzzy Bayes. Ανάλυση και Χρησιμότητα των Αποτελεσμάτων.....	74
10.	Βιβλιογραφία.....	76

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πληροφοριακό σύστημα παρακολουθεί και διαχειρίζεται την ενέργεια και το εσωτερικό περιβάλλον στα κτίρια.

Αρχικός του ρόλος είναι η διαχείριση των ενδείξεων από τους αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι στα κτίρια. Οι αισθητήρες μετρούν παραμέτρους του εσωτερικού περιβάλλοντος. Οι μετρήσεις μεταδίδονται μέσω του διαδικτύου και καταφθάνουν στο διακομιστή όπου λειτουργεί η εφαρμογή.

Οι μετρήσεις αφού επεξεργαστούν θα αποθηκεύονται κατάλληλα σε βάση δεδομένων. Η διαδικασία λήψης της πληροφορίας αλλά και αποστολής αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων γίνεται μέσω διαδραστικού περιβάλλοντος (interface), ενσωματωμένο στο σύστημα.

Στο πρώτο μέρος αναφέρεται συνολικά η λειτουργία του πληροφοριακού συστήματος, ενώ στο δεύτερο μέρος η διαδικασία πιστοποίησης. Βάσει των φυσικών παραμέτρων – και όχι μόνο – του κτιρίου και της ενεργειακής κατανάλωσής του, αποδίδεται σε αυτό βάσει αλγόριθμου μια ενεργειακή ετικέτα (label). Αναλόγως, εξετάζοντας την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον και την εφαρμογή συγκεκριμένων ρυθμίσεων αποδίδεται μια περιβαλλοντική ετικέτα.

Το τρίτο μέρος και τέταρτο μέρος αποτελούν το κυρίως θέμα της συγκεκριμένης διατριβής. Αναλύεται το σύστημα υποστήριξης απόφασης, το οποίο θα αναλαμβάνει να προτείνει παρεμβάσεις για τη βελτίωση της ενεργειακής κατάστασης του κτιρίου. Θα παρουσιαστούν δυο προσεγγίσεις. Η πρώτη αφορά σε μια λύση βασιζόμενη σε μεθόδους πολυκριτήριας ανάλυσης και η δεύτερη βασίζεται στη μαθηματική θεωρία του Bayes για το μοντέλο συστήματος απόφασης, εμπλουτισμένο σε καίρια σημεία του με τη χρήση ασαφούς λογικής (fuzzy logic). Επιπλέον θα αναλυθούν προσεγγίσεις οι οποίες εγκαταλείφθηκαν και οι λόγοι γιατί.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι κύριο σκοπό της εργασίας αποτελούν όσα αναλυθούν για τη σχεδίαση, μελέτη, ανάπτυξη και εκτίμηση αποτελεσμάτων του συστήματος υποστήριξης απόφασης. Τα σημεία που αναφέρονται στο πληροφοριακό σύστημα και στις διαδικασίες πιστοποίησης υπάρχουν για να περιγράψουν την συνολική λειτουργικότητα εποπτικά και να συνδεθούν με τη λειτουργία του συστήματος απόφασης. Οι περιγραφές στα θέματα σχεδιασμού γίνονται αναφορικά με εργασίες του Πανεπιστημίου Αθηνών και του Πολυτεχνείου Κρήτης, οι οποίοι εμπλέκονται στο συγκεκριμένο ερευνητικό έργο.

2. Η ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

2.1 Το σύστημα Ενεργειακής και Περιβαλλοντικής Διαχείρισης Κτιρίων

Τα τελευταία χρόνια οι διαθέσιμοι πόροι ενέργειας μειώνονται, με σκοπό η παραγωγή και διάθεσή της να γίνεται δυσκολότερη και ακριβότερη. Επίσης, η ανάπτυξη της τεχνολογίας, αλλά και η επιβάρυνση του περιβάλλοντος επιτάσσουν την ανάγκη για ορθή διαχείριση της ενέργειας και των ενεργειακών πόρων σε παγκόσμια κλίμακα.

Στον άξονα αυτόν κινούνται τα Συστήματα Ενεργειακής και Περιβαλλοντικής Διαχείρισης των Κτιρίων. Λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνικές προδιαγραφές και ιδιαιτερότητες του κάθε κτιρίου, εξασφαλίζουν στους σύγχρονους χώρους κατοικίας ή εργασίας αυτοματοποιημένους μηχανισμούς που ρυθμίζουν τόσο τις ενεργειακές όσο και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, βελτιώνοντας αισθητά το βιοτικό επίπεδο των ανθρώπων που διαβιούν ή εργάζονται σε αυτό.

Η μελέτη, η σχεδίαση και ανάπτυξη Ηλεκτρονικών Συστημάτων Ενεργειακής και Περιβαλλοντικής Διαχείρισης έχει στόχο την ορθολογική διαχείριση των κτιρίων και τη μείωση της ενεργειακής τους κατανάλωσης.

Ειδικότερα, τα Συστήματα Ενεργειακής και Περιβαλλοντικής Διαχείρισης των Κτιρίων εξασφαλίζουν τη βέλτιστη ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση κάθε κτιρίου ενώ παρέχουν σε όλους τους χρήστες του κτιρίου:

- θερμική άνεση (κλιματισμός)
- οπτική άνεση (φωτισμός)
- άριστη ποιότητα εσωτερικού αέρα (εξαερισμός)
- ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας για κλιματισμό, φωτισμό, εξαερισμό.

Το παρόν έργο που φέρει τον τίτλο «Ολοκληρωμένο Σύστημα για την Ηλεκτρονική Διαχείριση του Εσωτερικού Περιβάλλοντος και της Ενέργειας στα κτίρια» εντάσσεται στα πλαίσια του Επιχειρησιακού Προγράμματος

Ανταγωνιστικότητα του Υπουργείου Ανάπτυξης, χρηματοδοτείται από το Γ΄ Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης (2000 - 2006) και τελεί υπό την καθοδήγηση και την εποπτεία της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας (Γ.Γ.Ε.Τ.).

Το προϊόν με την επωνυμία «e-building» θα αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση Ενεργειακής και Περιβαλλοντικής Διαχείρισης και Κατάταξης των Κτιρίων, το οποίο παραμετροποιείται πλήρως ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κάθε κτιρίου (κατάστημα, εμπορικό κέντρο, γραφείο, ξενοδοχείο, κτλ.).

Πυρήνα του Συστήματος αποτελεί το Λογισμικό το οποίο ενοποιεί τους μηχανισμούς διαχείρισης του Συστήματος, με ιδιαίτερη έμφαση στις σύγχρονες πρακτικές e-management που εξασφαλίζουν εύκολη και αποτελεσματική διαχείριση του κτιρίου μέσα από ένα φιλικό και άνετο internet περιβάλλον.

Το Σύστημα, συνολικά, θα έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει και να τακτοποιεί μεγάλο όγκο εισερχομένων δεδομένων, να παράγει και να αποστέλλει αναφορές, να πιστοποιεί και να κατατάσσει ενεργειακά και περιβαλλοντικά το κτίριο ανάλογα με την ετήσια ενεργειακή του κατανάλωση, καθώς και να προτείνει εναλλακτικά σενάρια βελτίωσης των συνθηκών που επικρατούν μέσω ενός εξελιγμένου Συστήματος Υποστήριξης Απόφασης (Σ.Υ.Α). Οι λειτουργίες θα περιγραφούν αναλυτικά παρακάτω.

Το «e-building» θα προσανατολίζεται κυρίως στη διαχείριση του εσωτερικού περιβάλλοντος και στην εξασφάλιση άνεσης στους χρήστες.

2.2 Ανάλυση των απαιτήσεων

Η πρώτη μέριμνα του συστήματος θα είναι να συλλέγει τα δεδομένα τα οποία καταφθάνουν μέσω διαδικτύου και προέρχονται από τους εγκατεστημένους στα κτίρια αισθητήρες. Οι αισθητήρες καταγράφουν πληροφορία σχετικά με τα φυσικά μεγέθη που αφορούν στο εσωτερικό περιβάλλον του κτιρίου (θερμοκρασία, CO₂, κλπ), καθώς και στην καταναλισκόμενη ενέργεια. Η πληροφορία θα καταφθάνει με συγκεκριμένη συχνότητα, ενώ ο συνδυασμός των δεδομένων επί του συνόλου των αισθητήρων θα εξάγει συμπεράσματα για την εσωτερική και ενεργειακή κατάσταση του κτιρίου.

Τα δεδομένα θα αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων, η οποία είναι απαραίτητη για την ορθή ταξινόμηση και μετέπειτα επεξεργασία τους. Εκεί θα αποθηκεύονται τα δεδομένα των μετρήσεων, του εγκατεστημένου εξοπλισμού και οι φυσικές παράμετροι όλων των κτιρίων ξεχωριστά, τα οποία διαχειρίζεται η εφαρμογή. Αφού το υπό εξέταση κτίριο πιστοποιηθεί ενεργειακά και περιβαλλοντικά βάσει των παραμέτρων και ορίων που έχουν οριστεί, θα δίνεται η δυνατότητα καταγραφής και αποστολής των σχετικών αναφορών σχετικά με τις καταστάσεις και στάθμες. Επιπλέον, αναλόγως της τρέχουσας ενεργειακής κατάστασης, των γεωγραφικών και φυσικών δεδομένων θα διαμορφώνεται μια πρόταση

εναλλακτικών παρεμβάσεων, οι οποίες παράγονται από το Σύστημα Υποστήριξης Απόφασης ειδικά και ξεχωριστά για το εκάστοτε κτίριο.

2.3 Βασικές λειτουργίες του πληροφοριακού συστήματος

2.3.1 Προδιαγραφές

Η εφαρμογή που πρόκειται να αναπτυχθεί θα παρακολουθεί online τα κτιριακά συγκροτήματα και θα έχει σαν κύρια λειτουργία την παροχή 2 certificates.

- energy certificate που αφορά την ενεργειακή κατάσταση στο εκάστοτε κτίριο
- environment certificate που αφορά την επιβάρυνση στο περιβάλλον και την υιοθέτηση περιβαλλοντικών κανονισμών.

Σε ότι αφορά το πρώτο, τα δεδομένα έρχονται σαν είσοδος στην εφαρμογή μέσω sensors εγκατεστημένα στο κτίριο. Μετά από επεξεργασία υπολογίζεται η συνολική ενεργειακή κατάσταση του κτιρίου.

Κύρια σημεία είναι

1. Ο παραπάνω υπολογισμός σε σύγκριση με αριθμητικές στάθμες (Ενεργειακή κατάσταση/κτιριακός επιφάνεια) - που ορίζονται από κοινοτική οδηγία - ,έχει ως αποτέλεσμα το labeling του κτιρίου σε ενεργειακές κατηγορίες ($A > B > C > D > E$ αναλόγως την κατάσταση του, με E την μέγιστη επιτρεπτή ενεργειακή στάθμη).
2. Ο όρος 'ενεργειακή κατάσταση' στο κτίριο καθορίζεται μόνο από τους εξής 3 παράγοντες :

- α) θερμική άνεση
- β) οπτική άνεση
- γ) ποιότητα αέρα

Πέρα από την απλή κατάταξη(labeling) του κτιρίου σε ενεργειακές κατηγορίες, θα παρέχεται η δυνατότητα online πρότασης εναλλακτικών σεναρίων στον διαχειριστή του κτιρίου μέσω ενός Συστήματος Υποστήριξης Απόφασης. Το Σ.Υ.Α θα αναλαμβάνει δράση στις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Υποχρεωτικά όταν το κτίριο βρίσκεται πάνω από τη στάθμη E, οπότε ξεφεύγει από τα επιτρεπτά όρια.
2. Προαιρετικά, όταν ο διαχειριστής επιθυμεί αναβάθμιση της κατηγορίας του κτιρίου, π.χ από C σε A.

Τα εν λόγω σενάρια αφορούν ενεργειακές παρεμβάσεις στο κτίριο πάνω στη βελτίωση αποκλειστικά των 3 προαναφερθέντων παραγόντων.

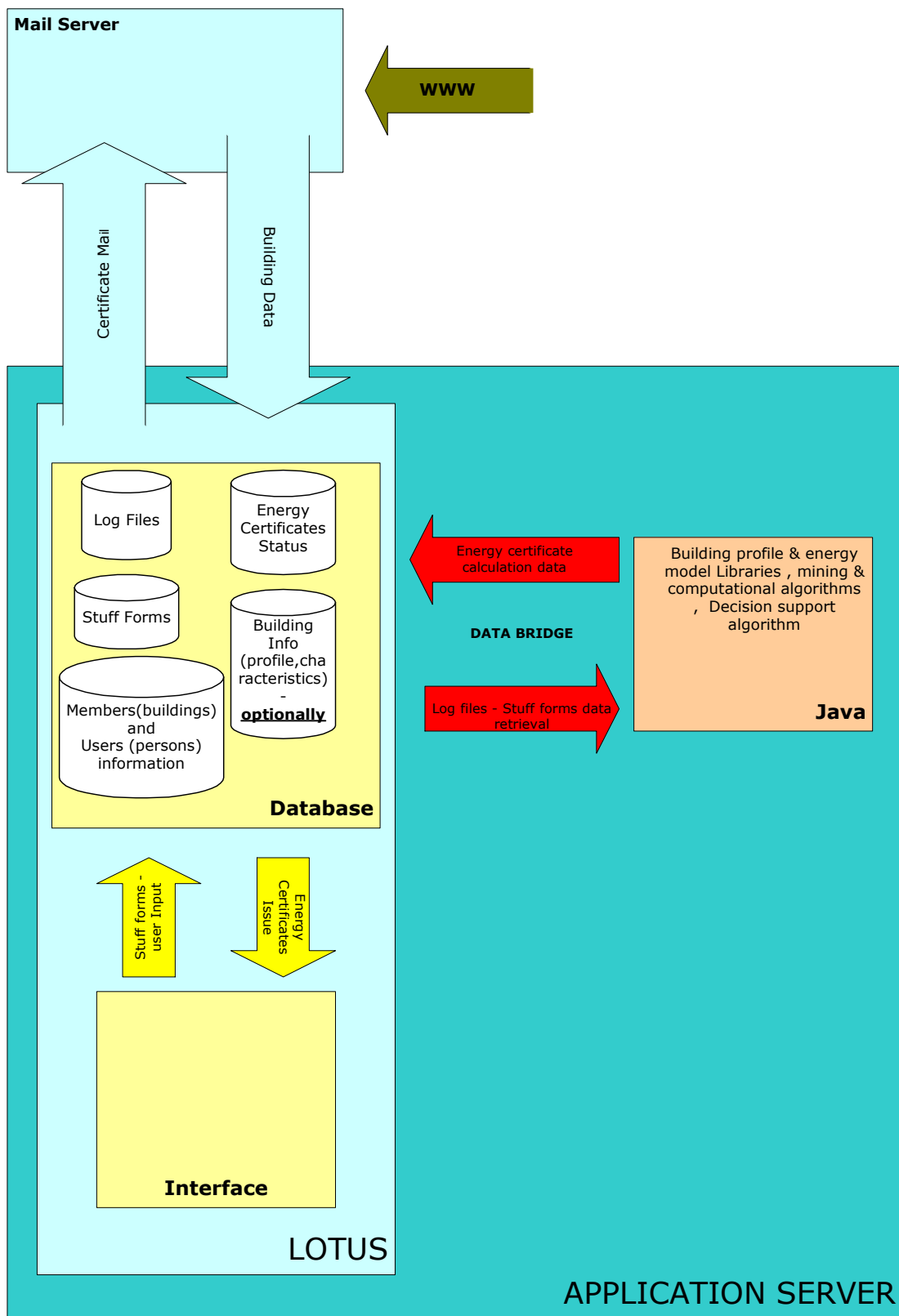
2.3.2 Περιγραφή

Για την υλοποίηση του συστήματος της e-διαχείρισης θα αναπτυχθεί λογισμικό. Οι πλατφόρμες υλοποίησης θα είναι η οικογένεια των εργαλείων Lotus™, σε συνδυασμό πιθανότατα με τη J2EE™.

Τα κύρια μέρη της συνολικής εφαρμογής λογισμικού θα είναι:

1. Η βάση δεδομένων, όπου θα κρατούνται όλες οι πληροφορίες για τα κτίρια
2. Το interface
3. Λογισμικό σε Java

Τα 1 & 2 θα υλοποιηθούν στο περιβάλλον ανάπτυξης της Lotus. Όλα τα μέρη θα ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους και θα λειτουργούν στο κοινό περιβάλλον ενός application server. Αυτά φαίνονται στ Σχήμα 1:



Σχήμα 1. Το συνολικό λειτουργικό διάγραμμα.

Στους παρακάτω πίνακες επεξηγούνται οι λειτουργίες των 3 μερών, καθώς και οι πηγές των δεδομένων των οποίων κάνουν χρήση:

Πίνακας 1. Database	
<u>FUNCTIONALITY</u>	<u>SOURCE</u>
Log files(sensors measurements) storage	e-mail
3 energy certificates status storage	Java software
Stuff forms data storage	Interface
Buildings profile & energy model storage (optional)	Interface
Member Buildings & User Information Storage	Administrator

Πίνακας 2. Interface	
<u>FUNCTIONALITY</u>	<u>SOURCE</u>
Energy Certificate status representation	Database
Stuff forms fill-in	User input
Energy certificate e-mailing	User input

Πίνακας 3. Software	
<u>FUNCTIONALITY</u>	<u>SOURCE</u>
Retain building characteristics, profile & energy model	Inner Libraries
Log files data processing	Database
Stuff forms data processing	Database
Energy certificate calculation	Inner Libraries

Decision support system	Inner Libraries
-------------------------	-----------------

2.4 Η Βάση Δεδομένων

2.4.1 Το υποσύστημα Διαχείρισης Δεδομένων

Τα δεδομένα τα οποία θα αποθηκεύονται και θα συλλέγονται σχετικά με την εφαρμογή του «e-building» θα οργανωθούν σε βάση δεδομένων.

Η πληροφορία που θα καταχωρείται στη βάση, αφορά πιο συγκεκριμένα:

- Δεδομένα ταυτότητας των χρηστών της εφαρμογής (κτίρια & διαχειριστές) .
- Φυσικά χαρακτηριστικά των κτιρίων (επιφάνεια, κατηγορία χρήσης, κλπ.) .
- Δεδομένα σχετικά με τους αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι σε κάθε κτίριο και τα χαρακτηριστικά τους.
- Μετρήσεις που παράγονται από τους αισθητήρες και αφορούν σε συγκεκριμένο κτίριο, μετρούμενο μέγεθος και περίοδο μέτρησης.
- Δεδομένα των ενεργειακών καταναλώσεων και πιστοποιήσεων για κάθε κτίριο.
- Δεδομένα των περιβαλλοντικών εκτιμήσεων και πιστοποιήσεων για κάθε κτίριο.
- Δεδομένα που αφορούν τα εναλλακτικά σενάρια βελτίωσης, τις εκτιμήσεις των στο εκάστοτε κτίριο και οι προτεινόμενες λύσεις που παρέχει το σύστημα υποστήριξης απόφασης.

Σκοπός είναι η σωστή και οικονομική διαχείριση των δεδομένων και στοιχείων, αλλά και η εξαγωγή χρήσιμης πληροφορίας μέσω της βάσης για τις ανάγκες του πληροφοριακού συστήματος. Προς το παρόν, θα περιγραφεί ο σχεδιασμός και η αρχιτεκτονική, ώστε να οργανωθούν με το βέλτιστο τρόπο τα δεδομένα που περιγράφηκαν.

2.4.2 Το Σχεσιακό Μοντέλο & το Διάγραμμα Οντοτήτων –Συσχετίσεων (Entity-Relation). Αρχική Προσέγγιση

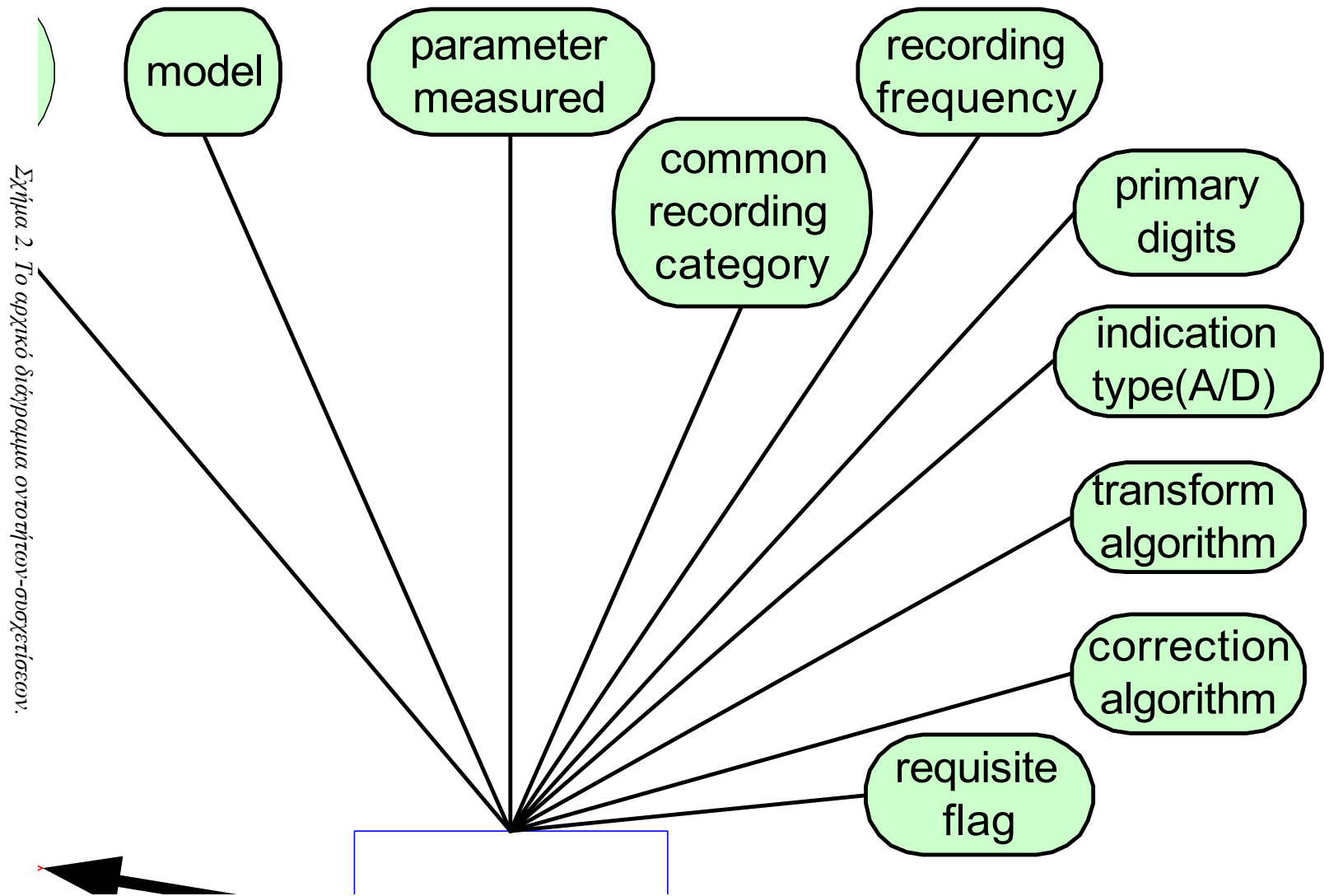
Κύρια δομή περιγραφής της πληροφορίας είναι η οντότητα (entity). Είναι αντικείμενο του οποίου τα χαρακτηριστικά έχουν διακριτή ύπαρξη σε σχέση με τα υπόλοιπα αντικείμενα [2]. Μια οντότητα περιγράφεται μέσω ενός συνόλου γνωρισμάτων τα οποία την χαρακτηρίζουν.

Η διακριτικότητα που επιτυγχάνεται με τη χρήση οντοτήτων, στην ομαδοποίηση δεδομένων, δεν αφορά απαραίτητα στο ότι είναι ξένα (ορθογώνια) μεταξύ τους [1].

Δηλαδή, κάποιες εγγραφές γνωρισμάτων σε διαφορετικές οντότητες μπορούν να είναι ίδιες.

Επιλέγοντας τα γνωρίσματα κάθε μιας οντότητας, καθορίζουμε το είδος, τη λεπτομέρεια και το εύρος της πληροφορίας που μας ενδιαφέρει στη συγκεκριμένη περίπτωση. Δύο ή περισσότερες οντότητες διασυνδέονται με συσχέτιση (relationship). Έτσι επιτυγχάνεται ο συνδυασμός της πληροφορίας διαφορετικών οντοτήτων.

Βάσει των προηγούμενων κανόνων σχεδιάστηκε το αρχικό διάγραμμα οντοτήτων – συσχετίσεων (E-R diagram) που φαίνεται στο Σχήμα 2. Κάθε οντότητα έχει ένα κύριο κλειδί που ορίζεται με το όνομα της οντότητας και το παράθεμα “id”. Κύριο κλειδί αποτελεί το γνώρισμα που προσδιορίζει μονοσήμαντα κάθε μια οντότητα στο σύνολο. Στο διάγραμμα οντοτήτων-συσχετίσεων κάθε σύνολο οντοτήτων αναπαρίσταται με ορθογώνιο, τα γνωρίσματά της με ελλείψεις και τα σύνολα συσχετίσεων με ρόμβο. Τα κύρια κλειδιά είναι υπογραμμισμένα.



Σχήμα 2. Το αρχικό διάγραμμα οντοτήτων-συσχετίσεων.

2.4.3 Το Διάγραμμα Οντοτήτων –Συσχετίσεων. Δεύτερη Προσέγγιση

Τα σημεία που εκκρεμούν από την αρχική σχεδίαση είναι :

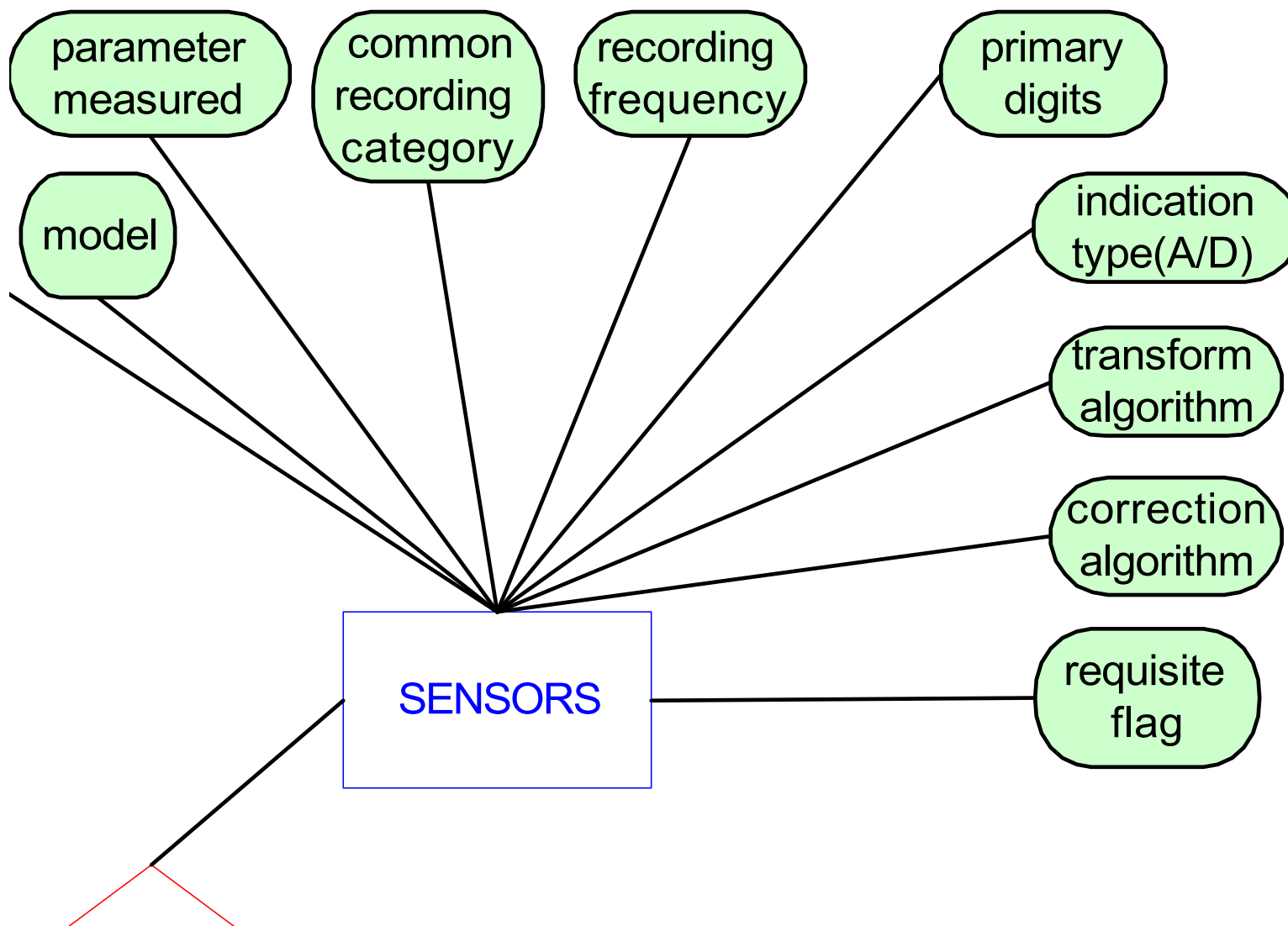
1. ο τρόπος που θα διαχειριστεί η πληροφορία που ανήκει στις επιμέρους ζώνες του κτιρίου. Θα πρέπει να αποτελούν είτε γνώρισμα είτε Weak entity [3].
2. Η ύπαρξη του γνωρίσματος “transform Algorithm” στην entity “Sensors”. Αν θα υπάρχει το συγκεκριμένο γνώρισμα δεν θα υπάρχει το “indication type”.
3. Οι στατικές πληροφορίες που χρειάζεται η εφαρμογή, όπως για παράδειγμα τα ονόματα των εναλλακτικών σεναρίων, τα ονόματα των περιβαλλοντικών ερωτήσεων, κλπ., θα ανήκουν σε μια βιβλιοθήκη δεδομένων του πληροφοριακού συστήματος εφόσον δεν αλληλεπιδρούν με τα στοιχεία του Entity-Relation διαγράμματος.

Επομένως :

1. Οι ζώνες πρέπει να αποτελούν weak entity και είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός των αισθητήρων (διαχωρισμός διαθέσιμων τύπων). Η οντότητα "ZONE" θα έχει το γνώρισμα "ZONE NAME" αλλά δεν θα είναι κύριο κλειδί.
2. Κάθε ζώνη αντιστοιχεί σε μοναδικό κτίριο. Επομένως κάθε στοιχείο της οντότητας "INSTALLED SENSORS" αναφέρεται σε συγκεκριμένη ζώνη συγκεκριμένου κτιρίου.
3. Η οντότητα "SENSORS" αν παραμείνει θα χρησιμεύει στο να κρατάει τους τύπους των διαθέσιμων αισθητήρων. Εάν συνδεθεί με μια νέα οντότητα "INSTALLED SENSORS" θα είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά κάθε εγκατεστημένου αισθητήρα, βάσει του τύπου του.
4. Η "Κατηγορία" πρέπει να είναι γνώρισμα της ζώνης και όχι του κτιρίου αφού κάποια ζώνη μέσα στο κτίριο μπορεί να έχει διαφορετική χρήση.

Δεδομένων των όσων αναφέρθηκαν προέκυψε η δεύτερη έκδοση του E-R διαγράμματος :

Σχήμα 3. Το διάγραμμα ομοτιών-συσχετίσεων – Δεύτερη Προσέγγιση.



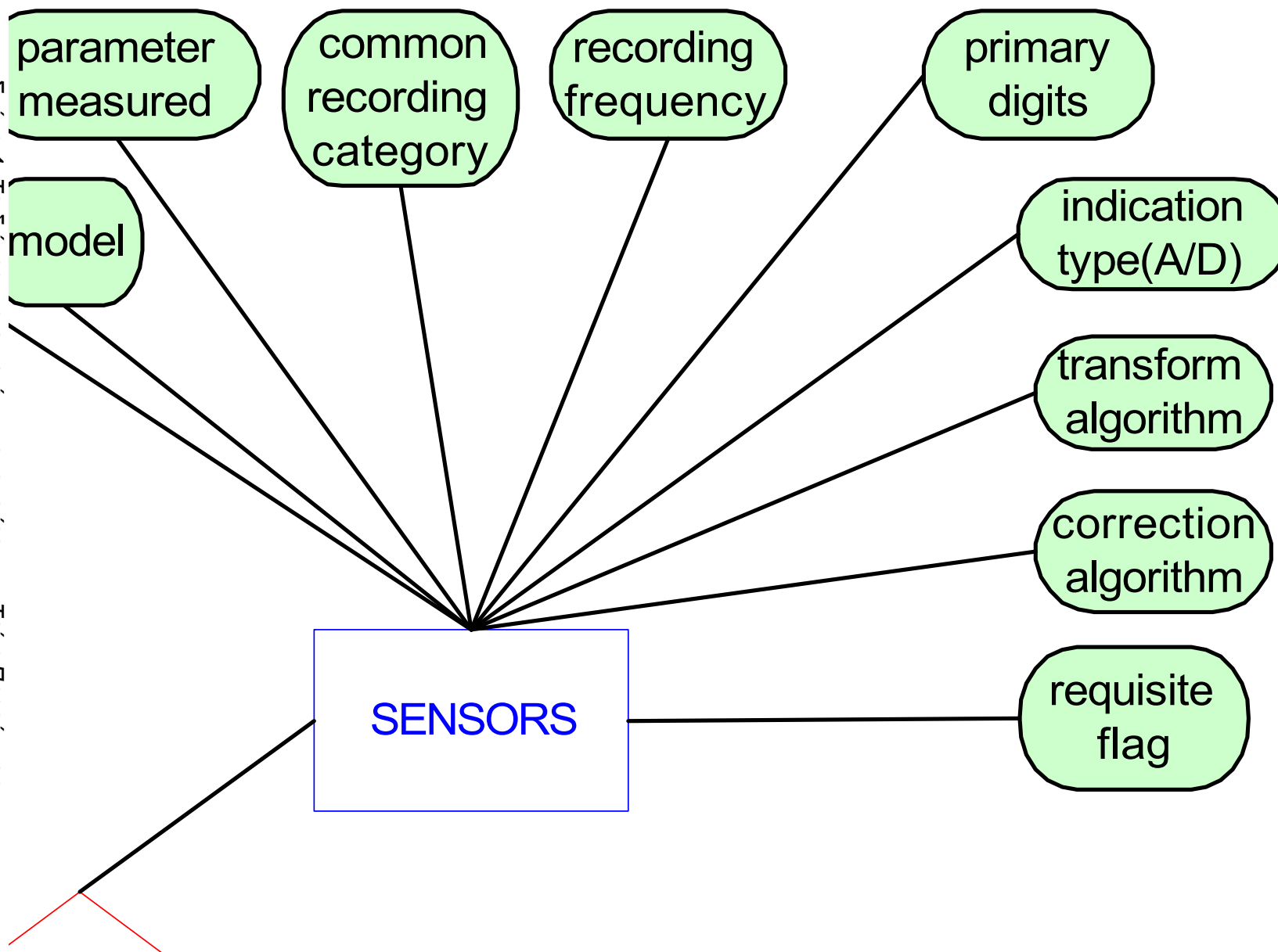
2.4.4 Το Διάγραμμα Οντοτήτων –Συσχετίσεων. Τρίτη Προσέγγιση

Για τη δεύτερη προσέγγιση υπήρξαν μερικές σχεδιαστικές αντιρρήσεις :

1. Ορθά η οντότητα για τις ζώνες δεν πρέπει να είναι main entity. Αφού όμως κάθε ζώνη πρέπει να αναφέρεται σε μοναδικό εγκατεστημένο αισθητήρα, τότε για να διαχωρίζεται που αναφέρονται οι ενδείξεις τα στοιχεία του συνόλου οντοτήτων "ZONE" θα αναφέρονται τόσες φορές όσες και τα διαφορετικά κτίρια που φιλοξενούνται στη βάση. Έτσι μόνο μπορούν να απομονωθούν οι ενδείξεις των αισθητήρων σε κάθε ζώνη κτιρίου. Αυτό επιτυγχάνεται χωρίς να τεθεί κύριο κλειδί στην αδύναμη οντότητα, αλλά με τους περιορισμούς συμμετοχής (παχύ-έντονο βέλος) χάνεται το πλεονέκτημα οικονομίας που προσφέρει μια αδύναμη οντότητα, να αποτελούσε δηλαδή τη μόνη καταγραφή των διαθέσιμων ζωνών και ο μονοσήμαντος προσδιορισμός με το κύριο κλειδί της main entity "BUILDING" (είναι δυνατόν να υπάρχουν ζώνες με το ίδιο όνομα, αλλά η μοναδικότητά τους έγκειται στο κτίριο στο οποίο ανήκουν). Αυτό θα διορθωνόταν αν δημιουργούνταν μια οντότητα "ZONE READINGS" για να φιλοξενεί τις ενδείξεις κάθε ζώνης. Το σχέδιο όμως τότε θα περιπλεκόταν αρκετά.
2. Στη διεθνή βιβλιογραφία εν γενεί αποφεύγεται η χρήση αδύναμων οντοτήτων, αφού στην ύπαρξη συσχετίσεων (relations) μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα απουσία κύριου κλειδιού.
3. Οι συσχετίσεις των αισθητήρων και των ενδείξεων με τις ζώνες είναι απαραίτητες, όμως οι ίδιες συσχετίσεις με την προσδιορίζουσα ιδιοκτήτρια οντότητα ("BUILDING") – παρόλο που μπορεί να χρησιμεύσουν – αποτελούν σχεδιαστικό πλεονασμό.

Τα παραπάνω αντιμετωπίστηκαν με ένα νέο διάγραμμα (Σχήμα 4) όπου κύριο σημείο είναι τριαδική συσχέτιση "OPERATES_IN".

Σχήμα 4. Το διάγραμμα οντοτήτων-συσχετίσεων – Τρίτη Πρόσγγιση.



2.4.5 Ανάλυση του Σχεδιασμού

Η βάση δεδομένων *απαρτίζεται από 9 οντότητες:*

1. BUILDING: Εδώ καταχωρούνται όλα τα στοιχεία κτιρίων-χρηστών. Γνωρίσματα είναι η γεωγραφική περιοχή, η επιφάνεια, η ύπαρξη μόνωσης ή όχι, το πλήθος των ορόφων, τα στοιχεία του διαχειριστή, η διεύθυνση, το είδος της συνδρομής που έχει στις πληροφοριακές υπηρεσίες του ebuilding (επίπεδο πρόσβασης, κλπ) και η διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.
2. SENSORS: Αποτελεί το σύνολο οντοτήτων των διαθέσιμων τύπων αισθητήρων με τους οποίους εξοπλίζονται τα κτίρια. Τα γνωρίσματα είναι το μοντέλο του κατασκευαστή, το φυσικό μέγεθος το οποίο μετρά ο αισθητήρας (θερμοκρασία, CO₂, κλπ), η κατηγορία κοινής συχνότητας δειγματοληψίας, η συχνότητα καταγραφής, τα σημαντικά ψηφία των μετρήσεων, η φύση των ενδείξεων που δίνει (αναλογικές / ψηφιακές), ο αλγόριθμος διόρθωσης σφαλμάτων, ο αλγόριθμος μετατροπής (σε περίπτωση που οι ενδείξεις του αισθητήρα αντιστοιχούν σε ηλεκτρικά σήματα) και η παράμετρος που δηλώνει αν το φυσικό μέγεθος που μετρά ο αισθητήρας ανήκει στις ομάδες των υποχρεωτικών ή προαιρετικών μετρούμενων μεγεθών σε κτίρια.
3. INSTALLED SENSORS: Αποτελεί το σύνολο οντοτήτων των εγκατεστημένων αισθητήρων στα κτίρια. Το γνώρισμά είναι ο σειριακός αριθμός του αισθητήρα.
4. ZONE: Εδώ αποθηκεύονται οι ζώνες που αντιστοιχούν σε κάθε κτίριο. Γνωρίσματα είναι η κατηγορία χρήσης στην οποία ανήκει (σχολείο, χώρος γραφείων κτλ) και η περίοδος λήψης μετρήσεων μέσα στην ημέρα.
5. UNPROCESSED READINGS: Σε αυτό το σύνολο οντοτήτων αποθηκεύονται οι ενδείξεις που δίνουν οι αισθητήρες. Τα γνωρίσματα είναι η τιμή της ένδειξης, και η μονάδα μέτρησης.
6. PROCESSED READINGS: Σε αυτό το σύνολο οντοτήτων αποθηκεύονται οι ενδείξεις μετά την επεξεργασία και διόρθωση σφαλμάτων. Τα γνωρίσματα είναι η τιμή μετά την διόρθωση και η μέση τιμή.
7. ENVIRONMENT CERTIFICATE: Είναι ο τρόπος καταχώρησης των περιβαλλοντικών πιστοποιήσεων. Γνωρίσματα είναι τα σκορ του εκάστοτε κτιρίου στους περιβαλλοντικούς παράγοντες, η συνολική αξιολόγηση και η περιβαλλοντική κατάταξη του κτιρίου.

8. ENERGY CERTIFICATE: Αναλόγως με το “ENVIRONMENT CERTIFICATE”, αποθηκεύει την ενεργειακή κατανάλωση για ψύξη και θέρμανση, την ενεργειακή αξιολόγηση και την τελική ενεργειακή κατάταξη.
9. PROPOSAL: Πρόκειται για το σύνολο οντοτήτων που παρέχει το σύστημα υποστήριξης απόφασης. Γνωρίσματα είναι οι εκτιμήσεις των διαθέσιμων εναλλακτικών σεναρίων για εκάστοτε κτίριο και η προτεινόμενη ομάδα λύσεων.

Οι συσχετίσεις μεταξύ των οντοτήτων είναι 6:

10. Η τριαδική συσχέτιση ‘operates_in’ μεταξύ ‘BUILDING’, ‘INSTALLED SENSORS’ και ‘SENSORS’.
11. Η ‘indicated’ μεταξύ ‘UNPROCESSED READINGS’ και ‘SENSORS’ έχοντας το γνώρισμα ‘date-time’.
12. Η ‘processed’ μεταξύ ‘PROCESSED READINGS’ και ‘INSTALLED SENSORS’ έχοντας το γνώρισμα ‘date’.
13. Η ‘energy certified’ μεταξύ ‘BUILDING’ και ‘ENERGY CERTIFICATE’ έχοντας το γνώρισμα ‘date of issue’.
14. Η ‘environment certified’ μεταξύ ‘BUILDING’ και ‘ENVIRONMENT CERTIFICATE’ έχοντας το γνώρισμα ‘date of issue’.
15. Η ‘decision support’ μεταξύ ‘BUILDING’ και ‘PROPOSAL’ έχοντας το γνώρισμα ‘date of issue’.

2.4.6 Περιορισμοί Κλειδιού και Περιορισμοί Συμμετοχής

Εάν μία οντότητα συμμετέχει το πολύ μία φορά σε μία συσχέτιση, για το όποιο επιτρεπτό στιγμιότυπο του συνόλου συσχετίσεων, τότε υπόκειται σε περιορισμό κλειδιού. (βέλος από το σύνολο οντοτήτων προς το σύνολο συσχετίσεων στο E-R διάγραμμα).

Εάν μία οντότητα συμμετέχει υποχρεωτικά μία φορά σε μία συσχέτιση, για το όποιο επιτρεπτό στιγμιότυπο του συνόλου συσχετίσεων, τότε υπόκειται σε περιορισμό συμμετοχής. Η οντότητα λέγεται ότι έχει ολική συμμετοχή στο σύνολο συσχετίσεων (παχιά / έντονη γραμμή από το σύνολο οντοτήτων προς το σύνολο συσχετίσεων στο E-R διάγραμμα).

Επομένως :

- Κάθε κτίριο έχει τουλάχιστον ένα εγκατεστημένο αισθητήρα
- Κάθε εγγραφή αισθητήρα αντιστοιχεί σε μοναδικό κτίριο
- Κάθε αισθητήρας έχει τουλάχιστον μία ένδειξη

- Κάθε εγγραφή ένδειξης αντιστοιχεί σε μοναδικό αισθητήρα
- Κάθε κτίριο δύναται να μην έχει εκδώσει περιβαλλοντικό ή ενεργειακό πιστοποιητικό, είναι όμως δυνατό να έχει πολλά πιστοποιητικά (σε διαφορετικές ημερομηνίες)
- Κάθε κτίριο δύναται να μην έχει ζητήσει προτεινόμενες λύσεις, είναι όμως δυνατό να έχει πολλές προτάσεις (σε διαφορετικές ημερομηνίες)

2.5 Λειτουργικότητα της Βάσης Δεδομένων και η Σχέση με το Διάγραμμα Οντοτήτων – Συσχετίσεων

Το E-R διάγραμμα σχεδιάστηκε με τρόπο ώστε τα δεδομένα που καταχωρούνται σχηματίζουν σε επίπεδο διαχωρισμού στις παρακάτω δομικές ομάδες:

1. Τα δεδομένα για τις προτεινόμενες από το σύστημα υποστήριξης απόφασης λύσεις σε δεδομένες ημερομηνίες, συνδυάζονται με τα δεδομένα για το κτίριο στο οποίο αντιστοιχούν(συσχέτιση 'decision support').
2. Τα δεδομένα για ενεργειακά και περιβαλλοντικά πιστοποιητικά που εκδόθηκαν σε δεδομένες ημερομηνίες, συνδυάζονται με τα δεδομένα για το κτίριο στο οποίο αντιστοιχούν(συσχετίσεις 'energy certified', 'environment certified').
3. Οι ενδείξεις κάθε αισθητήρα σε δεδομένες χρονικές στιγμές, συνδυάζονται με τα δεδομένα για τη ζώνη και το κτίριο το οποίο έχει εγκατεστημένο το συγκεκριμένο αισθητήρα(συσχετίσεις 'operates_in', 'indicated', 'processed').

Προαιρετικά, στο διάγραμμα έχει εισαχθεί η οντότητα 'SUMMARY READINGS' η οποία συνδέεται μέσω της συσχέτισης 'statistics' με την οντότητα 'BUILDING'. Κατά αυτόν τον τρόπο παρέχεται η δυνατότητα στατιστικών μετρήσεων ανά κτίριο και ανά ενεργειακό παράγοντα βάσει των συνολικών ενδείξεων των αντίστοιχων αισθητήρων.

3. ΟΙ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

3.1 Η Ενεργειακή Πιστοποίηση

Η κύρια λειτουργία του «e-building» θα είναι όπως αναφέρθηκε η έκδοση ενεργειακού και περιβαλλοντικού πιστοποιητικού για τα κτίρια που εξετάζει.

Η μεθοδολογία ενεργειακής κατάταξης των κτιρίων βασίζεται σε καταγραφές πραγματικών ενεργειακών καταναλώσεων οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε διαφόρους τύπους κτιρίων και αφορούν στις επιμέρους καταναλώσεις που συνθέτουν τη συνολική κατανάλωση σε ένα κτίριο (στην θέρμανση, στην ψύξη και στον φωτισμό), αλλά δίνεται η δυνατότητα ενεργειακής κατάταξης και για επιμέρους καταναλώσεις (π.χ. σε μη κλιματιζόμενα κτίρια μόνο με το σύνολο της κατανάλωσης για θέρμανση και φωτισμό ή μόνο με την συνολική κατανάλωση για θέρμανση).

Το εκάστοτε κτίριο κατατάσσεται σε μία από πέντε προτεινόμενες κατηγορίες με βάση την ενεργειακή του κατανάλωση. Ο καθορισμός των ορίων σε βασίζεται – σε συνδυασμό με τις πραγματικές καταγραφές – στις νεότερες εξελίξεις σε ότι αφορά στην ανάπτυξη κοινών ευρωπαϊκών προτύπων στα πλαίσια της κοινοτικής οδηγίας για την ενεργειακή αποδοτικότητα των κτιρίων.

Για την πλήρη ανάλυση της μελέτης και του σχεδιασμού της διαδικασίας και των ορίων ενεργειακής πιστοποίησης, ο αναγνώστης παραπέμπεται στη σχετική αναφορά του Ινστιτούτου Επιταχυντικών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αθηνών [7]. Για τις ανάγκες της διατριβής θα παρατεθούν μόνο οι πίνακες των ορίων, οι ενεργειακές κατηγορίες και η υλοποίηση σε λογισμικό.

Τα κτίρια ανάλογα με τη χρήση τους χωρίζονται σε κτίρια γραφείων, κατοικίες, ξενοδοχεία και σχολεία. Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα όρια των κατηγοριών κατάταξης τόσο για την θέρμανση, όσο και για την συνολική ενεργειακή κατανάλωση για τις παραπάνω κατηγορίες χρήσης.

Πίνακας 4. Κατοικίες – Όρια Ενεργειακών Κατηγοριών (kWh/m ² /έτος)		
Κατηγορία Κατάταξης	Θέρμανση	Θέρμανση+Ηλεκτρισμός
A	[0,139)	[0,191)
B	[139,199)	[191,226)
C	[199,270)	[226,336)
D	[270,376)	[336,419)
E	≥376	≥419

Πίνακας 5. Μη Κλιματιζόμενα Κτίρια Γραφείων – Όρια Ενεργειακών Κατηγοριών (kWh/m²/έτος)		
<u>Κατηγορία Κατάταξης</u>	<u>Θέρμανση</u>	<u>Θέρμανση+Ηλεκτρισμός</u>
A	[0,51)	[0,60)
B	[51,79)	[60,106)
C	[79,123)	[106,143)
D	[123,221)	[143,240)
E	≥221	≥240

Πίνακας 6. Κλιματιζόμενα Κτίρια Γραφείων – Όρια Ενεργειακών Κατηγοριών (kWh/m²/έτος)		
<u>Κατηγορία Κατάταξης</u>	<u>Θέρμανση</u>	<u>Θέρμανση+Ηλεκτρισμός</u>
A	[0,67)	[0,122)
B	[67,122)	[122,172)
C	[122,199)	[172,240)
D	[199,278)	[240,348)
E	≥278	≥348

Πίνακας 7. Μη Κλιματιζόμενα Ξενοδοχεία – Όρια Ενεργειακών Κατηγοριών (kWh/m²/έτος)		
<u>Κατηγορία Κατάταξης</u>	<u>Θέρμανση</u>	<u>Θέρμανση+Ηλεκτρισμός</u>
A	[0,99)	[0,120)
B	[99,172)	[120,187)
C	[172,276)	[187,299)
D	[276,419)	[299,437)
E	≥419	≥437

Πίνακας 8. Κλιματιζόμενα Ξενοδοχεία – Όρια Ενεργειακών Κατηγοριών (kWh/m²/έτος)		
<u>Κατηγορία Κατάταξης</u>	<u>Θέρμανση</u>	<u>Θέρμανση+Ηλεκτρισμός</u>
A	[0,94)	[0,188)
B	[94,189)	[188,274)
C	[189,305)	[274,377)
D	[305,421)	[377,494)
E	≥421	≥494

Πίνακας 9. Σχολικά Κτίρια – Όρια Ενεργειακών Κατηγοριών (kWh/m²/έτος)		
<u>Κατηγορία Κατάταξης</u>	<u>Θέρμανση</u>	<u>Θέρμανση+Ηλεκτρισμός</u>
A	[0,51)	[0,76)
B	[51,85)	[76,138)
C	[85,140)	[138,190)
D	[140,221)	[190,302)
E	≥221	≥302

Η ανάπτυξη λογισμικού που εκτελεί την ενεργειακή πιστοποίηση βάσει των παραπάνω πινάκων έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού Java. Ο κώδικας βρίσκεται στο παράρτημα Α.

3.2 Η Περιβαλλοντική Πιστοποίηση

Η μεθοδολογία περιβαλλοντικής κατάταξης των κτιρίων βασίζεται στην μεθοδολογία LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) η οποία αποτελεί την επίσημη μέθοδο περιβαλλοντικής κατάταξης των κτιρίων στις ΗΠΑ. Η μεθοδολογία που ακολουθεί είναι προσαρμογή της LEED στα ελληνικά δεδομένα και συνδέεται με την ενεργειακή κατάταξη των κτιρίων και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Για την πλήρη ανάλυση της μελέτης και του σχεδιασμού της διαδικασίας και των κριτηρίων της περιβαλλοντικής πιστοποίησης, ο αναγνώστης παραπέμπεται στη σχετική αναφορά του Ινστιτούτου Επιταχυντικών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αθηνών [6].

Για τις ανάγκες της διατριβής θα παρατεθούν μόνο οι πίνακες των περιβαλλοντικών ερωτήσεων και η υλοποίηση σε λογισμικό.

Η βαθμολόγηση του εκάστοτε κτιρίου βασίζεται σε μία σειρά από στοιχεία που συνθέτουν την συνολική περιβαλλοντική συμπεριφορά του κτιρίου και ομαδοποιούνται σε 5 βασικές κατηγορίες:

- Αειφορία της περιοχής
- Αποδοτικότητα διαχείρισης του νερού
- Ενέργεια και ατμόσφαιρα
- Υλικά και Πόροι
- Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος

Πίνακας 10. Περιβαλλοντική Κατάταξη – Κριτήρια που αφορούν την Αειφορία της Περιοχής	
<u>Καταχώρηση</u>	<u>Βαθμολογία</u>
Έλεγχος διάβρωσης και ιζηματογένεσης	2 Βαθμοί
Επιλογή περιοχής	1 Βαθμός
Πυκνότητα δόμησης	1 Βαθμός
Αναδιαμόρφωση μολυσμένων περιοχών	1 Βαθμός
Εναλλακτικοί τρόποι μεταφοράς [πρόσβαση στα μέσα μαζικής μεταφοράς]	1 Βαθμός
Εναλλακτικοί τρόποι μεταφοράς [φύλαξη ποδηλάτων και αποδυτήρια]	1 Βαθμός
Εναλλακτικοί τρόποι μεταφοράς [οχήματα εναλλακτικών καυσίμων]	1 Βαθμός
Εναλλακτικοί τρόποι μεταφοράς [χωρητικότητα χώρων στάθμευσης]	1 Βαθμός
Μειωμένη διαταραχή περιοχής [προστασία ή αποκατάσταση ανοιχτών χώρων]	1 Βαθμός
Διαχείριση όμβριων υδάτων [ρυθμός και ποσότητα]	1 Βαθμός
Διαχείριση όμβριων υδάτων [επεξεργασία]	1 Βαθμός
Φαινόμενο θερμικής νησίδας, [ανοικτοί χώροι]	1 Βαθμός
Φαινόμενο θερμικής νησίδας, [οροφές]	1 Βαθμός
Μείωση Οπτικής Μόλυνσης	1 Βαθμός

Πίνακας 11. Περιβαλλοντική Κατάταξη – Κριτήρια που αφορούν την Αποδοτικότητα Διαχείρισης Νερού	
<u>Καταχώρηση</u>	<u>Βαθμολογία</u>
Αποδοτική διαχείριση νερού [μείωση 50%]	1 Βαθμός

Αποδοτική διαχείριση νερού [χρήση μη πόσιμου νερού ή αποφυγή άρδευσης]	1 Βαθμός
Καινοτόμες τεχνολογίες επεξεργασίας απόβλητου ύδατος	1 Βαθμός
Μείωση χρήσης ύδατος [μείωση 20%]	1 Βαθμός
Μείωση χρήσης ύδατος [μείωση 30%]	1 Βαθμός

Πίνακας 12. Περιβαλλοντική Κατάταξη – Κριτήρια που αφορούν Ενεέργεια & Ατμόσφαιρα	
<u>Καταχώρηση</u>	<u>Βαθμολογία</u>
Έλεγχος του σχεδιασμού, της εγκατάστασης και της λειτουργίας των συστημάτων του κτιρίου	2 Βαθμοί
Ελάχιστη ενεργειακή απόδοση	2 Βαθμοί
Μείωση των CFC στα συστήματα θέρμανσης και ψύξης	2 Βαθμοί
Βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης	1-10 Βαθμοί
Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [5%]	1 Βαθμός
Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [10%]	1 Βαθμός
Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [20%]	1 Βαθμός
Προστασία του όζοντος	1 Βαθμός
Μετρήσεις και επαλήθευση	1 Βαθμός
Χρήση ενέργειας από ΑΠΕ	1 Βαθμός

Πίνακας 13. Περιβαλλοντική Κατάταξη – Κριτήρια που αφορούν Υλικά & Πόρους	
<u>Καταχώρηση</u>	<u>Βαθμολογία</u>
Φύλαξη και συλλογή ανακυκλώσιμων υλικών	2 Βαθμοί
Επαναχρησιμοποίηση κτιρίου [διατήρηση 75% του υπάρχοντος	1 Βαθμός

κελύφους]	
Επαναχρησιμοποίηση κτιρίου [διατήρηση 100% του υπάρχοντος κελύφους]	1 Βαθμός
Επαναχρησιμοποίηση κτιρίου [διατήρηση 100% του υπάρχοντος κελύφους και 50% των υπόλοιπων χώρων]	1 Βαθμός
Διαχείριση αποβλήτων κατασκευής [μείωση 50% των αποβλήτων που προορίζονται στους χώρους απόθεσης απορριμμάτων]	1 Βαθμός
Διαχείριση αποβλήτων κατασκευής [μείωση 50% των αποβλήτων που προορίζονται στους χώρους απόθεσης απορριμμάτων]	1 Βαθμός
Επαναχρησιμοποίηση πόρων [5%]	1 Βαθμός
Επαναχρησιμοποίηση πόρων [10%]	1 Βαθμός
Ανακυκλωμένα υλικά [5%]	1 Βαθμός
Ανακυκλωμένα υλικά [10%]	1 Βαθμός
Τοπικά ή/και εγγύς περιοχής υλικά [20% τοπικά κατασκευασμένα]	1 Βαθμός
Τοπικά ή/και εγγύς περιοχής υλικά [35% τοπικά κατασκευασμένα]	1 Βαθμός
Ταχέως ανανεώσιμα υλικά	1 Βαθμός

Πίνακας 14. Περιβαλλοντική Κατάταξη – Κριτήρια που αφορούν την Ποιότητα του Εσωτερικού Περιβάλλοντος	
<u>Καταχώρηση</u>	<u>Βαθμολογία</u>
Ελάχιστη απόδοση ποιότητας εσωτερικού αέρα	2 Βαθμοί
Έλεγχος καπνού τσιγάρων (ETS)	2 Βαθμοί
Παρακολούθηση επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂)	1 Βαθμός
Αποτελεσματικότητα αερισμού	1 Βαθμός

Υλικά χαμηλής εκμπεμπτικότητας [κολλητικά και στεγανωποιητικά]	1 Βαθμός
Υλικά χαμηλής εκμπεμπτικότητας [μπογιές, επικαλυπτικά]	1 Βαθμός
Υλικά χαμηλής εκμπεμπτικότητας [χαλιά, μοκέτες]	1 Βαθμός
Υλικά χαμηλής εκμπεμπτικότητας [συνθετικό ξύλο]	1 Βαθμός
Έλεγχος εσωτερικών πηγών χημικών και ρυπαντών	1 Βαθμός
Θερμική Άνεση [με βάση τα διεθνή πρότυπα]	1 Βαθμός
Θερμική Άνεση [μόνιμο σύστημα παρακολούθησης]	1 Βαθμός
Φυσικός φωτισμός και ορατό εξωτερικό πεδίο [φυσικός φωτισμός σε 75% των χώρων]	1 Βαθμός
Φυσικός φωτισμός και ορατό εξωτερικό πεδίο [ορατό εξωτερικό πεδίο για το 90% των χώρων]	1 Βαθμός

Πίνακας 15. Περιβαλλοντική Κατάταξη	
<u>Κατηγορία</u>	<u>Βαθμολογία</u>
A	54-71
B	41-53
C	31-40
D	19-30
E	0-18

Η ανάπτυξη λογισμικού που εκτελεί την περιβαλλοντική πιστοποίηση βάσει των παραπάνω πινάκων έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού Java. Ο κώδικας βρίσκεται στο παράρτημα Β.

4. Το Σύστημα Υποστήριξης Απόφασης

4.1 Γενικά

Μια από τις πιο σημαντικές λειτουργίες της πληροφοριακής εφαρμογής είναι η υλοποίηση του συστήματος υποστήριξης απόφασης (Σ.Υ.Α). Στη συνέχεια θα περιγραφούν οι παράμετροι τις οποίες θα λαμβάνει υπόψη και θα χρησιμοποιεί το Σ.Υ.Α, όλες οι προσεγγίσεις σχεδιασμού του και οι λόγοι που απορρίφθηκαν μέχρι την τελική μορφή.

4.2 Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος

Η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος στο κτίριο εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες [5]:

- Ενεργειακή κατανάλωση
- Θερμική & οπτική άνεση
- Ποιότητα αέρα

Η ενεργειακή κατανάλωση υπολογίζεται από την καμπύλη συνολικής κατανομής συχνότητας (cumulative frequency distribution). Αποτέλεσμα είναι το labeling του κτιρίου σε ενεργειακές κατηγορίες ($A > B > C > D > E$) αναλόγως την κατάσταση του, με E την ελάχιστη επιτρεπτή ενεργειακή στάθμη) [7].

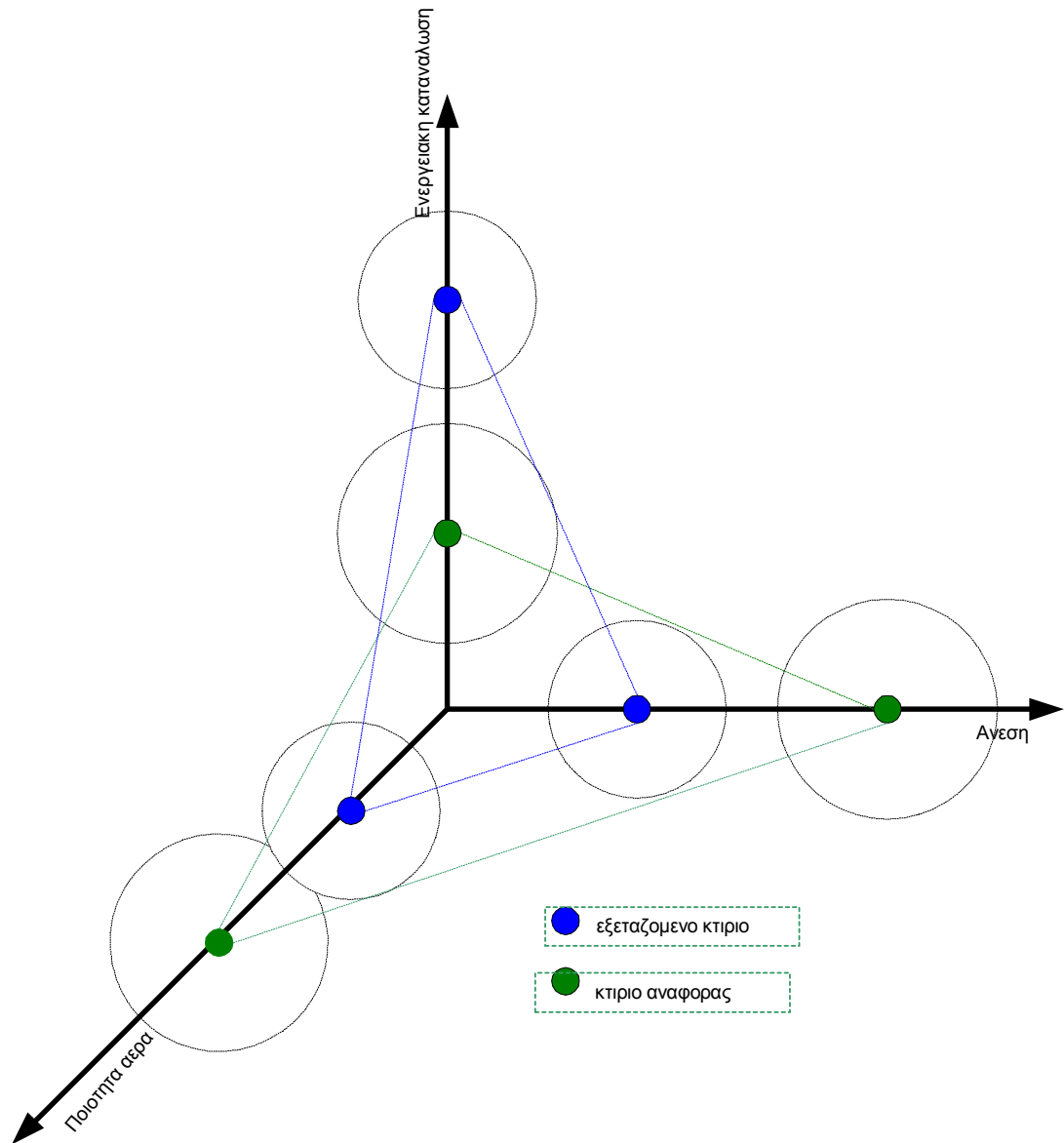
Οι στάθμες της οπτικής και θερμικής άνεσης δίνονται από πρωτόκολλα πιστοποίησης άνεσης (ISO/ASHRAE PMV) [5].

Η ποιότητα αέρα αφορά στην ύπαρξη ρύπων στο εσωτερικό του κτιρίου και υπολογίζεται βάσει αποκλίσεων από τα ευρωπαϊκά όρια συγκέντρωσης ρύπων.

Οι 3 παραπάνω παράγοντες καθώς και η κατάσταση ενός κτιρίου σε κάθε από αυτούς μπορούν να αναπαρασταθούν σε ένα τρισδιάστατο σύστημα αξόνων (Σχήμα 1).

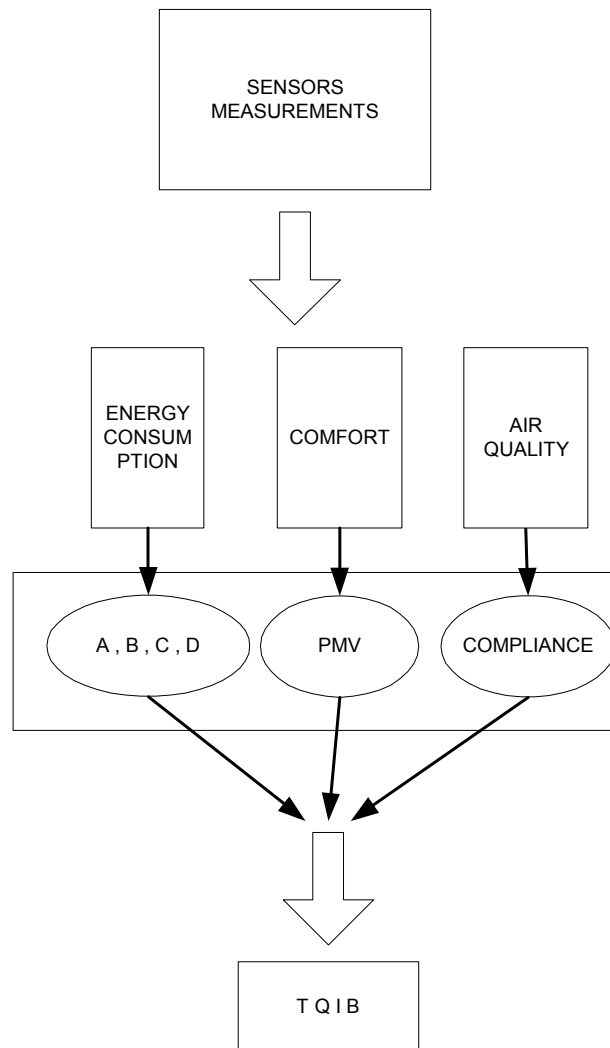
Ως σημεία αναφοράς λαμβάνονται οι καταστάσεις στους 3 παράγοντες-άξονες ενός «κτιρίου αναφοράς». Η απόσταση των σημείων που δηλώνουν την κατάσταση του υπό εξέταση κτιρίου από εκείνα του «ιδανικού κτιρίου» υποδηλώνουν το μέγεθος της απόκλισης από την ιδανική κατάσταση. Οι 3 παράγοντες διαμορφώνουν τον ολικό συντελεστή ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος (ΟΣΠ) [8].

$$TQIB = a_1 E_{\text{θερμανση}}^N + a_2 E_{\text{ψυξη}}^N + a_3 E_{\text{φωτισμος}}^N + a_4 PMV^N + a_5 [CO_2]^N$$



Σχήμα 5. Οι 3 Ενεργειακοί Παράγοντες.

Η αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος ακολουθεί στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6. Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος.

4.3 Η Μοντελοποίηση του Κτιρίου

4.3.1 Γενικά

Για το υπό παρακολούθηση κτίριο εκτελείται μια σειρά υπολογισμών οι οποίοι και θα δώσουν μια πρόβλεψη της συνεισφοράς του κάθε σεναρίου στη βελτίωση της ενεργειακής κατάστασης στο συγκεκριμένο κτίριο. Η παραπάνω διαδικασία λειτουργεί με σημείο αναφοράς ένα μοντέλο το οποίο λαμβάνει υπόψη τις φυσικές παραμέτρους του κτιρίου. Ρόλος του κτιριακού μοντέλου είναι να αποτυπώνει την ενεργειακή 'συμπεριφορά' του κτιρίου και να μας δίνει την πρόβλεψη 'αντίδρασης', όταν εισάγουμε σε αυτό υπονήφειες ενεργειακές παρεμβάσεις(εναλλακτικά σενάρια). Τελικός σκοπός είναι δηλαδή η κατάταξη

χρησιμότητας του συνόλου των σεναρίων δεδομένης της πρόβλεψης πάνω στο κτιριακό μοντέλο. Με τον όρο ‘χρησιμότητα’ εννοείται το κατά πόσο η υποτιθέμενη εφαρμογή του κάθε σεναρίου βελτιώνει τους 3 παράγοντες ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος.

4.4 Σ.Υ.Α – Αρχική Προσέγγιση

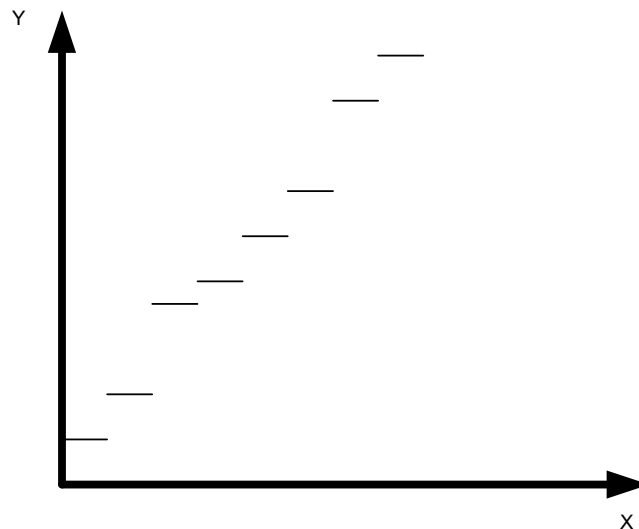
4.4.1 Γενικά

Πέρα από την απλή κατάταξη(labeling) του κτιρίου σε ενεργειακές κατηγορίες, θα παρέχεται η δυνατότητα online πρότασης ενός set εναλλακτικών σεναρίων στον διαχειριστή του κτιρίου μέσω ενός Συστήματος Υποστήριξης Απόφασης. Το Σ.Υ.Α θα αναλαμβάνει δράση στις παρακάτω περιπτώσεις:

11. Υποχρεωτικά όταν το κτίριο βρίσκεται πάνω από τη στάθμη Ε , οπότε ξεφεύγει από τα επιτρεπτά όρια.
12. Προαιρετικά, όταν ο διαχειριστής επιθυμεί αναβάθμιση της κατηγορίας του κτιρίου, π.χ από C σε A.

4.4.2 Σχεδιασμός

Βάσει του κτιριακού μοντέλου εκτελείται η πρόβλεψη επίδρασης των εναλλακτικών σεναρίων και σαν έξοδο λαμβάνουμε το παρακάτω κλιμακωτό διάγραμμα. Στον άξονα Χ φαίνεται το κάθε σενάριο, ενώ στον Υ το κατά πόσο βελτιώνει τον ενεργειακό παράγοντα(θερμική άνεση ή οπτική άνεση ή ποιότητα αέρα). Έχουμε στην ουσία μια κατάταξη των σεναρίων από το λιγότερο προς το περισσότερο σημαντικό.



Σχήμα 7. Κατάταξη Σεναρίων.

13. Το κυριότερο στοιχείο που το Σ.Υ.Α διαθέτει είναι τα παραπάνω διαγράμματα. Πριν ξεκινήσει η υλοποίηση του Σ.Υ.Α πρέπει να καθοριστεί από το Πανεπιστήμιο Αθηνών αν θα είναι διαθέσιμα μόνο τα 3 κλιμακωτά διαγράμματα (ένα για κάθε ενεργειακό παράγοντα), ή και ένα συνολικό(accumulative) διάγραμμα, όπου θα διαφαίνεται η συνεισφορά των σεναρίων στη συνολική κατάσταση του κτιρίου.
14. Η κατάταξη των σεναρίων στα κλιμακωτά διαγράμματα γίνεται βάσει της χρησιμότητάς τους σε ότι αφορά την βελτίωση του ενεργειακού παράγοντα. Ένα σενάριο είναι λιγότερο ή περισσότερο ‘χρήσιμο’, όταν προσεγγίζει λιγότερο ή περισσότερο αυτό που θεωρείται ως ‘ιδανική’ κατάσταση του ενεργειακού παράγοντα. Έτσι, η κατάταξη των σεναρίων δε γίνεται με σύγκριση αριθμητικών τιμών. Π.χ : Η κατάσταση της θερμικής άνεσης κυμαίνεται στο εύρος τιμών [-3 , +3] και το 0 είναι η ιδανική κατάσταση θερμικής άνεσης. Άρα όσο πιο κοντά στο 0 προβλέπεται ένα σενάριο να φέρει τη θερμική άνεση στο κτίριο, τόσο πιο ψηλά σε σχέση με τα άλλα βρίσκεται στο διάγραμμα .Μια λειτουργική προσέγγιση είναι η κατάταξη και για τους υπόλοιπους παράγοντες να ακολουθεί την ίδια λογική. Δηλαδή να διαμορφώνονται τα διαγράμματα χρησιμότητας των σεναρίων βάσει της προσέγγισης στην ιδανικότητα, σε ένα εύρος 3 υποδιαστημάτων ανάμεσα στα ακρότατα της κατάστασης του ενεργειακού παράγοντα.([-3,-1] [-1,+1] [+1,+3])

Βέβαια, οι υπόλοιποι ενεργειακοί παράγοντες δεν έχουν ανάλογες αναπαραστάσεις... π.χ στην οπτική άνεση δεν υπάρχει κλίμακα με ιδανικό σημείο και ακρότατα. Παρόλα αυτά, το Πανεπιστήμιο προσφέρθηκε να φέρει όλους τους παράγοντες σε ίδιο ‘καλούπι’. Τα κέρδη αυτού του τρόπου αναπαράστασης των παραγόντων είναι:

- Τα σενάρια μπορεί να επιδρούν θετικά ή αρνητικά κατά ορισμένο βαθμό μέσα σε μια οριζόμενη λεκτική κλίμακα. Δηλαδή: μέτρια, καλά, πολύ καλά, ανάλογα σε ποιο από τα παραπάνω υποδιαστήματα βρίσκεται η κατάσταση του ενεργειακού παράγοντα μετά την εφαρμογή του σεναρίου. Έτσι η κατάταξη των σεναρίων γίνεται ευκολότερα.
- Αν ακολουθηθεί ο τρόπος αναπαράστασης των παραγόντων με υποδιαστήματα σε ένα εύρος ιδανικότητας, το Σ.Υ.Α φαίνεται να εξάγει ανακριβή αποτελέσματα, διότι τα σενάρια δεν κατατάσσονται με απόλυτο τρόπο. Δεν συμβαίνει όμως αυτό. Αφού η ‘χρησιμότητα’ είναι μεταφρασμένη σε μια κλίμακα 3 διαστημάτων, τότε

I) υπάρχει συμβατότητα με τις απόψεις του προσωπικού για τους ενεργειακούς παράγοντες, οι οποίες επίσης αναπαρίστανται με λεκτικές μεταβλητές.(‘δυσανεστημένος’, ‘δεν έχω πρόβλημα’, ‘ικανοποιημένος’),

II) το Σ.Υ.Α έχει τη δυνατότητα να προτείνει με μεγαλύτερη ακρίβεια...Μετά από συνεννόηση με το Πανεπιστήμιο, καταλήξαμε στην κατηγοριοποίηση του συνόλου των σεναρίων ως εξής : Θα είναι διαθέσιμα 5-6 κύρια σενάρια παρέμβασης στο κτίριο. Το καθένα θα έχει 3 βαθμούς δράσης. Δηλαδή, η παρέμβαση των κύριων σεναρίων θα είναι μικρή, περισσότερη, πλήρης. 15-18 συνολικά σενάρια θα κατατάσσονται μετά τη διαδικασία της πρόβλεψης εφαρμογής τους στο κλιμακωτό διάγραμμα. Επομένως, ανάλογα με τις προτεραιότητες που θέτει το Σ.Υ.Α και τη συσχέτιση: υποδιάστημα που βρίσκεται τώρα ο ενεργειακός παράγοντας στην κλίμακα ιδανικότητας – υποδιάστημα που θέλει να επιτύχει το Σ.Υ.Α για τον παράγοντα, θα επιλέγεται ο κατάλληλος βαθμός δράσης ενός κύριου σεναρίου.

Η γενική ιδέα είναι να ελέγχεται η ψαλίδα της τρέχουσας κατάστασης κάθε ενεργειακού παράγοντα με την ιδανική του κατάσταση, εφαρμόζοντας τα σενάρια σε διαιρεμένη ισχύ. Έτσι με τη χρήση λεκτικών διαστημάτων στην αναπαράσταση της κατάστασης κάθε παράγοντα, της αναπαράστασης της γνώμης του προσωπικού και του βαθμού παρέμβασης με διαιρεμένη ισχύ των σεναρίων, επιτυγχάνεται καλύτερη υποστήριξη απόφασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον ακριβέστερο υπολογισμό στη συνολική ενεργειακή κατάσταση και συνεπώς στην ενεργειακή κατανάλωση, που είναι το κύριο μέλημα για την έκδοση του επιθυμητού energy certificate.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση που αφορά το μηχανισμό πρόβλεψης απορρίφθηκε διότι:

1. Δεν είναι εφικτή η πρόβλεψη της επίδρασης κάθε σεναρίου στους ενεργειακούς παράγοντες, ώστε να διαμορφωθεί το διάγραμμα του σχήματος 7.
2. Η απόδοση προτεραιότητας τα σενάρια ανάλογα με τη χρησιμότητα τους είναι εσφαλμένη προσέγγιση διότι έτσι γενικεύεται η σχέση σεναρίων – ενεργειακών παραγόντων, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη οι διαφορετικές φυσικοί παράμετροι και διαδικασίες εφαρμογής που χαρακτηρίζουν κάθε κτίριο. Η προτεραιότητα των σεναρίων είναι διαφορετική για κάθε κτίριο ξεχωριστά και η επίδραση στους ενεργειακούς παράγοντες εξαρτάται από τη φυσική ταυτότητα και τοποθεσία του κτιρίου.
3. Η κατάταξη των ενεργειακών παραγόντων βάσει του διαστήματος στο οποίο κυμαίνονται και την ιδανική τιμή (για παράδειγμα το PAM κυμαίνεται από -3 έως +3), είναι λανθασμένη διότι η εφαρμογή ενός σεναρίου – ακόμα και αν

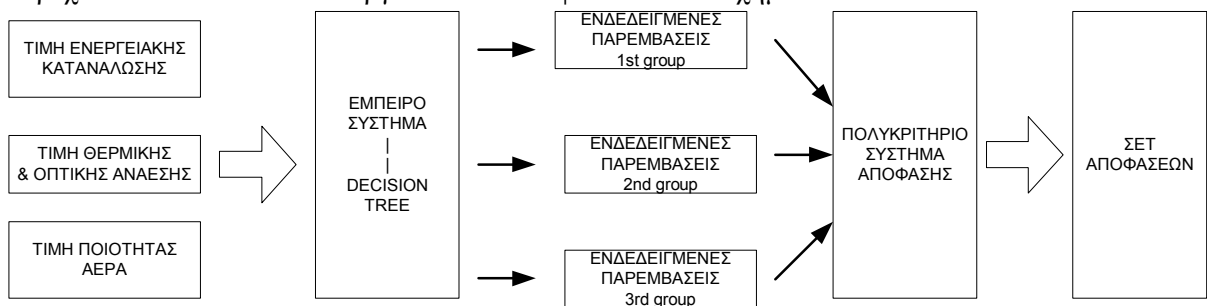
υπήρχε τρόπος να προβλεφθεί με ακρίβεια η επίδραση στο PAM – επηρεάζει όλους τους παράγοντες και όχι τον καθένα ξεχωριστά. Έτσι, αν με κάποιο τρόπο γνωρίζαμε ότι θα βελτιωθεί η θερμική άνεση, αυτό θα μπορούσε να επικαλύπτεται από βελτίωση ή χειροτέρευση – ανάλογα με το κτίριο και τη ζώνη που εξετάζεται – στη ποιότητα αέρα.

4.5 Η Διαδικασία Απόφασης

Τα εν λόγω σενάρια αφορούν ενεργειακές παρεμβάσεις στο κτίριο πάνω στη βελτίωση αποκλειστικά των 3 προαναφερθέντων παραγόντων. Ο αριθμός των σεναρίων είναι δεδομένος και καθορισμένος.

Στο πρώτο στάδιο λειτουργίας του, το Σ.Υ.Α θα επιλέγει ως υποψήφιες ένα σύνολο παρεμβάσεων. Βάσει ενός έμπειρου συστήματος το οποίο παρέχει το Πανεπιστήμιο Αθηνών, η αναγκαιότητα εφαρμογής συγκεκριμένων παρεμβάσεων εξαρτάται και καθορίζεται από την κατάσταση των 3 παραγόντων που διαμορφώνουν τον ΟΣΠ. Το έμπειρο σύστημα λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση κάθε παράγοντα θα προτείνει 3 ομάδες προτεινόμενων παρεμβάσεων για τη βελτίωση καθενός χωριστά. Η διαδικασία θα ακολουθεί τη λογική ενός δέντρου επιλογών (decision tree) όπου οι υποψήφιες παρεμβάσεις θα επιλέγονται ή θα απορρίπτονται βάσει των κανόνων του έμπειρου συστήματος.

Σε δεύτερο στάδιο, οι προτεινόμενες λύσεις θα εισάγονται σε ένα σύστημα πολυκριτήριας ανάλυσης. Σκοπός δεν είναι η κατάταξη των αρχικά προτεινόμενων παρεμβάσεων από την καλύτερη προς τη χειρότερη, αλλά η πρόταση σαν λύση ενός σετ ικανοποιητικών εναλλακτικών παρεμβάσεων. Τα κριτήρια διαμόρφωσης της ικανοποιητικής λύσης είναι οι τιμές των: ενεργειακής κατανάλωσης, οπτικής & θερμικής άνεσης και ποιότητας αέρα. Επίσης σαν κριτήρια θα εισάγονται οι αποκλίσεις των τιμών από εκείνες του ιδανικού κτιρίου, ο παράγοντας στον οποίο το κτίριο υστερεί περισσότερο και η διαφορά(ψαλίδα) μεταξύ των τιμών των 3 παραγόντων στο υπό εξέταση κτίριο. Εργαλείο για την σωστή επιλογή παρεμβάσεων αποτελεί το σύστημα μοντελοποίησης του κτιρίου το οποίο αποτυπώνει τη φυσική συμπεριφορά του κτιρίου. Το Σ.Υ.Α θα προτείνει λύσεις δίνοντας προτεραιότητα στη βελτίωση του παράγοντα που υπολείπεται των άλλων, κατατάσσοντάς αυτές σε «πράσινες», «κίτρινες», «καφέ», «κόκκινες», αναλόγως τη βελτίωση που παρέχουν συνολικά. Η λειτουργία του Σ.Υ.Α φαίνεται στο Σχήμα 8.

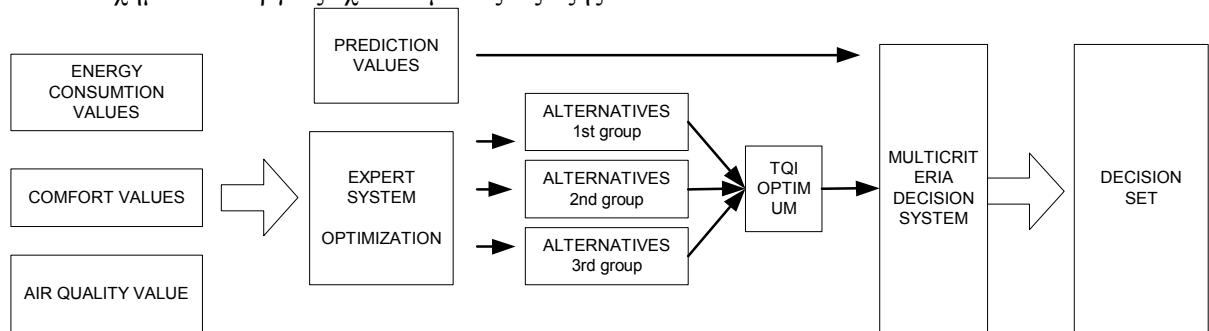


Σχήμα 8. Λειτουργία του Σ.Υ.Α.

Στη πορεία, το έμπειρο σύστημα [8] αναβαθμίστηκε και εμπλουτίστηκε στα παρακάτω:

- Το αρχικό φιλτράρισμα των εναλλακτικών σεναρίων γίνεται με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων. Έτσι, η απόρριψη από την αρχή των μη-χρήσιμων εναλλακτικών γίνεται αποδοτικότερη.
- Οι φιλτραρισμένες λύσεις θα ομαδοποιούνται σε groups, ανάλογα με ποιον ενεργειακό παράγοντα βελτιώνουν περισσότερο.

Το νέο σχήμα λειτουργίας έχει επομένως ως εξής:



Σχήμα 9. Τελική Λειτουργία του Σ.Υ.Α.

4.6 Η Προσέγγιση με Πολυκριτήρια Μεθοδολογία

4.6.1 Γενικά

Το πρόβλημα εύρεσης και πρότασης των περισσότερο χρήσιμων εναλλακτικών σεναρίων για τη βελτίωση της άνεσης & τη μείωση της ενέργειας στο κτίριο ανήκει στην πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων. Στην πολυκριτήρια προβλήματα υπάρχουν πολλαπλά και αντικρουόμενα μεταξύ των κριτήρια αξιολόγησης των εναλλακτικών αποφάσεων. Το πλήθος των κριτηρίων και η μεταξύ των σχέση έχουν επίδραση στο σύστημα προτιμήσεων του αποφασίζοντος. Η πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων δέχεται την ύπαρξη ενός συστήματος αξιών που αντιπροσωπεύει τις προτιμήσεις των αποφασίζόντων σε ένα σύνολο εναλλακτικών ενεργειών. Το σύστημα αξιών αφορά στη διαμόρφωση μιας συνάρτησης χρησιμότητας και των σχετικών βαρών των προτεραιοτήτων. Σύμφωνα με αυτή οι προτιμήσεις του αποφασίζοντα σε ένα σύνολο εναλλακτικών ενεργειών λαμβάνονται υπόψη στη διαμόρφωση ενός συστήματος αξιών. Αυτό ικανοποιεί ένα σύνολο συνθηκών, μέσα από το οποίο ο αποφασίζων θα οδηγηθεί στη στην επιλογή της σωστότερης λύσης [14].

4.6.2 Σχεδιασμός

Το σύνολο των διαθέσιμων εναλλακτικών ενεργειών είναι ένα πεπερασμένο σύνολο επιλογών γενικά, που μελετάται κατά τη διαδικασία λήψης μιας απόφασης και συμβολίζεται:

$$A = \{a_i, i=1,2,\dots,n\}$$

Ως κριτήριο ορίζεται μια πραγματική συνάρτηση g , ορισμένη σε ένα σύνολο A των εναλλακτικών ενεργειών και με πεδίο τιμών ένα απόλυτα διατεταγμένο σύνολο όπου εκφράζονται οι προτιμήσεις του αποφασίζοντα [14].

$$g: A \rightarrow R \quad a \rightarrow g(a)$$

όπου $g(a)$ είναι η εκτίμηση της εναλλακτικής ενέργειας-επιλογής a του συνόλου A πάνω στο κριτήριο g .

Εάν ισχύει $g(a) > g(b)$, η a είναι καλύτερη της b .

Δεδομένου ενός συνόλου κριτηρίων $\{g_1, g_2, \dots, g_m\}$, μια εναλλακτική ενέργεια-επιλογή a κυριαρχεί μιας εναλλακτικής b εάν:

$$g_i(a) \geq g_i(b) \quad \forall i$$

όπου τουλάχιστον μία είναι αυστηρή ανισότητα.

Μια εναλλακτική επιλογή a του συνόλου A είναι ικανοποιητική λύση για ένα σύνολο κριτηρίων $\{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ αν δεν υπάρχει άλλη εναλλακτική επιλογή b η οποία κυριαρχεί της a [14].

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, το A αποτελούν το σύνολο των εναλλακτικών σεναρίων που δίνει στην έξοδο η διαδικασία βελτιστοποίησης και πρόβλεψης.

Το σύνολο A είναι σταθερό, δεν επιτρέπονται δηλαδή μεταβολές στη σύνθεσή του κατά τη διάρκεια λήψης μιας απόφασης.

Τα κριτήρια είναι τέσσερα:

1. g_1 : Η βελτίωση της ποιότητας αέρα (μείωση του CO₂)
2. g_2 : Η βελτίωση της θερμικής άνεσης (μείωση της απόλυτης τιμής του PMV)
3. g_3 : Η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης
4. g_4 : Η βελτιστοποίηση του TQIB

Βάσει των συνόλων των n εναλλακτικών ενεργειών και m κριτηρίων διαμορφώνεται ο πολυκριτήριος πίνακας [1] όπου δίνονται οι εκτιμήσεις $g_i(a_j)$. (Πίνακας 16)

Πίνακας 16. Πολυκριτήριος Πίνακας				
ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ	g_1	g_2	g_3	g_4
a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	$g_3(a_1)$	$g_4(a_1)$
a_2	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	$g_3(a_2)$	$g_4(a_2)$
...
a_n	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	$g_3(a_n)$	$g_4(a_n)$

Η θεωρία πολυκριτήριας χρησιμότητας (Multiattribute Utility Theory) θέτει σε κάθε πρόβλημα απόφασης μια πραγματική συνάρτηση χρησιμότητας U ορισμένη στο A η οποία είναι επιθυμητό να μεγιστοποιηθεί. Η συνάρτηση αυτή συνθέτει τα κριτήρια

$$g_1, g_2, \dots, g_m.$$

Στη συγκεκριμένη προβληματική επειδή - βάσει των κριτηρίων - οι εκτιμήσεις των πρέπει να μειώνονται, στόχος για τη συνάρτηση U που θα ορισθεί είναι η ελαχιστοποίησή της.

Στη διαδικασία ανάλυσης απόφασης θα ακολουθηθεί η μέθοδος του σταθμισμένου μέσου (weighted sum method). Η χρησιμότητα μιας δραστηριότητας υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$u(a) = \sum_{i=1}^m p_i g_i(a) = p_1 g_1 + p_2 g_2 + \dots + p_m g_m$$

όπου p_1, p_2, \dots, p_m είναι θετικοί πραγματικοί που εκφράζουν τα βάρη των m αντίστοιχων κριτηρίων, δηλαδή την προτίμηση-προτεραιότητα στο εκάστοτε κριτήριο. Τα βάρη προτίμησης έχουν άθροισμα 1.

Ταυτόχρονα, οι συντελεστές βάρους p_i έχουν συγκεκριμένη φυσική σημασία υποδηλώνοντας βαθμούς παραχωρήσεων (trade offs) μεταξύ κριτηρίων. Ως βαθμός παραχώρησης του κριτηρίου i στο κριτήριο j , ορίζεται η ποσότητα που ο αποφασίζων επιθυμεί να παραχωρήσει στο j κριτήριο ώστε να αποκτήσει μια μονάδα ενός κριτηρίου i [4].

Ας υποθέσουμε δυο ενέργειες-επιλογές a και b των οποίων οι τιμές των κριτηρίων είναι παντού ίσες, εκτός των κριτηρίων g_1 και g_k .

a: $g_1, g_2, \dots, g_k, \dots, g_m$

b: $g_1 - x, g_2, \dots, g_k + 1, \dots, g_m$

Εάν ο αποφασίζων θεωρεί τις δυο ενέργειες a και b ισοδύναμες ($u(a) = u(b)$), η τιμή του x θα εκφράζει σε μονάδες του κριτηρίου g_k την αξία της μονάδας του κριτηρίου g_1 (κριτήριο αναφοράς).

Η σχέση ισοδυναμίας των δραστηριοτήτων είναι:

$$p_1 g_1 + p_2 g_2 + \dots + p_k g_k + \dots + p_m g_m = p_1 (g_1 - x) + p_2 g_2 + \dots + p_k (g_k + 1) + \dots + p_m g_m$$

από όπου συνάγεται ότι $x = \frac{p_k}{p_1}$

Τα βάρη των τεσσάρων κριτηρίων στη συγκεκριμένη περίπτωση ανατίθενται εμπειρογνομικά και βασίζονται στην τεχνογνωσία του Ινστιτούτου Επιταχυντών Επιταχυντικών Συστημάτων και Εφαρμογών από το Πανεπιστήμιο Αθηνών (Πίνακας 17).

Πίνακας 17. Συντελεστές Βαρύτητας	
ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΑΡΟΥΣ
βελτίωση της ποιότητας αέρα (μείωση του CO2)	0.35
βελτίωση της θερμικής άνεσης (μείωση της απόλυτης τιμής του PMV)	0.25
μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης	0.2
βελτιστοποίηση του TQI	0.2

Επειδή οι πραγματικές τιμές των τεσσάρων κριτηρίων εκφράζονται σε διαφορετικές αριθμητικές μονάδες αυτές κανονικοποιούνται στο διάστημα $[0,1]$ ακολουθώντας τον κανόνα:

$$v_i = (g_i - \min g_i) / (\max g_i - \min g_i)$$

Η συνάρτηση χρησιμότητας διαμορφώνεται ως εξής:

$$u(a) = 0.35 \times g_1(a) + 0.25 \times g_2(a) + 0.2 \times g_3(a) + 0.2 \times g_4(a)$$

Στη τελική του φάση, το σύστημα υποστήριξης απόφασης θα εξετάζει αν και για ποιες εναλλακτικές ενέργειες στο σύνολο A η συνάρτηση U δίνει ίσες τιμές. Τότε θα ελέγχεται κάθε εναλλακτική στο πού παρατηρείται η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ εκτιμώμενης τιμής και τιμής μετρήσεων για κάθε ένα κριτήριο.

Στη συνέχεια θα προτιμάται η εναλλακτική που δίνει τη μεγαλύτερη διαφορά στο κριτήριο με το μεγαλύτερο συντελεστή βάρους.

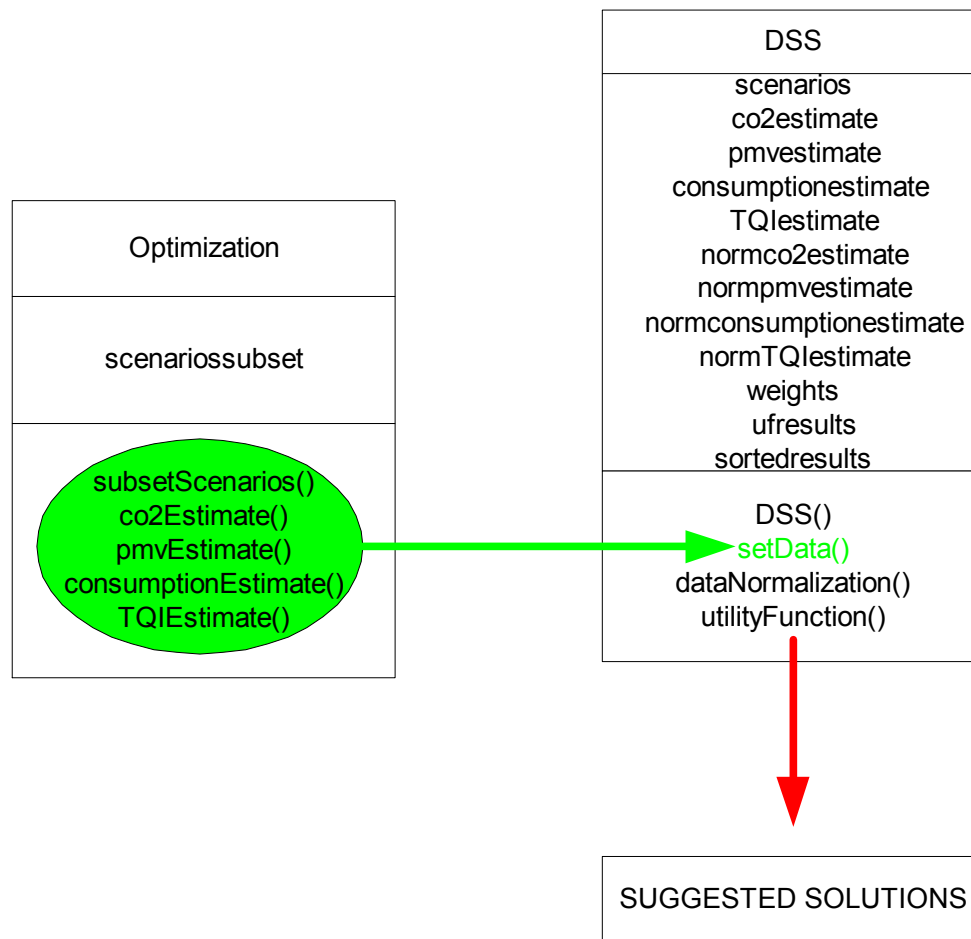
4.6.3 Υλοποίηση

Ο μηχανισμός του συστήματος υποστήριξης απόφασης υλοποιήθηκε σε αυτόνομο πακέτο λογισμικού. Η πλατφόρμα υλοποίησης ήταν η Java Enterprise Edition v2.0 (J2EE) της Sun Microsystems.

Αναπτύχθηκαν δύο κλάσεις:

1. Optimization
2. DSS

Το διάγραμμα λειτουργίας και συγγένειας των κλάσεων [9] φαίνεται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10. Το διάγραμμα λειτουργίας και συγγένειας των κλάσεων.

Στην κλάση “Optimization” θα γίνονται οι υπολογισμοί για την παραγωγή των υποσυνόλων εναλλακτικών σεναρίων με γνώμονα την μέθοδο βελτιστοποίησης. Οι μέθοδοι “co2Estimate()”, “pmvEstimate()”, “consumptionEstimate()” και “TQIEstimate()” επιστρέφουν τις εκτιμώμενες βελτιώσεις των ποιότητας αέρα, θερμικής άνεσης και ενεργειακής κατανάλωσης του εξεταζόμενου κτιρίου. Η μέθοδος “TQIEstimate()” επιστρέφει την εκτιμώμενη βελτίωση του Ολικού Συντελεστή Ποιότητας βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων. Η μέθοδος “subsetResults()” επιστρέφει το υποσύνολο των προτεινομένων εναλλακτικών σεναρίων.

Στην κλάση “DSS” υλοποιείται το πολυκριτήριο σύστημα απόφασης. Τα δεδομένα εισόδου επιστρέφονται από τις πέντε μεθόδους της κλάσης “Optimization” και αποθηκεύονται στο στιγμιότυπο της “DSS” με τη μέθοδο “setData()”. Η μέθοδος “dataNormalization()” κανονικοποιεί τα υποσύνολα εκτιμήσεων των εναλλακτικών σεναρίων που αφορούν στα τέσσερα κριτήρια(ποιότητα αέρα, θερμική άνεση, μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, βελτιστοποίηση του TQIB). Η μέθοδος “utilityFunction()” παράγει τον πολυκριτήριο πίνακα με τις τιμές της συνάρτησης χρησιμότητας U, όπως ορίστηκε στην παράγραφο 4.2 .

4.6.4 Αναλυτική περιγραφή του κώδικα

- **Class Optimization**

Ιδιοχαρακτηριστικά:

1. *scenariosubset*, τύπου String[]. Διατηρεί τα εναλλακτικά σενάρια τα οποία μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης[5] κρίνονται κατάλληλα για παρεμβάσεις στο εξεταζόμενο κτίριο.

Μέθοδοι:

1. *subsetResults()*, return type: void.

Ορίσματα: availablescenarios, τύπου String[]. Πρόκειται για τον αρχικό διαθέσιμο σύνολο εναλλακτικών σεναρίων για τη βελτίωση της ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος στα κτίρια γενικά. Αφού καθοριστεί στην επόμενη φάση του έργου, θα ορίζεται στατικά σε αρχείο βιβλιοθήκης μέσα στο πακέτο λογισμικού και η μέθοδος θα το χρησιμοποιεί ώστε να αρχικοποιεί το *scenariosubset*.

2. *co2Estimate()*, return type: double[].

Ορίσματα: --.

Επιστρέφει με το ιδιοχαρακτηριστικό *co2Estimate* τις εκτιμήσεις βελτίωσης της ποιότητας αέρα βάσει της διαδικασίας βελτιστοποίησης ανά εναλλακτικό σενάριο του *scenariosubset*.

3. *pmvEstimate()*, return type: double[].

Ορίσματα: --.

Επιστρέφει με το ιδιοχαρακτηριστικό *pmvEstimate* τις εκτιμήσεις βελτίωσης της θερμικής άνεσης βάσει της διαδικασίας βελτιστοποίησης ανά εναλλακτικό σενάριο του *scenariosubset*.

4. *consumptionEstimate()*, return type: double[].

Ορίσματα: --.

Επιστρέφει με το ιδιοχαρακτηριστικό *consumptionEstimate* τις εκτιμήσεις βελτίωσης της ενεργειακής κατανάλωσης βάσει της διαδικασίας βελτιστοποίησης ανά εναλλακτικό σενάριο του *scenariosubset*.

5. *TQIEstimate()*, return type: double[].

Ορίσματα: --.

Επιστρέφει με το ιδιοχαρακτηριστικό *TQIEstimate* τις εκτιμήσεις βελτιστοποίησης του ολικού συντελεστή ποιότητας βάσει της διαδικασίας βελτιστοποίησης ανά εναλλακτικό σενάριο του *scenariosubset*.

- **Class DSS**

Ιδιοχαρακτηριστικά:

1. *scenarios*, τύπου String[]. Διατηρεί τα εναλλακτικά σενάρια τα οποία μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης κρίνονται κατάλληλα για παρεμβάσεις στο εξεταζόμενο κτίριο και αποτελούν την είσοδο του πολυκριτήριου συστήματος απόφασης.
2. *co2estimate*, *pmvestimate*, *consumptionestimate*, *TQIestimate*, τύπου double[]. Διατηρούν τις εκτιμήσεις βελτίωσης των παραγόντων ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος ανά εναλλακτικό σενάριο.

3. *normco2estimate*, *normpmvestimate*, *normconsumptionestimate*, *normTQIestimate*, τύπου double[]. Διατηρούν τις κανονικοποιημένες τιμές των εκτιμήσεων βελτίωσης των παραγόντων ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος.
4. *weights*, τύπου double[]. Διατηρεί τα βάρη προτίμησης της συνάρτησης χρησιμότητας.
5. *ufresults*, τύπου double[]. Διατηρεί τα αποτελέσματα της συνάρτησης χρησιμότητας ανά εναλλακτικό σενάριο.
6. *sortedresults*, τύπου double[]. Διατηρεί τα εναλλακτικά σενάρια ταξινομημένα από το περισσότερο χρήσιμο στο λιγότερο χρήσιμο τα οποία είναι η έξοδος του πολυκριτηρίου συστήματος απόφασης.

Μέθοδοι:

1. *DSS()*, constructor.

Αρχικοποιεί τα ιδιοχαρακτηριστικά της κλάσης.

2. *setData()*, return type: void.

Ορίσματα: String[] *scenarios*, double[] *co2estimate*, double[] *pmvestimate*, double[] *consumptionestimate*, double[] *TQIestimate*.

Αναθέτει τιμές στους πίνακες *co2estimate*, *pmvestimate*, *consumptionestimate*, *TQIestimate*. Οι τιμές λαμβάνονται από τις εξόδους των μεθόδων *co2Estimate()*, *pmvEstimate()*, *consumptionEstimate()*, *TQIEstimate()* των αντικειμένων τύπου Optimization.

3. *dataNormalization()*, return type: void.

Ορίσματα:--.

Αναθέτει τιμές στους πίνακες *normco2estimate*, *normpmvestimate*, *normconsumptionestimate*, *normTQIestimate* εφαρμόζοντας τον αλγοριθμικό κανόνα $v_i = (g_i - \min g_i) / (\max g_i - \min g_i)$ σε κάθε ένα από τους πίνακες *co2estimate*, *pmvestimate*, *consumptionestimate*, *TQIestimate* αντίστοιχα.

4. *utilityFunction()*, return type: void.

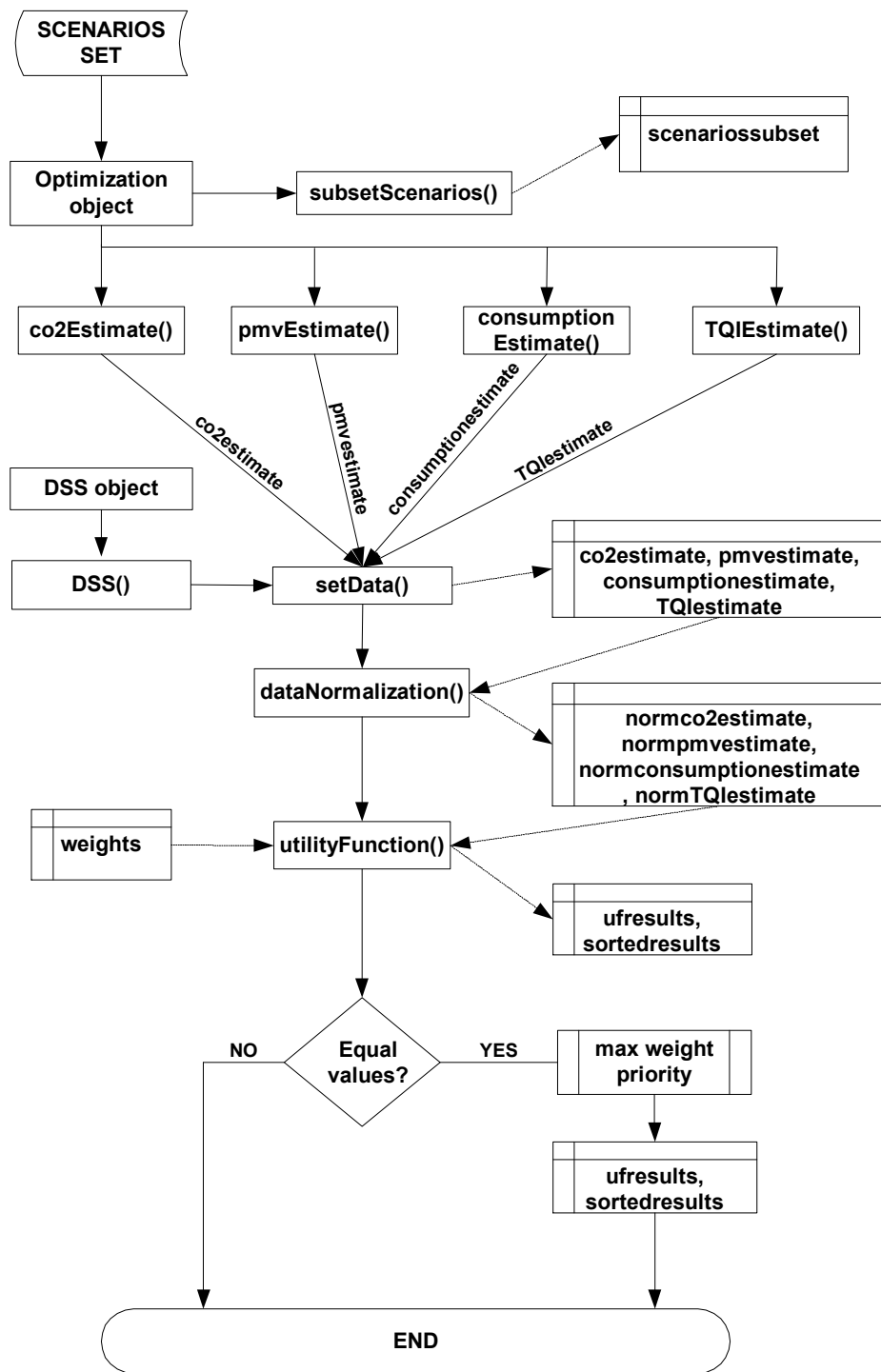
Ορίσματα:--.

Εδώ υλοποιείται η συνάρτηση χρησιμότητας:

$$u(a) = \sum_{i=1}^m p_i g_i(a) = p_1 g_1 + p_2 g_2 + \dots + p_m g_m \quad (4.2.1)$$

Για κάθε εναλλακτικό σενάριο του πίνακα *scenarios* υπολογίζεται η $u(a)$. Όπου p , χρησιμοποιούνται τα στοιχεία του πίνακα *weights* και όπου g , τα στοιχεία των πινάκων *normco2estimate*, *normpmvestimate*, *normconsumptionestimate*, *normTQIestimate*.

Τα αποτελέσματα ανατίθενται στον πίνακα *ufresults*, ενώ τα σενάρια που τα αντιπροσωπεύουν στον πίνακα *sortedresults*. Ο πίνακας *ufresults* υποβάλλεται σε διαδικασία sorting και ο πίνακας *sortedresults* ακολουθεί την ταξινόμηση του πρώτου. Αν υπάρχουν στοιχεία του πίνακα *ufresults* με ίδιες τιμές τότε αναταξινομούνται έτσι ώστε να προτιμάται η εναλλακτική που δίνει τη μεγαλύτερη διαφορά στο κριτήριο με το μεγαλύτερο συντελεστή βάρους (p_1). Οι αλλαγές περνούν κατά αντιστοιχία στον πίνακα *sortedresults*. Το διάγραμμα ροής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 11. Το διάγραμμα ροής.

5. Το Ασαφές (Fuzzy) Σ.Υ.Α

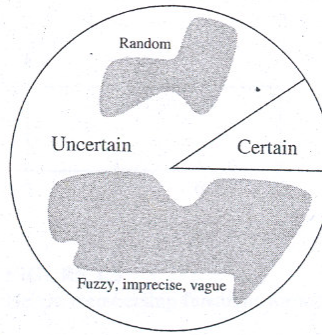
5.1 Αβεβαιότητα και Ανακρίβεια

Η θεωρία των ασαφών συνόλων είναι ο τρόπος για να αναπαρίστανται οι μαθηματικές αβεβαιότητες. Η θεωρία πιθανοτήτων ήταν μέχρι πρόσφατα το κύριο εργαλείο για το σκοπό αυτό. Τότε, οι παραδοχές για τη μαθηματική αβεβαιότητα ακολουθούσαν τα χαρακτηριστικά τυχαίας (random) αβεβαιότητας. Σε μια τυχαία διαδικασία όλα τα αποτελέσματα της αναπαρίστανται με πιθανότητες. Η πρόβλεψη μιας αλληλουχίας ενδεχόμενων δεν είναι δυνατή. Αυτό που είναι δυνατό είναι μια ακριβής περιγραφή των στατιστικών του μακροπρόθεσμου μέσου όρου της διαδικασίας. Μολοταύτα, δεν είναι όλα τα αβέβαια γεγονότα και τυχαία. Η θεωρία ασαφών συνόλων είναι το εργαλείο που ενδείκνυται για τη μοντελοποίηση της αβεβαιότητας που συνδέεται με την αοριστία, την ανακρίβεια και την έλλειψη πληροφορίας σχετικά με στοιχεία του προβλήματος. Σπάνια διαθέτουμε όλη την πληροφορία που χρειάζεται για την επίλυση ενός προβλήματος. Το ζητούμενο είναι να ενσωματώσουμε τη διαίσθηση που διαθέτουμε για το πρόβλημα στην επίλυσή του. Η ισχύς της ασαφούς λογικής διαφαίνεται στο παράδειγμα της σημασιολογίας του όρου : «ψηλό άτομο» . Για ένα άτομο X κάποιος είναι ψηλός αν έχει ύψος πάνω από 190 cm. Για ένα άτομο Y ψηλός θεωρείται εκείνος που έχει ύψος πάνω από 195 cm. Ο γλωσσικός όρος «ψηλός» παρόλο που σημαίνει διαφορετική ποσότητα, μεταφέρει επαρκώς όμοια πληροφορία για τα δυο άτομα. Κατανόηση και σωστή επικοινωνία μεταξύ τους, είναι επομένως δυνατή. Τα άτομα X και Y δεν απαιτούν ταυτόσημους ορισμούς του όρου «ψηλός» για κατανοήσουν ο ένας τον άλλο. Το κύριο πλεονέκτημα της ασαφούς λογικής είναι η χρήση γλωσσικών μεταβλητών αντί ποσοτικών μεταβλητών για αναπαραστήσει ανακριβείς έννοιες.

Ο τρόπος που η ανθρώπινη λογική κατανοεί τα προβλήματα, εκτιμά καταστάσεις, αντιλαμβάνεται τα δεδομένα και προσεγγίζει την επίλυση τους είναι ανακριβής. Ενώ λοιπόν ένας υπολογιστής απαιτεί συγκεκριμένη τιμή ως σημείο αναφοράς στη σύγκριση δυο «ψηλών» ανθρώπων ,η ενσωμάτωση της ασαφούς λογικής σε μοντέλα υπολογιστικών συστημάτων έχει σημαντική απόδοση στην αντιμετώπιση αυτού και τέτοιου είδους προβλημάτων.

Η δυνατότητα στους υπολογιστές να «σκέφτονται» με ασαφή τρόπο δεν επιλύει προβλήματα που απαιτούν ακρίβεια, όπως πλοήγηση διαστημόπλοιων, στόχευση σε στρατιωτικές εφαρμογές ή εστίαση ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σε περιοχές της τάξης νανόμετρου. Δεν ανήκουν σε αυτή την τάξη όμως όλα τα ανθρώπινα προβλήματα. Σε προβλήματα αυτόματου έλεγχου, επεξεργασίας εικόνας και λήψης αποφάσεων δεν απαιτείται ακρίβεια σε τέτοιο βαθμό. Η ακρίβεια σε μηχανικά μοντέλα και εφαρμογές συνεπάγεται υψηλό κόστος και χρόνο ανάπτυξης. Η χρήση ασαφούς λογικής στη λύση ενός προβλήματος εμπεριέχει ένα βαθμό ανοχής στην ανακρίβεια που θα επιλεγεί να χαρακτηρίσει τα δεδομένα και την προσέγγιση στην προβληματική [23].

Στο Σχήμα 12 διαφαίνεται το είδος της πληροφορίας που διαθέτουμε για ένα τυπικό πρόβλημα. Όπως φαίνεται, μόνο ένα μικρό μέρος αφορά βέβαιη ή ντετερμινιστική πληροφορία. Η αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει συνήθως τα διαθέσιμα δεδομένα προέρχεται από έλλειψη και ανεπάρκεια στοιχείων, αναπόφευκτη ανακρίβεια στη συλλογή τους, απρόβλεπτα συμβάντα, από την πολυπλοκότητα των συστημάτων που εξετάζουμε καθώς και από την ασάφεια που η ίδια η ανθρώπινη γλώσσα περιγράφει τα γεγονότα.



Σχήμα 12. Αβεβαιότητα

Τα ασαφή σύνολα (fuzzy sets) παρέχουν τον μαθηματικό τρόπο για να αναπαρασταθεί η αοριστία στα ανθρώπινα προβλήματα.

5.2 Ασαφή Σύνολα και Συναρτήσεις Συμμετοχής

Οι αποφάσεις που λαμβάνονται για πολλές διεργασίες πολλές φορές εμπεριέχουν αβεβαιότητα. Στο παράδειγμα για το ύψος που αναφέρθηκε στην παράγραφο 11 εύκολα αναγνωρίζεται κάποιος που είναι 195 cm. Με τη δυαδική (binary) έννοια ένα άτομο με ύψος 194 cm δεν θεωρείται μέλος του συνόλου «ψηλός», ενώ κάποιο με ύψος 196 cm θεωρείται. Υπάρχει η περίπτωση όμως να Υπάρχει απόκλιση ή σφάλμα στη μετρητική μέθοδο. Η κατάταξη ή όχι λοιπόν στο σύνολο βασίζεται στην ακρίβεια μιας μετρητικής διάταξης. Πώς όμως αποτιμάται η αβεβαιότητα στην εξέταση αν κάποιος είναι «πολύ ψηλός»; Ένα άτομο με ύψος 194 cm κάλλιστα θεωρείται μέλος του συνόλου «πολύ ψηλός». Στην πρώτη περίπτωση η αβεβαιότητα σχετικά με το ύψος ενός άγνωστου ανθρώπου είναι δυαδική. Είτε έχει ύψος πάνω από 195 cm, Είτε όχι. Με τη βοήθεια μιας στατιστικής μελέτης με δείγμα έναν μεγάλο αριθμό ανθρώπων. Υπάρχει η δυνατότητα να εκτιμηθεί αν θα ανήκει ή όχι στο σύνολο. Η αβεβαιότητα όμως στη δεύτερη περίπτωση σχετικά με το σύνολο «πολύ ψηλός» οφείλεται στη λέξη «πολύ» και δεν είναι τυχαία (random). Ο βαθμός στον οποίο κάποιος έχει μεγάλο ύψος είναι ασαφής (fuzzy). Η έννοια του ύψους είναι σχετική. Αν εξετάζουμε ένα δείγμα ενός πληθυσμού από μπασκετμπολίστες και ενός πληθυσμού από έφηβους λαμβάνουμε υπόψη τελείως διαφορετικά δεδομένα ως προς το ποιος θεωρείται «ψηλός». Στον πραγματικό κόσμο επομένως ο οποίος χαρακτηρίζεται από ασάφεια (fuzziness), το σύνολο των «ψηλών» ατόμων μπορεί να επικαλύπτεται με το σύνολο των «κοντών» - «όχι ψηλών» ατόμων, κάτι που είναι αδύνατο στη δυαδική (binary) λογική.

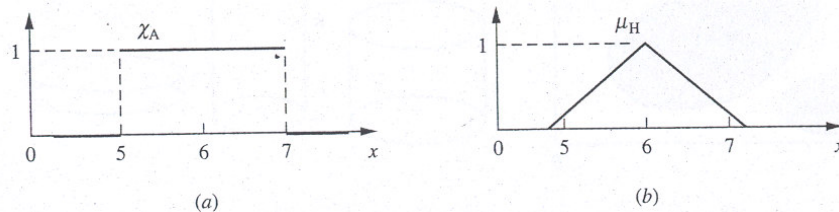
Η έννοια της συμμετοχής σε ένα σύνολο είναι ουσιώδης στη αναπαράσταση αντικειμένων μέσα σε ένα χώρο (universe) συνόλων. Η κλασσική θεωρία συνόλων ορίζει συλλογές αντικειμένων (σύνολα), τα οποία ικανοποιούν συγκεκριμένες ιδιότητες συμμετοχής [13].

Τα ασαφή σύνολα περιέχουν αντικείμενα που ικανοποιούν ανακριβείς ιδιότητες συμμετοχής, δηλαδή η συμμετοχή ενός αντικειμένου σε ένα ασαφές σύνολο είναι προσεγγιστική. Η συμμετοχή σε ένα σύνολο με την κλασσική έννοια ορισμένη από τον Cantor, είναι είτε 0, είτε 1, δηλαδή ένα αντικείμενο Είτε ανήκει, είτε όχι στο σύνολο. Για ένα στοιχείο x στο χώρο X η δυαδική συνάρτηση συμμετοχής ορίζεται ως εξής:

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

Βάσει αυτού του ορισμού στο προαναφερθέν παράδειγμα όσα άτομα έχουν ύψος από 195 cm και πάνω ανήκουν στο σύνολο «ψηλός» με συμμετοχή ίση με 1.

Ο Zadeh επέκτεινε τη δυαδική συμμετοχή ώστε να εξυπηρετεί διαφορετικούς βαθμούς (degrees) συμμετοχής στο συνεχές πραγματικό διάστημα $[0,1]$, όπου τα ακραία στοιχεία 0 και 1 δηλώνουν καμία και πλήρη συμμετοχή αντίστοιχα όπως στη δυαδική λογική. Οι τιμές όμως μέσα στο διάστημα αναπαριστούν διάφορους βαθμούς συμμετοχής για ένα στοιχείο x στο χώρο X . Τα σύνολα που ορίζονται σε ένα χώρο X και εξυπηρετούν βαθμούς συμμετοχής για τα στοιχεία τους ονομάζονται ασαφή σύνολα. Η συνάρτηση συμμετοχής για στοιχεία ενός ασαφούς συνόλου \tilde{A} ορίζεται ως $\mu_{\tilde{A}}$. Τα κλασσικά σύνολα έχουν μοναδική συνάρτηση συμμετοχής, ενώ ένα ασαφές σύνολο μπορεί να έχει άπειρο αριθμό συναρτήσεων που το αναπαριστούν. Στα ασαφή σύνολα η μοναδικότητα θυσιάζεται σε αντάλλαγμα της ευελιξίας να προσαρμόζεται η συνάρτηση συμμετοχής ώστε να μεγιστοποιείται η χρησιμότητα της σε συγκεκριμένες εφαρμογές [23]. Τα κλασσικά σύνολα πραγματικών αντικειμένων είναι ισοδύναμα και περιγράφονται ισόμορφα από μια μοναδική συνάρτηση συμμετοχής όπως η χα του σχήματος 13. Δεν υπάρχει όμως θεωρητικό ισοδύναμο πραγματικών αντικειμένων που να αντιστοιχούν στη χαρακτηριστική εξίσωση.



Σχήμα 13. Συναρτήσεις Συμμετοχής α) κλασσικά σύνολα β) ασαφή σύνολα

Τα ασαφή σύνολα όμως είναι πάντα συναρτήσεις, οι οποίες αντιστοιχούν (mapping) έναν αριθμό αντικειμένων του χώρου X στο διάστημα $[0,1]$. Πιο συγκεκριμένα, το ασαφές σύνολο \tilde{A} είναι η συνάρτηση $\mu_{\tilde{A}}$ που αντιστοιχεί το X στο $[0,1]$. Επομένως κάθε συνάρτηση η οποία αντιστοιχεί τον X στο $[0,1]$ είναι ασαφές σύνολο. Η συνάρτηση συμμετοχής ενσωματώνει τη μαθηματική αναπαράσταση της συμμετοχής σε ένα σύνολο και ο συμβολισμός αυτής της αντιστοίχισης είναι :

$$\mu_{\tilde{A}}(x) \in [0,1]$$

Η τιμή $\mu_{\tilde{A}}(x)$ αποτελεί το βαθμό συμμετοχής στον οποίο το στοιχείο x ανήκει στο \tilde{A} .

5.3 Πιθανότητα και Αβεβαιότητα

Έστω ότι αναζητούμε ένα πολύ ψηλό άτομο για να επανδρωθεί μια αθλητική ομάδα. Μια πηγή πληροφόρησης θα μπορούσε να είναι μια στατιστική δειγματοληψία η οποία θα έδειχνε ότι ένα ποσοστό (π.χ 5%) του δείγματος έχει ύψος πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή (π.χ 203 cm). Μια δεύτερη πηγή πληροφόρησης δηλώνει πως ένας καλός παίκτης ενδεχόμενα κατά μεγάλο βαθμό είναι πολύ ψηλός. Το πρόβλημα με την πρώτη πληροφορία είναι ότι αποτελεί τυχαία ποσότητα. Αν ένα άτομο επιλεγεί από το δείγμα τότε ενδέχεται να αποδειχθεί πολύ κοντότερος από ότι αναμενόταν σύμφωνα με τη θεωρία πιθανοτήτων. Η δεύτερη πληροφορία θα μπορούσε να αποδειχθεί περισσότερο χρήσιμη και λιγότερο αβέβαιη, διότι εάν μετά από μια απόφαση επιλογής ο παίκτης δεν ήταν τελικά

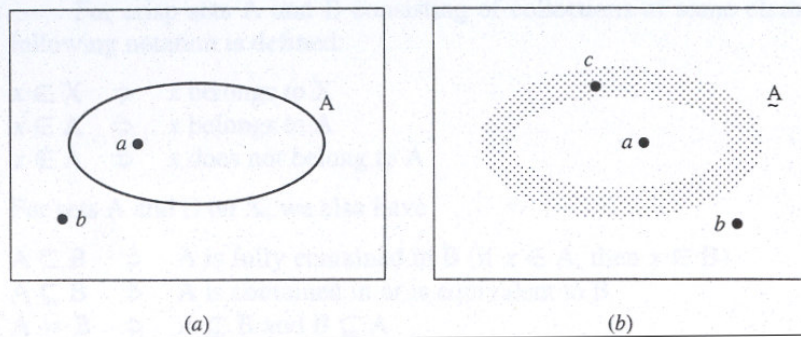
πάνω από το όριο ύψους που έθετε η πρώτη πληροφόρηση , θα υπήρχε έτσι κι αλλιώς μεγάλη πιθανότητα να είναι αρκετά ψηλός.

Η ηγουμένη (prior) πιθανότητα 0.05 στη πρώτη περίπτωση, μετατρέπεται σε μεταγενέστερη (posterior) πιθανότητα 0 ή 1, αφού του μετρηθεί ο παίκτης υποδηλώνοντας απλά ότι είναι ή δεν είναι πάνω από το όριο που είχαμε θέσει. Στη δεύτερη όμως, αν ο βαθμός συμμετοχής είναι 0.95 (1 - 0.05), παραμένει ο ίδιος μετά τη μέτρηση του παίκτη.

Η παραπάνω αποτελεί από τις μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ τυχαίων και ασαφών ενδεχόμενων. Η ασάφεια περιγράφει την αμφιβολία για ένα ενδεχόμενο, ενώ οι πιθανότητες την αβεβαιότητα εμφάνισης του ενδεχόμενου [23].

5.4 Κλασσικά και Ασαφή Σύνολα

Ένα κλασσικό σύνολο ορίζεται σχηματικά από απόλυτες γραμμές όπως στο Σχήμα 14. Ένα ασαφές σύνολο έχει ασαφή όρια. Η έννοια της συμμετοχής φαίνεται ξεκάθαρα στα δυο σχήματα. Το σημείο b δεν είναι μέλος του συνόλου A. Η σκιασμένη περιοχή δείχνει τα ασαφή όρια του \tilde{A} . Το σημείο a έχει πλήρη συμμετοχή στο ασαφές σύνολο. Το σημείο β δεν είναι μέλος του συνόλου. Η συμμετοχή όμως του σημείου c είναι αμφιλεγόμενη. Η συμμετοχή του στο σύνολο είναι στο διάστημα [0,1]. Η τιμή της συμμετοχής πλησιάζει στο 1 όσο περισσότερο πλησιάζει στη κεντρική περιοχή του συνόλου και στο 0 όσο τείνει να αφήσει τη σκιασμένη περιοχή των ορίων. Τα στοιχεία ενός ασαφούς συνόλου δεν χρειάζεται να έχουν πλήρη συμμετοχή σε αυτό. Γι' αυτό το λόγο τα ίδια στοιχεία μπορούν να ανήκουν σε διαφορετικά ασαφή σύνολα στον ίδιο χώρο.



Σχήμα 14. α) κλασσικά σύνολα β) ασαφή σύνολα

Ένας συμβατικός συμβολισμός για άστη σύνολα που περιέχουν διακριτά και πεπερασμένα στοιχεία είναι ο εξής

$$\tilde{A} = \left\{ \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_2)}{x_2} + \dots \right\} = \left\{ \sum_i \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_i)}{x_i} \right\}$$

Το σύμβολο της πρόσθεσης υποδηλώνει τη συλλογή των στοιχείων μέσα στο σύνολο. Οι αριθμητές δηλώνουν το βαθμό συμμετοχής για τα στοιχεία των αντίστοιχων παρονομαστών.

5.5 Ασαφής Υποστήριξη Απόφασης βασισμένη στη Θεωρία Bayes

Σχεδόν όλες οι διαδικασίες λήψης απόφασης εμπεριέχουν αβεβαιότητα μολονότι απαιτείται το αποτέλεσμα να οδηγεί σε σωστές επιλογές. Με τον χαρακτηρισμό 'αβεβαιότητα', εννοείται πως μια αρχική δεδομένη κατάσταση ερμηνεύεται και αξιολογείται διαφορετικά από τον καθένα. Επιπλέον, οι διαθέσιμες εναλλακτικές ενέργειες που μπορεί να υιοθετηθούν για να μεταβάλλουν την αρχική κατάσταση οδηγούν σε παρεμφερή αποτελέσματα, ενώ η δράση τους δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια. Η λήψη μιας απόφασης επομένως υπό αβεβαιότητα δεν ακολουθεί τη δυαδική λογική στην αξιολόγηση καταστάσεων αλλά ούτε και στην επιλογή εναλλακτικής. Η σωστή απόφαση δεν αποτελεί μονόδρομο στην αξιολόγηση, στην επιλογή ή στην απόρριψη εναλλακτικών. Υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα σε μια «καλή» απόφαση και σε ένα «καλό» αποτέλεσμα στη διαδικασία λήψης απόφασης κάτω από αβεβαιότητα. Εξετάζοντας ένα ζήτημα, οι πληροφορίες που το αφορούν ζυγίζονται και επιλέγουμε ανάμεσα σε ένα σύνολο εναλλακτικών ενεργειών. Η πληροφορία που αφορά όμως το συγκεκριμένο ζήτημα είναι ατελής ή αβέβαιη. Επομένως το αποτέλεσμα είναι αβέβαιο, ασχέτως της απόφασης που πάρθηκε ή της επιλεγμένης εναλλακτικής. Μπορεί να πάρουμε μια σωστή απόφαση και το αποτέλεσμα να είναι ενάντιο στον αρχικό στόχο. Επίσης, μπορεί να πάρουμε μια άσχημη απόφαση και το αποτέλεσμα να είναι επωφελές. Αυτό οφείλεται στην ιδιοτροπία των αβέβαιων συμβάντων. Εάν όμως συνεχώς λαμβάνουμε «καλές» αποφάσεις, τότε μακροπρόθεσμα οι επωφελείς καταστάσεις θα συμβαίνουν συχνότερα. Παρόλο που στη κοινή λογική είναι ξεκάθαρη η έννοια της αβεβαιότητας, καθημερινά αυτό παραβιάζεται στη πράξη. Για παράδειγμα, ένας μηχανικός παίρνει μια σωστή απόφαση, το αποτέλεσμα όμως δεν είναι το προβλεπόμενο και η οικονομική ζημιά είναι μεγάλη. Ένας ασυνείδητος οδηγός αποφασίζει να οδηγήσει μετά την κατανάλωση αλκοόλ, αλλά επιστρέφει ασφαλής χωρίς ατύχημα. Το πρόβλημα με τη λήψη αποφάσεων υπό αβεβαιότητα είναι ότι ο όγκος των δεδομένων που διαθέτουμε για τις πιθανές εκβάσεις, την αξία της πληροφορίας, τον τρόπο που οι συνθήκες αλλάζουν δυναμικά με το χρόνο, τη χρησιμότητα των εναλλακτικών ενεργειών και τις δικές μας υποκειμενικές προτιμήσεις είναι αόριστος, αμφιλεγόμενος και εν γένει ασαφής (fuzzy) [12]. Σε αυτή τη μεθοδολογία εισάγονται οι έννοιες της ασαφούς πληροφορίας, εναλλακτικών και αποτελεσμάτων στην κλασσική πιθανολογική προσέγγιση του Bayes.

5.6 Οι Λόγοι Επιλογής της Ασαφούς Προσέγγισης

Η υλοποίηση του Σ.Υ.Α με μεθόδους ασαφούς λογικής επιλέχθηκε για την υπεροχή της σε σχέση με άλλες προσεγγίσεις. Πιο συγκεκριμένα:

15. Στη πολυκριτήρια προσέγγιση που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφαλαίο,

- Ο ορισμός των βαρών προτίμησης ορίζεται αυθαίρετα, θέτοντας την λειτουργία προς τη μεριά των υποκειμενικών μας προτιμήσεων και όχι στην πρωτοβουλία του συστήματος.
- Η συλλογή των εκτιμήσεων σε τόσο μεγάλο αριθμό κριτηρίων είναι δύσκολη έως ανέφικτη.

- Τα κριτήρια μεταβάλλονται ακολουθώντας το ίδιο μοτίβο με το στόχο της απόφασης, δηλαδή την εξοικονόμηση ενέργειας. Δηλαδή, η βελτίωση της ποιότητας αέρα συνεπάγεται βελτίωση και του ολικού συντελεστή ποιότητας, έχοντας αντίκτυπο ταυτόχρονα στην ενεργειακή κατανάλωση.
16. Η λήψη απόφασης με τη χρήση δένδρων (decision trees), δεν ενδείκνυται διότι περιορίζει τη διαδικασία σε συγκεκριμένες οδούς, οι οποίες αν ακολουθηθούν με συγκεκριμένους συνδυασμούς παράγουν συγκεκριμένα αποτελέσματα. Ενώ τα δένδρα είναι πολύ χρήσιμα σε προβλήματα που συγκεκριμένες παράμετροι οδηγούν σε θεσμοθέτηση μοναδικών κανόνων στη προσέγγιση, στο “ebuilding” χρειάζεται μια ευελιξία στο παραμερισμό έως ένα βαθμό των ενεργειακών παραγόντων, με κέρδος την ενεργειακή εξοικονόμηση. Επιπλέον, η ίδια εξοικονόμηση μπορεί να προέλθει χρησιμοποιώντας διαφορετικές οδούς.
17. Η τέλεια πληροφορία είναι ένα μαθηματικό εργαλείο το οποίο τοποθετεί το Σ.Υ.Α πιο κοντά στην αντίληψη της πραγματικότητας. Τέλεια πληροφορία σημαίνει συλλογή όλων των εξεταζόμενων παραμέτρων από το διαθέσιμο πληθυσμό αντικειμένων. Στο “ebuilding” θα σήμαινε συγκομιδή όλων των ενδείξεων των ενεργειακών παραγόντων από όλα τα εξεταζόμενα κτίρια. Ενώ η τέλεια πληροφορία δίνει καθαρή εικόνα για το πρόβλημα, είναι αδύνατο να συλλεχθεί.

5.7 Υλοποίηση

5.7.1 Bayes

Η στατιστική θεωρία λήψης αποφάσεων βασίζεται στο γεγονός ότι η αβεβαιότητα στο μέλλον μπορεί να χαρακτηριστεί πιθανολογικά. Η μελλοντική έκβαση του προβλήματος που εξετάζεται είναι διαιρεμένη σε έναν αριθμό καταστάσεων. Στο “ebuilding” αποτελούνται από τα ενεργειακά labels που θα αποδοθούν στο υπό εξέταση κτίριο μετά από τη διαδικασία εφαρμογής εναλλακτικών με σκοπό τη βελτίωσή του. Στη θεωρία του Bayes οι μελλοντικές καταστάσεις χαρακτηρίζονται ως ενδεχόμενα [18].

Έστω ότι το σύνολο των πιθανών μελλοντικών καταστάσεων είναι

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$$

και το σύνολο των πιθανοτήτων εμφάνισης αυτών

$$P = \{p(s_1), p(s_2), \dots, p(s_n)\}$$

Οι παραπάνω πιθανότητες ονομάζονται ‘πρωτεύοντες πιθανότητες’.

Για το “ebuilding” οι καταστάσεις είναι τέσσερις και οι πιθανότητες τους έχουν δοθεί στην αναφορά του Ινστιτούτου Επιταχυντικών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Πίνακας 18. Πρωτεύοντες Πιθανότητες		
<u>Μελλοντική Κατάσταση</u>	<u>Ποσοστό επί του συνόλου των Κτιρίων</u>	<u>Πιθανότητα</u>
A	0-30 %	0.3
B	30-50 %	0.2
C	50-75 %	0.25
D	75-100 %	0.25

Επομένως

$S=\{A,B,C,D\}$ και $P=\{0.3,0.2,0.25,0.25\}$

Επιπλέον έστω ότι το σύνολο των εναλλακτικών σεναρίων είναι

$A=\{a_1,a_2,\dots,a_n\}$

Για την άντληση μετρήσεων και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας μεθοδολογίας χρησιμοποιήθηκε η μελέτη που περιγράφεται στο άρθρο “Energy Audit of Building Systems” και βρίσκεται στο Παράρτημα Γ.

Τα σενάρια που θα χρησιμοποιηθούν για τη παρούσα υποθετική ανάλυση (case study) είναι:

1. CAV to VAV conversion
2. Optimal ice storage control
3. Glazing retrofit
4. Indoor temperature set back/up
5. Motor replacement
6. Daylight Control plan

5.7.2 Ανάθεση Τιμών Χρησιμότητας

Σε κάθε σενάριο a_j αναθέτουμε μια τιμή χρησιμότητας u_{ji} εφόσον η προκύπτουσα κατάσταση μετά την εφαρμογή του είναι s_i ($i=A,B,C,D$).

Οι τιμές χρησιμότητας εκφράζουν άξια, κόστος ή πλεονέκτημα για κάθε ζεύγος εναλλακτικής-μελλοντικής κατάστασης. Στο “ebuilding” τα στοιχεία που θα καθορίζουν τη χρησιμότητα επιλέχθηκαν να είναι [10]:

- Το οικονομικό όφελος από την επιλογή της εναλλακτικής
- Ο χρονικός ορίζοντας ανταμοιβής (payback period)

Ο πίνακας με τις τιμές των παραπάνω για κάθε σενάριο είναι:

Πίνακας 19. Τιμές Στοιχείων Χρησιμότητας ανά Εναλλακτικό Σενάριο		
Σενάριο	Ποσοστό οικονομικού κέρδους (%)	Payback period (years)
1	11.8	3.5
2	0.6	8
3	1.7	15
4	3	0.5
5	1.1	5
6	6	4

Προφανώς, όσο μεγαλύτερο το κέρδος και μικρότερος ο χρονικός ορίζοντας, τόσο το καλύτερο για το συγκεκριμένο σενάριο.

Στη βιβλιογραφία [23, 19, 20, 17, 21], ο πίνακας χρησιμοτήτων που περιέχει τις τιμές u_{ji} παρατίθεται χωρίς να αναφέρεται η μέθοδος με την οποία διαμορφώθηκε. Στη συγκεκριμένη προβληματική η παραγωγή των τιμών χρησιμότητας έγινε με ένα μικρό μαθηματικό αλγόριθμο, ο οποίος βάσει του πίνακα 19 καθορίζει αντικειμενικά τις τιμές χρησιμότητας.

Αρχικά, αποδίδεται σε κάθε μελλοντική κατάσταση ένας δείκτης χρησιμότητας:

$$A \quad B \quad C \quad D$$

Οι τιμές για τα δυο στοιχεία χρησιμότητας κανονικοποιούνται στο διάστημα [0,1] βάσει του γνωστού τύπου

$$El_{i [0,1]} = \frac{El_i - El_{\min}}{El_{\max}}$$

Επειδή, όσο μικρότερος είναι ο χρόνος ανταμοιβής τόσο καλύτερα η τιμή της κανονικοποίησης αφαιρείται από τη μονάδα. Το άθροισμα των δυο κανονικοποιημένων τιμών (καθενός από τα δυο στοιχεία χρησιμότητας) πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο δείκτη χρησιμότητας και έτσι καθορίζεται η τιμή χρησιμότητας (utility value).

$$u_{ij} = [El_{\text{economic}_{j \text{ norm}}} + (1 - El_{\text{payback}_{j \text{ norm}}})] \times \text{Utility Index}_i \quad (1)$$

Όσο υψηλότερο είναι το ενεργειακό label τόσο υψηλότερος είναι ο δείκτης χρησιμότητας ώστε να αυξάνει η τελική τιμή χρησιμότητας για το συγκεκριμένο ζεύγος εναλλακτικής-μελλοντικής κατάστασης. Γι' αυτόν το λόγο οι τιμές των δεικτών αυξάνουν όσο πλησιάζουμε τη κατηγορία A. Επιπλέον δεν επιλέχθηκε να έχουν διαδοχική αρίθμηση, αλλά ασταθή προοδευτική αύξηση διότι κατ' αυτόν το τρόπο σενάρια με κοντινές τιμές στο οικονομικό όφελος και στο χρόνο ανταμοιβής θα μπορούν να διατηρούν προβάδισμα αν αναφέρονται σε υψηλότερα ενεργειακά labels.

Ο πίνακας χρησιμοτήτων διαμορφώνεται ως εξής:

Πίνακας 20. Πίνακας Τιμών Χρησιμότητας				
S_i A_i	A	B	C	D
a_1	12.552	8.966	3.586	0.897
a_2	3.380	2.414	0.966	0.241
a_3	0.688	0.491	0.196	0.049
a_4	8.5	6.071	2.429	0.607
a_5	5.140	3.671	1.469	0.367
a_6	8.685	6.204	2.482	0.620

Η εκτιμώμενη χρησιμότητα η οποία αναφέρεται στην εναλλακτική j είναι τότε:

$$E(u_j) = \sum_{i=1}^n u_{ji} \times p(s_i) \quad (2)$$

και αποφασίζεται να επιλέγει το κριτήριο με τη μέγιστη εκτιμώμενη χρησιμότητα...

$$E(u^*) = \max_j E(u_j) \quad (3)$$

Πίνακας 21. Εκτιμώμενες Χρησιμότητες ανά Εναλλακτικό Σενάριο	
<u>Σενάριο</u>	$E(u_j)$
1	6.679
2	1.798
3	0.366
4	4.523
5	2.735
6	4.622

Όπως φαίνεται, προτείνεται πρώτα το σενάριο 1 και ακολουθούν τα σενάρια 6 και 4, όπως ακριβώς και στην ενεργειακή μελέτη κτιρίων [10].

5.7.3 Χρήση Δευτερογενούς Πληροφορίας

Μπορούμε να αποκτήσουμε περισσότερη πληροφορία σε ότι αφορά την έκβαση των μελλοντικών καταστάσεων και έτσι να προσεγγίζουμε με μεγαλύτερη βεβαιότητα το ενδεχόμενο να συμβεί κάποια από τις μελλοντικές καταστάσεις ορισμένες στο σύνολο S. Έστω ότι τα στοιχεία της νέας πληροφορίας συγκεντρώνονται στο σύνολο X. Αυτά τα στοιχεία χρησιμοποιούνται στην προσέγγιση του Bayes ώστε να αναβαθμίσουν τις πρωτεύοντες πιθανότητες. Με τη βοήθεια των δεσμευμένων πιθανοτήτων μπορούμε να

εκφράσουμε την πιθανότητα της νέας πληροφορίας δεδομένου ότι υφίσταται κάποια από τις μελλοντικές καταστάσεις. Πρόκειται για τις δεσμευμένες πιθανότητες της μορφής $p(x_k | s_i)$ και πιο συγκεκριμένα σημαίνουν : Δεδομένου ότι υφίσταται η κατάσταση s_i , η πιθανότητα ότι η νέα πληροφορία x_k το επιβεβαιώνει είναι $p(x_k | s_i)$.

Χρησιμοποιώντας το παραπάνω, μπορούμε να εξάγουμε τις μεταγενέστερες δεσμευμένες πιθανότητες, $p(s_i | x_k)$, οι οποίες εκφράζουν το ζητούμενο, δηλαδή την πιθανότητα να μεταβεί το κτίριο σε κάποιο ενεργειακό label δεδομένου ότι εφαρμόστηκε μια συγκεκριμένη εναλλακτική.

Σύμφωνα με το νόμο του Bayes ισχύει :

$$p(s_i | x_k) = \frac{p(x_k | s_i)}{p(x_k)} \times p(s_i) \quad (4)$$

Ο όρος που δεν είναι γνωστός είναι ο παρονομαστής. Σύμφωνα όμως με το θεώρημα ολικής πιθανότητας :

$$p(x_k) = \sum_{i=1}^n p(x_k | s_i) \times p(s_i) \quad (5), \text{ όπου } n \text{ ο αριθμός των καταστάσεων (τέσσερις).}$$

Η νέα πληροφορία ονομάζεται ατελής πληροφορία διότι εκφράζει μέσω των δεσμευμένων πιθανοτήτων προσεγγιστικά τη βεβαιότητα ότι θα συμβεί μια από τις μελλοντικές καταστάσεις i .

Συνήθως στα προβλήματα απόφασης επιλέγεται τύπος νέας πληροφορίας που έμμεσα συνδέεται με τις μελλοντικές καταστάσεις. Το πρόβλημα είναι σε αυτή την περίπτωση ότι δεν μπορούμε να πιθανολογήσουμε για την έκβαση του προβλήματος μας σε άμεση σχέση με τις εναλλακτικές. Όσο περισσότερο κοντινή είναι η νέα πληροφορία στις εναλλακτικές που διαθέτουμε, τόσο πιο **αξιόπιστη** μπορεί να γίνει η απόφαση. Η φύση του προβλήματος στο “ebuilding” μας επιτρέπει να θέσουμε σαν νέα πληροφορία την ίδια την εφαρμογή των εναλλακτικών σε σχέση με τις μελλοντικές καταστάσεις. Από τις υπάρχουσες μετρήσεις σε κτίρια είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η δεσμευμένη πιθανότητα της μορφής: «Ποια είναι η πιθανότητα συγκεκριμένης κατηγορίας χρήσης (σχολείο, γράφει, κλπ) σε δεδομένη γεωγραφική περιοχή να έχει εφαρμόσει τα εκάστοτε σενάρια, δεδομένου ότι βρίσκεται σε συγκεκριμένο ενεργειακό label». ($p(x_k | s_i)$)

Από τις εξισώσεις (4) & (5) μπορούμε να οδηγηθούμε στην εκτίμηση μελλοντικής κατάστασης από την εφαρμογή του σεναρίου.

Ο προσδιορισμός επομένως της ατελούς πληροφορίας μπορεί να γίνει τεκμηριωμένα βάσει των κτιρίων που εξετάστηκαν στο παρελθόν. Η συγκεκριμένη λογική όμως κρύβει μειονεκτήματα :

1. Είναι πολύ δύσκολο να συλλεχθεί όλη αυτή η πληροφορία για τόσο μεγάλο πληθυσμό κτιρίων.
2. Δεν είναι επιστημονικά ορθό να χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα που δίνει η εφαρμογή ενός συγκεκριμένου σεναρίου σε κάποιο κτίριο, ώστε να παραχθεί κατ’αναλογία εκτίμηση σχετικά με την εφαρμογή του σε διαφορετικό κτίριο.

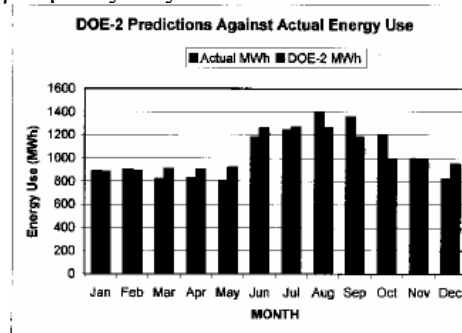
Αυτό που έχουμε όμως στη διάθεση μας είναι τα αποτελέσματα προσομοίωσης, τα οποία όταν εκτελεστούν βάσει των παραμέτρων που περιγράφουν κάθε κτίριο μας παρέχουν απευθείας εκτιμήσεις για τις ενδεχόμενες εφαρμογές εναλλακτικών.

Στο συγκεκριμένο case-study χρησιμοποιήθηκαν οι εκτιμήσεις που παρήγαγε το σύστημα DOE-2 για το εξεταζόμενο κτίριο.

Έτσι, διαμορφώνεται ο πίνακας των μεταγενέστερων δεσμευμένων πιθανοτήτων:

Πίνακας 22. Μεταγενέστερες Δεσμευμένες Πιθανότητες						
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
$p(A a_k)$	1	0	0	0	0	0
$p(B a_k)$	0	0	0	0	0	1
$p(C a_k)$	0	0	0	1	0	0
$p(D a_k)$	0	1	1	0	1	0

Το άθροισμα κάθε στήλης πρέπει να ισούται με τη μονάδα. Ως γνωστόν, τα αποτελέσματα των εργαλείων προσομοίωσης-μοντελοποίησης κτιρίων, πάντα αποκλίνουν στις εκτιμήσεις τους από την πραγματική αντίδραση του κτιρίου στα δοκιμαζόμενες παρεμβάσεις (Σχήμα 12). Οι πιθανότητες που εκφράζουν εκτίμηση επομένως, θα πρέπει να είναι μικρότερες από τη μονάδα και διαμοιρασμένες στις



Σχήμα 15. Αποκλίσεις προσομοίωσης - Παραγωγικότητας

κοντινές ενεργειακές κατηγορίες που προβλέπεται ότι θα μεταβούμε. Στην παρούσα προβληματική θεωρείται ως μοναδική μετάβαση το label που προβλέπεται μετά από την εκτέλεση του DOE-2. Θεωρείται καταχρηστικά δηλαδή, ότι το σύστημα προσεγγίζει την τέλεια πληροφορία όντας σχεδόν αλάνθαστο στις προβλέψεις του, όποτε προβλέπεται μόνο μια εκ των μελλοντικών καταστάσεων.

Η εκτιμώμενη χρησιμότητα η οποία αναφέρεται στην εναλλακτική j δεδομένης της νέας πληροφορίας είναι τότε:

$$E(u_j|x_k) = \sum_{i=1}^n u_{ji} \times p(s_i|x_k) \quad (6)$$

και η μέγιστη εκτιμώμενη χρησιμότητα δεδομένης της νέας πληροφορίας...

$$E(u^*|x_k) = \max_j E(u_j|x_k) \quad (7)$$

Για να προσδιοριστεί η αποδεσμευμένη μέγιστη εκτιμώμενη χρησιμότητα σε κάθε παράγοντα της (7) αποδίδεται το βάρος της κύριας πιθανότητας :

$$E(u_x^*) = \sum_{k=1}^r E(u^*|x_k) \times p(x_k) \quad (8), \text{ όπου } r \text{ ο πληθάριθμος της νέας πληροφορίας(έξι).}$$

Θεωρούμε ότι η εφαρμογή των εναλλακτικών είναι ισοπίθανη, $p(x_k)=0.166$. Στον πίνακα 21 φαίνονται τα νέα αποτελέσματα.

Πίνακας 23. Ατελής Πληροφορία						
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
$E(u_1 a_k)$	<u>12.552</u>	<u>0.897</u>	<u>0.897</u>	<u>3.586</u>	<u>0.897</u>	<u>8.966</u>
$E(u_2 a_k)$	3.38	0.241	0.241	0.966	0.241	2.414
$E(u_3 a_k)$	0.688	0.049	0.049	0.196	0.049	0.491
$E(u_4 a_k)$	<u>8.5</u>	<u>0.607</u>	<u>0.607</u>	<u>2.429</u>	<u>0.607</u>	<u>6.071</u>
$E(u_5 a_k)$	5.14	0.367	0.367	1.489	0.367	3.671
$E(u_6 a_k)$	<u>8.685</u>	<u>0.62</u>	<u>0.62</u>	<u>2.482</u>	<u>0.62</u>	<u>6.204</u>
$E(u^* a_k)$	12.552	0.897	0.897	3.586	0.897	8.966

Παρατηρούμε ότι ξανά θα επιλεγόταν η πρώτη εναλλακτική δεδομένων των πληροφοριών που θα παίρναμε από την εφαρμογή και των έξι εναλλακτικών.

5.7.4 Ασαφοποίηση (Fuzzification) των Μελλοντικών Καταστάσεων

Η ανάθεση τιμών χρησιμότητας με τον τρόπο που περιγράφηκε είναι αντικειμενική έως ένα βαθμό. Αυτό που δεν λαμβάνεται υπόψη είναι ότι κάθε εξεταζόμενο κτίριο βρίσκεται αρχικά σε διαφορετική κατάσταση. Δεν είναι δηλαδή δόκιμο να αποδίδουμε χρησιμότητες χωρίς να αξιολογούμε την τρέχουσα κατάσταση του κτιρίου σε σχέση με τις ορισμένες μελλοντικές καταστάσεις. Ένα σενάριο που εφαρμόζεται σε κτίριο που βρίσκεται στο Label E και εκτιμάται ότι θα οδηγηθεί στο Label A πρέπει να αξιολογηθεί καλύτερα από ότι αν εφαρμοζόταν σε κτίριο που βρίσκεται στο Label D και εκτιμάται ότι θα οδηγηθεί στο Label A. Ομοίως, ένα σενάριο που εφαρμόζεται σε κτίριο που βρίσκεται στο Label E και εκτιμάται ότι θα οδηγηθεί στο Label D (2 label άνοδο) πρέπει να αξιολογηθεί καλύτερα από ότι αν εφαρμοζόταν σε κτίριο που βρίσκεται στο Label D και εκτιμάται ότι θα οδηγηθεί στο Label B (2 labels άνοδο).

Αρχικά ορίζεται ένα ασαφές σύνολο \tilde{F} . Ως στοιχεία του ορίζονται τρεις ασαφείς

μελλοντικές καταστάσεις:

- \tilde{F}_1 : «Άριστη εφαρμογή». Σαν «άριστη» παραδεχόμαστε ότι θεωρείται μια άνοδος τριών ενεργειακών labels και πάνω.
- \tilde{F}_2 : «Καλή εφαρμογή». Σαν «καλή» παραδεχόμαστε ότι θεωρείται μια άνοδος δυο ενεργειακών labels.

- \tilde{F}_3 : «Μέτρια εφαρμογή». Σαν «μέτρια» παραδεχόμαστε ότι θεωρείται μια άνοδος ενός ενεργειακού label.

Άνοδος είναι η μετάβαση από το τρέχον ενεργειακό label σε μεγαλύτερο. Εφαρμογή που δεν βελτιώνει καθόλου την ενεργειακή κατάσταση έχει μηδενική χρησιμότητα.

Το θέμα που προκύπτει είναι ο ορισμός της συνάρτησης χρησιμότητας. Πρέπει να αντικατοπτρίζει την προσέγγιση στη μονάδα εφόσον ταυτιζόμαστε με τις λεκτικά στοιχεία του \tilde{F} κατά τις εφαρμογές των σεναρίων, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνεται υπόψη το σημείο

εκκίνησης, δηλαδή η τρέχουσα κατάσταση του κτιρίου.

Δανειζόμενοι στοιχεία από τη θερμοδυναμική θεωρία, μια θερμική μηχανή Carnot κατά τη λειτουργία της χρειάζεται μια πηγή θερμότητας T_1 και ένα μέσο M μέσω του οποίου λαμβάνουν πόσο θερμότητας Q_1 και αφού εκτελέσει μια κυκλική μεταβολή εκβάλλουν θερμότητα Q_2 σε πηγή θερμότητας T_2 .

$$\alpha = \frac{\text{ωφελιμο δαπανωμενο εργο}}{\text{δαπανωμενη ενεργεια}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (9)$$

$$\text{Επίσης ισχύει: } \frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \quad (10)$$

Αρα η απόδοση μιας θερμικής μηχανής Carnot είναι:

$$\alpha = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (11)$$

Αυτό που αποκομίζουμε από την παραπάνω σχέση είναι πως αν μια μηχανή λειτουργεί σε δεξαμενές $100^\circ\text{K} - 200^\circ\text{K}$, έχει διαφορετική απόδοση από μια άλλη που λειτουργεί σε $150^\circ\text{K} - 250^\circ\text{K}$ παρόλο που έχουν 100 βαθμούς διαφορά θερμοκρασίας. Σύμφωνα με αυτή την ιδέα ο αλγόριθμος που αποδίδει τιμή συμμετοχής στα σενάρια ανάλογα με την εκτιμώμενη άνοδο έχει ως εξής:

Τα labels βαθμονομούνται: $\overset{5}{A} \ \overset{4}{B} \ \overset{3}{C} \ \overset{2}{D} \ \overset{1}{E}$

$$\text{και για κάθε μεταβολή εφαρμόζεται ο τύπος: } \mu_{\tilde{F}_m} = 1 - \frac{\text{label}_{\text{start}}}{\text{label}_{\text{dest}}} \quad (12)$$

Για παράδειγμα ο βαθμός συμμετοχής ενός σεναρίου στο στοιχείο «άριστη εφαρμογή» για

$$\text{την μεταβολή } E \rightarrow C \text{ είναι } \mu_{\tilde{F}_1} = 1 - \frac{1}{3} = 0.666$$

Για κάθε μια λεκτική μεταβλητή που ορίστηκε στο \tilde{F} οι μεταβολές που ταυτίζονται με αυτές ανάλογα με το Label εκκίνησης βρίσκονται στον πίνακα 24.

Πίνακας 24. Ταύτιση λεκτικών μεταβλητών και μεταβολών ανά σημείο εκκίνησης		
F \sim	Μεταβολή (εκκίνηση-προορισμός) / μ_{F_m}	Προσαρμογή / νέο μ_{F_m}
«Άριστη εφαρμογή»	$E \rightarrow A / 0.8$ $E \rightarrow B / 0.75$ $D \rightarrow A / 0.6$	*1.25 / 1 *1.25 / 0.94 *1.25 / 0.75
«Καλή εφαρμογή»	$E \rightarrow C / 0.66$ $D \rightarrow B / 0.5$ $C \rightarrow A / 0.4$	*1.5 / 1 *1.5 / 0.75 *1.5 / 0.6
«Μέτρια εφαρμογή»	$E \rightarrow D / 0.5$ $D \rightarrow C / 0.33$ $C \rightarrow B / 0.25$ $B \rightarrow A / 0.2$	*2 / 1 *2 / 0.66 *2 / 0.5 *2 / 0.4

Για παράδειγμα με την «καλή εφαρμογή» ταυτίζεται η μεταβολή $E \rightarrow C$ αλλά και η $C \rightarrow A$. Και οι δυο έχουν άνοδο δυο labels, διαφορετικό όμως σημείο εκκίνησης. Προφανώς η (12) ικανοποιεί πλήρως τις προδιαγραφές μας διότι αποδίδει υψηλό βαθμό συμμετοχής στις μεταβολές που ταυτίζονται με τις παραδοχές που ορίζουν τις λεκτικές μεταβλητές του F ,

αλλά επιβραβεύει περισσότερο τα πιο αδύναμα κτίρια. Γι' αυτό το λόγο, η $E \rightarrow C$ έχει υψηλότερο βαθμό συμμετοχής από την $C \rightarrow A$ παρόλο που και οι δυο θεωρούνται «καλές εφαρμογές». Ταυτόχρονα, δίνει χαμηλή συμμετοχή εάν η μεταβολή δεν ανήκει στη συγκεκριμένη λεκτική μεταβλητή. Για παράδειγμα, η $E \rightarrow D$ έχει πολύ μικρότερη συμμετοχή στο σύνολο «καλή εφαρμογή», διότι απέχει από την άνοδο των δυο labels και ταυτίζεται με την άλλη λεκτική, «μέτρια εφαρμογή», γι' αυτό έχει σε εκείνη μεγάλο βαθμό συμμετοχής.

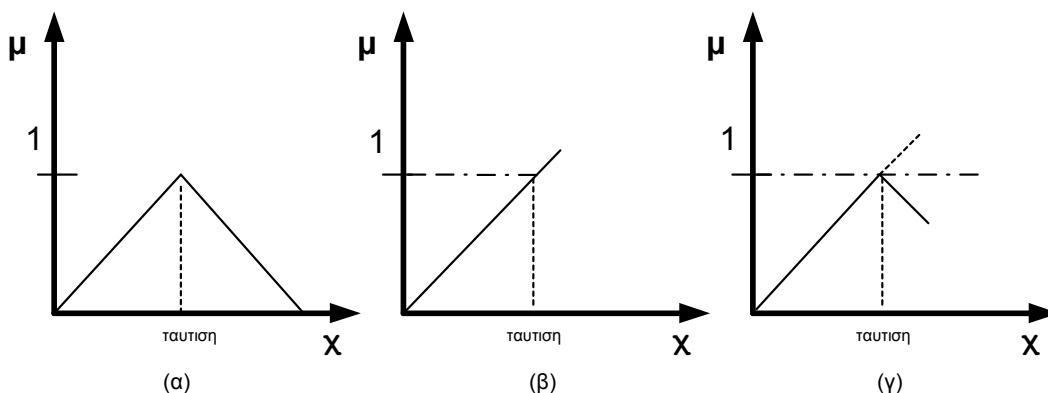
Ανάμεσα από τις μεταβολές που ανήκουν στο ίδιο στοιχείο του F , εκείνη που θα πάρει το

μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής είναι αυτή που εκφράζεται από το πιο μικρό label εκκίνησης. Στις «καλές εφαρμογές» για παράδειγμα η $E \rightarrow C$ πρέπει να πάρει βαθμό συμμετοχής ίσο με 1, ενώ οι υπόλοιπες μεγάλο βαθμό μεν, αλλά όχι μονάδα. Εξάλλου όπως παρατηρείται υπάρχει διακύμανση μεταξύ των καλύτερων εφαρμογών ανά ασαφή μεταβλητή. Η $E \rightarrow C$ είναι η καλύτερη από τις «καλές εφαρμογές» και η $E \rightarrow D$ η καλύτερη από τις «μέτριες εφαρμογές». Ως καλύτερες σε σχέση με τη λεκτική που ταυτίζονται θα πρέπει να έχουν βαθμό συμμετοχής ίσο με 1. Για να επέλθει λοιπόν μια μορφή εξομάλυνσης, η τιμή συμμετοχής σε κάθε μεταβολή 'βαρύνεται' με ένα παράγοντα, ο οποίος είναι το ποσοστό με το οποίο υπολείπεται από τη μονάδα η καλύτερη εφαρμογή για την υπό εξέταση λεκτική μεταβλητή. Δηλαδή, σε ότι αφορά τις «καλές εφαρμογές» η $E \rightarrow C$ θα πολλαπλασιαστεί με 1.5 ώστε να γίνει μονάδα, ενώ στην ίδια αναπροσαρμογή υπόκεινται όλες οι μεταβολές από όλα τα σημεία εκκίνησης που αφορούν σε «καλή εφαρμογή».

Η μορφή της καμπύλης της συνάρτησης συμμετοχής σε οποιοδήποτε ασαφές σύνολο έχει πάντα τη μορφή του σχήματος 16α. Η εξίσωση (12) μας δίνει όλο και μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής όσο πλησιάζουμε την μεταβολή που ταυτίζεται με το στοιχείο του ασαφούς συνόλου.

Έτσι, αποδίδεται ο μέγιστος βαθμός στη μεταβολή η οποία κάθε φορά ταυτίζεται με τις παραδοχές των λεκτικών μεταβλητών ανάλογα του σημείων εκκίνησης και προορισμού.

Αν οι μεταβολές είναι σε κοντινά σημεία η συμμετοχή μειώνεται, αφού παράλληλα η συμμετοχή της ίδιας μεταβολής μεγιστοποιείται για μια από τις άλλες πλέον λεκτικές μεταβολές. Η μεταβολή $E \rightarrow D$ έχει το μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής για τη μεταβλητή «καλή εφαρμογή», η $E \rightarrow C$ πέφτει σε ότι αφορά την «καλή εφαρμογή», αλλά μεγιστοποιείται για την «μέτρια εφαρμογή».



Σχήμα 16. Συναρτήσεις Συμμετοχής

Η διαμόρφωση των τιμών χρησιμότητας υπόκειται πάντα σε ένα περιορισμό. Οι ασαφείς μεταβλητές πρέπει να είναι ορθογώνια ασαφή σύνολα, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση να ισχύει:

$$\sum_{s=1}^3 \mu_{F_s}(s_i) = 1 \quad (13)$$

Επομένως κάθε άθροισμα στήλες στους παρακάτω πίνακες πρέπει να ισούται με τη μονάδα. Πρώτα αποδίδεται ο βαθμός χρησιμότητας από τη (12) για το σημείο ταύτισης κάθε φορά, και αργότερα παραχωρείται το υπόλοιπο από τη μονάδα στη μεταβλητή που είναι πιο κοντά στο δικό της σημείο ταύτισης.

Λαμβάνοντας υπόψη και εφαρμόζοντας τα παραπάνω προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες που αντιστοιχίζουν τις ασαφείς μεταβλητές για όλους τους συνδυασμούς μεταβολών για κάθε σημείο εκκίνησης (μελλοντικές καταστάσεις). Υπογραμμισμένα είναι τα σημεία ταύτισης κάθε φορά.

Πίνακας 25. Βαθμοί συμμετοχής για label εκκίνησης E				
	$E \rightarrow A$	$E \rightarrow B$	$E \rightarrow C$	$E \rightarrow D$
«Άριστη εφαρμογή»	<u>1</u>	<u>0.94</u>	0	0
«Καλή εφαρμογή»	0	0.06	<u>1</u>	0
«Μέτρια εφαρμογή»	0	0	0	<u>1</u>

Πίνακας 26. Βαθμοί συμμετοχής για label εκκίνησης D			
	D→A	D→B	D→C
«Άριστη εφαρμογή»	<u>0.75</u>	0.25	0
«Καλή εφαρμογή»	0.25	<u>0.75</u>	0.34
«Μέτρια εφαρμογή»	0	0	<u>0.66</u>

Πίνακας 27. Βαθμοί συμμετοχής για label εκκίνησης C		
	C→A	C→B
«Άριστη εφαρμογή»	0.4	0
«Καλή εφαρμογή»	<u>0.6</u>	0.5
«Μέτρια εφαρμογή»	0	<u>0.5</u>

Πίνακας 28. Βαθμοί συμμετοχής για label εκκίνησης B	
	B→A
«Άριστη εφαρμογή»	0.3
«Καλή εφαρμογή»	0.3
«Μέτρια εφαρμογή»	<u>0.4</u>

Η ανάθεση τιμών χρησιμότητων θα γίνει πλέον βάσει των τριών ασαφών μελλοντικών καταστάσεων με όμοιο τρόπο όπως και για τις μη ασαφείς καταστάσεις του συνόλου S. Στις ασαφείς μελλοντικές καταστάσεις αποδίδονται δείκτες:

$\begin{matrix} 3 & 2 & 1 \\ F & F & F \\ \sim 3 & \sim 2 & \sim 1 \end{matrix}$ πράγμα που σημαίνει ότι η χρησιμότητα διπλασιάζεται αν πρόκειται για «καλή εφαρμογή» και τριπλασιάζεται αν πρόκειται για «άριστη εφαρμογή». Βάσει της (1) διαμορφώνεται εκ νέου ο πίνακας χρησιμότητων.

Πίνακας 29. Πίνακας Τιμών Χρησιμότητας (Fuzzy States)			
$\begin{matrix} F \\ \sim \\ A_i \end{matrix}$	«Άριστη εφαρμογή»	«Καλή εφαρμογή»	«Μέτρια εφαρμογή»
a_1	5.379	3.586	1.793
a_2	1.448	0.966	0.483
a_3	0.295	0.196	0.098
a_4	3.643	2.429	1.214
a_5	2.202	1.469	0.734
a_6	3.722	2.482	1.241

Κατ' αναλογία με την (2) η εκτιμώμενη χρησιμότητα κάθε εναλλακτικής θα είναι:

$$E(u_j) = \sum_{s=1}^3 u_{js} \times p(F_{\sim s}) \quad (14), \text{ όπου}$$

$$p(F_{\sim s}) = \sum_{i=1}^n \mu_{F_s}(s_i) \times p(s_i) \quad (15)$$

Η εξίσωση (15) εκφράζει την έννοια της «πιθανότητας ενός ασαφούς ενδεχόμενου». Αυτό ορθά εκφράζεται από την εξίσωση αφού αν εξετάζαμε μη ασαφή ενδεχόμενα η (15) θα μετατρεπόταν:

$$p(F) = \sum_{x_k \in M} p(x_k) \quad \mu_M = \begin{cases} 1, & x_k \in M \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{όπου απλά εκφράζεται η πιθανότητα ενός}$$

κλασσικού ενδεχόμενου κατά τα γνωστά ως το άθροισμα των ηγούμενων πιθανοτήτων των στοιχείων που ανήκουν στο ενδεχόμενο.

Χρησιμοποιώντας την (3) υπολογίζουμε τη μέγιστη εκτιμώμενη χρησιμότητα.

Αν επιπλέον διαθέτουμε μεταγενέστερη πληροφορία μπορούμε να την λάβουμε υπόψη μας όπως περιγράφηκε παραπάνω:

$$p(F_{\sim s} | x_k) = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{F_s}(s_i) \times p(x_k | s_i) \times p(s_i)}{p(x_k)} \quad (16)$$

Σύμφωνα όμως με την (4) η εξίσωση γίνεται:

$$p(F_{\sim s} | x_k) = \sum_{i=1}^n \mu_{F_s}(s_i) \times p(s_i | x_k) \quad (17)$$

Η δεσμευμένη εκτιμώμενη χρησιμότητα είναι:

$$E(u_j | x_k) = \sum_{s=3}^3 u_{js} \times p(F_{\sim s} | x_k) \quad (18)$$

Εν τέλει επιλέγεται η εναλλακτική με τη μέγιστη τιμή εκ των αποτελεσμάτων της (18). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών βασισμένων στις δυο προηγούμενες εκδοχές, αλλά πλέον με τις μελλοντικές καταστάσεις στοιχειοθετημένες σε ασαφές σύνολο βρίσκονται στο πίνακα 28.

Πίνακας 30. Εκτιμώμενες Χρησιμότητες για Ασαφείς Μελλοντικές Καταστάσεις		
<u>Σενάριο</u>	$E(u_j)$ (Χωρίς μεταγενέστερη πληροφορία)	$E(u_j x_k)$ (μεταγενέστερη πληροφορία)
1	4.012	5.379
2	1.08	1.793
3	0.22	1.793
4	2.718	3.586
5	1.643	1.793
6	2.78	5.271

Τα σενάρια θα προτείνονταν με την ίδια σειρά όπως προηγουμένως, όμως οι αποστάσεις μεταξύ των κοντινών λύσεων άλλαξαν δείχνοντας την σχέση ανταλλαγής (trade-off) εφαρμογής – χρησιμότητας.

Ο κώδικας βρίσκεται στο Παράρτημα Δ.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Συνολικά

Η υλοποίηση της πολυκριτήριας προσέγγισης που περιγράφηκε στο τρίτο κεφαλαίο υστερεί στα παρακάτω:

3. Ο ορισμός των βαρών προτίμησης ορίζεται αυθαίρετα, θέτοντας την λειτουργία προς τη μεριά των υποκειμενικών μας προτιμήσεων και όχι στην πρωτοβουλία του συστήματος.
4. Η συλλογή των εκτιμήσεων σε τόσο μεγάλο αριθμό κριτηρίων είναι δύσκολη έως ανέφικτη.
5. Τα κριτήρια μεταβάλλονται ακολουθώντας το ίδιο μοτίβο με το στόχο της απόφασης, δηλαδή την εξοικονόμηση ενέργειας. Δηλαδή, η βελτίωση της ποιότητας αέρα συνεπάγεται βελτίωση και του ολικού συντελεστή ποιότητας, έχοντας αντίκτυπο ταυτόχρονα στην ενεργειακή κατανάλωση.

Η υλοποίηση της ασαφούς προσέγγισης που βασίστηκε στη θεωρία του Bayes παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

6. Είναι να αναγκαίο να γνωρίζουμε μόνο μια ακαθόριστη παράμετρο, τις εκάστοτε εκτιμήσεις επί της ενεργειακής κατανάλωσης.
7. Οι προτιμήσεις οι οποίες καθορίζουν ποιες εναλλακτικές είναι χρησιμότερες δεν υπολογίζονται αυθαίρετα αλλά με τη διαδικασία του πίνακα χρησιμότητων.
8. Με την ασαφοποίηση των μελλοντικών καταστάσεων επιτυγχάνεται ο συνυπολογισμός του label εκκίνησης για το κτίριο που εξετάζεται, δίνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο μια περισσότερο αξιοκρατική απόφαση.

6.2 Fuzzy Bayes. Ανάλυση και Χρησιμότητα των Αποτελεσμάτων

Η ασαφοποιημένη προσέγγιση βασισμένη στη θεωρία του Bayes είναι και αυτή που προτείνεται σαν υποστηρικτής απόφασης στο “ebuilding”. Στο πέμπτο κεφαλαίο παρουσιάστηκε η διαδικασία πρότασης απόφασης χρησιμοποιώντας πίνακα χρησιμότητων

και μετέπειτα χρησιμοποιώντας δευτερογενή πληροφορία. Τα δυο συγκεκριμένα στοιχεία επανεξετάστηκαν μετά από την ασαφопоίηση των στόχων του προβλήματος και επαναυπολογίστηκαν οι προτεινόμενες αποφάσεις υπό καθεστώς ασαφών καταστάσεων. Οι τέσσερις σειρές αποτελεσμάτων (αναφορικά στις τιμές χρησιμότητων) συγκεντρώνονται στον πίνακα 31.

Πίνακας 31. Fuzzy Bayes – Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα				
<u>Σενάριο</u>	$E(u_j)$ (πίνακας χρησιμότητων)	$E(u_j x_k)$ (μεταγενέστερη πληροφορία)	$E(u_j)$ (FUZZY - πίνακας χρησιμότητων)	$E(u_j x_k)$ (FUZZY - μεταγενέστερη πληροφορία)
1	6.679	12.552	4.012	5.379
2	1.798	3.38	1.08	1.793
3	0.366	0.688	0.22	1.793
4	4.523	8.5	2.718	3.586
5	2.735	5.14	1.643	1.793
6	4.622	8.685	2.78	5.271

Το πρώτο πράγμα που παρατηρούμε είναι ότι τα σενάρια που προτείνονται είναι:

Πρώτο με μεγάλη διάφορα το σενάριο 1 και ακολουθούν τα σενάρια 6 και 5.

Στο case study χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή της πρώτης και τρίτης στήλης αποτελεσμάτων πραγματικά δεδομένα από την ενεργειακή μελέτη κτιρίων. Το σύστημα απόφασης λειτουργεί πολύ σωστά, αφού προτείνει σαν λύση ακριβώς τα ίδια σενάρια και με την ίδια σειρά που προτείνονται και στην μελέτη.

Επιπλέον, η χρήση ατελούς πληροφορίας μας δίνει τη δυνατότητα να διαμορφώνουμε μια περισσότερο σφαιρική εικόνα για την ενδεχόμενη αποτελεσματικότητα των σεναρίων, άρα ενισχύει την αποτελεσματικότητα της απόφασης. Τα αποτελέσματα με χρήση ατελούς πληροφορίας υπολογίστηκαν ενδεικτικά άνευ πραγματικών αλλά προσεγγιστικών τιμών και για αυτό δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν επιστημονικό συμπέρασμα.

Η δευτερογενής πληροφορία, αποδεικνύεται ότι μπορεί να προκαλέσει διαφορά στη λήψη απόφασης εάν

- έχουμε αμφιβολίες για την ποιότητα των εκτιμήσεων μας επί των εναλλακτικών σεναρίων, όποτε εικάζουμε για το αν ένα σενάριο μας οδηγεί στα διάφορα labels με μερίδιο πιθανότητας
- διαφορετικά σενάρια μας οδηγούν βάσει των εκτιμήσεων στα ίδια labels

Η ατελής πληροφορία δηλαδή ‘ξεκαθαρίζει’ το τοπίο στις περιπτώσεις που έχουμε σύγχυση στο προβλεπόμενο αποτέλεσμα κάθε σεναρίου ή έχουμε ίδιο τελικό προορισμό από την εφαρμογή διαφορετικών εναλλακτικών. Το συγκεκριμένο στοιχείο μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμο αφού όπως ήδη περιγράφηκε στο τέταρτο κεφάλαιο ένα ‘έμπειρο’ σύστημα προηγείται του Σ.Υ.Α, δρώντας προπαρασκευαστικά και παρέχοντας εκτιμήσεις. Αναλόγως λοιπόν της αποτελεσματικότητας και της ανοχής που επιλέγουμε να έχει, γίνεται να το Σ.Υ.Α να προετοιμαστεί κατάλληλα με τη σωστή διαμόρφωση της ατελούς πληροφορίας.

Η ασαφής παραμετροποίηση στα συγκεκριμένα στοιχεία ενδυναμώνει την απόφαση επειδή αυτή λαμβάνεται προϋποθέτοντας ότι αξιολογείται το label εκκίνησης. Ένα αδύναμο κτίριο επιβραβεύεται περισσότερο για να επιτύχει τα ίδια σε σχέση με ένα κτίριο σε καλύτερη αρχική κατάσταση.

Κατά την εφαρμογή των διαφορετικών εκδοχών της ασαφούς προσέγγισης αν δεν σημειωθούν ανατροπές στη σειρά πρότασης των εναλλακτικών, σίγουρα αλλάζουν οι αποστάσεις μεταξύ των χρησιμότητων των. Αυτή η πληροφορία μας δίνει την εικόνα σχετικά με το πόσο καλύτερη εφαρμογή έχει ένα σενάριο σε σχέση με τα άλλα και το κατά πόσο μπορούμε να επιτύχουμε σχεδόν το ίδιο αποτέλεσμα με την εφαρμογή διαφορετικών εναλλακτικών.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] C.J.Date, "An Introduction to database systems", 6th ed. , Ed. Massachusetts:Addison-Wesley, 1995
- [2] Abraham Silberschatz, Henry F.Corth, S.Sudarshan, "Database system concepts", 3rd ed. , Ed. New York:Mc Graw-Hill, 1997
- [3] Raghu Ramakrishnan, Johannes Gehrke, "Database management systems", 2nd ed. , Ed. New York:Mc Graw-Hill, 2000
- [4] Ν.Φ. Ματσατσίνης, Πολυτεχνείο Κρήτης-Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης. Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων.
- [5] Ινστιτούτο Επιταχυντικών Συστημάτων και Εφαρμογών Πανεπιστήμιο Αθηνών. Επιλογή παραμέτρων που θα πρέπει να μετρώνται σε κάθε κτίριο. Ολοκληρωμένο Σύστημα για την e-Διαχείριση του Εσωτερικού Περιβάλλοντος και της Ενέργειας στα Κτίρια.
- [6] Ινστιτούτο Επιταχυντικών Συστημάτων και Εφαρμογών Πανεπιστήμιο Αθηνών. Μεθοδολογία Περιβαλλοντικής Κατάταξης των κτιρίων. Ολοκληρωμένο Σύστημα για την e-Διαχείριση του Εσωτερικού Περιβάλλοντος και της Ενέργειας στα Κτίρια .
- [7] Ινστιτούτο Επιταχυντικών Συστημάτων και Εφαρμογών Πανεπιστήμιο Αθηνών. Μεθοδολογία Ενεργειακής Κατάταξης των κτιρίων. Ολοκληρωμένο Σύστημα για την e-Διαχείριση του Εσωτερικού Περιβάλλοντος και της Ενέργειας στα Κτίρια .
- [8] Δ. Κολοκοτσά, Ερευνητικό Πανεπιστημιακό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων-Πολυτεχνείο Κρήτης. Μέθοδος βελτιστοποίησης και Εναλλακτικά σενάρια βελτίωσης συνθηκών εσωτερικού περιβάλλοντος και εξοικονόμησης ενέργειας.
- [9] H. Schildt, Java 2, The Complete Reference. Osborne-Mc Graw Hill, 2003.
- [10] Energy Audit of Building Systems. Introduction to Energy Audit.
- [11] J H MOON, Application of Fuzzy Decision Making Method to the Evaluation of Spent Fuel Storage Options, Department of Nuclear Engineering, Seoul National University, Korea.

- [12] A. Schuster, Decision Making on Fuzzy Pieces of Evidence.
- [13] C. Bana, Readings in Multiple Decision Aid. Springer-Verlag.
- [14] Bernard Roy, Multicriteria Methodology for Decision Aiding. Kluwer Academic Publishers.
- [15] J. Fodor, Fuzzy Preference Modelling & Multicriteria Decision Support.
- [16] K. Balckmond, Bayesian Inference and Decision Theory, G. Mason University.
- [17] George P. Schell, Evidence of Information System Value, University of North Carolina.
- [18] A.L. Yuille, Bayes Decision Theory.
- [19] D. Lane, Bayes Base Rates.
- [20] P A. Jensen, Operations Research Models and Methods.
- [21] D. Johnson, Criteria in Hypothesis Testing.
- [22] Principles of Statistics, Cambridge University.
- [23] T. J. Ross, Fuzzy Logic with Engineering Applications