ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Σχεδιασμός Συστημάτων Διαχείρισης Ενέργειας Κτηρίων με Χρήση Θερμικών Μοντέλων και Ευρετικών - Μεθευρετικών Αλγορίθμων Βελτιστοποίησης

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

Ελευθερία Κοντογιάννη

Α.Μ: 2010019038, Email: ekontogianni@isc.tuc.gr

Εξεταστική Επιτροπή:

Δ. Ρόβας, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης (Επιβλέπων)

Ε. Γρηγορούδης, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης

Ι. Νικολός, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης

© 2013 Ελευθερία Κοντογιάννη.

Σχεδιασμός Συστημάτων Διαχείρισης Ενέργειας Κτηρίων με Χρήση Θερμικών Μοντέλων και Ευρετικών - Μεθευρετικών Αλγορίθμων Βελτιστοποίησης

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δημήτριο Ρόβα, για την ανάθεση της εργασίας, την πολύτιμη βοήθειά του, αλλά και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Χάρη στην υπομονή του και στις παροχές που είχα διαθέσιμες, απέκτησα πολλές γνώσεις, επιστημονικές και τεχνικές. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την πολύ σημαντική εμπειρία που απέκτησα, κατά την ένταξή μου στα ερευνητικά προγράμματα PEBBLE (Positive Energy Buildings thru Better controL dEsicions) και BaaS (Building as a Service) τα οποία συντονίζει.

Ακόμη, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους συνεργάτες και φίλους, υποψήφιους διδάκτορες Γιώργο Γιαννάκη και Γιώργο Κόντε για τις ευχάριστες στιγμές που περάσαμε στο γραφείο αλλά και για τη συνεχή βοήθειά τους στις δυσκολίες που συνάντησα για να ολοκληρώσω τη συγκεκριμένη εργασία.

Ένα ακόμη ευχαριστώ στις φίλες και στους φίλους μου, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου για τις πολύ όμορφες στιγμές που περάσαμε μαζί, αλλά και στον Ταξιάρχη για τη στήριξη που μου έχει δείξει.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, στην αδερφή μου και στη γιαγιά μου, Ελευθερία, για την αγάπη τους, την εμπιστοσύνη τους και την υλική και ηθική στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες **iii**

Περιεχόμενα **v**

Κατάλογος σχημάτων **vii**

Κατάλογος πινάκων **ix**

1 Περίληψη **1**

2 Εισαγωγή **3**

3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση **7**
3.1 Έλεγχος των HVAC συστημάτων 7
3.1.1 Εφαρμογές ελέγχου HVAC βασισμένες σε κτηριακά μοντέλα 8
3.2 Φυσικά αεριζόμενα κτήρια 11

4 Προσέγγιση της θερμικής άνεσης **15**
4.1 Μαθηματικά μοντέλα 15
4.1.1 Το μοντέλο του Fanger 16
4.1.2 Το μοντέλο του Pierce 18
4.1.3 Το μοντέλο KSU 22
4.2 Τοπική θερμική δυσφορία 24
4.3 Κατηγοριοποίηση περιβάλλοντος με βάση τη θερμική άνεση 25

5 GenOpt **27**
5.1 Προβλήματα Βελτιστοποίησης 27
5.1.1 Κατηγοριοποίηση Προβλημάτων 28
5.1.2 Είδη Περιορισμών 28
5.2 Επιλογή Αλγορίθμου 29
5.3 Generalized Pattern Search Methods 31
5.3.1 Παραδοχές 31

5.3.2 Περιγραφή των GPS αλγορίθμων 32
5.3.3 Model Adaptive Precision GPS Algorithm 33
5.3.4 Hooke-Jeeves Algorithm 33
5.4 Η δομή του GenOpt 36
5.4.1 Περιβάλλον διεπαφής για το πρόγραμμα προσομοίωσης 36
5.4.2 Περιβάλλον διεπαφής για τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης 38

6 Περιγραφή του μοντέλου 39
6.1 Γεωμετρία του κτηρίου και Θερμικές ζώνες 39
6.1.1 Χαρακτηριστικά τοίχων και Υαλοπινάκων 41
6.1.2 Εσωτερικά κέρδη 42
6.1.3 Αερισμός και Διήθηση του αέρα 43
6.1.4 Σύστημα HVAC 44
6.1.5 Δεδομένα καιρού 44
6.2 Το λογισμικό EnergyPlus 44
6.2.1 Χρονοδιαγράμματα (Schedules) 45
6.2.2 Energy Management System (EMS) 46
6.2.3 Η θερμική άνεση στο EnergyPlus 48

7 Παρουσίαση του προβλήματος και Πειραματικές εφαρμογές 51
7.1 Προσδιορισμός του προβλήματος 51
7.1.1 Ορισμός των ελεγκτών 52
7.1.2 Επιλογή αλγορίθμου και ρυθμίσεις βελτιστοποίησης 53
7.1.3 Ορισμός της συνάρτησης κόστους 53
7.2 Πειραματικές εφαρμογές 54
7.2.1 Καλοκαιρινή ημέρα σε θερμό κλίμα 56
7.2.2 Χειμερινή ημέρα σε θερμό κλίμα 59
7.2.3 Χειμερινή ημέρα σε ψυχρό κλίμα 62

8 Συμπεράσματα 67

Βιβλιογραφία 69

Κατάλογος σχημάτων

3.1 Ρύθμιση της θερμοκρασίας ζώνης για θέρμανση και ψύξη και για το εύρος θερμικής άνεσης ”Narrow” και ”Wide” 10
3.2 Αποδεκτά όρια θερμοκρασίας λειτουργίας και υγρασίας για τυπική ένδυση θερινής και χειμερινής περιόδου για κυρίως καθιστική δραστηριότητα [32] 12
3.3 Αποδεκτά όρια θερμοκρασίας λειτουργίας και μέσης εξωτερικής θερμοκρασίας για θερινή και καλοκαιρινή περίοδο σύμφωνα με το Adaptive comfort model βασισμένο στο ASHRAE Standard 55-2010 13
3.4 Αποδεκτά όρια θερμοκρασίας λειτουργίας και μέσης εξωτερικής θερμοκρασίας για θερινή και καλοκαιρινή περίοδο σύμφωνα με το Adaptive comfort model βασισμένο στο European Standard EN15251-2007 14

4.1 Προβλεπόμενο ποσοστό δυσαρεστημένων (PPD) σε σχέση με την προβλεπόμενη μέση ψήφο (PMV) σύμφωνα με τον Fanger 18

5.1 Η δομή του GenOpt, [34] 37
5.2 Το περιβάλλον διεπαφής του GenOpt για τον αλγόριθμο [34] 38

6.1 Η γεωμετρία του πειραματικού κτηρίου, όπως έχει σχεδιαστεί στο OpenStudio του Google SketchUp 39
6.2 Διαχωρισμός των θερμικών ζωνών στο πειραματικό κτήριο 40
6.3 Επιφάνεια Υαλοπινάκων στην πρόσοψη, δεξιά, πίσω και αριστερή όψη του κτηρίου . 40
6.4 Χρονοδιάγραμμα παρουσίας ανθρώπων για κάθε εργάσιμη ημέρα 43
6.5 EP-Launch 45
6.6 Η κλάση Schedules του EnergyPlus 46
6.7 Η κλάση EMS του EnergyPlus 47
6.8 Το πεδίο People 49

7.1 Διαδραστικότητα μεταξύ GenOpt και EnergyPlus 54
7.2 Κλίμακα αξιολόγησης θερμικής άνεσης 55
7.3 Εξωτερικές συνθήκες για την ημέρα του πειράματος 56

7.4 Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας για κάθε δείκτη και αντίδραση των άλλων δεικτών 58
(α□) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον Fanger PMV 58
(β□) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον Pierce PMVET 58
(γ□) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον KSU TSV 58
7.5 Εξωτερικές συνθήκες για την ημέρα του πειράματος 60
7.6 Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας για κάθε δείκτη και αντίδραση των άλλων δεικτών 61
(α□) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον Fanger PMV 61
(β□) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον Pierce PMVET 61
(γ□) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον KSU TSV 61
7.7 Εξωτερικές συνθήκες για την ημέρα του πειράματος 63
7.8 Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας για κάθε δείκτη και αντίδραση των άλλων δεικτών 64
(α□) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον Fanger PMV 64
(β□) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον Pierce PMVET 64
(γ□) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον KSU TSV 64

Κατάλογος πινάκων

3.1 Διαδικασία υπολογισμού για τον ορισμό του εύρους της θερμικής άνεσης σε δεδομένο χρόνο [17] 10

4.1 Κατηγορίες θερμικού περιβάλλοντος 26

5.1 Ο γενικός αλγόριθμος των GPS 34
5.2 Ο χάρτης γενικής αναζήτησης (global search) στον αλγόριθμο Hooke-Jeeves 35

6.1 Θερμικές ζώνες - Επιφάνεια και Ύψος 40
6.2 Θερμικές ιδιότητες των κατασκευαστικών υλικών (α) 41
6.3 Θερμικές ιδιότητες των κατασκευαστικών υλικών (β) 41
6.4 Layers και U-value για κάθε κατασκευή 42
6.5 Χαρακτηριστικά Υαλοπινάκων 42
6.6 Δυνατές θέσεις ανοίγματος των παραθύρων 47

7.1 Όρια των περιορισμών 56

Κεφάλαιο 1

Περίληψη

Οι ανησυχίες των τελευταίων ετών για την προστασία του περιβάλλοντος με μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αλλά και συνετή διαχείριση ενεργειακών πόρων έχουν οδηγήσει σε μια σειρά νόμων ανά τον κόσμο για την επίτευξή τους. Αποτέλεσμα είναι να εντείνονται όλο και περισσότερο οι συνεχείς προσπάθειες για εξοικονόμηση ενέργειας και ενεργειακή αποδοτικότητα με την ανάπτυξη πλήθους ερευνητικών δραστηριοτήτων. Ανάμεσα σε αυτές είναι και η ενεργειακή αποδοτικότητα στον τομέα των κτηρίων. Εκτός από το βιοκλιματικό σχεδιασμό και τη θερμομόνωση για την επίτευξη αυτού του στόχου, έντονο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στον τομέα των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας κτηρίων. Ο τομέας αυτός διευρύνεται σε διάφορα πεδία, στη μοντελοποίηση του κτηρίου, στο σχεδιασμό ενός ελεγκτή που θα αποφασίζει ποιες θα είναι οι ενέργειες των συστημάτων κλιματισμού αλλά και στον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η εφαρμογή των αποφάσεων στο πειραματικό κτήριο.

Η παρούσα εργασία ωστόσο επικεντρώνεται στο σχεδιασμό των ελεγκτών οι οποίοι θα αποφασίζουν για τις ενέργειες των συστημάτων κλιματισμού και του αερισμού, βασισμένοι στο κτηριακό μοντέλο. Ο σχεδιασμός ενός ελεγκτή τίθεται συνήθως ως ένα πρόβλημα με περιορισμό προς ελαχιστοποίηση: με δεδομένο ένα μοντέλο του κτηρίου δρώντας ως υποκατάστατο του πραγματικού, πρέπει να οριστεί ένας ελεγκτής ο οποίος ελαχιστοποιεί μια συνάρτηση κόστους που ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το πρόβλημα. Η συνάρτηση κόστους αποτελείται ουσιαστικά από δυο αντικρουόμενους όρους: την ενέργεια που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί και τη θερμική άνεση, που πρέπει να διατηρηθεί σε αποδεκτά επίπεδα. Ο υπολογισμός της θερμικής άνεσης μπορεί να γίνει από το θερμικό μοντέλο του κτηρίου έτσι ώστε να εισαχθεί στη συνάρτηση κόστους.

Το λογισμικό προσομοίωσης κτηρίων EnergyPlus είναι αυτό στο οποίο μοντελοποιείται το κτήριο εφαρμογής και το οποίο παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της θερμικής άνεσης με διάφορα μοντέλα. Με τη χρήση των μοντέλων του Fanger, του Pierce και το KSU σε κάθε διαδικασία βελτιστοποίησης, θα προκύψουν διάφοροι ελεγκτές οι οποίοι και θα αποτυπώσουν την επίδραση των παραπάνω μοντέλων ως περιορισμοί. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με τη βοήθεια του πακέτου βελτιστοποίησης GenOpt το οποίο παρέχει ένα σύνολο αλγορίθμων προς την επίλυση διαφορετικού είδους προβλημάτων αλλά και διαθέτει ένα περιβάλλον που διευκολύνει την επικοινωνία αυτών των αλγορίθμων με το θερμικό μοντέλο. Στο τέλος της μελέτης θα προκύψουν εκτός από τους ελεγκτές κάποια συμπερασματικά διαγράμματα που θα απεικονίσουν τη συμπεριφορά των θερμικών δεικτών για τα διαφορετικά σύνολα πειραμάτων τα οποία

πραγματοποιούνται για ξεχωριστή χρονική περίοδο και κλιματικά δεδομένα.

Κεφάλαιο 2

Εισαγωγή

Η ενέργεια αποτέλεσε από το παρελθόν το κύριο μέσο στις δραστηριότητες του ανθρώπου. Είναι η πηγή όχι μόνο για τη διευκόλυνση της ζωής του ανθρώπου, αλλά για την ικανοποίηση βασικών αναγκών. Η οικονομική ανάπτυξη και το βιοτικό επίπεδο μιας χώρας συνδέεται σημαντικά με την παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας, τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της οποίας, όπως η κατανομή της χρήσης της για την εξυπηρέτηση αναγκών αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για τη χάραξη πολιτικών γραμμών και την ανάπτυξη πρωτοβουλιών.

Παγκοσμίως, έχει υπολογιστεί ότι ο κτηριακός τομέας σε συνδυασμό με τον εμπορικό σπαταλούν 2589 Mt ισοδύναμου πετρελαίου σε ενέργεια το οποίο αντιστοιχεί στο 40% της καταναλισκόμενης ενέργειας, ενώ στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης φαίνεται ότι το 76% προορίζεται για την επίτευξη της θερμικής άνεσης στα κτήρια από τα HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) συστήματα. Ο βραχυπρόθεσμος στόχος για το 2020 που έχει τεθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση, αναφέρεται σε μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 20% κάτω από τα επίπεδα του 1990, 20% της κατανάλωσης ενέργειας της ΕΕ να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές και μείωση κατά 20% στη χρήση πρωτογενούς ενέργειας σε σύγκριση με τα προβλεπόμενα επίπεδα μέσω τη βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης. Στις ΗΠΑ ο κτηριακός τομέας κατέχει το 40% της χρησιμοποιούμενης ενέργειας και είναι υπεύθυνος για περίπου το 40% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Οι στόχοι που έχουν τεθεί από την California Public Utilities Commission περιλαμβάνουν μείωση κατά 70% της κατανάλωσης από τον κτηριακό τομέα.

Με δεδομένα τις παραπάνω συνθήκες και στόχους που αφορούν στη μείωση εκπομπών και καταναλισκόμενης ενέργειας, υπάρχει πλέον μια ξεκάθαρη στροφή στην ενεργειακή απόδοση και στην εξοικονόμηση ενέργειας. Αναφορικά με τον κτηριακό τομέα, ο οποίος είναι αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας, οι προσπάθειες που γίνονται αφορούν στη βελτίωση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών με χρήση υλικών που θα προσφέρουν την καλύτερη δυνατή θερμομόνωση αλλά στην πρόοδο που σημειώνεται στον τομέα του βιοκλιματικού σχεδιασμού. Πέρα όμως από αυτές τις ενέργειες οι οποίες αν μη τι άλλο απαιτούν υψηλό κόστος και αφορούν περισσότερο σε νεόδμητα κτήρια, νέες τεχνολογίες που σχετίζονται με την ορθότερη χρήση των συστημάτων HVAC ανατέλλουν στα πλαίσια των προσπαθειών για εξοικονόμηση της ενέργειας.

Οι τεχνολογίες αυτές, που ονομάζονται Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας Κτηρίων (Building Energy Management Systems, BEMS) απαιτούν για την εφαρμογή τους σημαντική προσπά-

θεια σε πολλούς τομείς. Αρχικά όμως απαιτείται ένα υποκατάστατο του κτηρίου εφαρμογής το οποίο συνήθως είναι σχεδιασμένο και μοντελοποιημένο από κάποιο πρόγραμμα ενεργειακής προσομοίωσης. Έχοντας ένα τέτοιο μοντέλο ως δεδομένο, πρέπει να σχεδιαστεί ένας ελεγκτής ο οποίος θα διαχειρίζεται τη χρήση των μονάδων HVAC με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Ο σχεδιασμός των ελεγκτών αυτών τίθεται συνήθως ως ένα πρόβλημα προς ελαχιστοποίηση. Ο τρόπος είναι να δημιουργηθεί μια συνάρτηση κόστους προς ελαχιστοποίηση η οποία θα λαμβάνει υπόψιν της τόσο την ελαχιστοποίηση της ενέργειας όσο και την διατήρηση της θερμικής άνεσης σε αποδεκτά επίπεδα. Το σημείο που αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο θα εκφραστεί η θερμική άνεση αποτελεί και το κύριο αντικείμενο ενασχόλησης της συγκεκριμένης εργασίας.

Η θερμική άνεση επηρεάζει κατά μεγάλο ποσοστό τη σωματική και ψυχολογική διάθεση, την ικανοποίηση και την παραγωγικότητα των ανθρώπων που ζουν, εργάζονται και γενικώς δραστηριοποιούνται μέσα σε ένα κτήριο. Η πλειοψηφία των συστημάτων HVAC για την θερμική άνεση βασίζεται είτε μεμονωμένα στον έλεγχο της θερμοκρασίας, είτε σε έναν συνδυασμό μεγεθών, είτε σε πιο πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα που επιδιώκουν να ποσοτικοποιήσουν τη θερμική άνεση των ανθρώπων που βρίσκονται σε ένα κτήριο. Η χρήση αυτών των μοντέλων φαίνεται να είναι περισσότερο αξιόπιστη από αυτή μεμονωμένων μεγεθών, καθώς λαμβάνει υπόψη της ένα πλήθος από μεταβλητές που σχετίζονται με τις εξωτερικές συνθήκες αλλά και με τη φυσιολογία του ανθρώπου. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να εισαχθούν εύκολα στο προς βελτιστοποίηση μαθηματικό πρόβλημα που αναφέρθηκε προηγουμένως, εντασσόμενα ως περιορισμοί. Έτσι, στην εργασία αυτή θα δημιουργηθεί ένα μαθηματικό πρόβλημα με τους περιορισμούς του να περιλαμβάνουν τρία από αυτά τα μοντέλα. Σκοπός είναι να ερευνηθεί πώς η επιλογή του θερμικού μοντέλου θα επηρεάσει ποιοτικά την εξαγωγή του ελεγκτή αλλά και τι ποσότητες ενέργειας απαιτούνται για τη βελτίωση των επιπέδων τους.

Το κτήριο στο οποίο πραγματοποιούνται αυτές οι εφαρμογές έχει μοντελοποιηθεί στο πρόγραμμα προσομοίωσης Energy Plus και δεν υφίσταται στην πραγματικότητα. Για τη θερμική άνεση χρησιμοποιούνται οι δείκτες τριών κυρίων μοντέλων: του Fanger, του Pierce και του KSU (Kansas State University), σύμφωνα με τους οποίους δημιουργούνται διαφορετικές συναρτήσεις κόστους. Οι διαφορετικές αυτές συναρτήσεις ορίζονται για διάφορα επίπεδα των δεικτών τα οποία διαμορφώνονται με βάση τους κανονισμούς της ASHRAE και του ISO. Σημαντικό εργαλείο για την εκτέλεση της εκάστοτε βελτιστοποίησης αποτέλεσε το ολοκληρωμένο πακέτο GenOpt (Generic Optimization Program) που βρίσκει εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων βελτιστοποίησης, ενώ διαθέτει και ένα σύνολο από αλγορίθμους βελτιστοποίησης, με τη βοήθεια των οποίων γίνεται η αναζήτηση των βέλτιστων παραμέτρων του προβλήματος. Μετά το πέρας των διαδικασιών βελτιστοποίησης για κάθε περίπτωση, παρουσιάζεται μια συγκριτική μελέτη σχετικά με την επίδραση της επιλογής των εκάστοτε ελεγκτών.

Όλα τα παραπάνω λοιπόν, δομούνται αναλυτικά στην παρούσα εργασία. Έτσι, στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στην πρόσφατη ερευνητική δραστηριότητα σχετικά με τις δυο κύριες κατηγορίες με βάση τις οποίες πραγματοποιείται ο έλεγχος των συστημάτων HVAC, ενώ εκτενέστερα αναλύονται οι εφαρμογές ελέγχου τους οι οποίες βασίζονται σε κτηριακά μοντέλα δίνοντας έμφαση στον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται οι ελεγκτές και εκφράζεται ο περιορισμός της θερμικής άνεσης.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στην θερμική άνεση, πώς μπορεί να προσεγγιστεί, με ποιες

μεταβλητές και μεγέθη, αλλά και ποια είναι τα πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα που μπορούν να την ποσοτικοποιήσουν και τις σχέσεις με τις οποίες αυτά υπολογίζονται. Τέλος, γίνεται μια αναφορά στις κατηγορίες θερμικού περιβάλλοντος με βάση τις οποίες μπορεί να καταταχθεί ένα κτήριο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση του πακέτου βελτιστοποίησης GenOpt, το οποίο διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στη διεκπεραίωση της συγκεκριμένης εργασίας, αφού χωρίς αυτό δε θα μπορούσαν να γίνουν οι διαδικασίες βελτιστοποίησης. Αναλύεται λοιπόν τι είδους προβλήματα μπορούν να επιλυθούν μέσα από αυτό το πρόγραμμα, ποια είναι η κατηγοριοποιήσεις των μεταβλητών, ποιοι αλγόριθμοι παρέχονται και για τι είδους προβλήματα προορίζονται, ποια είναι τα είδη των περιορισμών και πως μπορούν να εκφραστούν, ποια είναι τα απαραίτητα αρχεία που απαιτούνται, αλλά και πως λειτουργεί ο αλγόριθμος που επιλέγεται για τις βελτιστοποιήσεις του προβλήματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μοντέλο του προβλήματος· το πειραματικό κτήριο για το οποίο πρέπει να βρεθούν οι ελεγκτές που με τις εντολές τους θα ελαχιστοποιούν την ενέργεια ικανοποιώντας το τιθέμενο κάθε φορά όριο για τη θερμική άνεση. Δίνεται λοιπόν, η γεωμετρία του κτηρίου, οι διαστάσεις του, τα υλικά που το αποτελούν και οι θερμικές ιδιότητές τους, τα θερμικά κέρδη, τα χρονοδιαγράμματα χρήσης του κτηρίου, ο αερισμός του κτηρίου και τα συστήματα HVAC που διαθέτει. Επίσης, γίνεται μια παρουσίαση του λογισμικού EnergyPlus, στο βαθμό που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της εργασίας, δηλαδή στα χρονοδιαγράμματα, στον ορισμό της θερμικής άνεσης και των ελεγκτών του συστήματος HVAC και της λειτουργίας των παραθύρων.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο μαθηματικός προσδιορισμός του προβλήματος και πιο συγκεκριμένα του ελεγκτή και της συνάρτησης κόστους, με βάση τα οποία γίνεται και η επιλογή του αλγορίθμου. Επίσης, παρουσιάζονται οι πειραματικές εφαρμογές, ποια είναι τα είδη πειραμάτων και για ποιο σκοπό πραγματοποιούνται, υπό ποιες συνθήκες και γιατί και ποια είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Μετά από κάθε σύνολο πειραμάτων προκύπτουν κάποια διαγράμματα όπου παρουσιάζεται η τελικά επίδραση των περιορισμών που τέθηκαν στη δημιουργία των ελεγκτών.

Στο έβδομο κεφάλαιο δίνονται τα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής και προτείνονται μελλοντικές εργασίες, που μπορούν να προκύψουν ως συνέχεια.

Τέλος, με αφορμή την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή δημοσιεύτηκε η ακόλουθη εργασία:

1. E.G. Kontogianni, G.I. Giannakis, G.D. Kontes, D.V. Rovas, ”Comparing the impact of different thermal comfort on a model-assisted control design process”. CLIMA 2013: 11th REHVA World Congress & 8th International Conference on IAQVEC, ”Energy Efficient, Smart and Healthy Buildings”, Prague, Czech Republic, 16 - 19/6/2013

Κεφάλαιο 3

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η προσπάθεια των τελευταίων ετών για μείωση της κατανάλωσης της πρωτογενούς ενέργειας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη κανονισμών και οδηγιών από χώρες και κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο. Ο κτηριακός τομέας κατέχει το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας παγκοσμίως και σχεδόν το ήμισυ αυτού του ποσοστού, οφείλεται στη χρήση των συστημάτων HVAC (Heating, Ventilation and Air Contioning) για σκοπούς θέρμανσης, ψύξης και αερισμού. Οι νέες κατασκευαστικές τεχνολογίες κτηρίων καθώς και ο βιοκλιματικός σχεδιασμός έχουν καθοριστικό ρόλο στο στόχο αυτό. Ωστόσο, οι ενεργειακές απαιτήσεις αυτών των κτηρίων μπορούν να μειωθούν πιο άμεσα και ακόμη περισσότερο, με τη σωστή διαχείριση της ενέργειας. Επίσης, δεν πρέπει να λησμονηθεί, ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των υφιστάμενων κτηρίων αυτή τη στιγμή, είναι παλαιότερης τεχνολογίας και καταναλώνει πολύ περισσότερη ενέργεια. Για το λόγο αυτό, η εφαρμογή ενός αποδοτικού και ολοκληρωμένου συστήματος ελέγχου του μικροκλίματος σε ένα κτήριο μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων και κατ' επέκταση στη μείωση εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Παρακάτω, ακολουθεί μια μελέτη του σχεδιασμού τέτοιων συστημάτων στη μέχρι τώρα ερευνητική πορεία και πιο συγκεκριμένα ο τρόπος, το μαθηματικό υπόβαθρο και οι μεταβλητές βάσει των οποίων έχουν υλοποιηθεί καθώς και πως μπορούν να εφαρμοστούν όλα αυτά ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει ένα κτήριο.

3.1 Έλεγχος των HVAC συστημάτων

Στην πρόσφατη έρευνα, έχουν παρουσιαστεί δυο τάσεις στο πεδίο ελέγχου των HVAC· αυτές είναι α) η προσέγγιση μέσω της τεχνητής νοημοσύνης, για παράδειγμα των νευρωνικών δικτύων και των ασαφών και προσαρμοστικών ασαφών νευρωνικών δικτύων και β) τα Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας Κτηρίων (Building Energy Management Systems, BEMS) που βασίζονται στον Έλεγχο Προβλεπτικού Μοντέλου (Model Predictive Control, MPC) και σε αρχές του κλασικού ελέγχου.

Η πρώτη κατηγορία χρησιμοποιείται για HVAC συστήματα, κυρίως σε περιπτώσεις μη γραμμικότητας, αλλά και για την ικανότητά τους να διαχειρίζονται συστήματα πολλαπλών εισόδων και εξόδων (MIMO). Οι προσεγγίσεις αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί στον έλεγχο συστημάτων ψύξης με διαφορετικές στρατηγικές [31] στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης συστημάτων

θέρμανσης και ψύξης [35] ή στη βελτιστοποίηση της θερμικής άνεσης με χρήση ελέγχου αερισμού [19].

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει την διαχείριση συστημάτων MIMO που βασίζονται στα μαθηματικά μοντέλα και στη δυναμική των κτηρίων. Ωστόσο, MPC μπορεί να εφαρμοστεί και για μεμονωμένα συστήματα HVAC [24]. Ο στόχος των τεχνικών διαχείρισης ενέργειας κτηρίων είναι η ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης με την ταυτόχρονη διατήρηση των επιπέδων θερμικής άνεσης σε αποδεκτά επίπεδα. Στις μελέτες αυτές μπορούν να ληφθούν υπόψη προβλέψεις για τις καιρικές συνθήκες ή για το πλήθος των ανθρώπων που θα βρεθούν στο κτήριο, αλλά και οι απρόβλεπτες αλλαγές στις μεταβλητές αυτές, να γίνει διαχειρίσιμο το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της ενέργειας, και να εισαχθεί αλγόριθμος για την επίλυση με πολλές φορές τη δυνατότητα της παράλληλης εκτέλεσης της βελτιστοποίησης σε περισσότερους από έναν επεξεργαστές. Στο στόχο αυτό έχει πραγματοποιηθεί ένα πλήθος από έρευνες, ενώ είναι ενδιαφέρον να εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο εκφράζεται η θερμική άνεση.

3.1.1 Εφαρμογές ελέγχου HVAC βασισμένες σε κτηριακά μοντέλα

Οι έρευνες που εστιάζουν μόνο στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των συστημάτων HVAC για να καλύψουν τις συνήθως εμπειρικά προβλεπόμενες ανάγκες για ένα κτήριο υστερούν στο γεγονός ότι δε λαμβάνουν υπόψιν τους χαρακτηριστικά του κτηρίου (π.χ κέλυφος), ούτε διαθέτουν κάποιο τρόπο άμεσης αξιολόγησης της ανθρώπινης θερμικής άνεσης. Οι μελέτες που χρησιμοποιούν το κτηριακό μοντέλο προσπαθούν να υπολογίσουν με άμεσο τρόπο την θερμική αίσθηση είτε με τη μέτρηση εσωτερικών φυσικών χαρακτηριστικών είτε με τη χρήση μοντέλων υπολογισμού της θερμικής άνεσης.

Τα κτηριακά μοντέλα μπορεί να αναπαρασταθούν με δυο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι μέσω προγραμμάτων προσομοίωσης τα οποία μπορεί να είναι στατικά ή δυναμικά ή να υποστούν αλλαγές, να διασπαστούν και να απλοποιηθούν. Ο δεύτερος τρόπος είναι με τη μέθοδο αντιστάσεων-πυκνωτών (Resistance-Capacity, RC) της οποίας κεντρική ιδέα αποτελεί η αντικατάσταση της θερμικής αντίστασης με την ηλεκτρική αντίσταση και της θερμοχωρητικότητας με έναν πυκνωτή. Έτσι, με δεδομένο ένα υποκατάστατο του υπό ελέγχου κτηρίου που έχει δημιουργηθεί με τη χρήση ενός προγράμματος προσομοίωσης, μελετάται ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να διαμορφωθούν στρατηγικές ελέγχου που υλοποιούνται με μαθηματικό προγραμματισμό.

Η διαμόρφωση των στρατηγικών ελέγχου μπορεί να γίνει με διαφορετικούς τρόπους [25]. Ανάμεσα σ' αυτούς είναι ο έλεγχος βάσει κανόνων (Rule-Based Control, RBC), δηλαδή σύμφωνα με τη συνθήκη "εάν *συνθήκη*, τότε ..." σύμφωνα με προκαθορισμένα κατώφλια. Έπειτα, υπάρχει ο ντετερμινιστικός έλεγχος προβλεπτικού μοντέλου (Deterministic MPC, DMPC). Σε αυτή την εφαρμογή, η οποία είναι διαδεδομένη στο εμπόριο, χρησιμοποιούνται μοντέλα πρόγνωσης καιρού. Η μοντελοποίηση της συνάρτησης κόστους γίνεται με γνώμονα συγκεκριμένα όρια της θερμοκρασίας που πρέπει να επιτευχθούν. Το τελευταίο είδος στρατηγικής ελέγχου είναι ο στοχαστικός έλεγχος προβλεπτικού μοντέλου (Stochastic MPC, SMPC). Με αυτό το είδος ελέγχου, η εισαγωγή του περιορισμού στη συνάρτηση κόστους γίνεται με τη χρήση πιθανότητας, δηλαδή ο στόχος είναι η πιθανότητα του ορίου της θερμοκρασίας, για παράδειγμα, να διατηρείται σε συγκεκριμένα όρια.

Οι Cigler et al. [7] προτείνουν δυο μεθοδολογίες. Η πρώτη αφορά τον σχεδιασμό με βάση την ελαχιστοποίηση της ενέργειας με ταυτόχρονη διατήρηση των επιπέδων της θερμοκρασίας. Σε αυτή την εφαρμογή, η ενέργεια εκφράζεται με βάση τη θερμοκρασία του θερμού νερού που διανέμεται, μιας και η θέρμανση πραγματοποιείται μέσω σωληνώσεων που διανέμουν θερμό νερό όντας ενσωματωμένες στην οροφή. Στόχος λοιπόν, είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς της θερμοκρασίας της οροφής από τη θερμοκρασία του νερού που διανέμεται. Η έκφραση της θερμικής άνεσης γίνεται με βάση τη θερμοκρασία λειτουργίας (operative temperature) και το όριο τίθεται με βάση τις υποδείξεις του ISO 7730 [2]. Η ελαχιστοποίηση της διαφοράς των δυο παραπάνω αποτελεί το δεύτερο μέρος του της εξίσωσης της αντικειμενικής συνάρτησης. Η δεύτερη μεθοδολογία συμφωνεί με την πρώτη ως προς την έκφραση της ενέργειας, αλλά διατυπώνει τον περιορισμό της θερμικής άνεσης διαφορετικά. Εισάγει τον δείκτη PMV του μοντέλου του Fanger [13] στη συνάρτηση κόστους στο οποίο θέτει το όριο υπέρβασης σύμφωνα με το ISO 7730 [2]. Στην έρευνα αυτή φαίνεται ότι στην πρώτη μεθοδολογία η ενέργεια που απαιτείται είναι μικρότερη από αυτή που απαιτεί η δεύτερη. Ωστόσο, η μέση θερμοκρασία αέρα και η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας επηρεάζουν σημαντικά τον δείκτη PMV και επιπλέον λαμβάνονται υπόψη πολλοί περισσότεροι παράγοντες όπως ο ρουχισμός, ο μεταβολισμός, οι παρευρισκόμενοι στο κτήριο κλπ. Γι' αυτό προτείνεται περαιτέρω μελέτη στο πεδίο αυτό.

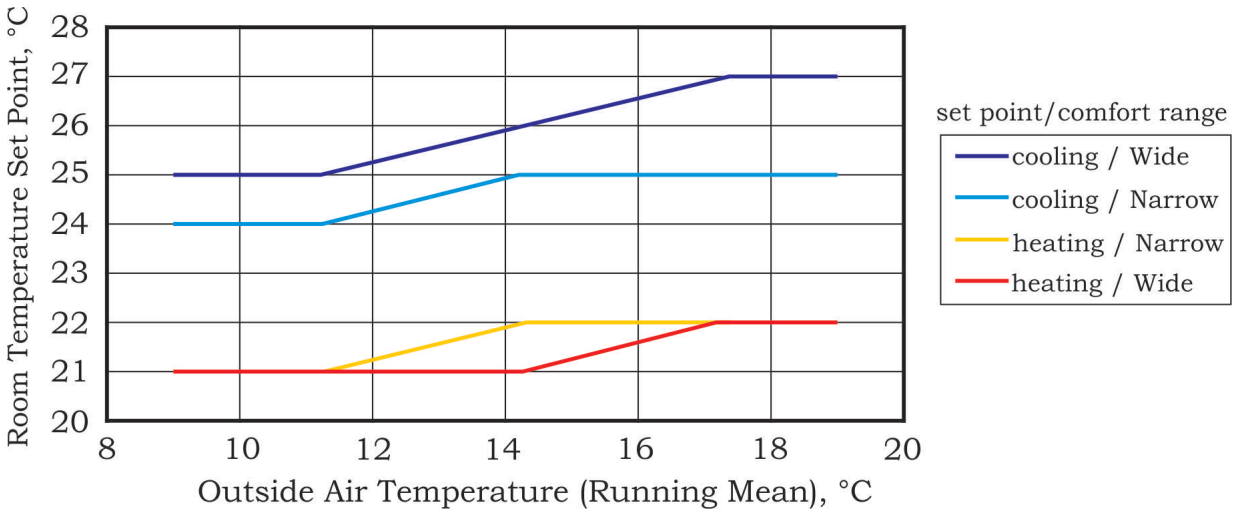
Οι Freire et al. [14], εισάγουν τη θερμική άνεση στο σχεδιασμό συστημάτων διαχείρισης ενέργειας με δυο κύριες προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση βασίζεται σε αλγορίθμους που χρησιμοποιούν ψυχρομετρικά διαγράμματα, ενώ η δεύτερη κατηγορία στη χρήση του δείκτη PMV. Σύμφωνα με την πρώτη προσέγγιση, ένας αλγόριθμος μπορεί να βασιστεί είτε στη βελτιστοποίηση της τιθέμενης θερμοκρασίας σε σχέση με τη σχετική υγρασία, είτε στην ισορροπία μεταξύ σφαλμάτων της εσωτερικής θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας σε σχέση με τα όρια της θερμοκρασίας που έχουν τεθεί στο σύστημα θέρμανσης. Τα όρια αυτά, ορίζονται ως το κέντρο της περιοχής της άνεσης μέσα σε ένα ψυχρομετρικό διάγραμμα. Η τρίτη περίπτωση της πρώτης κατηγορίας υλοποιείται μέσω της βελτιστοποίησης της ισχύος του συστήματος HVAC με την προϋπόθεση η θερμοκρασία να διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα. Η δεύτερη κατηγορία αλγορίθμων που χρησιμοποιεί τον δείκτη PMV, είτε ελαχιστοποιεί τον δείκτη ώστε να μηδενιστεί (ουδέτερη θερμική αίσθηση) είτε προσπαθεί να τον περιορίσει μεταξύ αποδεκτών επιπέδων [3]. Σαν συμπέρασμα, προκύπτει ότι λόγω της ικανότητας του PMV να προσαρμόζεται με τις ατομικές παραμέτρους, μπορεί να δώσει καλύτερα συνολικά αποτελέσματα για όρους θερμικής άνεσης και ενεργειακής κατανάλωσης.

Οι Oldewurtel et al. [25] επιδιώκουν να αυξήσουν την ενεργειακή αποδοτικότητα διατηρώντας τη θερμική άνεση σε αποδεκτά επίπεδα. Η θερμική άνεση εκφράζεται με βάση τα όρια της θερμοκρασίας και πιο συγκεκριμένα από το εύρος των τιμών της εσωτερικής θερμοκρασίας σε σχέση με την εξωτερική. Έτσι έδωσαν τέσσερις διαφορετικούς ορισμούς της θερμικής άνεσης. Κάθε ένας από αυτούς, αντιστοιχεί σε μια διαφορετική διαδικασία ορισμού της θερμικής άνεσης σε δεδομένο χρόνο, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1. Η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας για θέρμανση και ψύξη που χρησιμοποιήθηκαν για να οριοθετήσουν το "Narrow" και "Wide" εύρος θερμικής άνεσης, επιλέχθηκαν να είναι όμοιες με βάση το γερμανικό πρότυπο SIA 382/1 [1]. Το εύρος σε μια δεδομένη τιμή στο χρόνο καθορίστηκε ως συνάρτηση του εκθετικού μέσου των προηγούμενων τιμών της εξωτερικής θερμοκρασίας (πίνακας 3.1). Ο

Πίνακας 3.1: Διαδικασία υπολογισμού για τον ορισμό του εύρους της θερμικής άνεσης σε δεδομένο χρόνο [17]

Διαδικασία Υπολογισμού	**Εύρος θερμικής άνεσης**	
	Εργάσιμες ώρες	**Μη-εργάσιμες ώρες**
A_n	Narrow	Narrow
A_w	Wide	Wide
B_n	Narrow	12°C- 35°C
B_w	Wide	12°C- 35°C

υπολογισμός του μέσου γίνεται σύμφωνα με το EN 15251 [18] χρησιμοποιώντας όμως ωριαίες μέσες θερμοκρασίες, αντί ημερήσιες που χρησιμοποιεί το πρότυπο. Ο λόγος είναι η ομαλότητα στις ωριαίες τιμές σε αντίθεση με τις ασυνέχειες που μπορούν να εντοπιστούν συχνότερα στις ημερήσιες και δυσκολεύουν τη διαδικασία του ελέγχου.



Σχήμα 3.1: Ρύθμιση της θερμοκρασίας ζώνης για θέρμανση και ψύξη και για το εύρος θερμικής άνεσης "Narrow" και "Wide"

Όπως φαίνεται, οι δυο πρώτες περιπτώσεις αφορούν όλες τις ώρες της ημέρας, ενώ οι δυο τελευταίες μόνο τις ώρες εργασίας στο κτήριο. Στο πρόβλημα εφαρμόζονται και τα τρία είδη στρατηγικών ελέγχου που αναφέρθηκαν πιο πάνω.

Οι Ma et. al [23] [24] διαθέτουν ως σύστημα ψύξης με βάση τη διανομή ψυχρού νερού, για μια πανεπιστημιούπολη. Σκοπός είναι να εξασφαλιστεί αρκετή ποσότητα κρύου νερού που θα καλύψει τις ανάγκες της επόμενης ημέρας. Ο τρόπος που θα επιτευχθεί αυτό είναι να σχεδιαστεί ένα MPC ώστε να πετύχει την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας, αποθηκεύοντας με το βέλτιστο τρόπο τη θερμική ενέργεια της δεξαμενής στην πανεπιστημιούπολη με βάση το προβλεπόμενο ψυκτικό φορτίο και τις καιρικές συνθήκες. Το σύστημα ψύξης περιλαμβάνει δυο

ψύκτες που λειτουργούν τη νύχτα εκμεταλλευόμενοι τη χαμηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ισχύ του ρεύματος. Στη συνέχεια το νερό διοχετεύεται σε δεξαμενή και την επόμενη μέρα αντλείται και διανέμεται στην πανεπιστημιούπολη. Έπειτα, το νερό αντλείται και διανέμεται μέσα σε κάθε κτήριο. Στη διαδικασία της βελτιστοποίησης συμμετέχουν προγνωστικά μοντέλα για τα ηλιακά και εσωτερικά κέρδη και για τα θερμικά κέρδη συνολικά για την πανεπιστημιούπολη. Ο υπολογισμός του θερμικού φορτίου γίνεται με τη χρήση αντιστάσεων-πυκνωτών (RC). Οι περιορισμοί στην αντικειμενική συνάρτηση αφορούν τη θερμοκρασία του νερού, την παροχή μάζας και το επίπεδο στάθμης της δεξαμενής. Συγκεκριμένα:

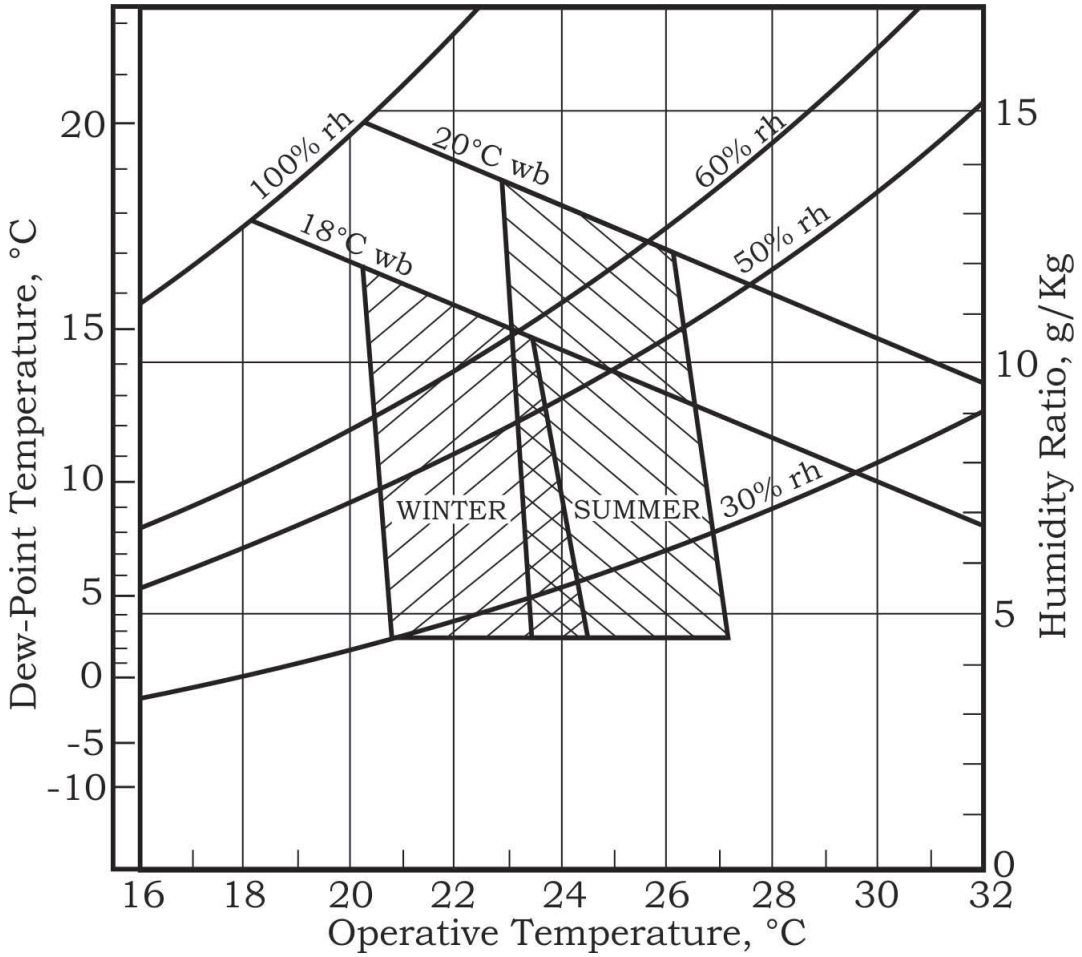
- η θερμοκρασία αναφοράς για το νερό που εξέρχεται του ψύκτη $\in [288, 295]$K
- η παροχή μάζας της θερμοκρασίας του νερού που δέχεται ο ψύκτης $\in \{0\} \cup [148, 235]$ kg/s
- η θερμοκρασία αναφοράς του νερού που διανέμει ο ψύκτης $\in [276.5, 280.4]$K
- η θερμοκρασία του νερού που επιστρέφει στους ψύκτες $\in [283, 295]$K
- η στάθμη του ψυχρότερου νερού στη δεξαμενή $\in [0.3, 1]$ του ύψους της δεξαμενής

Όπως μπορεί να συναχθεί από τις παραπάνω περιπτώσεις, η μεμονωμένη χρήση διαφόρων τιμών της θερμοκρασίας ή της υγρασίας ως παράμετρο για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και πολύ περισσότερο η ανυπαρξία αξιολόγησής της καθιστούν τον εξαγόμενο ελεγκτή μη εφαρμόσιμο για ένα υφιστάμενο κτήριο, αφού στην ουσία αγνοεί την ύπαρξη του ανθρώπινου παράγοντα. Στη θέσπιση των ορίων για τιμές θερμοκρασίας μπορούν να βοηθήσουν τα ψυχρομετρικά διαγράμματα της ASHRAE σχηματίζοντας αποδεκτές περιοχές για κάθε φυσική παράμετρο. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 3.2, η περιοχή της θερμικής άνεσης ορίζεται από τις τιμές της θερμοκρασίας ξηρού βολβού, του κλάσματος υγρασίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας και της σχετικής υγρασίας. Εκτός όμως, από το διάγραμμα αυτό, η ASHRAE δίνει κάποιες σχέσεις για την εκτίμηση της θερμικής αίσθησης σε συνάρτηση της θερμοκρασίας ξηρού βολβού και της τάσης ατμών, οι οποίες ισχύουν όμως για συγκεκριμένες τιμές παράγοντα ένδυσης και σχετικής ταχύτητας αέρα. Για το λόγο αυτό, η ASHRAE προτείνει το ψυχρομετρικό διάγραμμα για τη θέσπιση ορίων θερμικής άνεσης. Ωστόσο, σχετικά με τα μοντέλα υπολογισμού της θερμικής αίσθησης που έχουν κυκλοφορήσει, έχει υιοθετήσει επίσημα το μοντέλο του Fanger υποστηρίζοντας έτσι, τα μοντέλα που στην ουσία εκτιμούν τη θερμότητα που εν τέλει είναι αποθηκευμένη στο σώμα, δηλαδή τα μοντέλα ισολογισμού ενέργειας.

Ως εκ τούτου, δημιουργείται η τάση εισαγωγής της θερμικής άνεσης κυρίως με τη χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου, ως πιο διαδεδομένο για τη δημιουργία MPC σε κτήρια που διαθέτουν συστήματα HVAC για τη ρύθμιση του μικροκλίματος που επικρατεί σε αυτά.

3.2 Φυσικά αεριζόμενα κτήρια

Πέρα από τα κτήρια που διαθέτουν μηχανικά συστήματα ψύξης και αερισμού και έχει αναπτυχθεί πληθώρα μοντέλων και αυτοματοποιημένων συστημάτων για τη βελτίωση της λειτουργίας τους και της θερμικής τους άνεσης, υπάρχει ανάγκη μελέτης σε κτήρια που δε διαθέτουν τέτοια

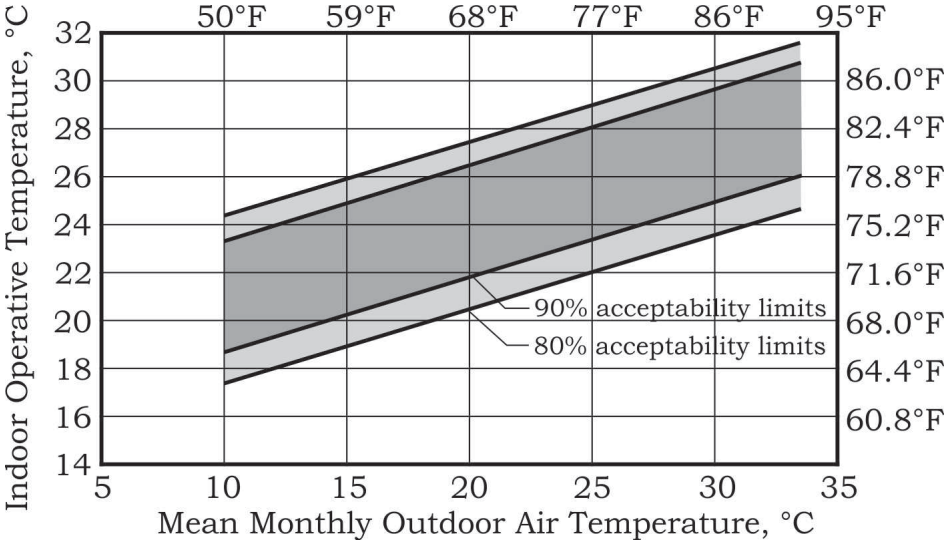


Σχήμα 3.2: Αποδεκτά όρια θερμοκρασίας λειτουργίας και υγρασίας για τυπική ένδυση θερινής και χειμερινής περιόδου για κυρίως καθιστική δραστηριότητα [32]

συστήματα, παρά μόνο ανοιγόμενα παράθυρα. Τα επίπεδα της θερμικής άνεσης σε τέτοιου είδους κτήρια δεν μπορούν ωστόσο να εκτιμηθούν με τα μοντέλα ισολογισμού ενέργειας που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Σε αυτά τα μοντέλα, οι παράμετροι της θερμικής αίσθησης αλλάζουν καθώς υπεισέρχεται ο ανθρώπινος παράγοντας και η τάση να προσαρμόζεται στο περιβάλλον του. Γι' αυτό το λόγο, και τα μοντέλα λέγονται "Adaptive Comfort Models".

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, παράγοντες που σχετίζονται με τη διαβίωση ενός ανθρώπου επηρεάζουν τις προτιμήσεις και τις προσδοκίες του, όπως για παράδειγμα άνθρωποι που έχουν ζήσει σε θερμό κλίμα προτιμούν υψηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες από αυτούς που έχουν ζήσει σε θερμά. Έτσι, προσαρμογή ορίζεται ως η σταδιακή πτώση των προσδοκιών στην επαναλαμβανόμενη περιβαλλοντική διέγερση και σχετίζεται με τις συνήθειες, τη φυσιολογία και την ψυχολογία ενός ανθρώπου.

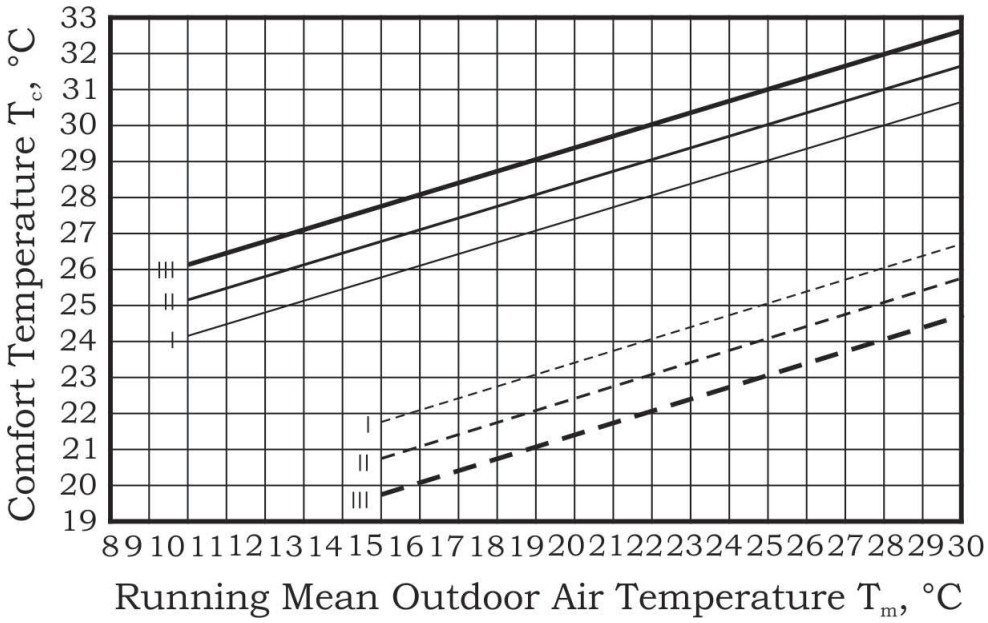
Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί δυο προσαρμοστικά μοντέλα, αυτό που βασίζεται στο ASHRAE Standard 55-2010 και εκείνο που βασίζεται στο European Standard EN15251-2007. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν εξισώσεις παλινδρόμησης που συσχετίζουν την ουδέτερη εσω-



Σχήμα 3.3: Αποδεκτά όρια θερμοκρασίας λειτουργίας και μέσης εξωτερικής θερμοκρασίας για θερινή και καλοκαιρινή περίοδο σύμφωνα με το Adaptive comfort model βασισμένο στο ASHRAE Standard 55-2010

τερική θερμοκρασία με τη μηνιαία μέση εξωτερική θερμοκρασία, έτσι ώστε να εκτιμήσουν την αποδοχή σε συνθήκες στο εσωτερικό. Το μοντέλο της ASHRAE ορίζει δυο περιοχές θερμικής άνεσης, μια για αποδοχή των επικρατουσών συνθηκών από τους παρευρισκόμενους στο κτήριο κατά 80 % και μια για αποδοχή 90 % (σχήμα 3.3). Αντίστοιχα, για το μοντέλο του European Standard, υπάρχουν τρεις περιοχές θερμικής άνεσης, για αποδοχή 65 %, 80 % και 90 % (σχήμα 3.4).

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, η χρήση τους περιορίζεται αποκλειστικά σε φυσικά αεριζόμενα κτήρια και έτσι αποδεικνύονται μη εφαρμόσιμα για κτήρια που διαθέτουν συστήματα HVAC. Στα κτήρια αυτά μπορούν να εφαρμοστούν οι δείκτες βασισμένοι σε ισολογισμό ενέργειας όπως του Fanger, του Kansas State University και του Pierce.



Σχήμα 3.4: Αποδεκτά όρια θερμοκρασίας λειτουργίας και μέσης εξωτερικής θερμοκρασίας για θερινή και καλοκαιρινή περίοδο σύμφωνα με το Adaptive comfort model βασισμένο στο European Standard EN15251-2007

Κεφάλαιο 4

Προσέγγιση της θερμικής άνεσης

Ως θερμική άνεση ορίζεται η κατάσταση του εγκεφάλου, σύμφωνα με την οποία ένα άτομο είναι ικανοποιημένο από το θερμικό περιβάλλον που βρίσκεται, σύμφωνα με το ISO 7730 [2]. Η κατάσταση στην οποία ένα άτομο βρίσκεται σε φυσιολογικά επίπεδα θερμικής άνεσης έχει υποκειμενικό χαρακτήρα, αφού είναι δυνατόν άτομα που βρίσκονται στον ίδιο χώρο να εκφράζουν διαφορετική άποψη για τη θερμική τους άνεση.

Η θερμική άνεση εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων για κάθε άτομο. Πέρα όμως από εκείνους τους παράγοντες που συνδέονται με την κοινωνική και ψυχολογική κατάσταση του ατόμου, προκειμένου να αξιολογηθεί επιστημονικά και αντικειμενικά η θερμική άνεση, ορίστηκαν οι φυσικές παράμετροι οι οποίες και την επηρεάζουν. Οι παράμετροι αυτές είναι φυσικές, όπως η θερμοκρασία του αέρα, η θερμοκρασία ακτινοβολίας των εσωτερικών επιφανειών, η απόλυτη και σχετική υγρασία του αέρα, η ταχύτητα του εσωτερικού αέρα, βιολογικές παράμετροι, όπως το φύλο και η ηλικία και τέλος εσωτερικές παράμετροι όπως είδος δραστηριότητας των παρευρισκομένων και θερμομόνωση ρουχισμού. Από τις παραπάνω παραμέτρους, κυρίως τις φυσικές, επηρεάζεται η ροή θερμότητας από τον άνθρωπο προς το περιβάλλον. Το ανθρώπινο σώμα διαθέτει μηχανισμούς των οποίων ο ρόλος είναι να διατηρούν σταθερή τη θερμική κατάστασή του και να την προσαρμόζουν ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Με την εξισορρόπηση των θερμικών κερδών και των απωλειών θερμότητας με μηχανισμούς όπως ο μεταβολισμός, το ρίγος, η εφίδρωση, το σώμα διαχειρίζεται την εισερχόμενη και εξερχόμενη ροή θερμότητας.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια αναλυτική παρουσίαση των μαθηματικών μοντέλων που στόχο έχουν να ποσοτικοποιήσουν τη θερμική αίσθηση σε κτήρια στα οποία για την βελτίωσή της γίνεται παρέμβαση με συστήματα HVAC.

4.1 Μαθηματικά μοντέλα

Τα διάφορα μαθηματικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση της θερμικής αίσθησης των ανθρώπων στο περιβάλλον τους και βασίζονται σε προσωπικές, περιβαλλοντικές και φυσιολογικές μεταβλητές που επηρεάζουν τη θερμική άνεση, ενώ έχουν αποτελέσει θέμα μελέτης για πολλούς επιστήμονες. Το πιο διάσημο από αυτά είναι το μοντέλο του Fanger [13] το οποίο έχει γίνει σημείο αναφοράς για δεκάδες μελέτες, και έχει υιοθετηθεί από την ASHRAE και την ISO για την αξιολόγηση θερμικού περιβάλλοντος. Αρκετά γνωστά και χρησιμοποιημένα

μοντέλα είναι και αυτό του Pierce [15, 16] και του KSU [5]. Ενώ τα παραπάνω μοντέλα είναι αποδεκτά για την ακρίβειά τους, καθένα από αυτά βασίζεται σε διαφορετικές παραδοχές. Αυτά τα τρία μοντέλα εφαρμόζουν έναν ισολογισμό ενέργειας στο ανθρώπινο σώμα και χρησιμοποιούν μηχανισμούς συναλλαγής ενέργειας σε συνδυασμό με φυσιολογικά μοντέλα για την πρόβλεψη της θερμικής αίσθησης. Ωστόσο, διαφέρουν στα φυσιολογικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για να εκτιμήσουν τη μετάδοση θερμότητας δια μέσου του σώματος και προς το περιβάλλον, αλλά και το νευρωνικό έλεγχο του ρίγους, της εφίδρωσης και της ροής του αίματος στο δέρμα.

4.1.1 Το μοντέλο του Fanger

Το μοντέλο εκτίμησης της θερμικής άνεσης του Fanger [13] εφαρμόζει έναν ισολογισμό ενέργειας στο ανθρώπινο σώμα. Υπολογίζει τις θερμικές απώλειες του σώματος λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας από την επιφάνεια του σώματος, τη διάχυση υδρατμών και την εξάτμιση του ιδρώτα από την επιφάνεια του δέρματος και την απώλεια θερμότητας λόγω εξάτμισης και συναγωγής. Επίσης, θεωρεί ότι το άτομο βρίσκεται θερμικά σε σταθερή κατάσταση με το περιβάλλον του. Από τον ισολογισμό ενέργειας προκύπτει τελικά η ενέργεια (σε $\mathrm{W/m^2}$) που είναι αποθηκευμένη στο σώμα (S) και η εξίσωση υπολογισμού είναι η ακόλουθη:

$$S = M - W_k - E_{res} - C_{res} - R_s - C_s - E_{sk}, \tag{4.1}$$

όπου E_{res} ο ρυθμός της απώλειας θερμότητας από την αναπνοή λόγω εξάτμισης, C_{res} ο ρυθμός της απώλειας θερμότητας από την αναπνοή λόγω συναγωγής, E_{sk} ο ρυθμός της απώλειας θερμότητας λόγω εξάτμισης από το δέρμα, C_s ο ρυθμός της απώλειας θερμότητας λόγω συναγωγής από την επιφάνεια του δέρματος, R_s ο ρυθμός της απώλειας θερμότητας λόγω ακτινοβολίας από την επιφάνεια του σώματος, M ο μεταβολικός ρυθμός ανά μονάδα επιφάνειας και W_k ο μεταβολικός ρυθμός λόγω είδους δραστηριότητας.

Απαραίτητες μεταβλητές για τον υπολογισμό των παραπάνω παραμέτρων και κατά συνέπεια της θερμικής άνεσης, αποτελούν η θερμοκρασία του δέρματος T_{sk} (σε $^\circ\mathrm{C}$) και η απώλεια θερμότητας από εξάτμιση λόγω εφίδρωσης E_{sw} (σε $\mathrm{W/m^2}$) που απαιτούνται για την επίτευξη της θερμικής άνεσης και υπολογίζονται συναρτήσει του μεταβολικού ρυθμού , όπως φαίνεται στις ακόλουθες σχέσεις:

$$T_{sk} = 37.5 - 0.0275M, \tag{4.2}$$

$$E_{sw} = 0.42(M - 58.2). \tag{4.3}$$

Οι απώλειες θερμότητας από την αναπνοή (σε $\mathrm{W/m^2}$) υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$E_{res} = 0.0023M(44 - P_a), \tag{4.4}$$

$$C_{res} = 0.0014M(34 - T_a). \tag{4.5}$$

Εδώ, T_a είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος (σε $^\circ\mathrm{C}$) και P_a είναι η τάση ατμών στο περιβάλλον σε Torr.

Η απώλεια θερμότητας λόγω ακτινοβολίας R_s (σε $\mathrm{W/m^2}$) από την επιφάνεια του σώματος υπολογίζεται από την θερμοκρασία της επιφάνειας που καλύπτεται από ρουχισμό (T_{cl}) και τη μέση

θερμοκρασία ακτινοβολίας (T_r). Η σχέση είναι η ακόλουθη:

$$R_s = 0.72 f_{acl} \sigma \epsilon ((T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4) \tag{4.6}$$

όπου, 0.72 είναι το κλάσμα που αντιπροσωπεύει την επιφάνεια του σώματος που εκτίθεται σε θερμική ακτινοβολία και αντιστοιχεί σε καθιστική θέση, σε ορθοστασία και ύπτια θέση, f_{acl} είναι η κλασματική αύξηση της επιφάνειας του σώματος που καλύπτεται με ρουχισμό και προσεγγίζεται από τη σχέση $f_{acl} = 1 + 0.968 I_{cl}$, σ η σταθερά του Stefan-Boltzman (5.67×10^{-8} (σε $\mathrm{W/m^2K^4}$)) και ϵ η εκπομπή δέρματος που για το μοντέλο του Fanger και θεωρείται 0.97.
Η απώλεια θερμότητας λόγω συναγωγής C_s από το σώμα (σε $\mathrm{W/m^2}$) εξαρτάται από την διαφορά, ανάμεσα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_a) και τη θερμοκρασία της κεκαλυμμένης με ρούχα επιφάνειας του σώματος (T_{cl}).

$$C_s = h_c f_{acl} (T_{cl} - T_a) \tag{4.7}$$

Εδώ, ο όρος h_c, είναι ο γραμμικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας (σε $\mathrm{W/m^{2\circ}C}$) από συναγωγή και υπολογίζεται από τη μέγιστη τιμή των παρακάτω δυο εξισώσεων.

$$h_c = 12.1(v)^{0.5}, \tag{4.8}$$

$$h_c = 2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25}. \tag{4.9}$$

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας της επιφάνειας του δέρματος που καλύπτεται με ρουχισμό σε $^\circ\mathrm{C}$, ο Fanger χρησιμοποιεί την ακόλουθη σχέση:

$$T_{cl} = T_{sk} - I_{cl}(R_s + C_s), \tag{4.10}$$

όπου I_{cl} είναι η μόνωση από το ρουχισμό σε (σε $\mathrm{m^{2\circ}C/W}$).
Η απώλεια θερμότητας από το δέρμα λόγω εξάτμισης, οφείλεται είτε στην εφίδρωση (E_{sk}) είτε στη διάχυση των υδρατμών μέσω της επιφάνειας του δέρματος (E_{dif}) και ορίζεται από το άθροισμά τους.

$$E_{sk} = E_{sw} + E_{dif} \tag{4.11}$$

Στην παραπάνω σχέση, η εξάτμιση των υδρατμών που διαχέονται μέσω της επιφάνειας του δέρματος E_{dif}, (σε $\mathrm{W/m^2}$) υπολογίζεται με την εξής σχέση:

$$E_{dif} = (0.68)(0.61)(P_{sk} - P_a) \tag{4.12}$$

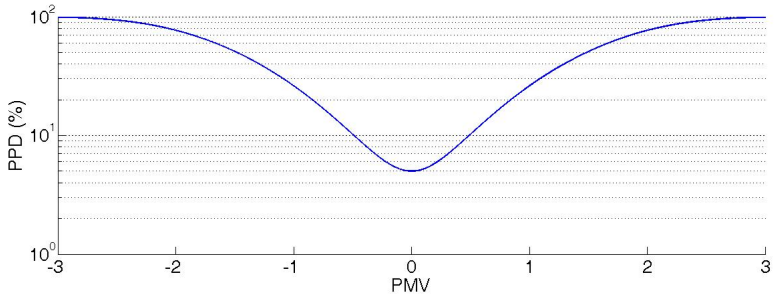
όπου:
0.61 είναι ο ρυθμός παθητικής διάχυσης υδρατμών, (σε $\mathrm{kg/\ 1000hm^2Torr}$), 0.68 είναι η λανθάνουσα θερμότητα του νερού, (σε $\mathrm{Wh\ 1000/kg}$) και P_{sk} είναι η κορεσμένη πίεση υδρατμών σε $T_{sk} = 1.92(T_{sk} - 25.3)$, σε Torr.
Εφόσον, έχουν οριστεί όλοι οι απαραίτητοι όροι για τον υπολογισμό του S, μπορεί να υπολογιστεί ο δείκτης Predictive Mean Vote (PMV).

$$\mathrm{PMV} = (0.303 e^{(-0.036M)} + 0.028)S \tag{4.13}$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, ο δείκτης Predicted Mean Vote (PMV) μπορεί να προβλέψει τη μέση απόκριση ενός συνόλου ανθρώπων σύμφωνα με την επταβάθμια κλίμακα θερμικής αίσθηση της ASHRAE. Ο δείκτης Predicted Percent of Dissatisfied people (PPD), δηλαδή του προβλεπόμενου ποσοστού δυσαρεστημένων ατόμων ποσοτικοποιεί τη θερμική άνεση ενός συνόλου ατόμων για ένα συγκεκριμένο θερμικό περιβάλλον. Έτσι ο Fanger συσχετίζει τον PPD με τον PMV σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\mathrm{PPD} = 100 - 95e^{-0.03353\mathrm{PMV}^4 - 0.2179\mathrm{PMV}^2} \tag{4.14}$$

Και το διάγραμμα που αναπαριστά τη σχέση τους είναι:



Σχήμα 4.1: Προβλεπόμενο ποσοστό δυσαρεστημένων (PPD) σε σχέση με την προβλεπόμενη μέση ψήφο (PMV) σύμφωνα με τον Fanger

4.1.2 Το μοντέλο του Pierce

Το μοντέλο του Pierce [15, 16], εφαρμόζει μια διαδικασία πεπερασμένων διαφορών για την εκτίμηση των φυσιολογικών παραμέτρων σε οποιοδήποτε θερμικό περιβάλλον, υπό τον μεταβολικό ρυθμό και θερμομόνωσης ρουχισμού. Παράγει τέσσερις δείκτες: τους Thermal Sensation Vote (TSENS), Predicted Mean Vote by Effective Temperature (PMVET), Predicted Mean Vote by Standard Effective Temperature (PMVSET) και Predicted Discomfort Vote (DISC). Από γεωμετρικής άποψης, θεωρεί το σώμα ως δυο ομοκεντρικούς κυλίνδρους, από τους οποίους ο εσωτερικός αντιπροσωπεύει τον πυρήνα του σώματος, ενώ ο λεπτότερος εξωτερικός κύλινδρος αντιπροσωπεύει το περίβλημα του δέρματος.

Η παράμετρος α που παρουσιάζεται παρακάτω, αποτελεί τη διαχωριστική γραμμή ανάμεσα στους δυο κόμβους του εσωτερικού και εξωτερικού κυλίνδρου και εξαρτάται από το ρυθμό ροής του αίματος στο δέρμα ανά μονάδα επιφάνειας δέρματος $SKBF$, σε $\mathrm{L/hm^2}$.

$$\alpha = 0.0417737 + 0.7451832/(SKBF + 0.585417) \tag{4.15}$$

Το σώμα χαρακτηρίζεται από τριών ειδών θερμοκρασίες, τη θερμοκρασία δέρματος (T_{sk}), τη θερμοκρασία του πυρήνα (T_{cr}) και τη μέση θερμοκρασία σώματος (T_b) βαθμονομημένες σε $^\circ\mathrm{C}$. Στην ίδια κλίμακα μετρούνται και τα θερμικά σήματα που απευθύνονται επίσης σε δέρμα (SIG_{sk}), πυρήνα (SIG_{cr}) και σώμα (SIG_b), και συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς θερμορυθμιστικών μηχανισμών όπως η εφίδρωση (SW_{reg}) σε $\mathrm{kg/\ 1000m^2h}$, η ροή του αίματος στο δέρμα

($SKBF$) σε $\mathrm{L/hm^2}$και το ρίγος (M_{shiv}) σε $\mathrm{W/m^2}$.

$$SIG_{cr} = T_{cr} - 36.8, \tag{4.16}$$

$$SIG_{sk} = T_{sk} - 33.7, \tag{4.17}$$

$$SIG_b = T_b - 36.49, \tag{4.18}$$

$$SKBF = (6.3 + 200[SIG_{cr}])/(1 + 0.5[-SIG_{sk}]), \tag{4.19}$$

$$SW_{reg} = 170[SIG_b]e^{([SIG_{sk}]/10.7)}, \tag{4.20}$$

$$M_{shiv} = 19.4[-SIG_{cr}][-SIG_{sk}]. \tag{4.21}$$

Οι τιμές των φυσιολογικών μεταβλητών ενημερώνονται κάθε λεπτό μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Αν οι ρυθμοί της θερμοκρασίας του σώματος υπερβούν το 0.1 $^\circ\mathrm{C/min}$, τότε οι μεταβλητές ενημερώνονται με βήμα κλάσματος του λεπτού. Η προσέγγιση της θερμοκρασίας του δέρματος και της απώλειας θερμότητας εξάτμισης λόγω εφίδρωσης εξαρτάται από το μεταβολικό ρυθμό και είναι ίδια με αυτή του Fanger 4.34.2. Το μοντέλο του Pierce εφαρμόζει επίσης ισολογισμό ενέργειας όμοια με αυτό του Fanger 4.1, με την ένταξη όμως ενός επιπλέον όρου· της μετάδοσης της θερμότητας από το εσωτερικό του πυρήνα του σώματος στο εξωτερικό κέλυφος του δέρματος (HF_{c-s}). Ο όρος αυτός εμπεριέχεται στον υπολογισμό των απωλειών θερμότητας από τον πυρήνα S_{cr} και από το δέρμα S_{sk}.

$$S_{sk} = M - W_k - E_{res} - C_{res} - HF_{c-s}, \tag{4.22}$$

$$S_{cr} = HF_{c-s} - E_{sk} - R_s - C_s. \tag{4.23}$$

Ο υπολογισμός του HF_{c-s} σε $\mathrm{W/m^2}$, γίνεται με τη βοήθεια των θερμοκρασιών πυρήνα και δέρματος και της ροής του αίματος στο δέρμα. Η σχέση είναι η ακόλουθη:

$$HF_{c-s} = (5.28 + 1.163SKBF)(T_{cr} - T_{sk}) \tag{4.24}$$

όπου:
1.163 είναι η θερμοχωρητικότητα του αίματος σε $\mathrm{Wh/l^\circ C}$
5.28 είναι η μέση αγωγιμότητα των ιστών του δέρματος σε $\mathrm{W/m^{2\circ}C}$
Ο ρυθμός της απώλειας θερμότητας από την αναπνοή εξαιτίας της εξάτμισης (E_{res}) και εξαιτίας της συναγωγής (C_{res}) σε $\mathrm{W/m^{2\circ}C}$, υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο, όπως στο μοντέλο του Fanger:

$$E_{res} = 0.0023M(44 - P_a), \tag{4.25}$$

$$C_{res} = 0.0014M(34 - T_a), \tag{4.26}$$

Ο ρυθμός απωλειών θερμότητας λόγω ακτινοβολίας από την επιφάνεια του δέρματος (R_s) σε $\mathrm{W/m^{2\circ}C}$, στο μοντέλο του Pierce λαμβάνει ίδιους όρους υπόψη του με το μοντέλο του Fanger 4.6, αλλά ο συνδυασμός τους είναι διαφορετικός.

$$R_s = h_r f_{acl}(T_{cl} - T_r), \tag{4.27}$$

όπου:
για τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από ακτινοβολία (h_r) σε $\mathrm{W/m^{2\circ}C}$, ισχύει:

$$h_r = 4 \cdot 0.72\sigma\epsilon((T_{cl} + T_r)/2 + 273.15)^3 \tag{4.28}$$

Η απώλεια θερμότητας λόγω συναγωγής C_s σε $\mathrm{W/m^2}$, εξαρτάται γραμμικά από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θερμοκρασίας περιβάλλοντος και θερμοκρασίας της επιφάνειας του σώματος καλυμμένης με ρουχισμό, όπως και στο μοντέλο του Fanger.

$$C_s = h_c \cdot f_{acl}(T_{cl} - T_a) \tag{4.29}$$

Ωστόσο, ο γραμμικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από συναγωγή (h_c) σε $\mathrm{W/m^2{}^\circ C}$, υπολογίζεται με τη βαρομετρική πίεση (PB), ή τη σχετική ταχύτητα του εσωτερικού αέρα, ή το μεταβολικό ρυθμό ανάλογα με τη μέγιστη τιμή που θα δώσουν οι παρακάτω τρεις εξισώσεις.

$$h_c = 3(PB/760)^{0.53}, \tag{4.30}$$

$$h_c = 8.6(v \cdot PB/760)^{0.53}, \tag{4.31}$$

$$h_c = 5.66(M/58.2 - 0.85)^{0.39}, \tag{4.32}$$

Επιπλέον, η θερμοκρασία της κεκαλυμμένης επιφάνειας του σώματος με ρουχισμό (T_{cl}) είναι συνδυασμός της θερμοκρασίας του δέρματος, της θερμομόνωσης του ρουχισμού, της κλασματικής αύξησης της επιφάνειας του σώματος που καλύπτεται από ένδυση, του γραμμικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από συναγωγή, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από ακτινοβολία.

$$T_{cl} = (T_{sk}/I_{cl} + f_{acl}(h_c T_a + h_r T_r))/(1/I_{cl} + f_{acl}(h_c + h_r)) \tag{4.33}$$

Όσον αφορά τον υπολογισμό του ρυθμού απώλειας θερμότητας λόγω εξάτμισης από το δέρμα (E_{sk}), βασίζεται στις προβλέψεις της υγρασίας του δέρματος (w), της τάσης ατμών, τη πίεσης στο δέρμα, και του μεγέθους h_e ($\mathrm{W/m\ Torr}$) που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$h_e = 2.2h_c/(1 + 0.92 \cdot I_{cl} h_c), \tag{4.34}$$

$$P_{sk} = e^{18.6686 - 4030.183/(T_{sk}+235))}. \tag{4.35}$$

και η εξίσωση για το E_{sk} για $\mathrm{W/^2m}$, είναι η εξής:

$$E_{sk} = w \cdot h_e(P_{sk} - P_a) \tag{4.36}$$

Η συνολική υγρασία του δέρματος περιλαμβάνει υγρασία εξαιτίας της ρυθμιστικής εφίδρωσης (w_{sw}) και της διάχυσης διαμέσου του δέρματος (w_{dif}). Η ρυθμιστική εφίδρωση w_{sw} δίνεται από τη σχέση:

$$w_{sw} = 0.68 \cdot SW_{reg}/E_{max} \tag{4.37}$$

όπου: 0.68 είναι η λανθάνουσα θερμότητα του νερού σε $\mathrm{Wh\ 1000/kg}$
E_{max} είναι ο ρυθμός της απώλειας θερμότητας από εξάτμιση σε $\mathrm{W/m^2}$, όταν $w = 1$ που υπολογίζεται με βάση την εξίσωση 4.36. Εάν ο ρυθμός της απώλειας θερμότητας από εξάτμιση είναι μεγαλύτερος της μονάδας, μπορεί κανείς να υποθέσει κορεσμένη επιφάνεια δέρματος και μια σταθερή ποσότητα εφίδρωσης που εκρέει από το σώμα και δεν μπορεί να εξατμιστεί. Σε αυτή την περίπτωση, η υγρασία του δέρματος τίθεται ίση με 1 και ο ρυθμός απώλειας θερμότητας από το δέρμα λόγω εξάτμισης (E_{sk}) ισούται με E_{max}. Όταν το w_{sw} είναι μικρότερο της μονάδας, το

κλάσμα της υγρής επιφάνειας του σώματος λόγω των διαχεόμενων υδρατμών, θεωρείται ότι είναι το 6% της ξηρής επιφάνειας του δέρματος:

$$w_{dif} = 0.06(1 - w_{sw}) \tag{4.38}$$

Σε αυτή την περίπτωση, η συνολική υγρασία του δέρματος είναι

$$w = w_{dif} + w_{sw} \tag{4.39}$$

Οι θερμοκρασίες πυρήνα, δέρματος και σώματος υπολογίζονται εκ νέου σε κάθε επανάληψη, από το ρυθμό αποθήκευσης της ενέργειας στον πυρήνα και στο σώμα μέσω των σχέσεων 4.23 και 4.22.

$$T_{cr} = T_{cr} + S_{cr} \cdot A_D/(0.97(1-\alpha)W_t), \tag{4.40}$$

$$T_{sk} = T_{sk} + S_{sk} \cdot A_D/(0.97\alpha W_t), \tag{4.41}$$

$$T_b = T_{sk} + (1-\alpha)T_{cr}. \tag{4.42}$$

όπου:
0.97 είναι η θερμοχωρητικότητα του σωματικού ιστού σε $\mathrm{Wh/kg^{\circ}C}$
W_t είναι το σωματικό βάρος σε kg
A_D είναι η επιφάνεια του σώματος σε m^2, όπως υπολογίζεται από την εξίσωση του Dubois:

$$A_D = 0.203 H_t^{0.725} W_t^{0.425} \tag{4.43}$$

όπου H_t είναι το σωματικό ύψος σε m. Ο υπολογισμός των δεικτών που παράγει το μοντέλο του Pierce, γίνεται με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς. Οι δείκτες PMVET και PMVSET υπολογίζονται από τη σχέση 4.13 όπως και ο δείκτης PMV στο μοντέλο του Fanger. Αυτοί οι δείκτες είναι και οι πιο πρόσφατοι και μελετούν την επίδραση SET και ET. Για το SET, το μοντέλο μετατρέπει το υπάρχον περιβάλλον σε "σταθερό περιβάλλον" σε μια σταθερή αποτελεσματική θερμοκρασία. SET είναι η θερμοκρασία ξηρού βολβού ενός υποθετικού περιβάλλοντος για 50% σχετική υγρασία και για ένδυση ανάλογη με τη δραστηριότητα στο πραγματικό περιβάλλον, ενώ τα φυσιολογικά μεγέθη για τον άνθρωπο όπως θερμοκρασία δέρματος, υγρασία δέρματος και απώλεια θερμότητας στο περιβάλλον υπάρχουν όπως και στο πραγματικό περιβάλλον. Επιπλέον, το μοντέλο του Pierce μετατρέπει το υπάρχον περιβάλλον σε ένα περιβάλλον αποτελεσματικής θερμοκρασίας ("Effective Tmperature, ET") το οποίο είναι η θερμοκρασία ξηρού βολβού ενός υποθετικού περιβάλλοντος με 50 % σχετική υγρασία και ομοιόμορφη θερμοκρασία (Ta = Mean Radiant Temperature). Οι φυσιολογικές μεταβλητές είναι ίδιες όπως και στο πραγματικό περιβάλλον. Γίνεται λοιπόν μια τροποποίηση του PMV, είτε για ξηρό, είτε για υγρό περιβάλλον, ο οποίος και ανταποκρίνεται στις αλλαγές της αποδοτικότητας διείσδυσης ατμών της ένδυσης των παρευρισκομένων.

Ο δείκτης TSENS καθορίζεται με όρους θερμοκρασίας σώματος. Η θερμική δυσφορία θεωρείται ότι υπολογίζεται μέσω του δείκτη TSENS, όταν $T_b < T_{bc}$, όπου T_{bc} είναι ένα ελάχιστο όριο θερμοκρασίας και ορίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$T_{bc} = (0.194/58.15)(M - W_k) + 36.301, \tag{4.44}$$

$$T_{bh} = (0.347/58.15)(M - W_k) + 36.669, \tag{4.45}$$

$$TSENS, DISC = 0.4685(T_b - T_{bc}),\ T_b < T_{bc} \tag{4.46}$$

Στην περίπτωση που η θερμοκρασία σώματος ελέγχεται μέσω της εφίδρωσης, ο TSENS συνδέεται με την υγρασία του δέρματος.

$$TSENS = (4.7)ev_{eff}(T_b - T_{bc})/(T_{bh} - T_{bc}),\ T_{bc} < T_b < T_{bh} \tag{4.47}$$

$$TSENS = (4.7)ev_{eff}0.4685(T_b - T_{bh}),\ T_b > T_{bh} \tag{4.48}$$

$$DISC = (4.7)(E_{sw} - E_{sw-reg})/(E_{max} - E_{sw-reg} - E_{dif}),\ T_{bc} < T_b < T_{bh} \tag{4.49}$$

όπου:
ev_{eff} είναι η απόδοση της εξάτμισης του ιδρώτα και θεωρείται 0.85.

4.1.3 Το μοντέλο KSU

Το μόντέλο KSU [5], αναπτύχθηκε από το Kansas State University το 1977. Στην ουσία, αποτελεί μια εξέλιξη του μοντέλου του Pierce, ωστόσο η ιδιαιτερότητα του μοντέλου είναι ο διαφορετικός τρόπος εκτίμησης της θερμικής άνεσης, από θερμό σε ψυχρό περιβάλλον. Ο δείκτης που παράγεται από το μοντέλο KSU είναι ο Thermal Sensation Vote (TSV). Η ομοιότητα με το μοντέλο του Pierce είναι εντονότερη περισσότερο στο ψυχρό περιβάλλον, ενώ παρατηρείται ότι για θερμό περιβάλλον τα δυο μοντέλα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές.

Όσον αφορά τη μεθοδολογία του μοντέλου σε ψυχρό περιβάλλον, βασίζεται στις αλλαγές που συμβαίνουν στη θερμική αγωγιμότητα μεταξύ της θερμοκρασίας του πυρήνα και του δέρματος, ενώ σε θερμό περιβάλλον οι υπολογισμοί συνδέονται με τις αλλαγές στην υγρασία του δέρματος. Όπως και στο μοντέλο του Pierce, υπάρχει η υπόθεση ότι το σώμα είναι διαχωρισμένο σε δύο κυλίνδρους· τον πυρήνα και το εξωτερικό κέλυφος, δηλαδή το δέρμα. Έτσι, θεωρείται ότι η παραγωγή ενέργειας από τον μεταβολισμό που δημιουργείται από τον πυρήνα, ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον μέσω της εφίδρωσης, ενώ το δέρμα ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας. Επιπλέον, η ενέργεια διαχέεται μέσω της εξάτμισης του ιδρώτα από το δέρμα. Οι αρχές αυτές αποτυπώνονται στις παρακάτω εξισώσεις, μέσω των οποίων γίνεται τελικά και ο υπολογισμός της θερμοκρασίας πυρήνα και δέρματος, δηλαδή, T_{cr} και T_{sk} αντίστοιχα. Ο υπολογισμός του ρυθμού αποθήκευσης ενέργειας σε πυρήνα και δέρμα σε $\mathrm{W/m^2}$, πραγματοποιείται μέσω των παρακάτω εξισώσεων:

$$W_{cr}C_{cr}dT_{cr}/dt = M - W - Q_{res} - KS(T_{cr} - T_{sk}), \tag{4.50}$$

$$W_{sk}C_{sk}dT_{sk}/dt = KS(T_{cr} - T_{sk}) - Q_{dry} - E_{sk}, \tag{4.51}$$

όπου:
C_{cr} η ειδική θερμότητα του πυρήνα του σώματος σε $\mathrm{Wh/kg^\circ C}$
W_{cr} η μάζα του πυρήνα ανά μονάδα επιφάνειας σώματος σε $\mathrm{kg/m^2}$
C_{sk} η ειδική θερμότητα του δέρματος σε $\mathrm{Wh/kg^\circ C}$
W_{sk} η μάζα του δέρματος ανά μονάδα επιφάνειας σώματος σε $\mathrm{kg/m^2}$
Q_{res} ο ρυθμός της απώλειας θερμότητας από την αναπνοή σε $\mathrm{W/m^2}$
για τον οποίο, όπως και στα προηγούμενα δυο μοντέλα ισχύει το εξής:

$$Q_{res} = E_{res} + C_{res} = 0.0023M(44 - P_{a(torr)}) + 0.0014M(34 - T_a), \tag{4.52}$$

όπου οι όροι E_{res} και C_{res} είναι ο ρυθμός απώλειας θερμότητας από την αναπνοή λόγω εξάτμισης και ο ρυθμός απώλειας θερμότητας από την αναπνοή λόγω συναγωγής αντίστοιχα.
Η αισθητή ροή θερμότητας από το δέρμα (Q_{dry}) σε $\mathrm{W/m^2}$, ορίζεται ως το άθροισμα του ρυθμού απώλειας θερμότητας από συναγωγή (Q_c) και από ακτινοβολία (Q_r).

$$Q_{dry} = Q_c + Q_r = hf_{cl}F_{cl}(T_{sk} - T_o), \tag{4.53}$$

όπου:
F_{cl} είναι ο παράγοντας θερμικής απόδοσης του Burton για την ένδυση
h, ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας σε $\mathrm{W/m^{2}{}^{\circ}C}$, που προκύπτει από το συνδυασμό της μετάδοσης θερμότητας δια συναγωγής h_c και της μετάδοσης θερμότητας από ακτινοβολία h_r.

$$h = h_c + h_r \tag{4.54}$$

$$h_c = 8.3\sqrt{v} \tag{4.55}$$

$$h_r = 3.87 + 0.031T_r \tag{4.56}$$

Από τους παραπάνω όρους γίνεται και η εκτίμηση της θερμοκρασίας λειτουργίας (*operative temperature*) από το μοντέλο σε $^{\circ}\mathrm{C}$.

$$T_o = (h_cT_a + h_rT_r)/(h_c + h_r) \tag{4.57}$$

Ο όρος E_{sk}, που ισοδυναμεί με την απώλεια ροής θερμότητας από το δέρμα σε $\mathrm{W/m^2}$, εκτιμάται με δυο τρόπους:

$$If\ E_{sw} \leq E_{max},\ E_{sk} = E_{sw} + (1 - w_{rsw})E_{diff}, \tag{4.58}$$

$$If\ E_{sw} > E_{max},\ E_{sk} = E_{max}, \tag{4.59}$$

Οι όροι που συνθέτουν την σχέση υπολογισμού του E_{sw} αναλύονται παρακάτω:

- E_{sw} είναι η ισοδύναμη απώλεια θερμότητας λόγω εξάτμισης, από την έκκριση του ιδρώτα σε $\mathrm{W/m^2}$και υπολογίζεται σύμφωνα με τα παρακάτω:

  $$E_{sw} = \phi \times [260(T_{cr} - 36.9) + 26(T_{sk} - 33.8)]e^{[(T_{sk}-33.8)/8.5]/[1+0.05(33.37-T_{sk})^{2.4}]} \tag{4.60}$$

  όπου:
  $\phi = 1$ για $w \leq 0.4$
  και $\phi = 0.5 + 0.5e^{[-5.6(w-0.4)]}$ για $w > 0.4$

- E_{diff} είναι ο ρυθμός απώλειας της θερμότητας από την διάχυση των υδρατμών διαμέσου του δέρματος σε $\mathrm{W/m^2}$και δίνεται από τη σχέση:

  $$E_{diff} = 0.408(P_{sk} - P_a) \tag{4.61}$$

- E_{max} είναι η μέγιστη απώλεια ροής θερμότητας σε $\mathrm{W/m^2}$και δίνεται από τη σχέση:

  $$E_{max} = 0.2h_cF_{pcl}(P_{sk} - P_a), \tag{4.62}$$

  όπου:
  F_{pcl} είναι ο παράγοντας απόδοσης διείσδυσης για την ένδυση

- w_{rsw} είναι η υγρασία του δέρματος λόγω της ρυθμιστικής εφίδρωσης και ορίζεται από τη σχέση:

$$w_{rsw} = E_{sw}/E_{max} \tag{4.63}$$

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο δείκτης TSV έχει διαφορετική σχέση υπολογισμού από θερμό σε ψυχρό περιβάλλον. Για ψυχρό περιβάλλον, η τελική σχέση υπολογισμού είναι:

$$TSV = -1.46 \times \epsilon_{vc} + 3.75 \times {\epsilon_{vc}}^2 - 6.17 \times {\epsilon_{vc}}^3 \tag{4.64}$$

Σε αυτή τη σχέση το ϵ_{vc} ορίζεται ως παράγοντας αγγειοσυστολής και ορίζεται από τη σχέση:

$$\epsilon_{vc} = (KS_0 - KS)/(KS_0 - KS_{(-4)}) \tag{4.65}$$

όπου:
KS είναι η συνολική θερμική αγωγιμότητα του δέρματος σε $\mathrm{W/m^2{}^\circ C}$, και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$KS = 5.3 + [6.75 + 42.45(T_{cr} - 36.98) + 8.15(T_{cr} - 35.15)^{0.8}(T_{sk} - 33.8)]/[1 + 0.4(32.1 - T_{sk})], \tag{4.66}$$

ενώ οι όροι KS_0 και $KS_{(-4)}$ αντιστοιχούν στη θερμική αγωγιμότητα για θερμική άνεση στο ουδέτερο επίπεδο και για επίπεδο πολύ ψυχρής θερμικής αίσθησης (-4) αντίστοιχα.

Για την εκτίμηση της θερμικής άνεσης σε θερμό περιβάλλον, η σχέση υπολογισμού είναι η ακόλουθη:

$$TSV = [5 - 6.56(RH - 0.5)] \times \epsilon_{rsw} \tag{4.67}$$

όπου το ϵ_{rsw} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\epsilon_{rsw} = (w_{rsw} - w_{rsw-0})/(1 - w_{rsw-0}) \tag{4.68}$$

εδώ, το w_{rsw-0} εκφράζει την υγρασία του δέρματος για θερμική ουδετερότητα:

$$w_{rsw-0} = 0.2 + 0.4\{1 - e^{-0.6(H/58.2-1)}\} \tag{4.69}$$

όπου H, είναι ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας στο σώμα ανά μονάδα επιφάνειας ($\mathrm{W/m^2}$) και υπολογίζεται από τη σχέση $H = M - W$, στην οποία είναι ο μεταβολικός ρυθμός και W είναι ο ρυθμός απώλειας θερμότητας που εξαρτάται από το είδος της εργασίας.

4.2 Τοπική θερμική δυσφορία

Πέραν της θερμικής άνεσης, της οποίας μοντέλα υπολογισμού παρουσιάστηκαν παραπάνω και αφορούν το σύνολο του ανθρώπινου σώματος, υπάρχουν περιπτώσεις όπου θερμική δυσφορία μπορεί να προκληθεί εξαιτίας ανεπιθύμητης ζέστης ή κρύου σε κάποια συγκεκριμένα σημεία του σώματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται τοπική θερμική δυσφορία. Ο πιο συνήθης λόγος που το προκαλεί είναι τα ρεύματα αέρα, αλλά μπορεί και να προκληθεί από σημαντικές διαφορές στην κάθετη κατανομή της θερμοκρασίας από το κεφάλι έως τα κάτω άκρα, υπερβολικά ζεστό ή κρύο πάτωμα, ή από υψηλή ανομοιομορφία της θερμικής ακτινοβολίας. Η τοπική θερμική δυσφορία έχει περισσότερες πιθανότητες να εμφανιστεί όταν ο άνθρωπος βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα δραστηριότητας, ενώ σε υψηλότερα επίπεδα οι πιθανότητες είναι πολύ μικρότερες [2].

Ρεύματα αέρα

Η δυσφορία εξαιτίας ρευμάτων αέρα εκφράζεται ως το ποσοστό των ανθρώπων που προβλέπεται να ενοχληθούν και υπολογίζεται ως ο ρυθμός μεταβολής της ροής του αέρα. Εξαρτάται από την τοπική θερμοκρασία αέρα, την τοπική μέση ταχύτητα αέρα και την τοπική ένταση της τύρβης (%). Το μοντέλο εφαρμόζεται σε ανθρώπους με ελαφριά δραστηριότητα με συνολική θερμική αίσθηση κοντά στο ουδέτερο και πρόβλεψη του ρεύματος αέρα για το λαιμό, ενώ για βραχίονες και κάτω άκρα μπορεί να υπάρχει υπερεκτίμηση. Η αίσθηση της ροής του αέρα είναι μικρότερη για χαμηλό μεταβολικό ρυθμό $> 1,2$ met.

Διαφορές στην κάθετη κατανομή της θερμοκρασίας

Δυσφορία μπορεί να προκληθεί από διαφορές στην κάθετη κατανομή της θερμοκρασίας μεταξύ του κεφαλιού και του κατώτατου σημείου του σώματος. Μεγαλύτερη ευαισθησία υπάρχει κάτω από φθίνουσες θερμοκρασίες. Η τοπική δυσφορία εκτιμάται σύμφωνα με τον δείκτη PD που εκφράζει ποσοστό δυσαρεστημένων, ενώ ο δείκτης PD εξαρτάται από τη διαφορά της θερμοκρασίας και μάλιστα αυξάνεται για αύξουσα θερμοκρασία· για φθίνουσες θερμοκρασίες η ευαισθησία είναι πολύ μικρότερη.

Θερμά και κρύα δάπεδα

Τα θερμά και κρύα δάπεδα επηρεάζουν τη θερμική άνεση των κάτω άκρων ιδιαίτερα όταν τα υποδήματα των παρευρισκομένων είναι για εσωτερικούς χώρους ή όταν εκείνοι κάθονται στο πάτωμα. Η σχέση της θερμοκρασίας δαπέδου με τον δείκτη PD είναι παραβολοειδής με ελάχιστο όριο κοντά στους 25 °C.

Ασυμμετρία της θερμικής ακτινοβολίας

Η ασυμμετρία στην κατανομή της θερμικής ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει θερμική δυσφορία. Η ευαισθησία των ανθρώπων μπορεί να προκληθεί από θερμά ή ψυχρά δώματα και από ψυχρούς (λόγω παραθύρων) και θερμούς τοίχους. Η εξάρτηση του δείκτη PD με τη διαφορά της θερμοκρασίας είναι διαφορετική σε κάθε περίπτωση· ισχυρότερη μεταβολή του δείκτη δυσφορίας έχουμε για θερμά δώματα και για ψυχρούς τοίχους, ενώ ασθενέστερη είναι η μεταβολή του για θερμούς τοίχους.

4.3 Κατηγοριοποίηση περιβάλλοντος με βάση τη θερμική άνεση

Οι δείκτες που αναλύθηκαν παραπάνω είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό των θερμικών ζωνών που περιγράφουν και μπορούν να αποτελέσουν κριτήριο αξιολόγησης γι' αυτούς, όπως συμβαίνει με το ISO 7730 ([2]) που έχει θεσπιστεί γι' αυτό το σκοπό. Έτσι, το επιθυμητό θερμικό περιβάλλον για έναν χώρο μπορεί να επιλεχθεί μεταξύ τριών κατηγοριών A, B και C, οι απαιτήσεις των οποίων τίθενται στον πίνακα 4.1, όπου γίνεται αναφορά μόνο σε ό,τι αφορά τους δείκτες θερμικής άνεσης για το σώμα συνολικά.

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες θερμικού περιβάλλοντος

Κατηγορία	**Συνολική θερμική κατάσταση του σώματος**	
	PPD %	**PMV**
A	<6	-0.2<PMV<+0.2
B	<10	-0.5<PMV<+0.5
C	<15	-0.7<PMV<+0.7

Όπως φαίνεται, η κατηγοριοποίηση γίνεται με βάση τους δείκτες του μοντέλου Fanger είναι το πιο παλιό και το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο. Η κάθε κατηγορία που παρουσιάζεται παραπάνω περιγράφει ένα μέγιστο όριο δυσαρεστημένων ατόμων το οποίο επιτρέπει. Κάποιες από τις κατηγορίες απαντώνται συχνά ενώ άλλες είναι πιο σπάνιο να επιτευχθούν. Οι τιμές στον πίνακα εκφράζουν μια ισορροπία μεταξύ της επίτευξης της χαμηλής δυσαρέσκειας και και της υπάρχουσας τεχνολογίας. Επίσης, θεωρείται ότι τα παραπάνω όρια ισχύουν για όλα τα άτομα και ότι όλοι βρίσκονται κάτω από το ίδιο θερμικό περιβάλλον. Οποιοσδήποτε έλεγχος στη θερμοκρασία ή στην ταχύτητα του αέρα μπορεί να ισορροπήσει τις όποιες διαφορές μεταξύ πραγματικής θερμικής άνεσης και απαιτήσεων οδηγώντας σε πολύ μικρότερο αριθμό δυσαρεστημένων.

Αποδεκτά όρια για τα όρια της αποδεκτής θερμικής άνεσης, τίθενται και από την ASHRAE [4], που ορίζει για τον Fanger PMV, αποδεκτό όριο |0.5| και για τον PPD, <10%, και για τους δείκτες των μοντέλων του KSU και Pierce, αποδεκτό όριο θέτει το |1|.

Κεφάλαιο 5

GenOpt

Το GenOpt (Generic Optimization System)[34] είναι ένα ολοκληρωμένο πακέτο βελτιστοποίησης, ανεπτυγμένο σε περιβάλλον Java από το Lawrence Berkeley National Laboratory. Σκοπός του συγκεκριμένου λογισμικού είναι η ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους η οποία υπολογίζεται είτε από ένα εξωτερικό πρόγραμμα προσομοίωσης, είτε από μια απλούστερη συνάρτηση. Η δυνατότητα της επικοινωνίας ενός προγράμματος προσομοίωσης με έναν από τους αλγορίθμους βελτιστοποίησης, σε συνδυασμό με την απλότητα σε ότι αφορά τον ορισμό ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, είναι από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα που το GenOpt προσφέρει στο χρήστη. Ένα πλήθος από αλγορίθμους που παρέχεται από τη βιβλιοθήκη, κατηγοριοποιείται στο εγχειρίδιο του GenOpt για κάθε είδους πρόβλημα, για τη διευκόλυνση του χρήστη. Η κατηγοριοποίηση των προβλημάτων γίνεται με βάση το είδος των μεταβλητών και την ύπαρξη ή μη, περιορισμού. Οι μεταβλητές απόφασης που περιλαμβάνει ένα πρόβλημα μπορούν να είναι μόνο συνεχείς, μόνο διακριτές, ή συνεχείς και διακριτές. Οι περιορισμοί μπορούν να οριστούν σαν penalty functions ή σαν barrier functions.

Στα παρακάτω υποκεφάλαια θα γίνει μια αναφορά στους τύπους των προβλημάτων, αλλά και στην αξιοποίηση κάθε αλγορίθμου, στις εφαρμογές κάθε περιορισμού και στη συνολική αρχιτεκτονική επικοινωνίας του GenOpt, συμπεριλαμβανομένων των απαιτούμενων αρχείων και παραμέτρων.

5.1 Προβλήματα Βελτιστοποίησης

Η κατηγοριοποίηση των προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον τύπο των μεταβλητών. Οι μεταβλητές διακρίνονται σε συνεχείς και διακριτές, αλλά και σε εξαρτημένες και ανεξάρτητες. Οι συνεχείς μεταβλητές μπορούν να πάρουν οποιεσδήποτε τιμές σε πραγματικό χρόνο και μπορούν να περιοριστούν σε διαστήματα, ενώ οι διακριτές μεταβλητές μπορούν να πάρουν μόνο ακέραιες τιμές.

Η κατηγοριοποίηση σε εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές, απευθύνεται στα είδη των περιορισμών. Οι περιορισμοί που αφορούν ανεξάρτητες μεταβλητές εκφράζονται είτε με box constraints, είτε με coupled linear constraints. Ανεξάρτητες μεταβλητές λέγονται αυτές, οι οποίες συμμετέχουν στην αρχική συνάρτηση ελαχιστοποίησης αλλά και στον περιορισμό. Οι εξαρτημένες μεταβλητές είναι εκείνες, οι οποίες υπολογίζονται από άλλες μεταβλητές μέσω αριθ-

μητικών σχέσεων είτε από συναρτήσεις, είτε από προγράμματα προσομοίωσης και δεν συμμετέχουν στο κομμάτι της ελαχιστοποίησης. Η παρούσα εργασία, προσανατολίζεται σε εξαρτημένες και όχι σε ανεξάρτητες μεταβλητές.

5.1.1 Κατηγοριοποίηση Προβλημάτων

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης διακρίνονται ανάμεσα σε αυτά που οι παράμετροι τους είναι συνεχείς μεταβλητές, διακριτές ή συνεχείς και διακριτές. Τα προβλήματα αυτά μπορεί να διαθέτουν είτε περιορισμούς ανισότητας σε εξαρτημένες μεταβλητές, είτε σε ανεξάρτητες μεταβλητές. Ο γενικός ορισμός των προβλημάτων με περιορισμούς σε ανεξάρτητες μεταβλητές είναι:

$$min_{x \in \mathbb{X}} \; f(x) \tag{5.1}$$

Όπου οι μεταβλητές $\mathbb{X}$ μπορεί να είναι είτε συνεχείς: $\mathbb{X}_c \triangleq \{x \in \mathbb{R}^n \mid l^i \leq x^i \leq u^i, i \in \{1, \ldots, n\}\}$, όπου $-\infty \leq l^i \leq u^i \leq \infty$,
είτε διακριτές: $\mathbb{X}_d \subset \mathbb{Z}^{n^d}$,
είτε συνεχείς και διακριτές μαζί: $\mathbb{X} \triangleq \mathbb{X}_c \times \mathbb{X}_d$

Τα προβλήματα με περιορισμούς σε εξαρτημένες μεταβλητές, δηλώνονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \min_{x \in \mathbb{X}} \; & f(x) \\ s.t \quad & g(x) \leq 0, \end{aligned} \tag{5.2}$$

όπου η $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ είναι μια φορά συνεχώς διαφορίσιμη συνάρτηση κόστους και η $g : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^m$ είναι μια φορά συνεχώς διαφορίσιμη συνάρτηση περιορισμού (για κάποια $m \in \mathbb{N}$).

5.1.2 Είδη Περιορισμών

Όπως προαναφέρθηκε, σε αυτή την εργασία θα μας απασχολήσουν μόνο περιορισμοί με εξαρτημένες μεταβλητές. Η ανισότητα που εκφράζει τον περιορισμό έχει την εξής μορφή: $g(x) \leq 0$. Αν για παράδειγμα,ο περιορισμός θέλει να εκφράσει ότι δεν επιτρέπεται η τιμή του δείκτη άνεσης FangerPPD να μην ξεπερνάει το 10%, τότε για τη συνάρτηση $g(x)$ ισχύει ότι $g(x) = FangerPPD(x) - 10 \leq 0$.

Οι περιορισμοί ανισότητας με εξαρτημένες μεταβλητές δηλώνονται με δυο τρόπους: σαν barrier και σαν penalty functions. Οι barrier functions δεν επιτρέπουν στην τιμή της συνάρτησης του περιορισμού να πλησιάσει το όριο που έχει τεθεί· όσο η τιμή αυτή πλησιάζει στα όρια, η συνάρτηση $g(x)$ τείνει να είναι 0, και η τιμή της συνάρτησης κόστους να τείνει στο άπειρο.

$$\tilde{f}\,(x, \mu) \triangleq \; f(x) + \mu \frac{1}{\sum_{i=1}^{m} g^i(x)} \tag{5.3}$$

Ωστόσο, ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι η εύρεση ενός συνόλου λύσεων, με βάση τις οποίες η συνάρτηση περιορισμού θα προσεγγίζει το όριο που τίθεται με πολύ καλή ακρίβεια. Συνεπώς, οι barrier functions δεν είναι κατάλληλες γι' αυτού του είδους το πρόβλημα.

Το δεύτερο είδος εφαρμογής περιορισμού είναι οι penalty functions, οι οποίες επιτρέπουν στην τιμή του περιορισμού να συμπίπτει με το όριο. Οι συγκεκριμένου τύπου συναρτήσεις, προσθέτουν έναν θετικό όρο στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αν αυτό το όριο παραβιαστεί.

Οι penalty functions εφαρμόζονται ως εξής:

$$\tilde{f}\,(x,\mu) \triangleq\; f(x) + \mu \sum_{i=1}^{m} \max(0, g^i(x))^2, \tag{5.4}$$

όπου η $g(x) \leq 0$, $g : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^m$ και η $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ είναι μία φορά συνεχώς διαφορίσιμες συναρτήσεις στο x.

Η επιλογή του σταθμισμένου παράγοντα μ, σχετίζεται με τον σκοπό του προβλήματος· μια μικρή τιμή για το μ, σε σχέση με το επίπεδο της τιμής για την $f(x)$, οδηγεί σε σημαντικές παραβιάσεις του περιορισμού. Από την άλλη πλευρά, μεγάλες τιμές για το μ μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλη αύξηση του πρώτου μέλους της εξίσωσης για την ικανοποίηση του περιορισμού και γενικότερα να προκαλέσουν αριθμητικά προβλήματα.

5.2 Επιλογή Αλγορίθμου

Η επιλογή του αλγορίθμου στο συγκεκριμένο πρόβλημα δεν είναι μια απλή επιλογή. Πρέπει να ληφθούν υπόψη, εκτός από το είδος του προβλήματος, η ύπαρξη ενός προγράμματος προσομοίωσης και το πλήθος των μεταβλητών. Το GenOpt παρέχει μια βιβλιοθήκη με αλγορίθμους βελτιστοποίησης που διακρίνονται σε αλγορίθμους για πολυδιάστατα προβλήματα και για μονοδιάστατα. Σε αυτή την περίπτωση, το πρόβλημα είναι πολυδιάστατο, και έτσι η επιλογή πρέπει να γίνει ανάμεσα στους παρακάτω αλγορίθμους.

- Γενικευμένες Μέθοδοι Σχηματικής Αναζήτησης (Generalized Pattern Search Methods)
  - Ο Αλγόριθμος Coordinate Search
  - Ο Αλγόριθμος Hooke-Jeeves
  - GPS Αλγόριθμοι με Πολλαπλά Αρχικά Σημεία (Multi-Start GPS Algorithms)
- Discrete Armijo Gradient
- Particle Swarm Optimization
- Hybrid GPS Algorithm with PSO Algorithm
- Simplex Algorithm of Nelder and Mead

Στην προκείμενη εργασία, όπου οι όροι της συνάρτησης κόστους εκτιμούνται από το πρόγραμμα προσομοίωσης EnergyPlus και η συνάρτηση κόστους ίσως να μην είναι συνεχώς διαφορίσιμη, προτείνεται η εφαρμογή οποιουδήποτε από τους παραπάνω αλγόριθμους ξεκινώντας την διαδικασία βελτιστοποίησης από ένα τοπικό ελάχιστο $f(x,\mu)$. Με αυτό τον τρόπο, και ερευνώντας με μικρό βήμα, αναμένεται μια λύση κοντά στην αρχική και φυσικά καλύτερη από εκείνη. Εναλλακτικά, γι' αυτού του είδους τα προβλήματα προτείνονται οι αλγόριθμοι *Multi-Start General Pattern Search (GPS)*. Γενικά, οι αλγόριθμοι της οικογένειας των GPS δημιουργούν ένα πλέγμα, που ερευνάται σύμφωνα με κάποιους κανόνες οι οποίοι και τους διαφοροποιούν μεταξύ τους.

Αν η τιμή της συνάρτησης κόστους δεν μειωθεί, τότε το χρονικό βήμα της αναζήτησης διαιρείται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Ο αλγόριθμος *Discrete Armijio Gradient* προσεγγίζει gradients, δουλεύοντας με πεπερασμένες διαφορές. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προβλήματα όπου η συνάρτηση κόστους υπολογίζεται από κώδικα και είναι συνεχώς διαφορίσιμη. Ωστόσο, αναλυτικές εκφράσεις για τα gradients είναι μη πρακτικές, ακόμα και αδύνατες στην εφαρμογή τους. Επιπλέον, εξαιτίας της ευαισθησίας σε ασυνέχειες, ο αλγόριθμος είναι μη-εφαρμόσιμος για προγράμματα προσομοίωσης τα οποία περιλαμβάνουν προσαρμοστικούς επιλύτες με χαλαρές ρυθμίσεις στην ακρίβεια, όπως το EnergyPlus και τέλος, δεν είναι κατάλληλος για προβλήματα με περιορισμούς.

Οι αλγόριθμοι *Particle Swarm Optimization (PSO)* είναι πιθανολογικοί αλγόριθμοι βασισμένοι σε πληθυσμό, που πρώτα προτάθηκαν από τους Kennedy και Eberhart [11, 21], για την επίλυση προβλημάτων που περιλαμβάνουν συνεχείς, διακριτές αλλά και συνδυασμό από τα δυο είδη μεταβλητών. Η ικανότητα αυτή οφείλεται στις διάφορες τροποποιήσεις του αλγορίθμου για κάθε εφαρμογή. Οι PSO αλγόριθμοι μπορούν να εφαρμοστούν χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά είδη τοπολογίας γειτονιάς (τοπικό μέγιστο, ολικό μέγιστο, von Neumamm), αλλά και τρεις διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού των νέων θέσεων των σωματιδίων με τη χρήση βαρών αδράνειας (inertia weight), απαγόρευση συντελεστή (constriction coefficient) ή πλέγμα (mesh). Η λειτουργία τους βασίζεται στην εκμετάλλευση ενός συνόλου δυναμικών λύσεων στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Κάθε δυναμική λύση καλείται *σωματίδιο, (particle)* και το σύνολο των δυναμικών λύσεων σε κάθε βήμα επανάληψης καλείται *πληθυσμός, (population)*.

Οι αλγόριθμοι PSO είναι γενικευμένης αναζήτησης αλγόριθμοι και δεν απαιτούν προσαρμοστικά gradients στη συνάρτηση κόστους τους. Μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών αρχικοποιεί τον πρώτο πληθυσμό και στη συνέχεια, η εξίσωση που καθορίζει τις σχέσεις των σωματιδίων μοντελοποιείται με βάση την κοινωνική συμπεριφορά των σμηνών των πτηνών ή κοπαδιών ψαριών. Με αυτό τον τρόπο καθορίζεται η θέση του κάθε σωματιδίου στην επόμενη γενιά.

Αν και οι αλγόριθμοι PSO δεν είναι σχεδιασμένοι για προβλήματα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, υπάρχουν δημοσιευμένες μελέτες για προβλήματα με συνεχείς μεταβλητές υπό περιορισμούς, βασισμένες σε αυτούς [26, 27]. Στην παρούσα έρευνα που χαρακτηρίζεται από μεγάλο αριθμό μεταβλητών και η συνάρτηση κόστους υπολογίζεται από πρόγραμμα βελτιστοποίησης, ο PSO δεν ενδείκνυται για εφαρμογή, εξαιτίας του μεγάλου αριθμού γενιών και πληθυσμού που απαιτείται.

Ο *Υβριδικός αλγόριθμος Γενικευμένης Σχηματικής Αναζήτησης με Particle Swarm Optimization Algortithm (Hybrid Generalized Pattern Search Algorithm with Particle Swarm Optimization Algortithm)*, [34] είναι ένας αλγόριθμος κατάλληλος για όλων των ειδών τα προβλήματα, συμπεριλαμβανομένων συνεχών, διακριτών, ή συνύπαρξης συνεχών και διακριτών μεταβλητών με περιορισμούς. Ο αλγόριθμος συνδυάζει τα χαρακτηριστικά της global αναζήτησης του PSO με τα local του Hooke-Jeeves GPS αλγόριθμου. Όσον αφορά στις συνεχείς μεταβλητές, ο αλγόριθμος ξεκινάει με PSO σε πλέγμα (on a mesh), για καθορισμένες από το χρήστη γενιές και εν συνεχεία, εφαρμόζει τον Hooke-Jeeves με αρχική τιμή τις θέσεις των σωματιδίων (particles) με τη χαμηλότερη τιμή για τη συνάρτηση κόστους. Συγκεκριμένα πριν από την υλοποίηση του Hooke-Jeeves, ύστερα από έναν πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων, ο PSO τερματίζει, δίνοντας εφικτές λύσεις για το πρόβλημα. Έτσι, σε αντίθεση με τον από Hooke-Jeeves, ο υβριδικός αλγόριθμος είναι

λιγότερο πιθανό να καταλήξει σε κάποιο τοπικό ελάχιστο.

Ο *Simplex Algorithm of Nelder and Mead with the Extension of O'Neill* είναι ένας αλγόριθμος που δεν κάνει χρήση παραγώγων στην υλοποίησή του και είναι κατάλληλος για προβλήματα με συνεχείς μεταβλητές με ή χωρίς περιορισμούς. Η λειτουργία του βασίζεται σε μια ν-διάστατη δομή, όπου υπολογίζεται η συνάρτηση κόστους για κάθε διάνυσμα. Σε κάθε βήμα προσομοίωσης, το σημείο με την υψηλότερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση αντικαθίσταται από κάποιο άλλο σημείο. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τρεις κύριες λειτουργίες: *ανάκλαση σημείου (point reflection), contraction of the simplex, expansion of the simplex.* Ο αλγόριθμος έχει εφαρμοστεί για αριθμητικές συναρτήσεις [34], αλλά στις περιπτώσεις όπου γίνεται χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης η σύγκλιση μπορεί να αποτύχει, εξ αιτίας ασυνεχειών.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και σε συνδυασμό με το μεγάλο αριθμό μεταβλητών που περιλαμβάνονται στο πρόβλημα, επιλέχθηκε η αναζήτηση με χρήση ενός τοπικής αναζήτησης αλγορίθμου, με αρχική τιμή ένα διάνυσμα του οποίου τα στοιχεία θα οδηγούν σε έναν εφαρμόσιμο ελεγκτή με ταυτόχρονα μία σχετικά χαμηλού κόστους λύση η οποία κατά πάσα πιθανότατα δεν είναι εφικτή. Αυτό ίσως να μην οδηγήσει σε ένα ολικό ελάχιστο, αλλά είναι πολύ πιθανό η αναζήτηση να καταλήξει σε ένα εφαρμόσιμο και χαμηλότερου κόστους από την αρχική λύση, τοπικό ελάχιστο. Έτσι, οι GPS αλγόριθμοι, που ανήκουν στην κατηγορία των τοπικής αναζήτησης αλγορίθμων μπορούν να πετύχουν στην εύρεση μιας εφικτής λύσης.

5.3 Generalized Pattern Search Methods

Στο GenOpt, οι Αλγόριθμοι Γενικευμένης Σχηματικής Αναζήτησης (Generalized Pattern Search algorithms) παρουσιάζονται για περιπτώσεις όπου η f μπορεί να μην υπολογίζεται ακριβώς, αλλά προσεγγίζεται από συναρτήσεις $f(\cdot)$, όπου το πρώτο όρισμα $\epsilon \in \mathbb{R}_+^q$ είναι η παράμετρος ακριβείας των μερικών και συνήθων διαφορικών εξισώσεων και επιλυτών αλγεβρικών εξισώσεων. Η κύρια διαφορά με τα προβλήματα όπου η f μπορεί να υπολογιστεί ακριβώς, είναι ότι ο έλεγχος για το ϵ δεν είναι εφαρμόσιμος.

5.3.1 Παραδοχές

Οι παραδοχές για τη συνάρτηση $f(\cdot)$ και τις προσεγγιστικές τις συναρτήσεις $\{f^*(\epsilon, \cdot)\}\epsilon \in \mathbb{R}_+^q$ έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες.

- Παραδοχή 1: Υπάρχει μια συνάρτηση ορίου λάθους $\phi : \mathbb{R}_+^q \to \mathbb{R}_+$ τέτοια ώστε για κάθε ορισμένο σύνολο $\mathbb{S} \subset \mathbb{X}$, υπάρχει ένα $\epsilon_{\mathbb{S}} \in \mathbb{R}_+^q$ και ένα βαθμωτό $K_{\mathbb{S}} \in (0, \infty)$, τέτοια ώστε για όλα τα $x \in \mathbb{S}$ και για όλα τα $\epsilon \in \mathbb{R}_+^q$, με $\epsilon \leq \epsilon_{\mathbb{S}}$,

$$\begin{aligned} |f^*(\epsilon, x) - f(x)| &\leq K_{\mathbb{S}}\phi(\epsilon) \\ \lim_{||\epsilon|| \to 0} \phi(\epsilon) &= 0 \end{aligned} \tag{5.5}$$

- Παραδοχή 2: Η συνάρτηση $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ είναι μια φορά διαφορίσιμη.

- Παρατήρηση 1: Οι συναρτήσεις $\{f^*(\epsilon, \cdot)\}_{\epsilon \in \mathbb{R}_+^q}$ μπορούν να είναι μη-συνεχείς. Όσον αφορά τις προσεγγιστικές συναρτήσεις, θέτουμε τον ακόλουθο ορισμό.

- Ορισμός 1: Δοθείσας μιας συνάρτησης $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ και ενός $a \in \mathbb{R}$, τέτοιο ώστε $a > inf_{x\in\mathbb{R}^n} f(x)$, ορίζεται ένα σύνολο $\mathbb{L}_\alpha(f) \subset \mathbb{R}^n$, για το οποίο ισχύει

$$\mathbb{L}_\alpha(f) \triangleq \{x \in \mathbb{R}^n | f(x) \leq \alpha\} \tag{5.6}$$

- Παραδοχή 3: Έστω $\{f^*(\epsilon, \cdot)\}_{\epsilon\in\mathbb{R}^q_+}$ όπως ορίστηκε προηγουμένως και $\mathbb{X} \subset \mathbb{R}^n$ το σύνολο του περιορισμού. Έστω $x_0 \in \mathbb{X}$ η αρχική επανάληψη και $\epsilon_o \in \mathbb{R}^q_+$ η αρχική ρύθμιση ακρίβειας. Έτσι, θεωρούμε ότι υπάρχει ένα σύνολο $\mathbb{C} \subset \mathbb{R}^n$ τέτοιο ώστε

$$\mathbb{L}_{f^*(\epsilon_0,x_0)}(f^*(\epsilon, \cdot)) \cap \mathbb{X} \cap \mathbb{C}, \qquad \forall\epsilon \leq \epsilon_0. \tag{5.7}$$

5.3.2 Περιγραφή των GPS αλγορίθμων

Ανάμεσα στις διαφορετικές γεωμετρικές εφαρμογές των GPS αλγορίθμων, η παρούσα εφαρμογή διακρίνεται από τον περιορισμό των βημάτων της έρευνας σε θετικές και αρνητικές κατευθύνσεις. Ο παρακάτω πίνακας αντιπροσωπεύει τις κατευθύνσεις της έρευνας.

$$D \triangleq \Big[-e_1, +e_1, \ldots, -e_n, +e_n\Big] \in \mathbb{Z}^{n\times 2n}, \tag{5.8}$$

Για την κατασκευή ενός k τάξης πλέγματος, ο ορισμός της ελάχιστης απόστασης μεταξύ των επαναλήψεων βασίζεται στις παρακάτω παραδοχές:

- Παραδοχή: Έστω $r, s_0, k \in \mathbb{N}$, με $r > 1$, και $\{t_i\}_{i=0}^{k-1} \subset \mathbb{N}$. Θεωρούμε ότι η αλληλουχία των παραμέτρων του πλέγματος ικανοποιεί:

$$\Delta_k \triangleq \frac{1}{r^{s_k}}, \tag{5.9}$$

  όπου για $k > 0$

$$s_k \triangleq s_o + \sum_{i=0}^{k-1} t_i. \tag{5.10}$$

  Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω, οι επαναλήψεις στηρίζονται σε ένα πλέγμα με την ακόλουθη μορφή:

$$\mathbb{M}_k \triangleq \{x_0 + \Delta_k D m \mid m \in \mathbb{N}^{2n}\}. \tag{5.11}$$

  Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ γενικής ("global") και τοπικής ("local") αναζήτησης.

- Ορισμός: Έστω $\mathbb{X}_k \subset \mathbb{R}^n$ και $\mathbf{\Delta}_k \subset \mathbb{Q}_+$ τα σύνολα που καθορίζουν την αλληλουχία των $k+1$ στοιχείων, έστω $\mathbb{M}_k$ το πλέγμα που μελετάται, και $\epsilon \in \mathbb{R}^q_+$ η ανοχή του επιλύτη.

  1. Ο χάρτης της global αναζήτησης ορίζεται ως: $\gamma_k : \mathbb{X}_k \times \mathbf{\Delta}_k \times \mathbb{R}^q_+ \to (2^{\mathbb{M}_k} \cap \mathbb{X}) \cap \emptyset$, όπου γ_k περιλαμβάνει ένα πεπερασμένο σύνολο σημείων του πλέγματος.
  2. Η global αναζήτηση ορίζεται ως $G_k \triangleq \gamma_k(\underline{x}_k, \underline{\Delta}_k, \epsilon)$.
  3. Οι κατευθύνσεις της local αναζήτησης ορίζονται ως:

$$D \triangleq \Big[-e_1, +e_1, \ldots, -e_n, +e_n\Big] \in \mathbb{Z}^{n\times 2n}, \tag{5.12}$$

4. Ο χάρτης τοπικής αναζήτησης ορίζεται ως:

$$L_k \triangleq \{x_k + \Delta_k De_i \mid \in \{1, \cdots, 2n\}\} \cap \mathbb{X} \tag{5.13}$$

- Παρατήρηση:

1. Ο χάρτης global αναζήτησης $\gamma_k(\cdot, \cdot, \cdot)$ μπορεί να είναι δυναμικός στην περίπτωση που $\{x_{k_i}\}_{i=0}^{I} \triangleq \gamma_k(\underline{x_k}, \underline{\Delta_k}, \epsilon)$, τότε ο κανόνας για την επιλογή του $x_{k_{\hat{i}}}, 1 \leq \hat{i} \leq I$, εξαρτάται από το $\{x_{k_i}\}_{i=0}^{\hat{i}-1}$ και την $\{f^*(\epsilon, x_{k_i})\}_{i=0}^{\hat{i}-1}$. Η global αναζήτηση τερματίζει ύστερα από έναν πεπερασμένο αριθμό υπολογισμών και επίσης ισχύει ότι $G_k \subset (2^{\mathbb{M}_k} \cap \mathbb{X}) \cap \emptyset$.
2. Η global αναζήτηση επηρεάζει μόνο την αποδοτικότητα του αλγορίθμου και όχι τις ιδιότητες σύγκλισης. Οποιαδήποτε ευρετική διαδικασία που οδηγεί σε πεπερασμένο αριθμό αξιολογήσεων της συνάρτησης κόστους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για $\gamma_k(\cdot, \cdot, \cdot)$.
3. Το κενό σύνολο περιλαμβάνεται στο $\gamma_k(\cdot, \cdot, \cdot)$ για να επιτρέψει παραβιάσεις στην global αναζήτηση.

5.3.3 Model Adaptive Precision GPS Algorithm

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο των GPS αλγορίθμων με υπολογισμούς προσαρμοστικής ακρίβειας:

- Παρατήρηση:

1. Το όρισμα $\rho(\cdot)$ κανονικοποιείται, για να διασφαλιστεί ότι το ϵ δεν εξαρτάται από το Δ_0. Ο στόχος είναι να αποδεσμευτεί το ϵ από τις παραμέτρους πλέγματος που πρέπει αρχικά να καθοριστούν.
2. Αν η συνάρτηση κόστους μειωθεί στο **Βήμα 2**, μπορεί κανείς να προχωρήσει στο **Βήμα 3**. Η τοπική αναζήτηση L_k συνεχίζει σε όλα τα σημεία που αποτελούν το χάρτη, μέχρι να η συνάρτηση κόστους να μειωθεί όσο αυτό είναι δυνατό.
3. Στο **Βήμα 3**, η παράμετρος πλέγματος Δ_k μειώνεται μόνο όταν κάποιο x που ανήκει στον χάρτη τοπικής και γενικής αναζήτησης δεν μπορεί να αποφέρει κάποια μείωση στη συνάρτηση κόστους.

5.3.4 Hooke-Jeeves Algorithm

Ο αλγόριθμος Hooke-Jeeves [20] ανήκει στην οικογένεια των Generalized Pattern Search (GPS) αλγορίθμων. Οι αλγόριθμοι GPS δεν βασίζονται στην παραγώγιση και είναι κατάλληλοι για προβλήματα με συνεχείς μεταβλητές και εξαρτημένους περιορισμούς όπως το παρόν. Ο αλγόριθμός Hooke-Jeeves, που βρίσκεται στη βιβλιοθήκη του GenOpt έχει τροποποιηθεί από τον Smith [30] και από τους Bell and Pike [6] και De Vogeleare [8].

Εν ολίγοις, ο αλγόριθμος Hooke-Jeeves, απαιτεί ένα αρχικό διάνυσμα κατάστασης και τις παραμέτρους του που καθορίζουν το βήμα αναζήτησης 5.1. Έτσι, δημιουργείται ένας χάρτης με

Πίνακας 5.1: Ο γενικός αλγόριθμος των GPS

Δεδομένα:	Αρχική επανάληψη $x_0 \in \mathbb{X}$; Διαιρέτης πλέγματος $r \in \mathbb{N}$, με $r > 1$; Αρχικός εκθέτης πλέγματος $s_0 \in \mathbb{N}$;
Χάρτες:	Χάρτης γενικής αναζήτησης $\gamma_k : \underline{\mathbb{X}_k} \times \underline{\mathbf{\Delta_k}} \times \mathbb{R}_+^q \to (2^{\mathbb{M}_k} \cap \mathbb{X}) \cup \emptyset$; Η συνάρτηση $\rho : \mathbb{R}_+ \to \mathbb{R}_+^q$ είναι τέτοια ώστε η σύνθεση $\phi \circ \rho : \mathbb{R}_+ \to \mathbb{R}_+$ είναι γνησίως φθίνουσα και ικανοποιεί $\phi(\rho(\Delta))/\Delta \to 0$, καθώς το $\Delta \to 0$.
Βήμα 0:	Αρχικοποίηση $k = 0$, $\Delta_0 = 1/r^{s_0}$ και $\epsilon = \rho(1)$.
Βήμα 1:	Γενική αναζήτηση Δημιουργία του συνόλου γενικής αναζήτησης $G_k = \gamma_k(\underline{x_k}, \underline{\Delta_k}, \epsilon)$. Αν $f^*(\epsilon, x') - f^*(\epsilon, x_k) < 0$ για κάποιο $x' \in G_k$ πήγαινε στο **Βήμα 3**; αλλιώς πήγαινε στο **Βήμα 2**;
Βήμα 2:	Τοπική αναζήτηση Υπολόγισε την $f^*(\epsilon, \cdot)$ για κάθε $x' \in L_k$ μέχρι κάποιο από αυτά ικανοποιήσει την $f^*(\epsilon, x') - f^*(\epsilon, x_k) < 0$, ή μέχρι όλα τα σημεία του συνόλου L_k αξιολογηθούν.
Βήμα 3:	Επανεκτίμηση των παραμέτρων Αν υπάρχει κάποιο $x' \in G_k \cap L_k$ που ικανοποιεί $f^*(\epsilon, x') - f^*(\epsilon, x_k) < 0$, τότε $x_{k+1} = x'$, $s_{k+1} = s_k$, $\Delta_{k+1} = \Delta_k$ και μην αλλάξεις το ϵ; αλλιώς, $x_{k+1} = x_k$, $s_{k+1} = s_k + t_k$, με $t_k \in \mathbb{N}_+$ $\Delta_{k+1} = 1/r^{s_{k+1}}$, $\epsilon = \rho(\Delta_{k+1}/\Delta_0)$.
Βήμα 4:	Αντικατάστησε το k με το $k+1$ και πήγαινε στο **Βήμα 1**.

υποψήφια διανύσματα κατάστασης-λύσεις. Για κάθε διάνυσμα κατάστασης, εξάγεται ένα αποτέλεσμα από το πρόγραμμα προσομοίωσης που στη συνέχεια εισάγεται στη συνάρτηση κόστους για να αξιολογηθεί. Ο αλγόριθμος προσθέτει και αφαιρεί το βήμα από κάθε στοιχείο του διανύσματος, κρατώντας τις κάθε φορά βέλτιστες λύσεις. Ο χάρτης εμπλουτίζεται με τα βέλτιστα διανύσματα κατάστασης τα οποία ερευνώνται σε κάθε γενική αναζήτηση (global search). Σε κάθε global search γίνεται η εξής διαδικασία: Αν η τιμή που θα προκύψει είναι μικρότερη, τότε αποθηκεύεται σαν προσωρινή λύση το παρόν διάνυσμα κατάστασης· αν όχι, συνεχίζεται η έρευνα με το διάνυσμα κατάστασης με τη μέχρι στιγμής μικρότερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση που έχει προκύψει από την τρέχουσα διαδικασία . Αν με την global search δεν προκύψει κάποια μείωση στη συνάρτηση κόστους, ο αλγόριθμος προχωράει σε μια τοπική αναζήτηση (local search) ξεκινώντας από το βέλτιστο διάνυσμα κατάστασης που έχει προκύψει από όλη τη διαδικασία του αλγορίθμου. Αν η local search δεν αποφέρει μείωση στη συνάρτηση κόστους, τότε το βήμα μειώνεται ακόμα περισσότερο και ξεκινάει μια νέα global search με νέο διάνυσμα κατάστασης. Τέλος, η διαδικασία τερματίζει αν υπερβούν ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ή ο μέγιστος αριθμός μείωσης βήματος.

Παράμετροι αλγορίθμου

Οι παράμετροι του αλγορίθμου Hooke-Jeeves είναι οι D, r, s_0, t_k, όπως αναφέρθηκαν και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο για την επεξήγηση των GPS αλγορίθμων. Η παράμετρος D, ουσιαστικά αντιπροσωπεύει τα βήματα εξερεύνησης του αλγορίθμου, τα οποία είναι άμεσης εξάρτησης των παραμέτρων του αλγορίθμου, όπως φαίνεται από τη σχέση 5.11, πολλαπλασιασμένα με τη γενική παράμετρο που ορίζεται σε κάθε πρόβλημα του GenOpt, $step$. Έτσι, το διάνυσμα εξερεύνησης D, είναι:

$$D \triangleq \left[+s^1 e_1, -s^1 e_1, \ldots, +s^n e_n, -s^n e_n\right] \tag{5.14}$$

όπου $s^i \in \mathbb{R}, i \in \{1, \ldots, n\}$.
Η παράμετρος $r \in \mathbb{N}$ χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της Δ_k, ορίζεται με το όνομα MeshSize-Divider, και πρέπει να ισχύει ότι $r > 1$. Για τις υπόλοιπες παραμέτρους ισχύει ότι πρέπει να είναι μεγαλύτερες του μηδενός. Η παράμετρος $s_0 \in \mathbb{N}$ ορίζεται στο GenOpt με την ονομασία InitialMeshSizeExponent αλλά και ο αυξητικός παράγων t_k που τίθεται σε εφαρμογή όταν δεν επιτυγχάνεται κάποια μείωση στο κόστος, ονομάζεται MeshSizeExponentIncrement. Η μεταβλητή m που λέγεται και NumberOfStepReduction δείχνει το μέγιστο αριθμό μείωσης βημάτων πριν ο αλγόριθμος ολοκληρωθεί.

Χάρτης των κινήσεων εξερεύνησης

Για τη διευκόλυνση της εξήγησης του αλγορίθμου, δημιουργείται ένας χάρτης $E_k : \mathbb{R}^n \times \mathbb{Q}_+ \times \mathbb{R}^q_+ \to 2^{\mathbb{M}_k}$. Ο χάρτης E_k ορίζει τις κινήσεις του Hooke-Jeeves και ορίζει το χάρτη γενικής αναζήτησης αλλά και τον τοπικής αναζήτησης χάρτη όταν επιβάλλεται η εξερεύνησή του.

Χάρτης γενικής αναζήτησης (Global search set map)

Ο χάρτης γενικής αναζήτησης γ_k ορίζεται με τον παρακάτω αλγόριθμο (πίνακας5.2). Το γ_0 εξαρτάται από το x_{-1}, το οποίο ορίζεται $x_{-1} \triangleq x_0$. Ως εκ τούτου, $\gamma_k(\underline{x_k}, \underline{\Delta_k}, \epsilon) = G_k$.

Πίνακας 5.2: Ο χάρτης γενικής αναζήτησης (global search) στον αλγόριθμο Hooke-Jeeves

Χάρτης:	Ο χάρτης των κινήσεων εξερεύνησης είναι $E_k : \mathbb{R}^n \times \mathbb{Q}_+ \times \mathbb{R}^q_+ \to 2^{\mathbb{M}_k}$.
Δεδομένα εισόδου:	Η προηγούμενη και η παρούσα επανάληψη είναι: $x_{k-1} \in \mathbb{R}^n$ και $x_k \in \mathbb{R}^n$.
	Ο διαιρέτης πλέγματος είναι $\Delta_k \in \mathbb{Q}_+$.
	Η ακρίβεια του επιλύτη είναι $\epsilon \in \mathbb{R}^q_+$.
Δεδομένα εξόδου:	Το σύνολο γενικής αναζήτησης G_k.
Βήμα 1:	Έστω $x = x_k + (x_k - x_{k-1})$.
Βήμα 2:	Υπολογισμός του $G_k = E_k(x, \Delta_k, \epsilon)$.
Βήμα 3:	Αν $(min_{x \in G_k} f^*(\epsilon, x)) > f^*(\epsilon, x_k)$
	τότε $G_k \leftarrow G_k \cup E_k(x_k, \Delta_k, \epsilon)$.
	τέλος αν;
Βήμα 4:	Επέστρεψε το G_k.

Χάρτης τοπικής αναζήτησης (Local search direction map)

Αν η γενική αναζήτηση αποτύχει στη μείωση της προσεγγιστικής συνάρτησης κόστους, τότε τίθεται σε εφαρμογή η τοπική αναζήτηση. Η τοπική αναζήτηση αρχικοποιείται με το διάνυσμα που δίνει τη μέχρι στιγμής ελάχιστη τιμή στη συνάρτηση κόστους. Το βήμα με το οποίο ψάχνει ο αλγόριθμος είναι το ίδιο με αυτό της γενικής αναζήτησης. Ο χάρτης της τοπικής αναζήτησης $L_k \triangleq \{x_k + \Delta_k De_i \mid i = 1, \ldots, 2n\}$ είναι υποσύνολο του χάρτη γενικής αναζήτησης και εφόσον έχει γίνει αξιολόγηση της συνάρτησης κόστους μία φορά, δεν υπάρχει καμία ανάγκη για δεύτερη τοπική αναζήτηση.

5.4 Η δομή του GenOpt

Το GenOpt αποτελείται από δυο βασικά μέρη· το κεντρικό κομμάτι και το κομμάτι της βελτιστοποίησης. Το κεντρικό κομμάτι διαβάζει τα αρχεία εισόδου, καλεί το πρόγραμμα προσομοίωσης, αποθηκεύει τα αποτελέσματα, γράφει αρχεία εξόδου κλπ. Το κομμάτι της βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τους αλγορίθμους βελτιστοποίησης καθώς και κλάσεις μαθηματικών συναρτήσεων. Έτσι, υπάρχει ένα περιβάλλον διεπαφής για προγράμματα βελτιστοποίησης και ένα για αλγορίθμους βελτιστοποίησης. Το περιβάλλον διεπαφής για προγράμματα επιτρέπει ο υπολογισμός της συνάρτησης κόστους να γίνεται μέσω λογισμικών προσομοίωσης.

5.4.1 Περιβάλλον διεπαφής για το πρόγραμμα προσομοίωσης

Η ανταλλαγή των δεδομένων με το πρόγραμμα προσομοίωσης γίνεται μέσω αρχείων text· έτσι γίνεται δυνατή η σύνδεση με το GenOpt, χωρίς κάποιον ενδιάμεσο κώδικα. Το λογισμικό λοιπόν, θα πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω απαιτήσεις:

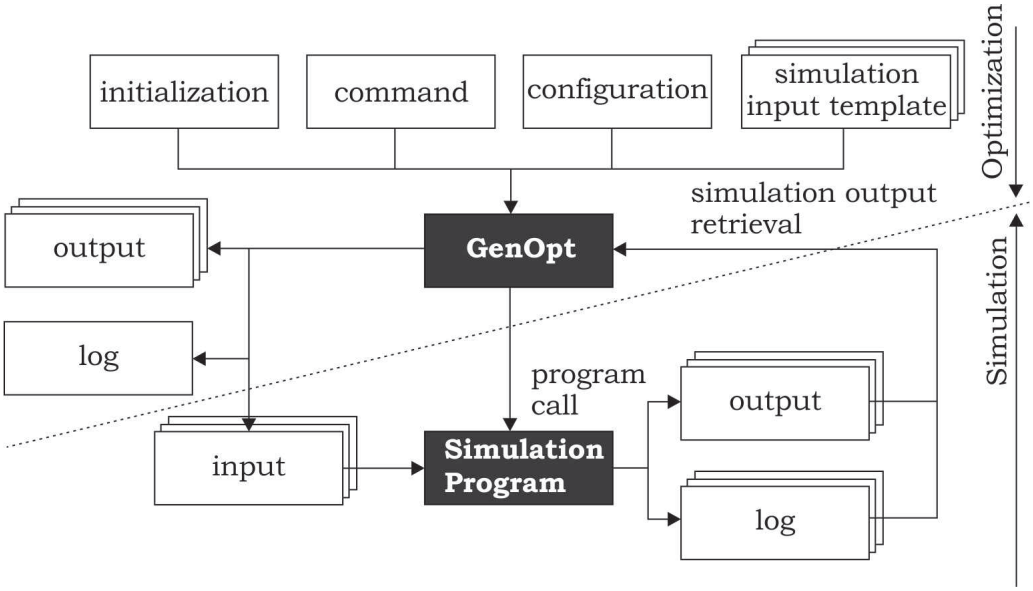
1. Το πρόγραμμα προσομοίωσης πρέπει να διαβάζει τις εισόδους του από αρχεία text, πρέπει να γράφει τα αρχεία εξόδου από όπου η συνάρτηση κόστους υπολογίζεται σε αρχεία text και να γράφει μηνύματα λάθους σε text αρχεία.

2. Πρέπει να μπορεί να ξεκινήσει την προσομοίωση από μια εντολή και να μπορεί να την τερματίζει αυτόματα, χωρίς την ενδιάμεση μεσολάβηση από το χρήστη.

Τα text αρχεία που απαιτούνται για την μοντελοποίηση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης και αποτελούν αρχεία εισόδου είναι τα εξής:

- Initialization file: Στο αρχείο αυτό δηλώνονται όλα τα αρχεία που συμμετέχουν στη βελτιστοποίηση, το αρχείο καιρού, δίνεται η αντικειμενική συνάρτηση και διαβάζονται οι μεταβλητές από το το αρχείο εξόδου του προγράμματος προσομοίωσης που συμμετέχουν σ' αυτή.

- Command file: Εδώ δηλώνονται οι αρχικές τιμές διανυσμάτων κατάστασης, το ανώτατο και το κατώτατο όριο που μπορούν να λάβουν καθώς και το βήμα αναζήτησης το οποίο χρησιμοποιείται ανάλογα με τον αλγόριθμο που έχει επιλεχθεί. Επίσης δηλώνεται ο αλγόριθμος καθώς και οι τιμές των παραμέτρων που τον χαρακτηρίζουν.



Σχήμα 5.1: Η δομή του GenOpt, [34]

- Configuration file: Αυτό το αρχείο αφορά το πρόγραμμα προσομοίωσης και πολλές φορές μπορεί να υπάρχει έτοιμο στη βιβλιοθήκη του GenOpt. Δεν αλλάζει με το πρόβλημα βελτιστοποίησης, αλλά με το λογισμικό προσομοίωσης. Περιλαμβάνει εντολές σχετικά με μηνύματα λάθους του λογισμικού, καθορίζει το είδος των χαρακτήρων στα αρχεία εισόδου και το σημείο στο οποίο θα αρχίσει το πρόγραμμα προσομοίωσης.

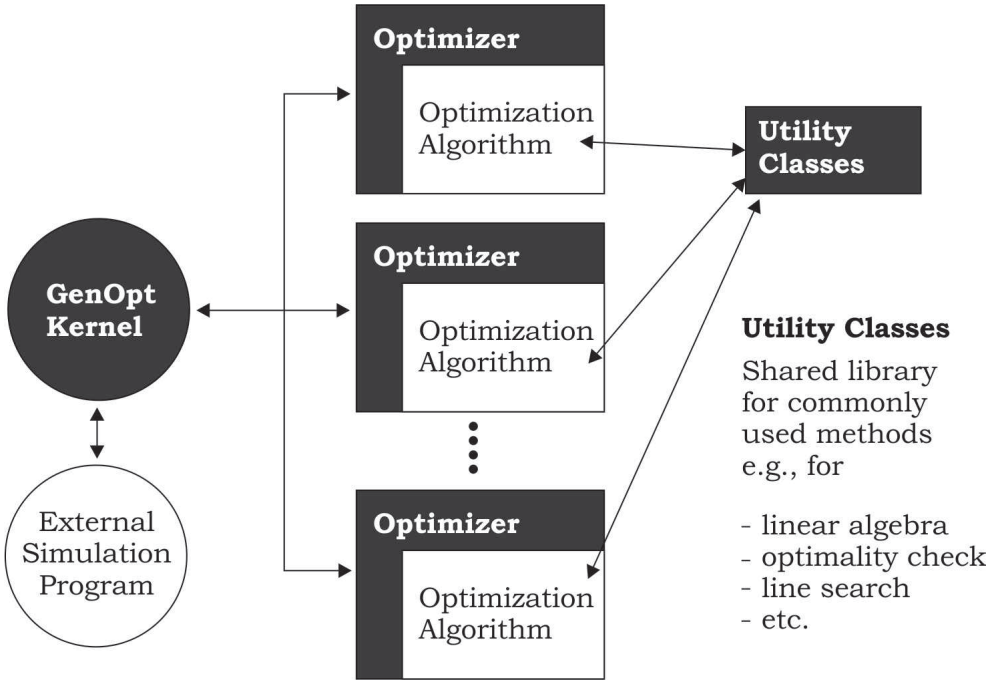
- Simulation input template file: Εδώ βρίσκεται το αρχείο της προσομοίωσης από το οποίο το GenOpt διαβάζει τις μεταβλητές που πρέπει να αλλαχθούν και με βάση αυτό δημιουργούνται τα αρχεία με τις νέες μεταβλητές που κάθε φορά 'δοκιμάζονται' στο λογισμικό προσομοίωσης.

Τα παραπάνω αρχεία μαζί με τα ακόλουθα αρχεία εξόδου που έχουν προκύψει από το πρόγραμμα βελτιστοποίησης, συνθέτουν το κομμάτι της βελτιστοποίησης.

- Output: Είναι το αρχείο εξόδου που προκύπτει σε κάθε τέλος μιας προσομοίωσης του λογισμικού, απ' όπου δίνονται τα αποτελέσματα για τις μεταβλητές που συνθέτουν την αντικειμενική συνάρτηση.

- Log: Σε αυτό το αρχείο τυπώνονται οι πληροφορίες για τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης και αναφέρονται τα λάθη σε περίπτωση που αυτή αποτύχει.

Πέρα από τη βελτιστοποίηση, υπάρχει το κομμάτι της προσομοίωσης. Σε αυτό κομμάτι, το output αρχείο έχει ρόλο αρχείου input για το πρόγραμμα προσομοίωσης, το οποίο με τη σειρά του, παράγει νέα output και log αρχεία-εισόδους για το GenOpt.



Σχήμα 5.2: Το περιβάλλον διεπαφής του GenOpt για τον αλγόριθμο [34]

5.4.2 Περιβάλλον διεπαφής για τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης

Το GenOpt περιλαμβάνει στη βιβλιοθήκη του ένα πλήθος αλγορίθμων οι οποίοι μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα με το περιβάλλον διεπαφής για αλγορίθμους βελτιστοποίησης. Επίσης μπορεί οποιοσδήποτε να αναπτύξει τον δικό του αλγόριθμο σύμφωνα με τους παραπάνω κανόνες. Έτσι, το Genopt μπορεί να γίνει ένα εργαλείο ανάπτυξης, ελέγχου και σύγκρισης αλγορίθμων. Η διεπαφή για τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης προσφέρει όλες τις απαιτούμενες συναρτήσεις για την ανάκτηση των παραμέτρων που περιγράφουν τις ρυθμίσεις βελτιστοποίησης, και αξιολογεί τη συνάρτηση κόστους δίνοντας αντίστοιχες αναφορές.

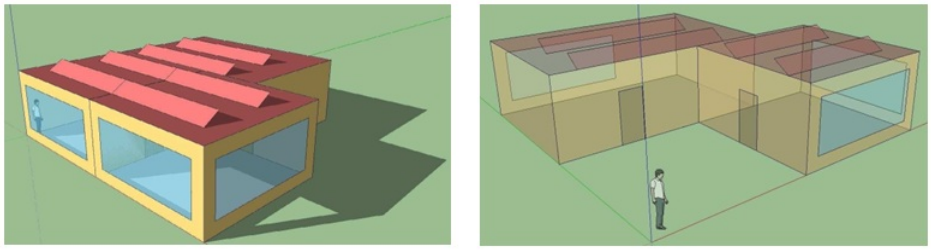
Κεφάλαιο 6

Περιγραφή του μοντέλου

Ο αλγόριθμος Hooke-Jeeves που σε προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκε, είναι ικανός να συνεργαστεί με προγράμματα θερμικής προσομοίωσης κτηρίων όπως το EnergyPlus. Στην παρούσα εργασία γίνεται εφαρμογή για ένα μη υπάρχον πειραματικό κτήριο, κατασκευασμένο από σκυρόδεμα και τοποθετημένο στην Αθήνα. Το κτήριο αυτό αποτελείται από τρεις θερμικές ζώνες. Χρησιμοποιώντας το EnergyPlus, δημιουργούμε ένα αναλυτικό μοντέλο προσομοίωσης του κτηρίου ως προς το κέλυφος, τα θερμικά του χαρακτηριστικά και τα συστήματα θέρμανσης-ψύξης (HVAC) που περιλαμβάνει. Η δημιουργία του μοντέλου έχει γίνει για τους σκοπούς του Ευρωπαϊκού προγράμματος PEBBLE (Positive-Energy Buildings thru Better controL dEcisions) [28] και υποθέτουμε ότι το κτήριο βρίσκεται στην Αθήνα.

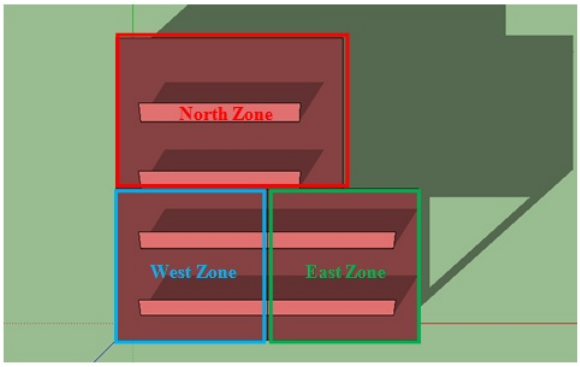
6.1 Γεωμετρία του κτηρίου και Θερμικές ζώνες

Το πειραματικό κτήριο φαίνεται στην εικόνα 6.1, η οποία έχει εξαχθεί από το πρόσθετο σχεδιαστικό πρόγραμμα OpenStudio του Google SketchUp [22] [10].



Σχήμα 6.1: Η γεωμετρία του πειραματικού κτηρίου, όπως έχει σχεδιαστεί στο OpenStudio του Google SketchUp

Όσον αφορά τη χρήση του κτηρίου, υποθέτουμε ότι περιλαμβάνει τρεις ξεχωριστούς χώρους-γραφεία. Σε κάθε γραφείο, είναι τοποθετημένα από ένα κλιματιστικό ή μονάδα HVAC τα οποία θεωρούμε ότι μπορούν να καλύψουν οποιαδήποτε ανάγκη για θέρμανση ή ψύξη. Έτσι, είναι δυνατή η ρύθμιση της θερμοκρασίας ξεχωριστά για τους τρεις χώρους και γι' αυτό το λόγο, ο καθένας από αυτούς μπορεί να θεωρηθεί ως μια ξεχωριστή θερμική ζώνη (Figure 6.2).

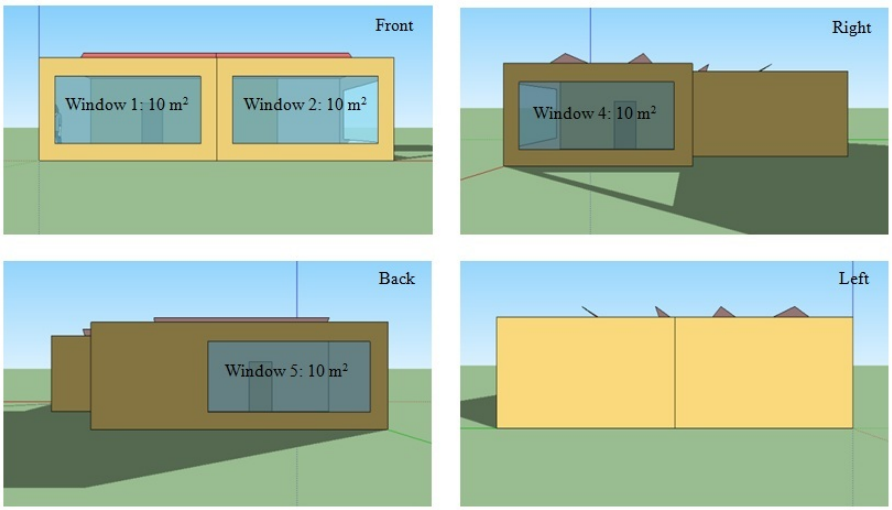


Σχήμα 6.2: Διαχωρισμός των θερμικών ζωνών στο πειραματικό κτήριο

Πίνακας 6.1: Θερμικές ζώνες - Επιφάνεια και Ύψος

	Επιφάνεια (m^2)	**Ύψος** (m)
Δυτική Ζώνη	37	3
Ανατολική Ζώνη	37	3
Βόρεια Ζώνη	56	3
Συνολικό Κτήριο	130	3

Η επιφάνεια κάθε ανοίγματος στην κάθε όψη του κτηρίου φαίνεται στην Εικόνα 6.3.



Σχήμα 6.3: Επιφάνεια Υαλοπινάκων στην πρόσοψη, δεξιά, πίσω και αριστερή όψη του κτηρίου

6.1.1 Χαρακτηριστικά τοίχων και Υαλοπινάκων

Το λογισμικό EnergyPlus στους υπολογισμούς του, θεωρεί από γεωμετρικής άποψης μηδενικό το πάχος κατασκευαστικών στοιχείων, λαμβάνει ωστόσο υπόψη του τα θερμικά χαρακτηριστικά καθώς και το πάχος των κατασκευαστικών υλικών για να υπολογίσει τη μετάδοση θερμότητας δια μέσου των τοίχων, των δαπέδων, της οροφής και των υαλοπινάκων. Τα θερμικά χαρακτηριστικά των υλικών περιγράφονται λεπτομερώς στους πίνακες 6.2 και 6.2 η κατασκευή κάθε τοιχοποιίας (layer) περιγράφεται στον πίνακα 6.4 και τα χαρακτηριστικά των υαλοπινάκων σε ό,τι αφορά θερμικές, ηλιακές, ορατές και υπέρυθρες ιδιότητες των υαλοπινάκων του κτηρίου δίνονται στον πίνακα 6.5.

Πίνακας 6.2: Θερμικές ιδιότητες των κατασκευαστικών υλικών (α)

Υλικό	**Αγωγιμότητα** $(\mathrm{W/m \cdot K})$	**Ειδική θερμότητα** $(\mathrm{J/kg \cdot K})$	**Πυκνότητα** $(\mathrm{kg/m^2})$
Solid Core	0.152	614.50	1630
Γυψομάρμαρο	0.692	1858.14	836.8
Οπτόπλινθος	0.726	1922.22	836.8
Γυψοσανίδα	0.726	1601.85	836.8
Πλακίδιο πηλού	0.571	1121.29	836.8
Σκυρόδεμα	1.729	2242.58	836.8
Πέτρα	1.436	881.01	1673.6
Ασφαλτική Μεμβράνη	0.190	1121.29	1673.6
Μόνωση	0.043	91.30	836.8

Πίνακας 6.3: Θερμικές ιδιότητες των κατασκευαστικών υλικών (β)

Υλικό	**Θερμική Απορρόφηση**	**Ηλιακή Απορρόφηση**	**Ορατή Απορρόφηση**
Solid Core	0.9	0.92	0.92
Γυψομάρμαρο	0.9	0.92	0.92
Οπτόπλινθος	0.9	0.76	0.76
Γυψοσανίδα	0.9	0.92	0.92
Πλακίδιο πηλού	0.9	0.82	0.82
Σκυρόδεμα	0.9	0.65	0.65
Πέτρα	0.9	0.55	0.55
Ασφαλτική Μεμβράνη	0.9	0.75	0.75
Μόνωση	0.9	0.50	0.50

Το κέλυφος του κτηρίου φαίνεται να είναι “μη-μονωμένο”, ή η μόνωση είναι ανεπαρκής. Οι U-value τιμές που αποτυπώνουν τη θερμική συμπεριφορά του κτηρίου και είναι αρκετά υψηλές, οδηγούν στο συμπέρασμα αυτό. Το κτήριο παρουσιάζει σημαντικές θερμικές απώλειες κατά τις

Πίνακας 6.4: Layers και U-value για κάθε κατασκευή

Κατασκευή Όνομα	**Εφαρμογή**	**Layer Bedding**	**U-value** (W/m^3K)
EXTWALL	Εξωτερικοί τοίχοι	1 in Γυψομάρμαρο, 4 in Οπτόπλινθος, 3/4 in Γυψοσανίδα	2.70
PARTITION	Εσωτερικοί Τοίχοι	3/4 in Γυψοσανίδα, 8 in Πλακίδιο πηλού, 3/4 in Γυψοσανίδα	2.08
FLOOR SLAB	Δάπεδο	8 in Σκυρόδεμα	1.17
ROOF	Οροφή	1/2 in Πέτρα, 3/8 in Ασφαλτική Μεμβράνη, 1 in Μόνωση, 2 in Σκυρόδεμα	3.08

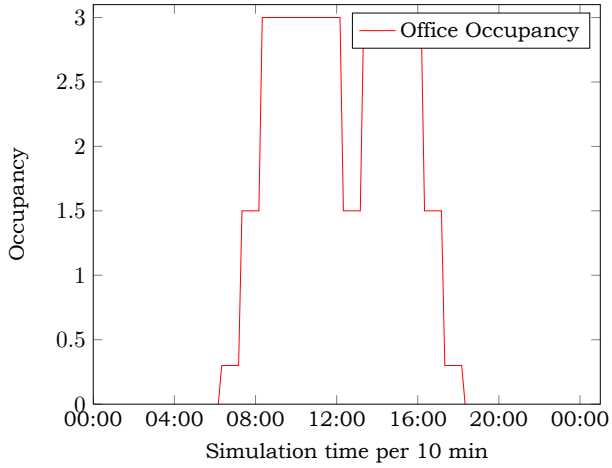
Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικά Υαλοπινάκων

Θερμικές Ιδιότητες	
Πάχος (m)	0.003
Πυκνότητα (W/mK)	0.9
Ηλιακές Ιδιότητες	
Ηλιακή Διαπερατότητα σε Κανονική Συχνότητα	0.9
Ηλιακή Ανάκλαση πρόσοψης σε Κανονική Συχνότητα	0.031
Ηλιακή Ανάκλαση πίσω όψης σε Κανονική Συχνότητα	0.031
Ορατές Ιδιότητες	
Ορατή Διαπερατότητα σε Κανονική Συχνότητα	0.9
Ορατή Ανάκλαση πρόσοψης σε Κανονική Συχνότητα	0.05
Ορατή Ανάκλαση πίσω όψης σε Κανονική Συχνότητα	0.05
Υπέρυθρες Ιδιότητες	
Υπέρυθρη Διαπερατότητα σε Κανονική Συχνότητα	0
Ημισφαιρική Εκπομπή Υπερύθρων πρόσοψης	0.84
Ημισφαιρική Εκπομπή Υπερύθρων πίσω όψης	0.84

χειμερινές περιόδους εξ αιτίας των κατασκευαστικών του υλικών αλλά και μεγάλα ποσά ηλιακών κερδών κατά τις θερινές περιόδους λόγω των μεγάλων επιφανειών από υαλοπίνακες.

6.1.2 Εσωτερικά κέρδη

Για να οριστούν τα εσωτερικά κέρδη εξ αιτίας της ανθρώπινης παρουσίας (Εικόνα 6.4), απαιτούνται δεδομένα για τον αριθμό των ανθρώπων σε κάθε ζώνη, τις ώρες που βρίσκονται σε αυτές και τους μεταβολικούς ρυθμούς για τις ανθρώπινες δραστηριότητες σε κάθε ζώνη (108 W/Person) στο θερμικό μοντέλο.



Σχήμα 6.4: Χρονοδιάγραμμα παρουσίας ανθρώπων για κάθε εργάσιμη ημέρα

1. Οι εργάσιμες ημέρες είναι από τη Δευτέρα έως την Παρασκευή, εκτός από τις διακοπές των Χριστουγέννων, του Πάσχα, καλοκαιρινές διακοπές και εθνικές εορτές.

2. Οι ώρες λειτουργίας του κτηρίου είναι από τις 06:00 έως 18:00.

3. Τα θερμικά κέρδη από υπολογιστές ή άλλους ηλεκτρικούς και ηλεκτρονικούς εξοπλισμούς τίθενται στο μηδέν. Έτσι, μπορεί να γίνει μια ξεκάθαρη εκτίμηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας εξ αιτίας των κλιματιστικών μονάδων σε κάθε ζώνη.

6.1.3 Αερισμός και Διήθηση του αέρα

Τα θερμικά κέρδη εξ αιτίας της διήθησης του αέρα και του αερισμού μπορεί να έχουν πολύ σημαντική επίδραση και γι' αυτό μοντελοποιούνται αναλυτικά στο EnergyPlus μέσω του AirflowNetwork. Το μοντέλο του AirflowNetwork παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού των ροών του αέρα που προέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον ή από τη λειτουργία των συστημάτων HVAC. Το μοντέλο πίεσης και ροής του αέρα είναι βασισμένο στο AIRNET [33].

Η διήθηση του αέρα είναι η ακούσια ροή του αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον σε μια θερμική ζώνη. Γενικά, προκαλείται από το άνοιγμα και το κλείσιμο των εξωτερικών θυρών, από τις ρωγμές γύρω από τα παράθυρα και σε μικρές ποσότητες μέσω των στοιχείων του κτηρίου [12]. Σύμφωνα με το μοντέλο του AirflowNetwork, κάθε επιφάνεια στο μοντέλο προσομοίωσης έχει μια ρωγμή και το μέγεθός της (χαρακτηρίζεται από το συντελεστή ροής) είναι καθορισμένο, με βάση την αεροστεγανότητα που έχει οριστεί.

Ο αερισμός είναι η εκούσια ροή του αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον σε μια θερμική ζώνη ώστε να ψυχθεί ο χώρος με μη-μηχανικό τρόπο [12]. Για τη μοντελοποίηση του αερισμού πρέπει να καθοριστούν πολλές είσοδοι ώστε να επιτραπεί ο έλεγχος του φυσικού αερισμού μέσω εσωτερικών και εξωτερικών ανοιγμάτων σε μια ζώνη, όπου τα ανοίγματα ορίζονται ως ένα παράθυρο ή μια θύρα που μπορεί να ανοιχτεί. Ο έλεγχος μπορεί να εφαρμοστεί είτε με τον ίδιο τρόπο σε όλα τα ανοίγματα κάθε ζώνης είτε ξεχωριστά σε κάθε παράθυρο ή θύρα.

Η λειτουργία των ανοιγμάτων ελέγχεται από ένα σύνολο χρονοδιαγραμμάτων.

6.1.4 Σύστημα HVAC

Το σύστημα HVAC (Heating, Ventilation and Air-Conditioning), είναι υπεύθυνο για το θερμικό έλεγχο στο εσωτερικό περιβάλλον ενός κτηρίου και κατ' επέκταση για τη θερμική άνεση των ενοίκων. Η λειτουργία του στοχεύει στη διαμόρφωση επιθυμητών επιπέδων θερμοκρασίας και υγρασίας αλλά και στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Οποιοδήποτε σύστημα HVAC μπορεί να προσομοιωθεί πλήρως μέσω του EnergyPlus.

Το σύστημα HVAC που έχει τοποθετηθεί στο πειραματικό μοντέλο για σκοπούς θέρμανσης και ψύξης είναι το απλούστερο που διαθέτει το λογισμικό EnergyPlus και λέγεται Ideal Loads Air System. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα δουλεύει στέλνοντας ζεστό η κρύο αέρα στο χώρο, ανάλογα με τις ανάγκες και επίσης, ότι το σύστημα είναι ιδανικό, δηλαδή είναι ικανό να πετύχει την ταύτιση της θερμοκρασίας που ρυθμίζεται η μονάδα κλιματισμού με τη μέση θερμοκρασία της ζώνης την ίδια χρονική στιγμή. Καλούμαστε λοιπόν να ορίσουμε τα χαρακτηριστικά του HVAC, τα οποία είναι η μέγιστη ή ελάχιστη θερμοκρασία παροχής του αέρα (50°C) και (13°C) αντίστοιχα, ο λόγος της υγρασίας και η μέγιστη ισχύς των συστημάτων. Οι τρεις θερμικές ζώνες διαθέτουν συστήματα με τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά.

Η ρύθμιση της θερμοκρασίας που θα τεθούν οι μονάδες HVAC, θα γίνει μέσω αλγορίθμου βελτιστοποίησης που σκοπό έχει να ελαχιστοποιήσει μια συνάρτηση κόστους που λαμβάνει υπόψη της την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη τήρηση των φυσιολογικών ορίων θερμικής άνεσης.

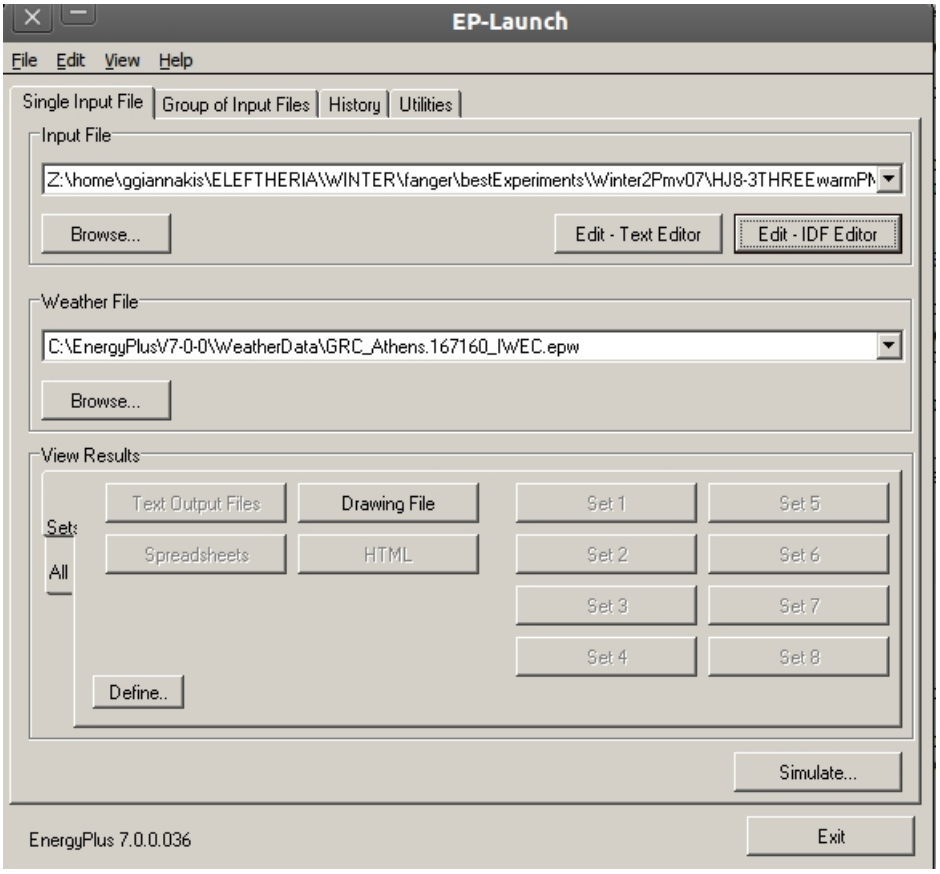
6.1.5 Δεδομένα καιρού

Τα δεδομένα καιρού αφορούν την Αθήνα και έχουν συλλεχθεί από τη Meteonorm [29] γεγονός που διασφαλίζει την εγκυρότητά τους. Ο τύπος του αρχείου καιρού είναι της μορφής .epw και από τις πληροφορίες που μας δίνει, βλέπουμε ότι το γεωγραφικό πλάτος είναι 37.9°, το γεωγραφικό μήκος είναι 23.73° και το υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας είναι 15 m. Η χειμερινή περίοδος ισχύει για τους μήνες Νοέμβριο έως Απρίλιο, ενώ η θερινή περίοδος από τον μήνα Μάιο έως Οκτώβριο.

6.2 Το λογισμικό EnergyPlus

Το EnergyPlus είναι ένα βασικό κομμάτι της μοντελοποίησης του προβλήματος που πραγματεύεται η εργασία. Είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης κτηρίων με απεριόριστες δυνατότητες ως προς το εύρος της χρήσης του. Είναι ικανό να μοντελοποιεί το κέλυφος του κτηρίου με όλα τα κατασκευαστικά του χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με ένα πλήθος από συστήματα HVAC με κάθε λεπτομέρεια, συστήματα παραγωγής ενέργειας, συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως επίσης συστήματα μοντελοποίησης της ροής του αέρα και πολλά άλλα. Διαθέτει ένα interface το EP-Launch, ώστε να οριστούν όλες οι λεπτομέρειες μοντελοποίησης και να δημιουργηθεί το αρχείο .idf που αποτελεί και το θερμικό μας μοντέλο και το οποίο μπορεί επίσης να

έχει τη μορφή .txt αρχείου. Μέσω του EP-Launch ορίζονται επιπλέον, το αρχείο καιρού αλλά και τα αρχεία εξόδου που προκύπτουν μετά το τέλος της προσομοίωσης.



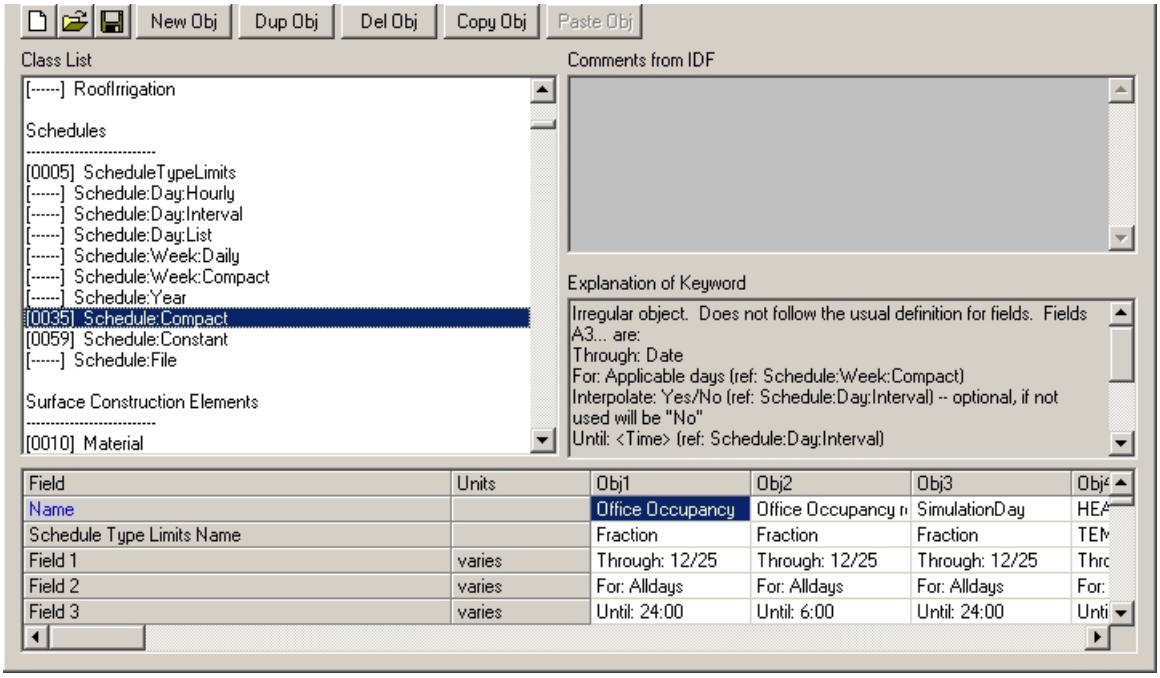
Σχήμα 6.5: EP-Launch

Πέρα από την μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών του κτηρίου για τη δημιουργία του μοντέλου, σημαντικό ζήτημα στην εργασία αυτή αποτελεί ο τρόπος με τον οποίο ανά τακτά χρονικά διαστήματα, θα αλλάζουν οι τιμές στις ρυθμίσεις παραθύρου και HVAC καθώς και ο τρόπος με τον οποίο θα οριστούν τα διανύσματα κατάστασης. Καίριο ρόλο λοιπόν στο πρόβλημα αυτό έχουν τα χρονοδιαγράμματα (Schedules) και το EMS (Energy Management System), τα οποία και παρουσιάζονται παρακάτω. Επίσης, βασικό κομμάτι της παρούσας εργασίας αποτελεί ο υπολογισμός της θερμικής άνεσης, τα διάφορα μοντέλα που υπάρχουν καθώς και οι διαφορές μεταξύ τους. Παρακάτω, θα γίνει μια αναφορά στην μοντελοποίηση της θερμικής άνεσης από το EnergyPlus.

6.2.1 Χρονοδιαγράμματα (Schedules)

Τα schedules έχουν πολύ σημαντικό ρόλο σε μια προσομοίωση στο EnergyPlus, αφού μέσω αυτών ορίζονται οι ώρες ή οι ημέρες λειτουργίας του κτηρίου, τα χρονοδιαγράμματα που αφορούν τη λειτουργία του φωτισμού, η παρουσία ανθρώπων, ο μεταβολικός ρυθμός τους και οτι-

δήποτε άλλο επιθυμεί ο χρήστης να προγραμματίσει. Τα schedules μπορούν να είναι στατικά ή δυναμικά. Για παράδειγμα, τα στατικά schedules παραμένουν ίδια σε όλη τη διάρκεια μιας προσομοίωσης όπως έχουν οριστεί από τον χρήστη. Τα δυναμικά schedules μπορούν να αλλάζουν ανά τακτά χρονικά διαστήματα έως και ανά δέκα λεπτά. Η χρήση τους εξυπηρετεί επί το πλείστον σκοπούς βελτιστοποίησης, συνήθως ελαχιστοποίησης της ενέργειας. Τα δυναμικά schedules μπορούν να είναι συνάρτηση άλλων μεγεθών, για παράδειγμα, τα schedules που αφορούν τη ρύθμιση των HVAC μπορούν να εξαρτώνται από τις τιμές τις εσωτερικής θερμοκρασίας. Η μοντελοποίηση των δυναμικών schedules απαιτεί και κάποιο εξωτερικό πρόγραμμα που πρέπει να συνεργαστεί με το EnergyPlus όπως το GenOpt ή το Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB) των οποίων ρόλος είναι η μεσολάβηση για την επικοινωνία με κάποιον αλγόριθμο βελτιστοποίησης ο οποίος θα παράξει τα νέα schedules και θα καθορίσει πιο από αυτά είναι το βέλτιστο. Γενικά, τα schedules μπορούν να είναι ημερήσια, εβδομαδιαία, μηνιαία ή και ετήσια. Επιπλέον, μπορούν να ορίσουν τιμές μεταβλητών σταθερές σε όλη τη διάρκεια μιας προσομοίωσης (Schedule: Constant), ή τιμές που αλλάζουν στη διάρκεια της ημέρας ή του χρόνου (Schedule: Compact). Στην εικόνα 6.6 φαίνεται η κλάση των Schedules όπως παρουσιάζεται στο EnergyPlus.

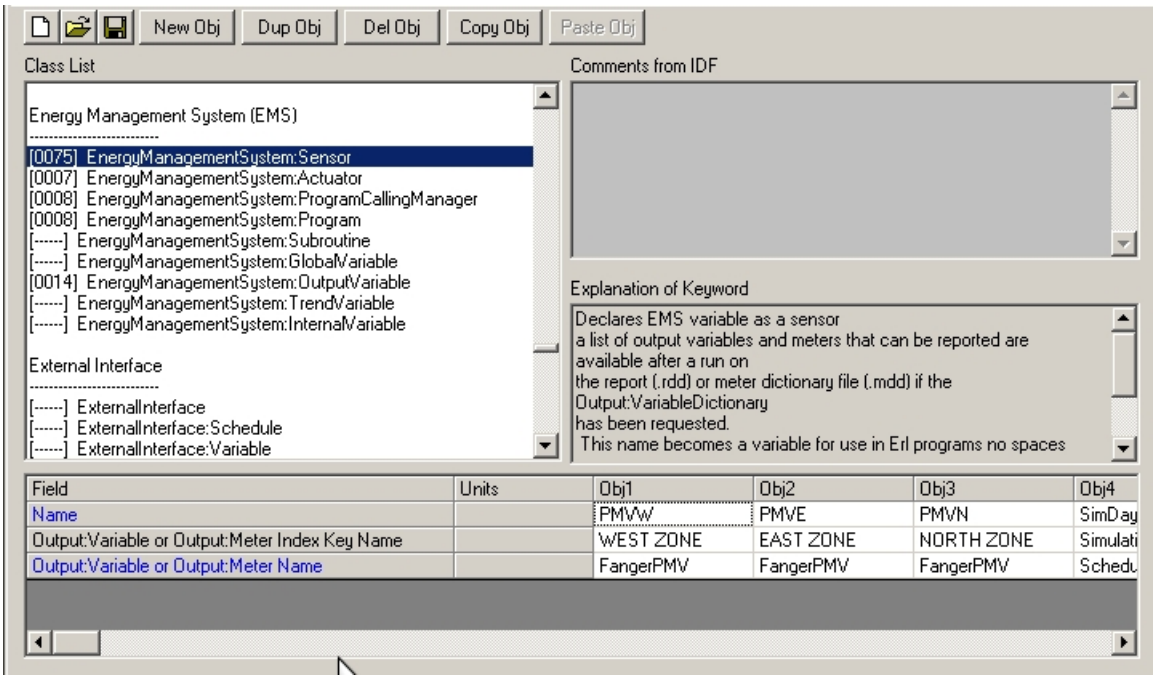


Σχήμα 6.6: Η κλάση Schedules του EnergyPlus

6.2.2 Energy Management System (EMS)

Το Energy Management System είναι μια κλάση του EnergyPlus και αποτελεί κύριο κομμάτι στη μοντελοποίηση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Μέσω αυτού του προγράμματος

διευκολύνεται κατά κύριο λόγο η διαδικασία του control, αφού ουσιαστικά δημιουργείται ένας βρόχος με είσοδο τις τρέχουσες τιμές των θερμικών μεγεθών και έξοδο τις τιμές που προκύπτουν από τους υπολογισμούς· ορίζονται οι μεταβλητές ελέγχου και δημιουργούνται υποπρογράμματα που υπολογίζουν τις τελικές τιμές που πρέπει να τεθούν τα κλιματιστικά ή οι θέσεις των παραθύρων.



Σχήμα 6.7: Η κλάση EMS του EnergyPlus

Οι θέσεις του παραθύρου είναι πέντε και ορίζονται ανάλογα με τη γωνία ανοίγματος.

Πίνακας 6.6: Δυνατές θέσεις ανοίγματος των παραθύρων

Γωνία ανοίγματος (°)	**Θέσεις**
0	0
(0, 22.5]	0.25
(22.5, 45]	0.5
(45, 67.5]	0.75
(67.5, 90]	1

Κάποια από τα βασικά μέρη του EMS program, είναι το EMS Sensors, το EMS Actuators, το EMS Program και το EMS Program Calling Manager. Το EMS Sensors αφορά στις μεταβλητές εισόδου οι οποίες μπορούν να είναι έξοδοι της προσομοίωσης ή να προέρχονται από κάποιο schedule, και αποτελούν παραμέτρους των προγραμμάτων του EMS. Το EMS Actuators αφορά

τα σημεία στα οποία μπορούμε να επέμβουμε, ενώ για διευκόλυνση, υπάρχουν αποθηκευμένοι κώδικες ήδη στο EnergyPlus, κατάλληλοι για τέτοιες ενέργειες. Αναφορικά, μπορούμε να επέμβουμε με αυτό τον τρόπο στα συστήματα HVAC, στο κέλυφος του κτηρίου, στην κίνηση του αέρα, στα εσωτερικά κέρδη, στην τυχόν παραγωγή ενέργειας και τέλος στη διαστασιολόγηση ζωνών και συστημάτων. Το EMS Program είναι το κομμάτι στο οποίο μπορεί ο χρήστης να γράψει τα προγράμματά του. Με τα προγράμματα αυτά μπορούν να ελεγχθούν εξαγόμενα της προσομοίωσης ή να οριστούν συναρτήσεις για διάφορους υπολογισμούς. Τέλος, το EMS Program Calling Manager σχετίζεται με το σημείο της προσομοίωσης στο οποίο θα πρέπει να κληθούν τα προγράμματα ή τα υποπρογράμματα που έχουν δημιουργηθεί.

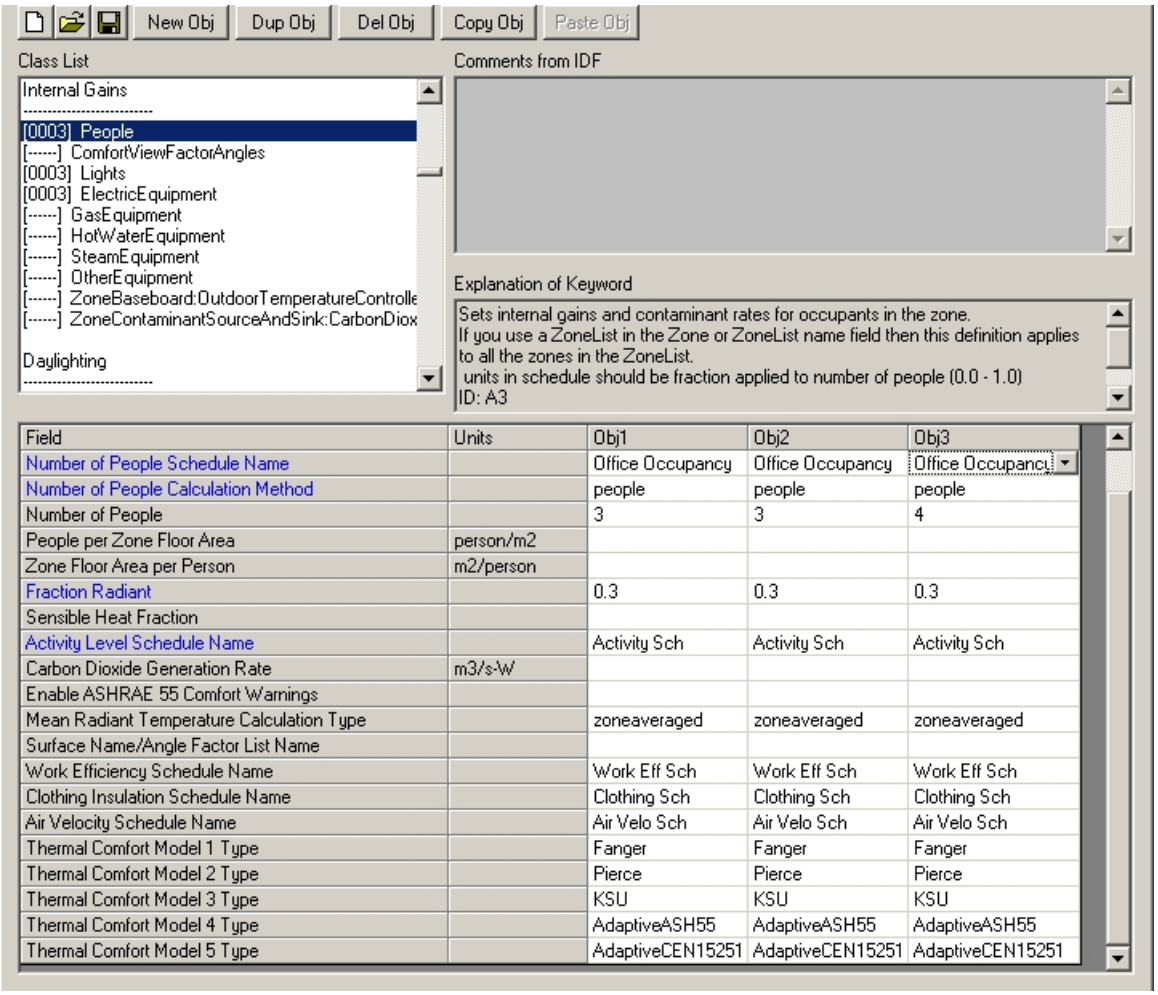
6.2.3 Η θερμική άνεση στο EnergyPlus

Το EnergyPlus μπορεί να εκτιμήσει ένα σύνολο θερμικών μοντέλων που κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί. Αυτά τα θερμικά μοντέλα, που αναπτύχθηκαν και σε προηγούμενο κεφάλαιο, βασίζονται σε περιβαλλοντικές και φυσιολογικές μεταβλητές. Υπάρχουν πέντε κύριες κατηγορίες μοντέλων που το EnergyPlus μπορεί να εκτιμήσει· το μοντέλο του Fanger, το μοντέλο του Pierce, το μοντέλο του KSU (Kansas State University) και το μοντέλο Adaptive Comfort Model βασισμένο στο ASHRAE Standard 55-2010 και στο European Standard EN15251-2007. Το πεδίο στο οποίο ορίζονται στο .idf αρχείο τα μοντέλα που θα πρέπει να υπολογιστούν ανήκει στην κλάση των Intenal Gains και είναι το People 6.8. Κάθε μοντέλο μπορεί να εξάγει ένα σύνολο από δείκτες. Το μοντέλο του Fanger εξάγει τους δείκτες Predicted Mean Vote (PMV) και Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD). Επιγραμματικά, ο δείκτης PMV εκφράζει την αίσθηση του κρύου ή της ζέστης για τους παρευρισκόμενους στη ζώνη, βαθμονομημένη σε επταβάθμια κλίμακα. Ωστόσο το EnergyPlus μπορεί να εξάγει τιμές μεγαλύτερες του 3 ή μικρότερες του -3 που ποιοτικά όμως δεν έχουν ιδιαίτερη διαφορά σε σχέση με αυτά τα όρια. Ο δείκτης PPD εκφράζει το ποσοστό (%) των παρευρισκομένων που δυσφορούν εξαιτίας ζεστού ή κρύου περιβάλλοντος.

Το μοντέλο Pierce παράγει τους δείκτες PMV Standard Effective Temperature (PMVSET), PMV Effective Temperature (PMVET), Predicted Discomfort Vote (DISC) και Thermal Sensation Vote (TSENS). Οι τέσσερις αυτοί δείκτες εκφράζουν τη θερμική αίσθηση των παρευρισκομένων εκφρασμένη σε εννιαβάθμια κλίμακα.

Το μοντέλο KSU εξάγει τον δείκτη Thermal Sensation Vote (TSV) ο οποίος εκφράζει όπως και οι προηγούμενοι τη δυσφορία σε εννιαβάθμια κλίμακα.

Το μοντέλο Adaptive Comfort βασισμένο στο ASHRAE 55-2010 είτε στο European Standard EN15251-2007, ερευνά την ανεκτικότητα των παρευρισκομένων στις εσωτερικές συνθήκες δεδομένων μηνιαίων τιμών της εξωτερικής θερμοκρασίας αέρα και της λειτουργικής (operative) θερμοκρασίας. Χρησιμοποιούνται ως δείκτες προσαρμοστικότητας στις εξωτερικές συνθήκες, καθορίζουν όρια ανεκτικότητας στις εσωτερικούς χώρους και υπολογίζουν τις ανάγκες ένδυσης σε αυτό το περιβάλλον. Τέλος, η χρήση τους αφορά κτήρια μόνο με φυσικό αερισμό· για όλους αυτούς τους λόγους φαίνεται ότι οι στόχοι της συγκεκριμένης εργασίας δε συμπίπτουν με τη χρησιμότητα αυτών των μοντέλων και γι' αυτό δεν χρησιμοποιούνται. Για τον υπολογισμό των δεικτών θερμικής άνεσης πρέπει να δηλωθούν στο πεδίο People, τα χρονοδιαγράμματα παρουσίας ανθρώπων, δραστηριοτήτων, απόδοσης εργασίας, ταχύτητας αέρα και ενδυμασίας.



Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Number of People Schedule Name		Office Occupancy	Office Occupancy	Office Occupancy
Number of People Calculation Method		people	people	people
Number of People		3	3	4
People per Zone Floor Area	person/m2			
Zone Floor Area per Person	m2/person			
Fraction Radiant		0.3	0.3	0.3
Sensible Heat Fraction				
Activity Level Schedule Name		Activity Sch	Activity Sch	Activity Sch
Carbon Dioxide Generation Rate	m3/s-W			
Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings				
Mean Radiant Temperature Calculation Type		zoneaveraged	zoneaveraged	zoneaveraged
Surface Name/Angle Factor List Name				
Work Efficiency Schedule Name		Work Eff Sch	Work Eff Sch	Work Eff Sch
Clothing Insulation Schedule Name		Clothing Sch	Clothing Sch	Clothing Sch
Air Velocity Schedule Name		Air Velo Sch	Air Velo Sch	Air Velo Sch
Thermal Comfort Model 1 Type		Fanger	Fanger	Fanger
Thermal Comfort Model 2 Type		Pierce	Pierce	Pierce
Thermal Comfort Model 3 Type		KSU	KSU	KSU
Thermal Comfort Model 4 Type		AdaptiveASH55	AdaptiveASH55	AdaptiveASH55
Thermal Comfort Model 5 Type		AdaptiveCEN15251	AdaptiveCEN15251	AdaptiveCEN15251

Σχήμα 6.8: Το πεδίο People

Κεφάλαιο 7

Παρουσίαση του προβλήματος και Πειραματικές εφαρμογές

Το κτήριο που παρουσιάστηκε πιο πάνω θα αποτελέσει την εφαρμογή στην παρούσα εργασία. Σκοπός είναι να βρεθούν οι βέλτιστοι controllers βάσει των οποίων θα λειτουργούν τα συστήματα HVAC και θα ελέγχεται το άνοιγμα και το κλείσιμο των παραθύρων. Το κριτήριο για την εύρεση αυτών των ελεγκτών είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη τήρηση των επιτρεπτών-επιθυμητών συνθηκών θερμικής άνεσης. Πρώτο βήμα για τη διαμόρφωση του προβλήματος είναι η δημιουργία μιας αντικειμενικής συνάρτησης η οποία θα κρίνει ποια θα είναι η "χρυσή τομή" μεταξύ των δυο αυτών αντικρουόμενων παραμέτρων. Έπειτα, πρέπει να οριστεί ποιες θα είναι οι μεταβλητές οι οποίες θα αλλάζουν και θα διαμορφώσουν το αποτέλεσμα. Αυτές οι μεταβλητές πρέπει να οριστούν και βάσει αυτών να επεξεργαστεί κατάλληλα το αρχείο του μοντέλου που περιγράφει το κτήριο. Τέλος, πρέπει να οριστεί ο κατάλληλος αλγόριθμος, ο οποίος θα δημιουργεί τις νέες τιμές των παραμέτρων και μετά την εισαγωγή τους στο μοντέλο του κτηρίου, να κρίνει τα επόμενά του βήματα.

7.1 Προσδιορισμός του προβλήματος

Για τη δημιουργία εφαρμόσιμων στρατηγικών ελέγχου, οι τιμές των μεταβλητών ελέγχου θα πρέπει να γίνουν οι βέλτιστες σύμφωνα με τον κατάλληλο δείκτη επίδοσης. Ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης σε ένα κτήριο γραφείων κατά τη διάρκεια μιας ημέρας υπό τη διατήρηση των αποδεκτών επιπέδων θερμικής άνεσης που αφορούν τις ώρες στις οποίες οι εργαζόμενοι βρίσκονται μέσα στο κτήριο. Υπό τις προϋποθέσεις αυτές, το πρόβλημα βελτιστοποίησης διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} &\min \sum_{t=1}^{T} E_t, \\ &s.t \ \frac{1}{T_c} \sum_{t=1}^{T_c} C_t^i - C_l^i < 0, \quad \forall i \in 1, 2, \ldots, N \end{aligned} \tag{7.1}$$

Στην παραπάνω εξίσωση, t είναι η μεταβλητή του χρόνου, T η μεταβλητή που αντιστοιχεί στη χρονική περίοδο για την οποία θέλουμε να δημιουργήσουμε τους βέλτιστους controllers και

στην προκειμένη περίπτωση είναι μια μέρα και T_c η μεταβλητή που αφορά τη διάρκεια κατά την οποία επιδιώκουμε να ελαχιστοποιήσουμε τη θερμική δυσφορία. Επίσης, E_t είναι η κατανάλωση ενέργειας στο χρονικό διάστημα $[t-1, t]$, C_t^i είναι η τιμή της μεταβλητής της θερμικής άνεσης τη στιγμή t στο δωμάτιο i, C_l^i το ανώτατο όριο θερμικής δυσφορίας για το γραφείο i και για N αριθμό δωματίων. Για τη διασφάλιση όσο το δυνατό ουδέτερων συνθηκών, ορίζουμε τη μεταβλητή που αντιπροσωπεύει τη θερμική αίσθηση να βρίσκεται σε απόλυτη τιμή, ώστε να μην εμφανίζονται φαινόμενα ψυχρής αίσθησης το καλοκαίρι ή θερμής αίσθησης το χειμώνα. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος πρέπει να γίνουν μια σειρά από ενέργειες. Η διαδικασία βελτιστοποίησης που θα ακολουθηθεί, περιλαμβάνει:

- τη μοντελοποίηση του κτηρίου στο EnergyPlus
- τον ορισμό του αλγορίθμου και των παραμέτρων του
- τα διαστήματα τιμών των μεταβλητών
- την αντικειμενική συνάρτηση
- τις ρυθμίσεις της διαδικασίας βελτιστοποίησης
- το αρχείο καιρού
- την επικοινωνία όλων των παραπάνω στοιχείων μεταξύ τους

7.1.1 Ορισμός των ελεγκτών

Οι ελεγκτές που θα ορίζουν τις τιμές του θερμοστάτη για τα συστήματα HVAC και το άνοιγμα και κλείσιμο των παραθύρων ορίζονται με την ακόλουθη εξίσωση 7.2.

$$u_t = \theta \times x_t \tag{7.2}$$

Στην εξίσωση αυτή, t είναι η μεταβλητή του χρόνου, u_t οι ενέργειες του ελεγκτή σε χρόνο t, $x_t \in \mathbb{R}^{7\times 1}$ είναι οι καταστάσεις σε χρόνο t και $\theta \in \mathbb{R}^{1\times 7}$ είναι το σύνολο των βαρών που αποτελούν τον κάθε ελεγκτή. Έτσι, προκύπτει ότι το πραγματικό πρόβλημα μετατοπίζεται τελικά στην εύρεση των σωστών τιμών του θ που γίνονται οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος, στις οποίες οφείλουμε να δώσουμε μέγιστη και ελάχιστη τιμή, αρχική τιμή και βήμα αναζήτησης. Όσον αφορά το διάνυσμα κατάστασης x_t, αποτελείται από τα εξής μεγέθη:

1. T_z η μέση θερμοκρασία αέρα της ζώνης ($^\circ$C)
2. T_o η εξωτερική θερμοκρασία ξηρού βολβού ($^\circ$C)
3. H_z η εσωτερική υγρασία (kgH_2O/kgAir)
4. H_o η εξωτερική θερμοκρασία (kgH_2O/kgAir)
5. S η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2)
6. W_s η ταχύτητα ανέμου (W/m)

7. W_d η διεύθυνση του ανέμου (°)

8. Occ_z δυαδική μεταβλητή ($\in 0, 1$) που δείχνει την παρουσία ή μη ανθρώπων στο κτήριο

Διαμορφώνονται λοιπόν, επτά τέτοια συστήματα εξισώσεων, τα οποία αντιστοιχούν: στα τέσσερα παράθυρα των γραφείων-ζωνών -ένα για τη δυτική ζώνη, δύο για την ανατολική και ένα για τη βόρεια- και στα τρία συστήματα HVAC για την κάθε ζώνη. Τα συστήματα αυτά καθώς και οι μεταβλητές απόφασης ορίζονται στην EMS κλάση του EnergyPlus. Από το EnergyPlus προκύπτουν φυσικά, και τα διανύσματα κατάστασης, η ενεργειακή κατανάλωση και οι τιμές του δείκτη θερμικής άνεσης που μας ενδιαφέρει. Επίσης, μπορεί να γίνει και μετά-επεξεργασία των εξαγόμενων, όπως η απόλυτη τιμή του δείκτη η οποία πρέπει να οριστεί για να μην υπάρχουν φαινόμενα σπατάλης, για παράδειγμα υπερθέρμανσης το χειμώνα ή ψύχρας το καλοκαίρι.

7.1.2 Επιλογή αλγορίθμου και ρυθμίσεις βελτιστοποίησης

Όπως αναφέρθηκε, οι μεταβλητές απόφασης είναι τα διανύσματα θ, ενώ το πρόβλημα που καλούμαστε να λύσουμε διαθέτει περιορισμό. Στην αναφορά που έγινε πιο πάνω στα κύρια σημεία του GenOpt, αναφέρθηκαν τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία προτείνεται η επιλογή των αλγορίθμων. Με δεδομένο λοιπόν, ότι τα στοιχεία των διανυσμάτων θ είναι τιμές που ανήκουν σε συνεχή διαστήματα, επιλέγεται για την βελτιστοποίηση-επίλυση του προβλήματός μας ο αλγόριθμος Γενικευμένης Σχηματικής Αναζήτησης, Hooke-Jeeves που αναλύεται στο 5.3.4. Ο αλγόριθμος όπως και οι παράμετροί του ορίζονται στο command.txt αρχείο του GenOpt.

Στο ίδιο αρχείο δηλώνονται και οι ρυθμίσεις της βελτιστοποίησης, δηλαδή ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (MaxIte), ο μέγιστος αριθμός ίσων αποτελεσμάτων (MaxEqualResults), η αλλαγή του συντελεστή στην αντικειμενική συνάρτηση (WriteStepNumber) και η επιλογή του αριθμού των επεξεργαστών (UnitsOfExecution) που θα χρησιμοποιηθούν.

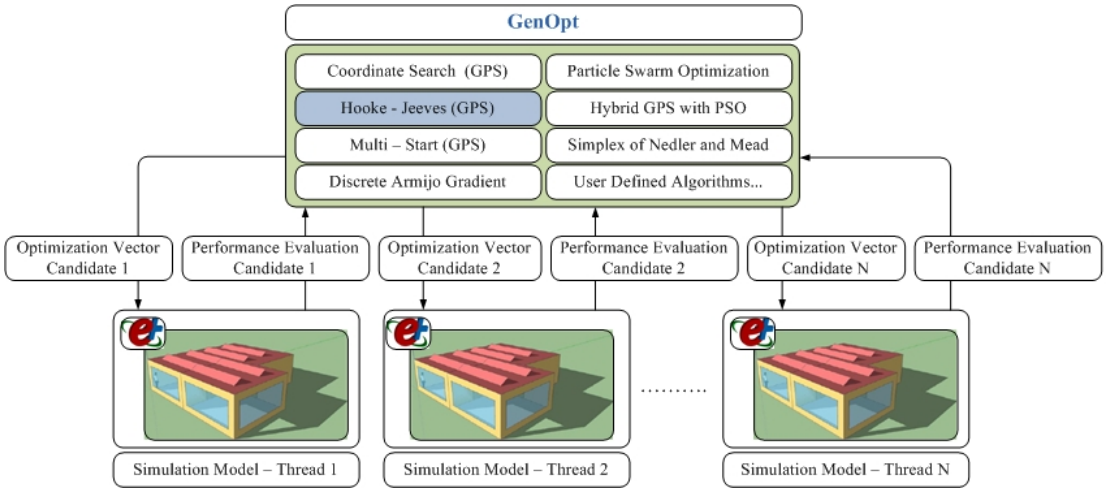
7.1.3 Ορισμός της συνάρτησης κόστους

Η συνάρτηση κόστους είναι αυτή που θα κρίνει το που θα κατευθυνθεί ο αλγόριθμος αναζήτησης και ποια θα είναι η ισορροπία μεταξύ της προς ελαχιστοποίηση μεταβλητής και του περιορισμού. Όπως περιγράφεται και στο 5.1.2, υπάρχουν δυο είδη περιορισμών· τα barrier functions και τα penalty fumctions. Στην πρώτη κατηγορία, είναι απαγορευτική η εξίσωση της τιμής του περιορισμού με το τιθέμενο όριο. Στη δεύτερη κατηγορία εφαρμόζεται τιμωρία σε περίπτωση που η τιμή της μεταβλητής του περιορισμού ξεπεράσει αυτή του ορίου, αυξάνοντας την τιμή της συνάρτησης κόστους. Εφόσον, η δεύτερη κατηγορία αντιπροσωπεύει με καλύτερο τρόπο τον τύπο του προβλήματος που πρέπει να αντιμετωπίσουμε, ο τύπος της συνάρτησης κόστους θα έχει τη μορφή:

$$\begin{aligned} &\min(\sum_{t=1}^{t} E_t + \mu \sum_{i=1}^{N} \max(0, g^i)), \\ &g^i = (\frac{1}{T_c} \sum_{t=1}^{T_c} C_t^i - C_l^i)^2 \end{aligned} \tag{7.3}$$

Σε αυτή την εξίσωση οι συμβολισμοί αντιστοιχούν σε αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν στην εξίσωση 7.1, οπού ορίζεται η γενική μορφή του προβλήματος βελτιστοποίησης και που είναι ισοδύναμη με αυτή. Το βάρος μ είναι αυτό που ουσιαστικά ορίζει τη σημασία του περιορισμού στη συνάρτηση. Μικρές τιμές μπορεί να μην καταφέρουν να ικανοποιήσουν τον περιορισμό, ενώ μεγάλες τιμές μπορούν να οδηγήσουν σε σπατάλη ηλεκτρικής ενέργειας για την ικανοποίηση του περιορισμού. Εδώ ο στόχος είναι μια ισορροπία, δηλαδή να ικανοποιηθούν όσο το δυνατό καλύτερα οι περιορισμοί με την ελάχιστη δυνατή ηλεκτρική ενέργεια. Η συνάρτηση κόστους καθώς και η είσοδος των τιμών των προς βελτιστοποίηση μεγεθών σαν έξοδοι του EnergyPlus ορίζονται στο optLinux.ini αρχείο.Στο ίδιο αρχείο ορίζονται τα αρχείο του EnergyPlus μαζί με το template, το command.txt αρχείο και το αρχείο καιρού.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης έχει ως εξής: ο αλγόριθμος Hooke-Jeeves που βρίσκεται στο GenOpt δίνει τις αρχικές τιμές που ο χρήστης έχει ορίσει. Αυτές οι τιμές περνάνε στο EnergyPlus το οποίο μέσα από μια προσομοίωση τις αξιολογεί, και παράγει τις τιμές για των δεικτών της θερμικής άνεσης και της ενέργειας. Οι τιμές αυτές επιστρέφουν στο GenOpt στο οποίο έχει οριστεί μια συνάρτηση κόστους. Εκεί γίνεται ο υπολογισμός της τιμής αυτής, την οποία δέχεται σαν είσοδο ο αλγόριθμος, την αξιολογεί και αναλόγως προχωράει αλλάζοντας τις τιμές των παραμέτρων και επαναλαμβάνοντας την προηγούμενη διαδικασία μέχρι την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων.



Σχήμα 7.1: Διαδραστικότητα μεταξύ GenOpt και EnergyPlus

7.2 Πειραματικές εφαρμογές

Στο κτήριο θα πραγματοποιηθούν τρεις κύριες κατηγορίες πειραμάτων. Αρχικά θα μελετηθεί η συμπεριφορά του σε θερμό κλίμα όπως είναι αυτό της Αθήνας. Εδώ, η πρώτη κατηγορία πειραμάτων θα λάβει χώρα την ημέρα με την πιο υψηλή θερμοκρασία, ενώ για το ίδιο αρχείο καιρού θα πραγματοποιηθεί και η δεύτερη κατηγορία πειραμάτων η οποία όμως θα γίνει για την ημέρα με την πιο χαμηλή θερμοκρασία. Στην τρίτη κατηγορία πειραμάτων θα εξεταστεί η συμπεριφορά

του κτηρίου για ένα ψυχρό κλίμα όπως είναι αυτό της Φρανκφούρτης στη Γερμανία. Και σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται η μέρα με την πιο χαμηλή θερμοκρασία.

Ο περιορισμός της θερμικής άνεσης εκφράζεται για το κάθε πείραμα με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Τα τρία μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 4.1 θα εισαχθούν στα πειράματα, ώστε να μελετηθεί η εξαγωγή των ελεγκτών με βάση αυτά. Από κάθε μοντέλο έχει επιλεχθεί ένας δείκτης. Για να αξιολογήσουμε τη θερμική άνεση σύμφωνα με την αίσθηση του θερμού ή του κρύου επιλέγουμε τα εξής:

- Από το μοντέλο του Fanger επιλέγεται ο δείκτης PMV
- Από το μοντέλο του Pierce επιλέγεται ο πιο πρόσφατος δείκτης, ο PMVET, ο οποίος μάλιστα έχει κοινά στοιχεία με τον Fanger PMV
- Από το μοντέλο του KSU χρησιμοποιείται ο μοναδικός δείκτης που διαθέτει, δηλαδή ο TSV

Η κλίμακα σύμφωνα με την οποία αξιολογούνται ποιοτικά οι παραπάνω δείκτες είναι:

	Fanger PMV	*Pierce PMVET*	*KSU TSV*
-4	-	Very Cold	Very Cold
-3	Cold	Cold	Cold
-2	Cool	Cool	Cool
-1	Slightly cold	Slightly cold	Slightly cold
0	Neutral	Neutral	Neutral
+1	Slightly warm	Slightly warm	Slightly warm
+2	Warm	Warm	Warm
+3	Hot	Hot	Hot
+4	-	Very hot	Very hot

Σχήμα 7.2: Κλίμακα αξιολόγησης θερμικής άνεσης

Σε κάθε σύνολο πειραμάτων που πραγματοποιείται ορίζονται διαφορετικά όρια για τους παραπάνω δείκτες. Τα όρια αυτά τίθενται σύμφωνα με το ISO 7730 που φαίνονται στον πίνακα 4.1 και χαρακτηρίζουν ένα θερμικό περιβάλλον σύμφωνα με τους δείκτες του μοντέλου του Fanger. Μια επιπλέον τιμή που ορίζει ένα αποδεκτό επίπεδο θερμικής αίσθησης και έχει οριστεί για τους υπόλοιπους δυο δείκτες και σε άλλες εφαρμογές σύμφωνα με τα πρότυπα της ASHRAE [4] είναι για |1|. Συνολικά λοιπόν, σε κάθε σύνολο πειραμάτων θα προκύψουν οι ακόλουθες τιμές:

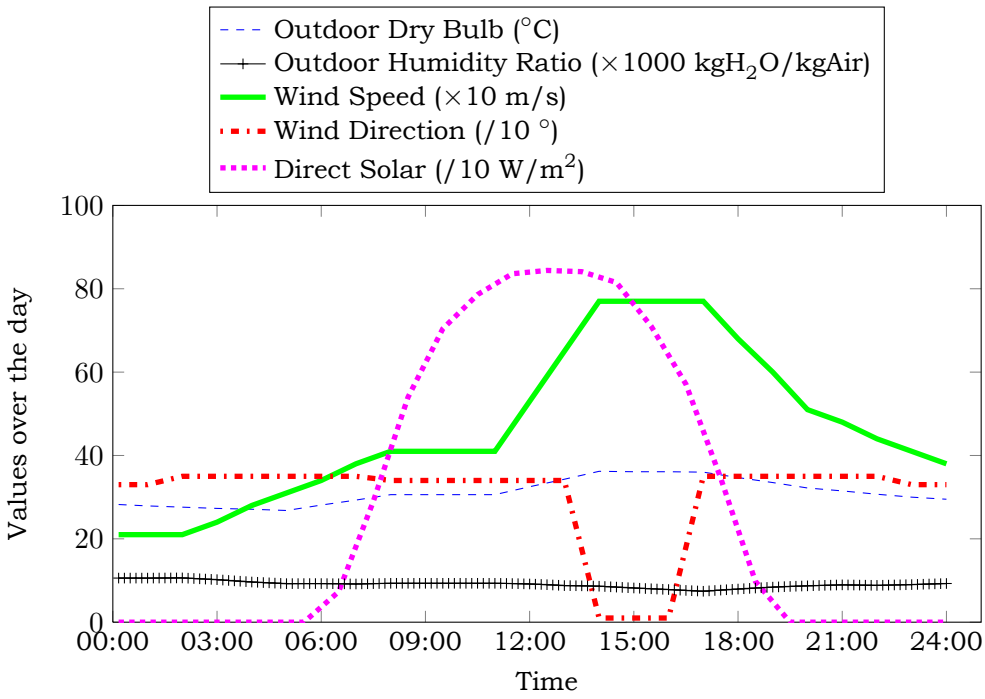
Πίνακας 7.1: Όρια των περιορισμών

Κατηγορία	**Όρια της θερμικής αίσθησης (TS)**
A	-0.2<TS<+0.2
B	-0.5<TS<+0.5
C	-0.7<TS<+0.7
D	-1<TS<+1

Με το πέρας του κάθε συνόλου πειραμάτων θα γίνει σύγκριση με τη συνολική ενέργεια που απαιτείται για την επίτευξη των ορίων του περιορισμού που τέθηκαν. Έτσι, θα προκύψουν κάποια διαγράμματα από τα οποία θα κριθεί η επίδραση του κάθε δείκτη στη δημιουργία των controllers, καθώς και η ευελιξία στη δυνατότητα βελτίωσης της τιμής του κάθε δείκτη.

7.2.1 Καλοκαιρινή ημέρα σε θερμό κλίμα

Το πρώτο σύνολο πειραμάτων γίνεται για θερινή περίοδο με αρχείο καιρού Αθήνας, για την ημέρα στην οποία σημειώνεται η μέγιστη θερμοκρασία. Η ημέρα αυτή είναι σύμφωνα με το δεδομένο αρχείο καιρού η 3η Αυγούστου και η μέγιστη θερμοκρασία ξηρού βολβού είναι 36.2 °C.



Σχήμα 7.3: Εξωτερικές συνθήκες για την ημέρα του πειράματος

Οι τιμές των εξωτερικών μεγεθών φαίνονται στο σχήμα 7.3 και πέρα από την υψηλή θερμοκρασία, η ημέρα του πειράματος διακρίνεται από υψηλό ποσοστό υγρασίας που κάνει την αίσθηση της ζέστης ακόμη πιο έντονη.

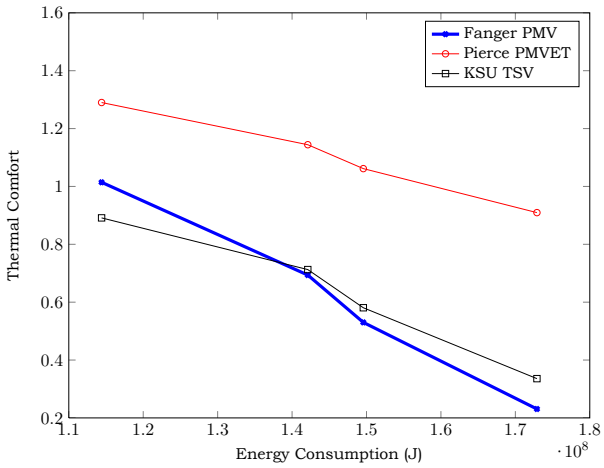
Η τακτική που ακολουθείται σε αυτό το σύνολο πειραμάτων αλλά και στα υπόλοιπα είναι να λειτουργήσει το σύστημα HVAC για τις προηγούμενες επτά ημέρες σε μια μέση θερμοκρασία, που στην προκειμένη περίπτωση είναι 25 °C. Επίσης, τα παράθυρα ανοίγουν τις ώρες που τα γραφεία δεν λειτουργούν. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται warming up και πραγματοποιείται ώστε να βρίσκεται το κτήριο σε συνθήκες περισσότερο ευνοϊκές από αυτές που θα ήταν εάν δεν υπήρχε κάποιο σύστημα, ώστε να προσαρμοστεί πιο εύκολα στις ρυθμίσεις που θα τεθούν από τον controller του HVAC. Επίσης, το μέγιστο όριο στο οποίο το HVAC μπορεί να λειτουργήσει είναι 6000 W, και για τις τρεις ζώνες. Για την ημέρα που πραγματοποιείται το πείραμα, ορίζουμε η βελτιστοποίηση να ξεκινήσει από μια κατάσταση φυσιολογική για το κτήριο, ώστε η συνάρτηση κόστους να έχει σχετικά χαμηλή τιμή. Έτσι, βοηθούμε τον αλγόριθμο που είναι τοπικής αναζήτησης να κινηθεί σε περιοχές πλησιέστερα στις βέλτιστες αλλά κυρίως να προχωρήσει με σύγκριση μια χαμηλή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Η αρχική τιμή που θέτουμε είναι 25 °C, για τις ώρες τις οποίες υπάρχουν εργαζόμενοι στα γραφεία και 50 °C, για τις ώρες που το κτήριο είναι κλειστό. Η τιμή αυτή (50 °C), τίθεται για να διασφαλιστεί ότι το σύστημα HVAC δεν λειτουργεί και ως εκ τούτου η κατανάλωση ενέργειας είναι μηδενική.

Αποτελέσματα πειραμάτων

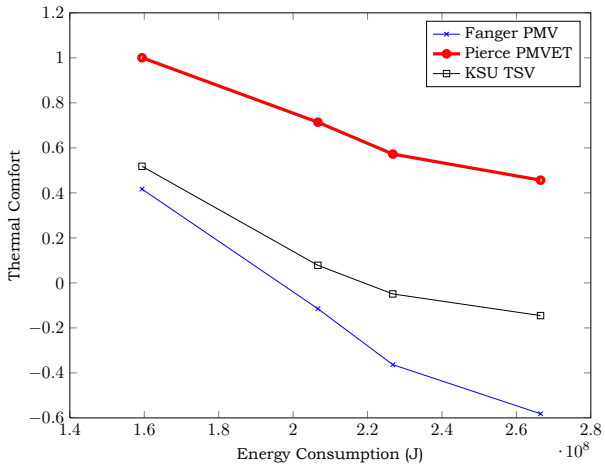
Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, κάθε σύνολο πειραμάτων έχει πραγματοποιηθεί για τρία διαφορετικά μοντέλα δεικτών. Για κάθε διαφορετικό δείκτη έχουν τεθεί τέσσερα διαφορετικά όρια. Για κάθε όριο έχει πραγματοποιηθεί μια διαδικασία βελτιστοποίησης με στόχο την ελάχιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την επίτευξη αυτού του ορίου. Εφόσον ολοκληρωθούν τα πειράματα για κάθε δείκτη δημιουργούμε κάποια διαγράμματα τα οποία δείχνουν τη σχέση της μέσης τιμής του δείκτη για τις τρεις ζώνες με τη συνολική ενέργεια που απαιτείται για την επίτευξη αυτού. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνονται και οι αντιδράσεις των άλλων δυο δεικτών στις τελικές λύσεις που έχουν διαμορφωθεί. Έτσι λοιπόν, στο πρώτο διάγραμμα 7.4α□ φαίνεται η σχέση θερμικής άνεσης - ενέργειας θέτοντας ως περιορισμό τον δείκτη PMV του Fanger αλλά και τη συμπεριφορά των άλλων δυο δεικτών στις αποφάσεις που έχουν εξαχθεί από τις διαδικασίες βελτιστοποίησης. Στο δεύτερο διάγραμμα 7.4β□, φαίνονται τα αποτελέσματα έχοντας ως περιορισμό τον Pierce PMVET καθως και τις αντιδράσεις των άλλων δυο δεικτών και στο τρίτο διάγραμμα 7.4γ□ απεικονίζονται τα αποτελέσματα με μεταβλητή περιορισμού τον δείκτη KSU TSV.

Στο διάγραμμα 7.4α□, φαίνεται ο PMV να απαιτεί συνολικά περίπου 115 MJ για να επιτύχει μέσο όριο ίσο με |1| για τις τρεις ζώνες. Για το ίδιο ποσοστό ενέργειας, ο δείκτης TSV αποδίδει μικρότερη τιμή, περίπου 0,9, ενώ η τιμή για τον PMVET είναι έξω από τα αποδεκτά γι' αυτόν όρια, περίπου ίση με 1,3. Ωστόσο στη συνέχεια των πειραμάτων, φαίνεται ο δείκτης PMV να επηρεάζεται σημαντικά από την μείωση της θερμοκρασίας και συνεπώς την αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι δηλαδή πιο ελαστικός, εφόσον με ηλεκτρική ενέργεια περίπου 173 MJ φθάνει στην τιμή 0,2, ενώ ο TSV βρίσκεται στο 0,35 και ο PMVET στο 0,95. Παρατηρείται επίσης, ότι τα σημεία που αντιστοιχούν στον PMV είναι κοντινά με τον TSV και

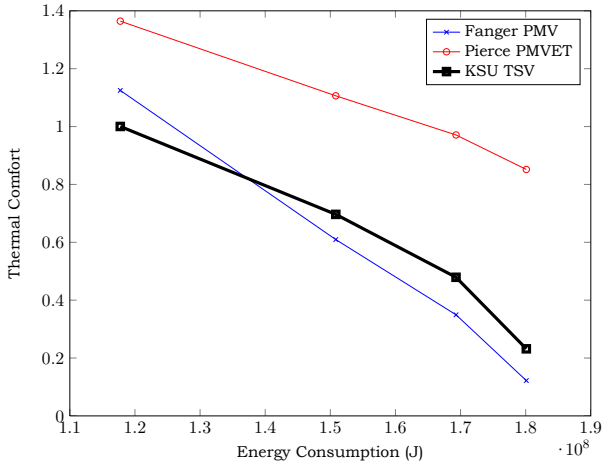
οι τιμές τους για το ίδιο ποσό ενέργειας δε διαφέρουν σημαντικά. Αν και υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά στα όρια του TSV και του PMVET, φαίνεται ωστόσο, ότι η πορεία τους είναι παρόμοια και μεταβάλλονται πιο δύσκολα με τη μείωση της θερμοκρασίας.



(α) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον Fanger PMV



(β) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον Pierce PMVET



(γ) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον KSU TSV

Σχήμα 7.4: Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας για κάθε δείκτη και αντίδραση των άλλων δεικτών

Στο διάγραμμα 7.4β παρουσιάζεται το σύνολο των πειραμάτων με περιορισμό τον PMVET. Όπως και στο προηγούμενο διάγραμμα, ο PMVET πετυχαίνει πολύ υψηλότερες τιμές για την ίδια ποσότητα ενέργειας σε σχέση με τους άλλους δυο δείκτες. Για να πετύχει το αποδεκτό όριο γι' αυτόν |1|, απαιτεί σχεδόν 160 MJ, ενώ ο PMV βρίσκεται στο 0,4 και ο TSV στο 0,5. Ο PMVET συνεχίζει να μειώνεται με μεγάλες απαιτήσεις ενέργειας, ενώ τη στιγμή που αγγίζει το 0,7, ο KSU βρίσκεται ήδη στο 0 που είναι η καλύτερη γι' αυτόν τιμή, και ο PMV έχει μειωθεί στο -0,15, κάτι

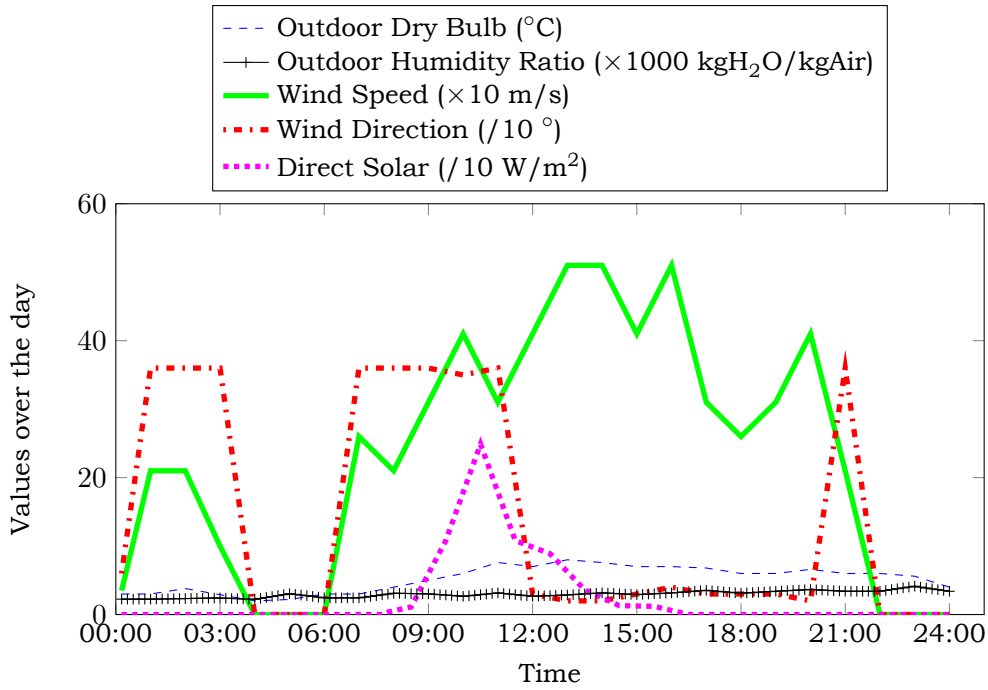
που αντιστοιχεί σε ψυχρό περιβάλλον. Ο PMVET δεν καταφέρνει να φθάσει στο όριο |0,2| που έχει τεθεί· και αγγίζει το 0,4, ενώ ο PMV βρίσκεται στο -0,6 και ο TSV στο -0,4.

Το διάγραμμα 7.4γ παρουσιάζει αρκετή ομοιότητα με το 7.4α ως προς τους αριθμούς. Και εδώ, ο TSV είναι αρκετά κοντά με τον PMV, ξεκινώντας καλύτερα αλλά πετυχαίνοντας υψηλότερα όρια για την ίδια ενέργεια, δείχνοντας και πάλι ότι είναι λιγότερο ελαστικός σε σχέση με τον PMV. Ο PMVET συνεχίζει να διατηρεί υψηλότερα όρια, αφού για 0,2 στον TSV η τιμή του είναι σχεδόν 0,8.

Συνάγεται λοιπόν γενικά, ότι ο PMV είναι ο δείκτης που επηρεάζεται περισσότερο απ' όλους από τη μείωση της θερμοκρασίας για τη βελτίωσή του, αφού δείχνει την μεγαλύτερη κλίση στο διάγραμμα. Ο TSV είναι κοντά στον PMV, αλλά δεν έχει την ίδια ευελιξία με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, εφόσον οι υπολογισμοί για θερμό κλίμα, βασίζονται στις αλλαγές σε σχέση με την υγρασία του δέρματος. Επίσης, μπορεί με την πιο χαμηλή ενέργεια σε σχέση με τους άλλους δείκτες να πετύχει το 1, που αποτελεί αποδεκτό όριο γι' αυτόν. Ο PMVET επηρεάζεται ελάχιστα με τη μείωση της θερμοκρασίας και δεν καταφέρνει να αγγίξει το κατώτατο όριο 0,2 που του έχει τεθεί, μόνο με τη ρύθμιση της θερμοκρασίας. Ο λόγος γι' αυτή την παράδοξη συμπεριφορά μπορεί να αποδοθεί σε διάφορους παράγοντες. Αρχικά, σύμφωνα με πειράματα που έχουν γίνει [9], έχει διαπιστωθεί πως το μοντέλο του Pierce έχει την τάση να υποεκτιμά την υγρασία, να υπερεκτιμά τη θερμοκρασία του δέρματος και να υποεκτιμά τη θερμοκρασία του πυρήνα. Όλα αυτά οδηγούν σε υπερεκτίμηση της θερμικής δυσφορίας για θερμό κλίμα. Ακόμη, η θεώρηση που γίνεται στον δείκτη PMVET για αντικατάσταση της μέσης θερμοκρασίας αέρα με τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας, η οποία από τα πειράματα αποδεικνύεται ιδιαίτερα υψηλή, είναι ο λόγος για τη διατήρηση του δείκτη σε υψηλά επίπεδα.

7.2.2 Χειμερινή ημέρα σε θερμό κλίμα

Το δεύτερο σύνολο πειραμάτων γίνεται για χειμώνα με αρχείο καιρού Αθήνας, για την ημέρα με τη χαμηλότερη θερμοκρασία. Η ημέρα αυτή είναι σύμφωνα με το δεδομένο αρχείο καιρού η 26η Δεκεμβρίου, η χαμηλότερη θερμοκρασία είναι στους 2°C, ενώ αξιοσημείωτη είναι η πολύ μικρή τιμή της απευθείας ακτινοβολίας και μάλιστα για λίγες ώρες, αφού η η ημέρα του πειράματος είναι κοντά στο χειμερινό ηλιοστάσιο.

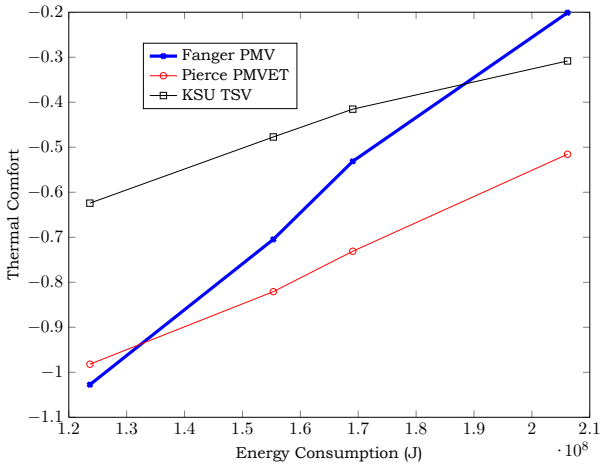


Σχήμα 7.5: Εξωτερικές συνθήκες για την ημέρα του πειράματος

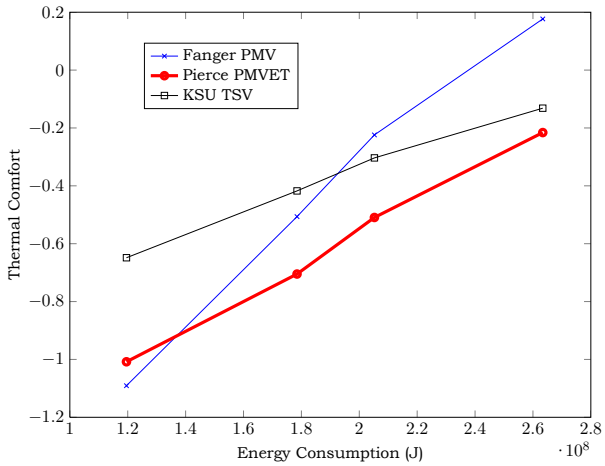
Όπως και στη περίπτωση του καλοκαιριού, έτσι κι εδώ γίνεται για τις προηγούμενες ημέρες της προσομοίωσης η διαδικασία του warming up. Θέτουμε λοιπόν για τις προηγούμενες επτά ημέρες τη θερμοκρασία του συστήματος ίση με 23 °C, και τα παράθυρα να είναι κλειστά. Τις υπόλοιπες ώρες, το σύστημα HVAC είναι στους 0 °C, ώστε να εξασφαλιστεί η μη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ίδιες τιμές τίθενται και για τον ορισμό της αρχικής τιμής από την οποία έχει ξεκινήσει την αναζήτηση ο αλγόριθμος. Επίσης, η ταύτιση της μέσης θερμοκρασίας αέρα σε κάθε ζώνη με αυτή στην οποία τίθεται το κλιματιστικό μπορεί να επιτευχθεί ορίζοντας την μέγιστη ισχύ του συστήματος σε κάθε ζώνη στα 6000 W.

Αποτελέσματα πειραμάτων

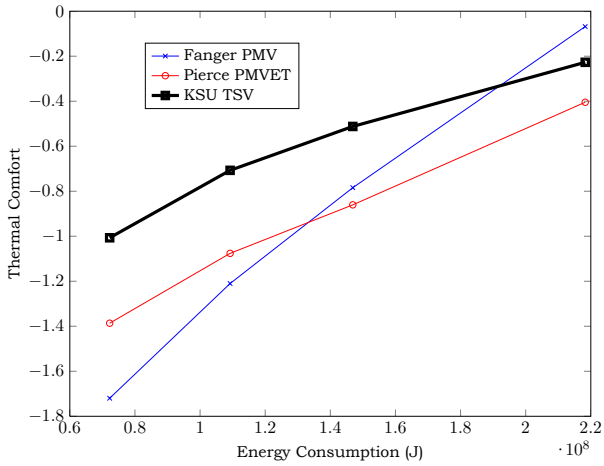
Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα που αντιπροσωπεύουν τη σχέση των αντικρουόμενων όρων της συνάρτησης κόστους, του μέσου όρου της θερμικής άνεσης για τις τρεις ζώνες του πειραματικού κτηρίου και της συνολικής ενέργειας που απαιτείται για την επίτευξη των ορίων που έχουν τεθεί. Τα διαγράμματα διαφέρουν αρκετά από αυτά του προηγούμενου πειράματος.



(α) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον Fanger PMV



(β) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον Pierce PMVET



(γ) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον KSU TSV

Σχήμα 7.6: Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας για κάθε δείκτη και αντίδραση των άλλων δεικτών

Στο πρώτο διάγραμμα(7.6α), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με περιορισμό τον PMV, ο οποίος για τιμή ορίου ίση με |1|, βρίσκεται κοντά με τον PMVET ο οποίος πετυχαίνει τιμή -0,95. Τα ποσά ενέργειας που απαιτεί ξεκινούν από περίπου 120 MJ για όριο ίσο με |1|, ενώ για τιμή ορίου |0,2|, απαιτείται λίγο περισσότερο από 200 MJ. Ο TSV βρίσκεται αρκετά πιο ψηλά από όλους τους δείκτες, με εξαίρεση στο πείραμα με όριο ίσο με |0,2| που βρίσκεται στο -0,3.

Στο δεύτερο διάγραμμα (7.6β), έχει τεθεί ο PMVET ως περιορισμός. Με μια γενική εικόνα, οι τιμές ενέργειας - θερμικής άνεσης είναι κοντά και για τους τρεις δείκτες. Ωστόσο, στο πιο χαλαρό όριο, το -1, ο PMVET απαιτεί σχεδόν 120 MJ, και ελάχιστα ψηλότερα βρίσκεται ο PMV. Ο TSV πετυχαίνει και πάλι πολύ καλύτερη τιμή, σχεδόν -0,6. Συνεχίζοντας, ο PMVET βελτιώνεται με τη θερμοκρασιακή ρύθμιση, και πλησιάζει το -0,2 για ενέργεια όμως ίση με 260 MJ, όπου

συναντάει και τον TSV. Σε αυτό το σημείο, ο PMV αγγίζει τα θετικά όρια και φθάνει στο 0,2, δείχνοντας και πάλι ανοδική πορεία με την αύξηση της ενέργειας.

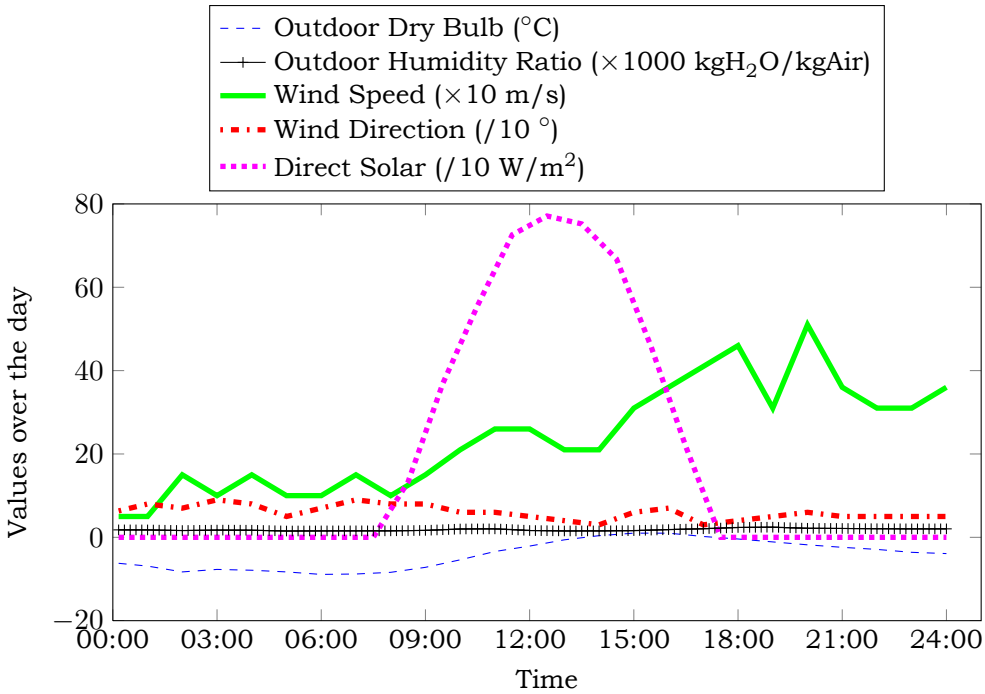
Στο τρίτο διάγραμμα (7.6γ□), με περιορισμό τον TSV, υπάρχει και πάλι μια εγγύτητα στις συμπεριφορές των τριών δεικτών, οι οποίοι αν και για |1| βρίσκονται μακριά (TSV=-1, PMVET=-1.4, PMV=-1.7), στην πορεία με την αύξηση της ενέργειας συναντώνται. Ο TSV απαίτησε χαμηλό ποσό ενέργειας για το όριο αυτό, περίπου 70 MJ, αλλά για τη βελτίωση στο -0,2 χρειάστηκαν 220 MJ. Και σε αυτή την περίπτωση, ο PMV βελτίωσε τις τιμές του ευκολότερα, ενώ ο PMVET, τείνει να έχει κοινή συμπεριφορά με τον TSV αλλά με λίγο χειρότερη επίδοση.

Συνολικά, φαίνεται ότι για την επίτευξη των πιο "χαλαρών" ορίων, ο TSV είναι ο δείκτης που απαιτεί τη χαμηλότερη ενέργεια, ενώ ο PMV απαιτεί το υψηλότερο ποσό ενέργειας. Ωστόσο ο PMV ανταποκρίνεται στην αύξηση της θερμοκρασίας και βελτιώνει πιο εύκολα από τους υπόλοιπους δείκτες την επίδοσή του, έχοντας πάντα το καλύτερο σκορ για τα πιο αυστηρά όρια. Ο PMVET, για τα πιο χαλαρά όρια έχει παρόμοιες επιδόσεις με τον PMV, αλλά όπως και ο TSV, τις βελτιώνει δύσκολα με την αύξηση της κατανάλωσης. Όσον αφορά τον TSV, αυτή η συμπεριφορά αποδίδεται στο γεγονός, ότι για ψυχρό κλίμα υπολογίζει τη θερμική άνεση σύμφωνα με τις αλλαγές που προκύπτουν στη θερμική αγωγιμότητα μεταξύ της θερμοκρασίας του πυρήνα και της θερμοκρασίας του δέρματος. Έτσι, η εξάρτηση από τη μέση θερμοκρασία αέρα δεν είναι άμεση. Η υψηλή του απόδοση μπορεί να αποδοθεί στον συνυπολογισμό της μέσης θερμοκρασίας αέρα και της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας για τη λειτουργική θερμοκρασία. Η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας προκύπτει από τα πειράματα που μελετούμε, αρκετά πιο χαμηλή από τη μέση θερμοκρασία αέρα. Αυτός είναι και ο λόγος για τη μέτρια απόδοση του PMVET ο οποίος όπως προαναφέρθηκε, αντικαθιστά τη θερμοκρασία αέρα με αυτή της ακτινοβολίας.

7.2.3 Χειμερινή ημέρα σε ψυχρό κλίμα

Στο τρίτο σύνολο πειραμάτων, επιδιώκουμε να δούμε την επίδραση των δεικτών στη δημιουργία των controllers για τις συνθήκες ψυχρού κλίματος. Επιλέγεται λοιπόν, η περιοχή της Φρανκφούρτης όπου χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλές θερμοκρασίες τον χειμώνα, ενώ για τη θερινή περίοδο οι συνθήκες είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές για τον άνθρωπο και σχεδόν ποτέ δεν είναι απαραίτητη η παρέμβαση για μείωση της θερμοκρασίας με συστήματα HVAC. Το κάθε πείραμα γίνεται για την ημέρα που σημειώνεται η χαμηλότερη θερμοκρασία δηλαδή -8.8°C, η οποία είναι η 18η Φεβρουαρίου. Όπως δείχνει και το διάγραμμα 7.7 που απεικονίζει τις εξωτερικές συνθήκες γι' αυτή την ημέρα, η θερμοκρασία ξηρού βολβού κυμαίνεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, από -8,8 °C, έως 1 °C, η ταχύτητα του ανέμου είναι σχετικά χαμηλή αλλά η προέλευσή του είναι βόρεια-βορειοδυτική και τα επίπεδα υγρασίας είναι χαμηλά ιδιαίτερα σε σχέση αυτά με της Αθήνας.

Και σε αυτή την περίπτωση εφαρμόζεται η διαδικασία του warming up θέτοντας για τις προηγούμενες επτά ημέρες τη θερμοκρασία του συστήματος για τις ώρες εργασίας ίση με 23 °C, και τα παράθυρα να είναι κλειστά, ενώ τις υπόλοιπες ώρες απενεργοποιείται το σύστημα HVAC. Το ίδιο ισχύει και με την αρχική λύση του προβλήματος, δηλαδή, κλειστά παράθυρα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, 23 °C, θερμοκρασία του συστήματος για τις ώρες εργασίας και 0 °C, τις υπόλοιπες ώρες ώστε να μην καταναλώνεται ενέργεια.



Σχήμα 7.7: Εξωτερικές συνθήκες για την ημέρα του πειράματος

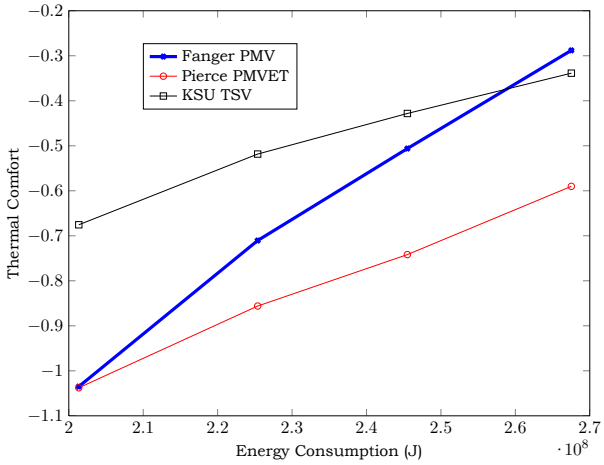
Για να μπορέσει να ταυτιστεί η μέση θερμοκρασία αέρα της κάθε ζώνης με αυτή που ρυθμίζεται το HVAC, γίνεται αύξηση της μέγιστης ισχύος του σε σχέση με τα προηγούμενα πειράματα, εξ αιτίας των δύσκολων εξωτερικών συνθηκών, αλλά και της χαμηλής μόνωσης του κτηρίου. Έτσι, η μέγιστη ισχύς του συστήματος HVAC τίθεται στα 10000 W, για τη δυτική και ανατολική ζώνη και 15000 W, για τη βόρεια, εξαιτίας και της θέσης της, αλλά και του όγκου της που είναι μεγαλύτερος από των άλλων δυο ζωνών.

Αποτελέσματα πειραμάτων

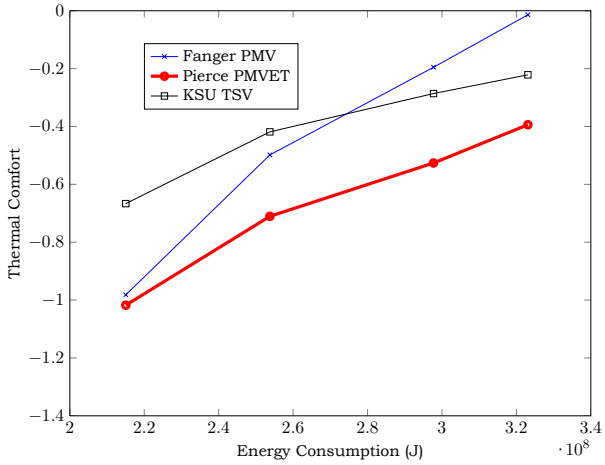
Τα αποτελέσματα των πειραμάτων όσον αφορά στην επίδοση των δεικτών σε σχέση με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται παρακάτω. Με μια πρώτη εικόνα, διαπιστώνεται η ομοιότητα στη μορφή αυτών των πειραμάτων με αυτά της Αθήνας για χειμερινή περίοδο, με διαφορά βέβαια τα επίπεδα ενέργειας που απαιτούνται εδώ για την επίτευξη των ορίων της θερμικής άνεσης. Στο διάγραμμα 7.8α□ έχει τεθεί ως περιορισμός στα πειράματα, ο PMV. Εδώ, φαίνεται ο PMV να ισοδυναμεί με τον PMVET στο κατώτατο όριο |1|, με 200 MJ απαιτούμενη ενέργεια, αλλά ο PMV δείχνει και πάλι την ευελιξία του αυξάνοντας κατά πολύ τις επιδόσεις του με την αύξηση της ενέργειας. Στην ανώτατη τιμή που καταφέρνει να φθάσει, -0,3, μέσα από τα πειράματα που έγιναν και για το οποίο απαιτούνται 270 MJ, συναντάει τον TSV ο οποίος έχει ξεκινήσει από τα πιο χαμηλά όρια με πολύ καλύτερες επιδόσεις.

Στο διάγραμμα 7.8β□, ο PMVET είναι ο δείκτης που έχει εισαχθεί στον περιορισμό και σε σχέση με τους υπόλοιπους δυο εμφανίζει τις χειρότερες επιδόσεις, οι οποίες όμως δεν είναι τόσο έντονες όπως στα πειράματα για καλοκαιρινή περίοδο. Στο πείραμα με όριο |1|, σχεδόν

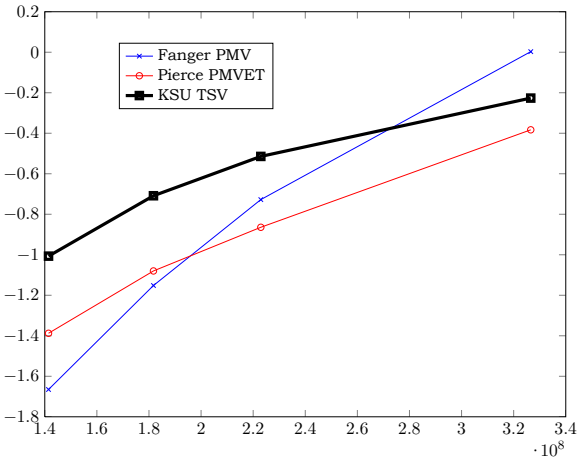
συμπίπτει με τον PMV, και απαιτεί 220 MJ αλλά δε βελτιώνεται τόσο εύκολα όσο εκείνος. Ο καλύτερος μέσος όρος που μπόρεσε να πετύχει ο αλγόριθμος με όριο |0,2|, είναι -0,4. Για το όριο αυτό απαιτείται ενέργεια ίση με 320 MJ. Η επίδοση των άλλων δυο δεικτών για αυτό το ποσό ενέργειας είναι -0,3 για τον TSV και 0 για τον PMV.



(α) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον Fanger PMV



(β) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον Pierce PMVET



(γ) Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας, με περιορισμό τον KSU TSV

Σχήμα 7.8: Αξιολόγηση της σχέσης θερμικής άνεσης-ενέργειας για κάθε δείκτη και αντίδραση των άλλων δεικτών

Στο τρίτο διάγραμμα (7.8γ), με περιορισμό πειραμάτων τον δείκτη TSV, βλέπουμε τον οριζόντιο άξονα που αντιπροσωπεύει την ενέργεια, να έχει το μεγαλύτερο εύρος από ότι δείχνουν τα άλλα δυο διαγράμματα. Φαίνεται λοιπόν, ότι ο TSV, αν και παρουσιάζει πολύ καλή επίδοση σε σχέση με τους άλλους δείκτες και απαιτεί χαμηλά ποσά ενέργειας για να βρίσκεται σε πλήρως αποδεκτά όρια, είναι πιο σταθερός. Συγκεκριμένα, για να φθάσει στο -0,2 από το -0,5 απαιτεί επιπλέον ενέργεια 110 MJ. Ο PMV δείχνει ξανά την ευελιξία του και την εξάρτησή του από το μέ-

γεθος της θερμοκρασίας ξεκινώντας από -1,7 όταν ο TSV είναι 1, αλλά καταλήγοντας στο ιδανικό 0, όταν ο TSV είναι -0,2.

Διαπιστώνεται λοιπόν και από αυτό το σύνολο πειραμάτων, ότι την καλύτερη επίδοση για όρια |1|, |0,7| και |0,5| παρουσιάζει ο TSV. Όπως αναφέρθηκε και για τα προηγούμενα πειράματα που αφορούν χειμερινή περίοδο Αθήνας, ο TSV συνδυάζει τις μέσες θερμοκρασίες αέρα και ακτινοβολίας για τον υπολογισμό της λειτουργικής, ενώ ο υπολογισμός του βασίζεται στις αλλαγές της θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ πυρήνα και δέρματος. Στα πιο χαμηλά όρια ο PMVET είναι κοντά με τον PMV, αλλά στη συνέχεια δε συμβαδίζουν, αφού ο PMV ικανοποιεί πιο εύκολα καλύτερες επιδόσεις. Η αντικατάσταση της μέσης θερμοκρασίας αέρα με τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας είναι και ο λόγος που αφήνει πίσω τον PMVET. Τέλος, αν και στις επιδόσεις ο TSV είναι πολύ καλύτερος δείχνει ομοιότητα με τον PMVET ως προς της εξάρτησή του από την αύξηση της θερμοκρασίας.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία είχε ως κύριο θέμα το σχεδιασμό διαχείρισης ενέργειας στα κτήρια αλλά και πως επηρεάζεται από τους περιορισμούς στη θερμική άνεση. Το πρόβλημα εκφράζεται μέσω μιας μαθηματικής συνάρτησης προς ελαχιστοποίηση, της συνάρτησης κόστους της ο οποίας στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας με δεδομένη την ικανοποίηση αποδεκτών ορίων θερμικής άνεσης. Η πραγματοποίηση του στόχου περιλαμβάνει πολλές οδούς στις οποίες ερευνητές έχουν κινηθεί. Εδώ, έγινε χρήση θερμικού μοντέλου ανεπτυγμένου σε λογισμικό προσομοίωσης το οποίο αποτέλεσε τη βάση για τον έλεγχο. Ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης έχει το ρόλο της αναζήτησης των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων ενώ απαραίτητο είναι ένα ενδιάμεσο λογισμικό που θα διαχειρίζεται την επικοινωνία του μοντέλου με τον αλγόριθμο.

Η υλοποίηση όλων αυτών πραγματοποιήθηκε, με τη χρήση διαφόρων εργαλείων. Το λογισμικό προσομοίωσης EnergyPlus επιλέχθηκε για τη μοντελοποίηση του κτηρίου, τον ορισμό χρονοδιαγραμμάτων και του ελεγκτή. Από τη φύση του προβλήματος επιλέχθηκε ο κατάλληλος αλγόριθμος τοπικής αναζήτησης Hooke-Jeeves. Ο κώδικάς του διατίθεται μέσα από το πακέτο GenOpt, το οποίο είναι ένα περιβάλλον που διευκολύνει την επικοινωνία μοντέλου και αλγορίθμου αλλά και στο οποίο ορίζεται η αντικειμενική συνάρτηση. Πραγματοποιήθηκαν πολλά πειράματα προς αναζήτηση του βέλτιστου ελεγκτή στα οποία τέθηκαν ως περιορισμοί τρεις διαφορετικοί δείκτες που υπολογίστηκαν μέσω του EnergyPlus, ο Fanger PMV, ο Pierce PMVET και ο KSU TSV. Για αυτούς τους δείκτες τέθηκαν τέσσερα διαφορετικά όρια και δοκιμάστηκαν για κλιματικά δεδομένα Αθήνας για δυο ημέρες με τις πιο ακραίες θερμοκρασίας, μια χειμερινή και μια καλοκαιρινή. Επίσης πραγματοποιήθηκε σύνολο πειραμάτων και για μια πολύ ψυχρή ημέρα για κλιματικά δεδομένα Φρανκφούρτης.

Ύστερα από όλα αυτά τα πειράματα, έγινε μια επεξεργασία για κάθε ένα από αυτά, που αφορά στα ποσά ενέργειας που απαιτήθηκαν για ώστε να επιτευχθούν οι βέλτιστες τιμές θερμικής άνεσης σε κάθε πείραμα, ώστε να μελετηθεί η επίδραση του κάθε δείκτη στη διαμόρφωση του εκάστοτε ελεγκτή, αλλά και συμπεριφορά των υπόλοιπων δεικτών. Έτσι, παρουσιάστηκαν διαγράμματα με τις σχέσεις δεικτών θερμικής άνεσης-ενέργειας. Μέσα από αυτά τα διαγράμματα έγινε εμφανής η εξάρτηση του Fanger PMV από την εσωτερική θερμοκρασία, και η ευελιξία και άμεση βελτίωσή του με την αυξομείωση της θερμοκρασίας. Το συμπέρασμα αυτό μπορεί να συναχθεί και από τα τρία κύρια σύνολα πειραμάτων, δηλαδή για χειμερινή και καλοκαιρινή ημέρα Αθήνας και για χειμερινή ημέρα Φρανκφούρτης. Ο KSU TSV βρίσκεται κοντά με τον

Fanger PMV στα πειράματα της καλοκαιρινής ημέρας χωρίς να είναι όμως το ίδιο ευέλικτος. Καλές επιδόσεις στα σκορ του εμφανίζει και στα χειμερινά πειράματα ικανοποιώντας τα όρια με σχετικά χαμηλά ποσά ενέργειας. Τέλος, ο Pierce PMVET έχει φανερά κακές επιδόσεις στα πειράματα του καλοκαιριού μη καταφέρνοντας να ικανοποιήσει αυστηρά όρια που έχουν τεθεί ακόμα και με αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες. Οι επιδόσεις του στα χειμερινά πειράματα είναι πιο βελτιωμένες εμφανίζοντας όμως στα πιο αυστηρά όρια όρια χαμηλότερα σκορ σε σχέση με τους υπόλοιπους δυο δείκτες.

Μελλοντική εργασία που θα μπορούσε να υλοποιηθεί θα ήταν η ανάπτυξη ενός γενικής αναζήτησης αλγορίθμου περισσότερο αποδοτικού από τους υπάρχοντες στη βιβλιοθήκη του GenOpt για την αναζήτηση ακόμα πιο οικονομικών λύσεων αλλά και με στόχο τη μείωση του χρόνου της βελτιστοποίησης ώστε να γινόταν η όλη διαδικασία εφαρμόσιμη για τα BEMS σε περισσότερο πολύπλοκα κτήρια.

Βιβλιογραφία

[1] SIA 382/1. *L'oftungs- und Klimaanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen.* 2007.

[2] ISO 7730. *Ergonomics of the Thermal Environment - Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria.* International Standard Organization, Geneva, 2005.

[3] ASHRAE. Handbook of fundamentals. *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineer Inc*, 2001.

[4] ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004: thermal environmental conditions for human occupancy. *American Society of Heating, Refrigerating and air-Conditioning Engineers*, 2004.

[5] N.Z. Azer and S. Hsu. The prediction of thermal sensation from simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions, 83(1)*, 1977.

[6] M. Bell and M. C. Pike. Remark on algorithm 178 [e4] direct search. *Commun. ACM*, 9(9):684–685, September 1966.

[7] Jiri Cigler, Samuel Privara, Zdenek Vana, Dana Komarkova, and Michael Sebek. Optimization of predicted mean vote thermal comfort index within model predictive control framework. In *Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annual Conference on*, pages 3056–3061. IEEE, 2012.

[8] R. De Vogelaere. Remark on algorithm 178: Direct search. *Commun. ACM*, 11(7):498–, July 1968.

[9] T Doherty and Edward A Arens. Evaluation of the physiological bases of thermal comfort models. 1988.

[10] A. Droscher, H. Schranzhofer, J.R. Santiago, A. Constantin, R. Streblow, D. Muller, P. Exizidou, G.I. Giannakis, and D.V. Rovas. Integrated thermal simulation models for the three buildings. PEBBLE Deliverable 2.1, 2010.

[11] R. Eberhart and J. Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory. In *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on*, pages 39–43. IEEE, 1995.

[12] EnergyPlus. Energyplus documentation. *US Department of Energy*, 2007.

[13] P.O. Fanger et al. Thermal comfort. analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.*, 1970.

[14] R.Z. Freire, G.H.C. Oliveira, and N. Mendes. Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings. *Energy and Buildings*, 40(7):1353–1365, 2008.

[15] A.P. Gagge, A.P. Fobelets, and L. G. Berglund. A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Trans., Vol.92, Pt 2*, 1986.

[16] A.P. Gagge, Stolwijk J. A. J., and Y Nishi. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Trans., Vol.70, Pt 1*, 1970.

[17] Dimitrios Gyalistras and Markus Gwerder. Use of weather and occupancy forecasts for optimal building climate control (opticontrol): Two years progress report. *Terrestrial Systems Ecology ETH Zurich, Switzerland and Building Technologies Division, Siemens Switzerland Ltd., Zug, Switzerland*, 2010.

[18] Claus Händel. Eingangsparameter für das raumklima zur auslegung und bewertung der energieeffizienz von gebäuden. *Bauphysik*, 30(1):46–49, 2008.

[19] Raad Z Homod, Khairul Salleh Mohamed Sahari, Haider AF Almurib, and Farrukh Hafiz Nagi. Gradient auto-tuned takagi–sugeno fuzzy forward control of a hvac system using predicted mean vote index. *Energy and Buildings*, 2012.

[20] Robert Hooke and T. A. Jeeves. "direct search" solution of numerical and statistical problems. *J. ACM*, 8(2):212–229, April 1961.

[21] J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization. In *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, volume 4, pages 1942–1948. IEEE, 1995.

[22] G.D. Kontes, G.I. Giannakis, G.N. Lilis, E.B. Kosmatopoulos, and D.V. Rovas. PEBBLE Building Optimization and Control System. PEBBLE Deliverable 3.2, 2012.

[23] Yudong Ma, Francesco Borrelli, Brandon Hencey, Brian Coffey, Sorin Bengea, and Philip Haves. Model predictive control for the operation of building cooling systems. In *American Control Conference (ACC), 2010*, pages 5106–5111. IEEE, 2010.

[24] Yudong Ma, Francesco Borrelli, Brandon Hencey, Andrew Packard, and Scott Bortoff. Model predictive control of thermal energy storage in building cooling systems. In *Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference.*

CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on, pages 392–397. IEEE, 2009.

[25] Frauke Oldewurtel, Alessandra Parisio, Colin N Jones, Dimitrios Gyalistras, Markus Gwerder, Vanessa Stauch, Beat Lehmann, and Manfred Morari. Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy and Buildings*, 45:15–27, 2012.

[26] K.E. Parsopoulos and M.N. Vrahatis. Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization. *Natural computing*, 1(2):235–306, 2002.

[27] K.E. Parsopoulos, M.N. Vrahatis, et al. Particle swarm optimization method for constrained optimization problems. *Intelligent Technologies–Theory and Application: New Trends in Intelligent Technologies*, 76:214–220, 2002.

[28] PEBBLE. Positive Energy Buildings thru Better controL dEcisions. 2010. `http://www.pebble-fp7.eu/`.

[29] J. Remund, S. Kunz, and R. Lang. Meteonorm-global meteorological database for solar energy and applied climatology. *Solar Engineering Handbook, version*, 4, 1999.

[30] Lyle B. Smith. Remark on algorithm 178 [e4]: direct search. *Commun. ACM*, 12(11):638–, November 1969.

[31] Henry C Spindler and Leslie K Norford. Naturally ventilated and mixed-mode buildings—part ii: Optimal control. *Building and Environment*, 44(4):750–761, 2009.

[32] ASHRAE Standard. 55 (2010). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.

[33] G.N. Walton. *AIRNET: A Computer Program for Building Airflow Network Modeling*. US Dept. of Commerce, National Institute of Standards and Technology, National Engineering Laborary, Center for Building Research, Building Environment Division, 1989.

[34] M. Wetter. Genopt manual: Generic optimization program, version 3.1. 0. *University of California (through Lawrence Berkeley National Laboratory), Berkeley*, 2011.

[35] Yongmin Yan, Jin Zhou, Yaolin Lin, Wei Yang, Ping Wang, and Guoqiang Zhang. Adaptive optimal control model for building cooling and heating sources. *Energy and Buildings*, 40(8):1394–1401, 2008.