
Ανάπτυξη Στρατηγικών Βασισμένων σε Μοντέλα Πρόβλεψης και Ελέγχου για τη Βελτίωση της Ενεργειακής Απόδοσης Υφιστάμενων Κτηρίων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

A.M: 2008019033, Email: giannakis.georgios@gmail.com

Εξεταστική Επιτροπή:

Ρόβας Δημήτριος (επιβλέπων)

Νικολός Ιωάννης

Κολοκοτσά Διονυσία

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή	1
2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	5
2.1 Θερμική Μοντελοποίηση Κτηρίων	5
2.2 Στρατηγικές Ελέγχου και Προσαρμοστική Βελτιστοποίηση	7
3 Μοντελοποίηση στο EnergyPlus	11
3.1 Υπολογιστικά μοντέλα στο EnergyPlus	11
3.1.1 Μετάδοσης θερμότητας με αγωγή διαμέσου του κελύφους	11
3.1.2 Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή σε εσωτερικές και εξωτερικές επι- φάνειες	13
3.1.3 Ακτινοβολία των εσωτερικών επιφανειών	15
3.1.4 Ακτινοβολία των εξωτερικών επιφανειών και του περιβάλλοντα χώρου . .	15
3.1.5 Η Ηλιακή Ακτινοβολία	16
3.1.6 Θερμοκρασία Αέρα Θερμικής Ζώνης	17
3.1.7 Φυσικός Αερισμός	17
3.1.8 Μετάδοση θερμότητας σε επιφάνειες εφαιπόμενες του εδάφους	18
3.1.9 Εσωτερικά Θερμικά Φορτία	19
3.1.10 Θερμική Άνεση	20
3.2 Ανάπτυξη του αρχείου IDF	22
3.2.1 Τοποθεσία και Κλίματικές Συνθήκες (Location and Climate)	23
3.2.2 Χρονοδιαγράμματα Δραστηριοτήτων (Schedules)	24
3.2.3 Κατασκευαστικά Στοιχεία Επιφανειών (Surface Construction Elements)	25
3.2.4 Θερμικές Ζώνες και Επιφάνειες (Thermal Zones and Surfaces)	26
3.2.5 Εσωτερικά Θερμικά Φορτία (Internal Gains)	27
3.2.6 Σύστημα HVAC	28
3.3 Το Αρχείο Καιρού στο EnergyPlus	28
3.3.1 Παρουσίαση των Δεδομένων	28
3.3.2 Δομή	35
4 Στρατηγικές Ελέγχου και Προσαρμοστική Βελτιστοποίηση	41
4.1 Ο αλγόριθμος Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SPSA)	41
4.2 Ο αλγόριθμος Adaptive Fine Tunning (AFT)	43
4.3 Ο αλγόριθμος Policy learning by Weighting Exploration with the Returns (PoWER)	47
4.4 Ο αλγόριθμος Cross Entropy (CE)	48

5 Ενσωμάτωση των Στρατηγικών Ελέγχου στο Θερμικό Μοντέλο	51
5.1 Παρουσίαση του Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB)	51
5.2 Αρχιτεκτονική του Συστήματος	52
5.2.1 Αλγόριθμος Ανταλλαγής Δεδομένων	52
5.2.2 Επικοινωνία EnergyPlus - BCVTB	53
5.2.3 Επικοινωνία Matlab - BCVTB	60
5.2.4 Ανάπτυξη του μοντέλου Ptolemy στο γραφικό περιβάλλον Vergil	61
6 Πειράματα	67
6.1 Πείραμα 1	67
6.1.1 Περιγραφή του Κτηρίου	67
6.1.2 Ανάπτυξη του μοντέλου προσαρμοστικής βελτιστοποίησης	71
6.1.3 Αποτελέσματα	73
6.2 Πείραμα 2	74
6.2.1 Περιγραφή του Κτηρίου	74
6.2.2 Ανάπτυξη του μοντέλου προσαρμοστικής βελτιστοποίησης	77
6.2.3 Αποτελέσματα	78
6.3 Πείραμα 3	81
6.3.1 Αποτελέσματα	81
6.4 Πείραμα 4	84
6.5 Πείραμα 5	86
7 Συμπεράσματα	89

Κατάλογος Σχημάτων

3.1 Σχήμα διακριτοποίησης για τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών του Energy-Plus	12
3.2 Επταβάθμια βαθμωτή κλίμακα θερμικής άνεσης σύμφωνα με τον Fanger [2] .	21
3.3 Συσχέτιση των δεικτών PPD, PMV	22
3.4 EP-Launch	22
3.5 Location and Climate	23
3.6 Schedule:Compact	24
3.7 Κατασκευαστικά Στοιχεία Επιφανειών	25
3.8 Εσωτερικά Θερμικά Φορτία	27
4.1 Αξονομετρική όψη του υποθετικού κτηρίου	45
5.1 Μοντέλο Ptolemy του γραφικού περιβάλλοντος Vergil για τη συνδεδεμένη προσομοίωση Matlab - EnergyPlus	52
5.2 Αρχιτεκτονική του συστήματος σύνδεσης των λογισμικών Matlab και Energy-Plus στο BCVTB	53
5.3 Η έκδοση (Version) του EnergyPlus στην οποία το μοντέλο έχει αναπτυχθεί . .	54
5.4 Ορισμός του χρονικού βήματος της προσομοίωσης (timestep)	55
5.5 Ορισμός του εξωτερικού περιβάλλοντος με το οποίο το EnergyPlus επικοινωνεί	55
5.6 Ορισμός των αντικειμένων στο πεδίο ExternalInterface:Schedule	56
5.7 Ορισμός των αντικειμένων στο πεδίο ExternalInterface:Actuator	56
5.8 Ορισμός των αντικειμένων στο πεδίο ExternalInterface:Variable	57
5.9 Ορισμός των αντικειμένων στο πεδίο Output:Variable	57
5.10 Ορισμός των αντικειμένων στο πεδίο EMS:OutputVariable	58
5.11 Αρίθμηση των στοιχείων του μοντέλου Ptolemy που απαιτούνται για τη σωστή σύνδεση EnergyPlus - Matlab	62
5.12 Καθορισμός των παραμέτρων του SDF Director	63
5.13 Καθορισμός των παραμέτρων του Matlab Actor	63
5.14 Καθορισμός των παραμέτρων του EnergyPlus Actor	64
6.1 Αξονομετρική όψη του υποθετικού κτηρίου	68
6.2 Διαστροφάτωση μιας υποθετικής επιφάνειας	69
6.3 Τιμές των εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειακών θερμικών αντιστάσεων . .	70
6.4 Απόδοση των αλγορίθμων SPSA, CE, PoWER με αντικειμενική συνάρτηση τη θερμοκρασιακή απόκλιση από τα επιθυμητά επίπεδα	73

6.5 Απόδοση των αλγορίθμων SPSA, CE, PoWER με αντικειμενική συνάρτηση το προβλεπόμενο ποσοστό δυσανεσχημένων ανθρώπων	73
6.6 Κάτοψη του υποθετικού κτηρίου	74
6.7 Αξονομετρική όψη του υποθετικού κτηρίου	74
6.8 Κάτοψη του υποθετικού κτηρίου	74
6.9 Αποτελέσματα χωρίς την εφαρμογή ελέγχου για το πειραματικό κτήριο στο Graz	78
6.10 Η τελική απόδοση του ελεγκτή στο πειραματικό κτήριο στο Graz	79
6.11 Αποφάσεις ελέγχου των περσίδων και των θερμοκρασιών αναφοράς του συστήματος θέρμανσης-ψύξης - κλιματισμού στο πειραματικό στο Graz	79
6.12 Απόδοση ενός καλού ελεγκτή στο πειραματικό κτήριο	80
6.13 Αποφάσεις ενός καλού ελεγκτή στο πειραματικό κτήριο	80
6.14 Απόδοση ενός καλύτερου ελεγκτή (περισσότερες επαναλήψεις) στο πειραματικό κτήριο	80
6.15 Αποφάσεις ενός καλύτερου ελεγκτή (περισσότερες επαναλήψεις) στο πειραματικό κτήριο	80
6.16 Απόδοση του τελικού ελεγκτή (περισσότερες επαναλήψεις) στο πειραματικό κτήριο	81
6.17 Αποφάσεις του τελικού ελεγκτή (περισσότερες επαναλήψεις) στο πειραματικό κτήριο	81
6.18 Απόδοση του συστήματος όταν η θερμοκρασία αναφοράς των συστημάτων H-VAC ρυθμίζεται στους 23°C	82
6.19 Οι αποφάσεις του συστήματος όταν η θερμοκρασία αναφοράς των συστημάτων HVAC ρυθμίζεται στους 23°C	82
6.20 Απόδοση της στρατηγικής ελέγχου στην οποία ο αλγόριθμος καταλήγει για το κτήριο στα Χανιά, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη θερμική άνεση	82
6.21 Στρατηγική ελέγχου στην οποία ο αλγόριθμος καταλήγει για το κτήριο στα Χανιά, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη θερμική άνεση	82
6.22 Απόδοση της στρατηγικής ελέγχου στην οποία ο αλγόριθμος καταλήγει για το κτήριο στα Χανιά	83
6.23 Στρατηγική ελέγχου στην οποία ο αλγόριθμος καταλήγει για το κτήριο στα Χανιά	83
6.24 Τα επίπεδα υγρασίας στο πειραματικό κτήριο	83
6.25 Το νέο κτήριο ύστερα από την πρόσθεση τριών νέων παραθύρων	84
6.26 Τα νέα ανοίγματα του πειραματικού κτηρίου	84
6.27 Στρατηγική ελέγχου όταν επιτρέπεται φυσικός αερισμός μέσω του νοτίου παραθύρου της ανατολικής ζώνης	84
6.28 Απόδοση στρατηγικής ελέγχου όταν επιτρέπεται φυσικός αερισμός μέσω του νοτίου παραθύρου της ανατολικής ζώνης	84
6.29 Στρατηγική ελέγχου όταν επιτρέπεται φυσικός αερισμός μέσω του ανατολικού παραθύρου της ανατολικής ζώνης	85
6.30 Απόδοση στρατηγικής ελέγχου όταν επιτρέπεται φυσικός αερισμός μέσω του ανατολικού παραθύρου της ανατολικής ζώνης	85
6.31 Στρατηγική ελέγχου των παραθύρων όταν επιτρέπεται φυσικός αερισμός μέσω και των δύο παραθύρων της ανατολικής ζώνης	85
6.32 Απόδοση της στρατηγικής ελέγχου όταν επιτρέπεται φυσικός αερισμός μέσω και των δύο παραθύρων της ανατολικής ζώνης	85

6.33 Στρατηγική ελέγχου των παραθύρων του κτηρίου ύστερα από μεγάλο αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου	86
6.34 Απόδοση της στρατηγικής ελέγχου των παραθύρων του κτηρίου ύστερα από μεγάλο αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου	86
6.35 Στρατηγική ελέγχου στην οποία ο γενετικός αλγόριθμος καταλήγει	86
6.36 Στρατηγική ελέγχου στην οποία ο αλγόριθμος AFT καταλήγει όταν η αρχική μήτρα παραμέτρων είναι η τελική μήτρα παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου	86

Κατάλογος Πινάκων

3.1	Μεταβολικός ρυθμός παραγωγής θερμότητας για διάφορες δραστηριότητες . .	20
3.2	Ονόματα των κύριων ανέμων	32
3.3	Τιμές αντικατάστασης των στοιχείων του αρχείου καιρού	34
3.4	Τύποι αρχείων συμβάτοι με το Weather Converter	35
4.1	Ο αλγόριθμος SPSA	43
4.2	Καθορισμός του πλήθους των σημείων του προσεγγιστή	44
4.3	Ανάπτυξη των συναρτήσεων βάσης $\varphi(\theta)$ και υπολογισμός των w	44
4.4	Ο αλγόριθμος PoWER	48
4.5	Ο αλγόριθμος CE	49
6.1	Οι θερμικές ζώνες - γραφεία του πειραματικού κτηρίου	68
6.2	Συντελεστές θερμοπερατότητας των επιφανειών του πειραματικού κτηρίου . .	70
6.3	Οι θερμικές ζώνες - γραφεία του πειραματικού κτηρίου	75
6.4	Συντελεστές θερμοπερατότητας των επιφανειών του πειραματικού κτηρίου . .	75

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει παρουσιαστεί στον τομέα της ενεργειακής απόδοσης και εξοικονόμησης, καθώς η ταχεία αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης ανά τον κόσμο, έχει ήδη εγείρει ανησυχίες για την εξάντληση των συμβατικών ενεργειακών πόρων, τη δυσκολία εφοδιασμού αυτών και τις μεγάλης κλίμακας περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ενδεικτικά, η υπερθέρμανση του πλανήτη οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, που στα μεγάλα αστικά κέντρα μεταφράζεται σε δραματική αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για τον δροσισμό των κτηρίων κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Η ενέργεια που καταναλώνεται στα κτήρια, αποτελεί το 40% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας παγκοσμίως. Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης εκτιμάται ότι το ποσοστό αυτό διαμορφώνεται στο 20-40% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης, με την ανά χώρα κύμανση να ποικίλει από 20% για την Πορτογαλία, έως και 45% για την Ιρλανδία.

Στην Ελλάδα, η κατανάλωση ενέργειας η οποία απαιτείται για τη διασφάλιση κατάλληλων συνθηκών θερμικής άνεσης και ποιότητας αέρα στα κτήρια, αγγίζει υψηλά επίπεδα, διαπιστώνοντας ότι στην πλειονότητά τους κρίνονται ως ενεργοθόρα με έλλειψη επαρκούς μόνωσης, ιδιαίτερα όσα κατασκευάστηκαν πριν από το 1980. Τα ελληνικά κτήρια παρουσιάζουν θερμικές απώλειες από πόρτες και παράθυρα, με αποτέλεσμα πολύτιμη ενέργεια και χρήματα να κατασπαταλούνται και να επιβαρύνεται η ατμόσφαιρα με επικίνδυνους ρύπους. Αποδεικνύεται ότι ο κτηριακός τομέας ευθύνεται για το 45% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα της χώρας και για το 35-40% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας. Μάλιστα, την τελευταία πενταετία, το ποσοστό ενέργειας που χρειάζονται τα κτήρια για να θερμανθούν, να ψυχθούν και να ηλεκτροδοτηθούν αυξήθηκε κατά 25%.

Η πρόοδος στους τομείς του βιοκλιματικού σχεδιασμού, της βελτίωσης της λειτουργίας, καθώς και των συστημάτων ελέγχου των ενεργειακών στοιχείων του κτηρίου (όπως για παράδειγμα τα συστήματα εξαερισμού, κλιματισμού και θέρμανσης, τα ηλιακά συστήματα, οι κυψέλες καυσίμου, συστήματα σκιάστων και φυσικού εξαερισμού, καθώς και συστήματα συμπαραγωγής ενέργειας και θερμότητας), έδωσαν νέες προοπτικές στην υλοποίηση βιώσιμων συστημάτων εξοικονόμησης ενέργειας και ενεργειακής απόδοσης, τόσο στην λειτουργία των καινούργιων, όσο και των υφιστάμενων κτηρίων. Όμως, η ενεργειακή χρήση και οι εκπομπές από την κατανάλωση ενέργειας από τα υπάρχοντα κτήρια κυριαρχούν σε σχέση με το 1-2% ενέργειας που καταναλώνεται από τα καινούρια κτήρια κάθε χρόνο. Συνεπώς, αν και οι σημερινές τάσεις δείχνουν προς την κατασκευή νέων ενεργειακά αποδοτικών

κτηρίων, μια γενική μείωση κατανάλωσης ενέργειας δεν μπορεί να επιτευχθεί χωρίς τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των υπάρχοντων κτηρίων. Καθώς οι ανακαινίσεις και οι μονώσεις αποτελούν δαπανηρές και χρονοβόρες λύσεις, σε αυτό το πλαίσιο, η ανάπτυξη προηγμένων στρατηγικών ελέγχου αποτελεί μια ελκυστική εναλλακτική λύση. Στόχος των προηγμένων στρατηγικών ελέγχου είναι να βρεθεί μια συμβιβαστική, αποδεκτή λύση μεταξύ της θερμικής άνεσης των ενοίκων και της κατανάλωσης ενέργειας. Η κατανόηση ότι οι αποφάσεις ελέγχου είναι άμεσα συνδεδεμένες με τη ενεργειακή απόδοση έχει οδηγήσει σε έναν σημαντικό αριθμό μελετών (δείτε τις αναφορές για διάφορες ερευνητικές εργασίες στην περιοχή). Σε μελέτες όπου χρησιμοποιούνται εμπειρικά μοντέλα, ο εμπειρογνώμονας έχει τη δυνατότητα να καταλάβει τη σχέση αιτίας και αποτελέσματος μεταξύ των διάφορων επιπέδων οικοδόμησης, στρατηγικών ελέγχου και κλιματολογικών όρων. Η εμπειρική αυτή προσέγγιση κτηριακών μοντέλων άλλοτε χρησιμοποιεί τα πιθανολογικά μαθηματικά μοντέλα [15] και άλλοτε τον προγνωστικό έλεγχο υποβοηθούμενο από προσομοίωση (simulation-assisted predictive control) [5]. Ωστόσο, συνήθως τα φυσικά μοντέλα απαιτούν υψηλές υπολογιστικές δεξιότητες και ανθρώπινη προσπάθεια. Επιπλέον, οι περισσότερες από τις προαναφερθείσες προσεγγίσεις είναι βασισμένες σε δεδομένα και εγγενώς αναξιόπιστες. Για το λόγο αυτό, η ενσωμάτωση ελέγχου σε θερμικά μοντέλα λεπτομερούς προσομοίωσης κτηρίων είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα και προσδίδει σημαντικές δυνατότητες [19, 20].

Όσον αφορά στην ανάπτυξη θερμικών μοντέλων, τα κτήρια αντιμετωπίζονται ως πολύπλοκα συστήματα και μια λεπτομερή προσομοίωση απαιτεί να ληφθούν υπόψη τα πραγματικά κλιματικά δεδομένα, η γεωμετρία, τα υλικά κτηρίου, η συμπεριφορά του χρήστη (κατοίκηση, χειροκίνητη ρύθμιση σκίασης, εσωτερικά θερμικά κέρδη). Προκειμένου να ληφθεί ένα ακριβές μοντέλο προσομοίωσης, απαιτείται η λεπτομερής αναπαράσταση της δομής του κτηρίου και των συστημάτων του στο λογισμικό προσομοίωσης. Υπάρχουν λογισμικά προσομοίωσης με πολλές δυνατότητες τα οποία είναι διαθέσιμα σήμερα [6], στα οποία συγκαταλέγεται και το EnergyPlus [7]. Το EnergyPlus είναι ένα λογισμικό το οποίο αναπτύχθηκε υπό την αιγίδα της υπηρεσίας ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών. Διατίθεται ελεύθερα σε τελικούς χρήστες, ενώ ολόκληρος ο πηγαίος κώδικας προσφέρεται σε πολύ χαμηλή τιμή. Το EnergyPlus διαθέτει την εκτενέστερη συλλογή μοντέλων (ειδικά για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σύστημα συμπαραγωγής ενέργειας κλπ). Ακολουθεί το πολύ-ζωνικό υπόδειγμα, διαιρώντας το κτήριο σε περιοχές (ζώνες) με σταθερή θερμοκρασία, υγρασία κλπ. Η χρονική εξέλιξη των παραμέτρων των επιμέρους περιοχών, εκτιμάται από τη επίλυση ενός συστήματος συνήθων διαφορικών εξισώσεων (ουσιαστικά, η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αυξομείωσης της θερμοκρασίας σε κάθε ζώνη, ενώ η εξίσωση διατήρησης της μάζας χρησιμοποιείται για να οριστούν οι μεταβλητές της υγρασίας) [22].

Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται στα πλαίσια μιας προσπάθειας για την ανάπτυξη στρατηγικών βασισμένων σε μοντέλα προσομοίωσης και στη θεωρία της προσαρμοστικής βελτιστοποίησης, με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων. Αρχικά, στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση της θερμικής μοντελοποίησης κτηρίων, η οποία επικεντρώνεται σε μια πρόσφατη αναφορά των είκοσι σημαντικότερων λογισμικών θερμικής προσομοίωσης κτηρίων, και της ισχύουσας κατάστασης στα συστήματα ελέγχου των κτηρίων. Ακολουθεί το κεφάλαιο που εστιάζει στη θερμική μοντελοποίηση των κτηρίων στο EnergyPlus και αναλυτικότερα, στα υπολογιστικά μοντέλα, στο αρχείο εισόδου και το αρχείο καιρού που το λογισμικό αυτό χρησιμοποιεί. Στη συνέχεια περιγράφονται οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι

μοι προσαρμοστικής βελτιστοποίησης οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη των βέλτιστων στρατηγικών ελέγχου με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων. Έχοντας επιλέξει το EnergyPlus ως λογισμικό ανάπτυξης θερμικού μοντέλου και αναζητώντας τον τρόπο με τον ενσωματώνουμε στρατηγικές ελέγχου στο θερμικό μας μοντέλο, καταλήγουμε ότι η ενσωμάτωση των στρατηγικών ελέγχου στις οποίες οι αλγόριθμοι προσαρμοστικής βελτιστοποίησης θα καταλήξουν, πραγματοποιείται μέσω του Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB) το οποίο παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η ενσωμάτωση στρατηγικών ελέγχου που προκύπτουν από αλγορίθμους προσαρμοστικής βελτιστοποίησης σε δύο υποθετικά-πειραματικά κτήρια.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση της θερμικής μοντελοποίησης κτηρίων, η οποία επικεντρώνεται σε μια αναφορά των είκοσι σημαντικότερων λογισμικών θερμικής προσομοίωσης κτηρίων. Στα πλαίσια μιας μελέτης που πραγματοποιήθηκε το 2005, τα λογισμικά αυτά συγκρίνονται ως προς την ικανότητα τους να προσομοιώσουν με ακρίβεια το θερμικό μοντέλο κάθε κτηρίου. Ακολουθεί η βιβλιογραφική ανασκόπηση της ισχύουσας κατάστασης στα συστήματα ελέγχου των κτηρίων και της ενσωμάτωσης αλγορίθμων προσαρμοστικής βελτιστοποίησης σε βασισμένα σε μοντέλα συστήματα ελέγχου.

2.1 Θερμική Μοντελοποίηση Κτηρίων

Τα λογισμικά θερμικής μοντελοποίησης κτηρίων διαφέρουν μεταξύ τους ανάλογα με το σκοπό της χρήσης τους, το περιβάλλον τους και τα υπολογιστικά μοντέλα που χρησιμοποιούν για την μελέτη της ενεργειακής συμπεριφοράς κάθε κτηρίου που μοντελοποιούν. Στόχος κάθε λογισμικού είναι να αναπτύξει, με όση το δυνατόν ακρίβεια, ένα θερμικό μοντέλο που θα προσεγγίζει την πραγματική θερμική συμπεριφορά του προς μελέτη κτηρίου. Ένα όσο το δυνατόν - ακριβές μοντέλο απαιτεί ακριβείς υπολογισμούς.

Ακριβείς υπολογισμοί μπορούν να γίνουν για :

- Θερμική μάζα
- Ηλιακά κέρδη
- Στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας
- Απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας
- Εσωτερικά θερμικά φορτία
- Κτηριακό κέλυφος και εξοπλισμό
- Καιρό
- Συστήματα θέρμανσης - ψύξης - κλιματισμού (HVAC)
- Εκπομπές ρυπογόνων ουσιών

Τα πιο διαδεδομένα λογισμικά προσομοίωσης είναι τα εξής:

1. BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics)
2. BSim (Danish Building Research Institute)
3. DeST (Designer's Simulation Toolkits)
4. DOE-2.1E (Department of Energy)
5. ECOTECT
6. Ener-Win
7. Energy Express
8. Energy-10
9. EnergyPlus
10. eQUEST
11. ESP-r
12. HAP (Hourly Analysis Program)
13. HEED
14. IDA ICE (Indoor Climate and Energy)
15. IES<VE> (<Virtual Environment>)
16. PowerDomus
17. SUNREL
18. Tas
19. TRACE (Trane Air Conditioning Economics)
20. TRNSYS (Transient Systems Simulation)

Στα πλαίσια μιας μελέτης που πραγματοποιήθηκε το 2005 [6], τα παραπάνω λογισμικά προσομοίωσης συγκρίνονται ως προς την ικανότητα τους να μοντελοποιήσουν τα γενικά χαρακτηριστικά μοντελοποίησης, τα φορτία των θερμικών ζωνών, το κέλυφος του κτηρίου, το φυσικό και ηλιακό φωτισμό, τον αερισμό, τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τον ηλεκτρικό εξοπλισμό, τα συστήματα HVAC, τις εκπομπές ρυπογόνων ουσιών στο περιβάλλον, τη δυνατότητα παροχής μετεωρολογικών δεδομένων, την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, τις διεπαφές χρηστών, και την ικανότητα τους να συνδεθούν με άλλα προγράμματα.

Όμως, τα τελευταία χρόνια παράγοντες όπως,

- η αυξανόμενη ανάγκη της χρήσης λογισμικών προσομοίωσης για την πραγματοποίηση ενεργειακών μελετών,

- η προσπάθεια ενσωμάτωσης των θερμικών μοντέλων στην διαδικασία ανάπτυξης αποφάσεων ελέγχου για τα αυτοματοποιημένα συστήματα των κτηριακών εγκαταστάσεων,
- η αύξηση του ανταγωνισμού και
- η ταχεία εξέλιξη της τεχνολογίας

έχουν συντελέσει σε μια επιτυχή, συνεχή βελτίωση των παραπάνω λογισμικών. Συνεπώς, ενημερώνουμε τον αναγνώστη ο οποίος θα ανατρέξει στην προαναφερόμενη μελέτη ότι, οι δυνατότητες μοντελοποίησης διαφόρων στοιχείων της ενεργειακής θεώρησης του κτηρίου έχουν αυξηθεί.

Αναφορικά, το λογισμικό που φαίνεται να συνεχίζει να υπερέχει σε εύρος δυνατοτήτων είναι το EnergyPlus. Το TRNSYS [12] επίσης αποτελεί ένα αξιόλογο και εφοδιασμένο με πολλές δυνατότητες λογισμικό, κάποιες απ' τις οποίες είναι προαιρετικές ή θα πρέπει ο ενδιαφερόμενος μελετητής να τις αγοράσει ή να τις προμηθευτεί από τις βιβλιοθήκες του. Αποτελεί μια εμπορική λύση, ευρέως χρησιμοποιούμενη, η οποία θεωρείται από πολλούς (ειδικά επαγγελματίες) ως πρότυπο για την προσομοίωση κτηρίων. Ωστόσο, το χαρακτηριστικό στο οποίο υπερέχει αισθητά έναντι των άλλων λογισμικών είναι η ικανότητα προσομοίωσης πληθώρας συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αντίθετα, υστερεί σε ότι αφορά τις εκπομπές ρύπων έναντι του EnergyPlus, το οποίο είναι πλήρως εφοδιασμένο με υπολογιστικά μοντέλα για το θέμα αυτό. Επίσης υστερεί και σε θέματα ελέγχου φυσικού φωτισμού. Όσον αφορά στα συστήματα CAD, το TRNSYS μπορεί να εισάγει (και όχι να εξάγει) γεωμετρία μόνο από το πρόγραμμα SIMCAD. Το EnergyPlus, μπορεί να εξάγει γεωμετρίες σε αρχεία DXF. Ακόμα, μπορεί να εισάγει ή να εξάγει γεωμετρία από/με το DOE-2.1E και το BLAST. Άλλα προγράμματα, όπως το HAP, μπορούν να εισάγουν γεωμετρία από συστήματα CAD μέσω του προτύπου gbXML. Για τον υπολογισμό της μετάδοσης θερμότητας από το έδαφος, το TRNSYS θα πρέπει να εφοδιαστεί με πρόσθετα στοιχεία από τις βιβλιοθήκες του (TESS libraries), ενώ το EnergyPlus εκτελεί 2D, 3D υπολογισμούς που βασίζονται σε ενσωματωμένες υπορουτίνες. Οι προσομοιώσεις που αφορούν ροή αέρα ή διήθηση στο TRNSYS όπως επίσης και μοντελοποίηση συγκεντρώσεων CO₂, είναι προαιρετικές και μπορούν να γίνουν με τα στοιχεία CONTAM ή COMIS (συμπεριλαμβάνεται στο επίσης προαιρετικό πακέτο TRN-Flow). Η διαθεσιμότητα μεγάλου πλήθους δεδομένων καιρού για διάφορες περιοχές είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα των δύο προγραμμάτων. Τέλος, μια βασική διαφορά μεταξύ των δύο υπολογιστικών πακέτων είναι ότι στο EnergyPlus γίνεται λεπτομερής υπολογισμός των επιδράσεων της ακτινοβολίας, κάτι το οποίο έχει εμφανιστεί μόνο πρόσφατα στη νέα έκδοση του TRNSYS.

2.2 Στρατηγικές Ελέγχου και Προσαρμοστική Βελτιστοποίηση

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει αναπτυχθεί, επεκταθεί και αξιολογηθεί μια πληθώρα μεθοδολογιών συστημάτων Βελτιστοποίησης και Ελέγχου Κτηρίων (BEK), οι οποίες αποσκοπούν στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτηριακών εφαρμογών. Τα συστήματα BEK καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών σχεδίων και χρήσεων κτηρίων, καθώς επίσης και ποικίλων στοιχείων αυτόματου και χειροκίνητου-ελέγχου ενεργειακής-επίδρασης (π.χ. σύστημα κλιματισμού, εξαερισμός και σκίαση, θέρμανση πατωμάτων, κ.λπ.). Η πλειοψηφία αυτών των συστημάτων υιοθετεί τη βραχυπρόθεσμη βελτιστοποίηση και στρατηγικές ελέγχου: με βάση

τις τρέχουσες — ή, στην καλύτερη περίπτωση, βραχυπρόθεσμα μελλοντικά προβλεπόμενες — συνθήκες εντός του κτηρίου και τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες, τροποποιούν τις καταστάσεις των στοιχείων που επηρεάζουν την ενεργειακή συμπεριφορά του κτηρίου, σε μια προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί η τρέχουσα συνολική ενέργεια που καταναλώνεται στο κτήριο. Εκτός από τη βραχυπρόθεσμη βελτιστοποίηση, η πλειοψηφία των υπαρχόντων συστημάτων BEK χαρακτηρίζεται από τρία πρόσθετα μειονεκτήματα:

1. Στη πλειοψηφία τους είναι βασισμένα σε δεδομένα, χρησιμοποιώντας κάποια μέθοδο στατιστικής παλινδρόμησης [1, 4, 16, 9, 11] με αποτέλεσμα να έχουν περιορισμένη γενικότητα.
2. Η πλειοψηφία των συστημάτων BEK μεθοδολογιών επικεντρώνεται σε βελτιστοποίηση και έλεγχο μονάχα ενός υποσυστήματος (για παράδειγμα βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος κλιματισμού, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα συστήματα συμπαγωγής ενέργειας, η ψύξη με μηχανικό εξαερισμό, ο φυσικός αερισμός, κ.λπ.).
3. Σχεδόν όλες οι υπάρχουσες μεθοδολογίες BEK απαιτούν μια επίπονη και μερικές φορές αδιάκοπη διαδικασία ρύθμισης (ακριβής-καθορισμός) μετά από την αρχική ανάπτυξη του συστήματος BEK [10, 11, 26]. Μια τέτοια διαδικασία ρύθμισης, που εκτελείται χαρακτηριστικά από πεπειραμένους μηχανικούς — γεγονός που τα καθιστά μη βιώσιμα οικονομικά και ιδιαίτερα — δεν εγγυάται ότι το σύστημα θα φθάσει σε μια αποτελεσματική απόδοση μετά από την ολοκλήρωση της διαδικασίας ρύθμισης. Υπάρχουν διάφορες αναφερθείσες περιπτώσεις, όπου ακόμα και μετά από μια παρατεταμένη διαδικασία ρύθμισης, η γενική βελτιστοποίηση και το σύστημα ελέγχου απέτυχε να παραγάγει σημαντική αποταμίευση ενέργειας, σε σύγκριση με την περίπτωση που δεν υπάρχει σύστημα ελέγχου [14]. Επιπλέον, η εξάρτηση της απόδοσης του συστήματος BEK από διάφορες αβεβαιότητες (καιρικές συνθήκες και συμπεριφορά των ενοίκων) καθιστά τη γενική διαδικασία ρύθμισης λίγο πολύ ανώφελη, εκτός αν αυτή εκτελείται σε καθημερινή βάση: χαρακτηριστικά, μετά από την ολοκλήρωση της διαδικασίας ρύθμισης, η απόδοση των συστημάτων BEK επιδεινώνεται εξαιτίας των καιρικών αλλαγών, της επιρροής των ενοίκων στην απόδοση του συστήματος BEK (που οφείλεται π.χ. στο ότι ο αριθμός ενοίκων έχει αυξηθεί ή έχει μειωθεί σε σύγκριση με αυτόν κατά τη διάρκεια της ρύθμισης, κ.λπ.) καθώς και λόγω των μικρών τροποποιήσεων στην υποδομή του κτηρίου.

Η δυσκολία στην ανάπτυξη αποτελεσματικών συστημάτων BEK έγγυται στη δυσκολία μέτρησης και σύγκρισης της απόδοσης των συστημάτων αυτών. Ανεξαρτήτως της στρατηγικής ελέγχου που επιλέγεται, η προσαρμοστική διαδικασία ρύθμισης (fine-tuning) των παραμέτρων του συστήματος BEK αποτελεί προϋπόθεση για μια καλή απόδοση δεδομένων των αβεβαιοτήτων.

Προσαρμοστικά νευρωνικά δίκτυα (adaptive neural networks) και ασαφείς τεχνικές (fuzzy techniques) έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη αποτελεσματικών συστημάτων BEK, αλλά έχουν αποτύχει να αντιμετωπίσουν την υψηλή μεταβλητότητα στη συμπεριφορά του κτηρίου. Συνεπώς, δεν εγγυώνται ότι η διαδικασία ρύθμισης θα καταλήξει σε μια αποδεκτά καλή στρατηγική ελέγχου ενώ παράλληλα δεν λαμβάνουν υπόψη την θερμική άνεση των ενοίκων κατά τη διάρκεια τις διαδικασίας αυτής.

Οι αλγόριθμοι προσαρμοστικής βελτιστοποίησης παρέχουν ίσως μια ελπιδοφόρα προσέγγιση για την ανάπτυξη αποδοτικών συστημάτων BEK. Ένας αλγόριθμος προσαρμοστικής βελτιστοποίησης είναι και ο Adaptive Fine-Tuning (AFT), ο οποίος παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4 και εφαρμόζεται στα πειράματα 2 έως 4 του κεφαλαίου 6. Ο AFT έχει δοκιμαστεί και επιτύχει σε πλήθος προβλημάτων, ως ένα on-line εργαλείο βελτιστοποίησης. Οι κύριες ιδιότητες του AFT συνοψίζονται ως εξής:

- εγγυάται τη σύγκλιση σε μια (τοπικά) βέλτιστη στρατηγική ελέγχου, ακόμα και σε μεγάλης κλίμακας κτήρια και παρά την ύπαρξη αβεβαιοτήτων.
- μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε κτήριο, ανεξαρτήτως των αρχιτεκτονικών διαφορών, μεγέθους, πολυπλοκότητας των εγκατεστημένων ενεργειακών συστημάτων.
- μπορεί ευθέως να ενσωματώσει τις ανθρώπινες απαιτήσεις και τους ανθρώπινους περιορισμούς.
- η θερμική άνεση και η συνολική απόδοση, μονίμως διατηρούνται σε αποδεκτό φάσμα κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων, καθώς μετριοούνται με σχετικούς δείκτες για τους οποίους ορίζεται ένα αποδεκτό διάστημα τιμών.

Να σημειωθεί ότι, η ανάπτυξη ενός υψηλής ακρίβειας θερμικού μοντέλου, που λειτουργεί ως υποκατάστατο του πραγματικού κτηρίου, αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για την αποτελεσματική χρήση κάθε αλγορίθμου προσαρμοστικής βελτιστοποίησης.

Κεφάλαιο 3

Μοντελοποίηση στο EnergyPlus

Το EnergyPlus είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης σχεδιασμένο για τη μοντελοποίηση κτηρίων και των συναφών συστημάτων θέρμανσης, αερισμού και κλιματισμού (HVAC systems). Αποτελεί μια μηχανή προσομοίωσης καθώς σχεδιάστηκε με σκοπό να λειτουργεί ως στοιχείο ενός συνόλου προγραμμάτων στο οποίο περιλαμβάνεται και ένα φιλικό προς τον χρήστη γραφικό περιβάλλον διεπαφής για την περιγραφή του κτηρίου. Ωστόσο, μπορεί να λειτουργήσει και αυτόνομα, ανεξάρτητα από το προαναφερόμενο σύνολο.

3.1 Υπολογιστικά μοντέλα στο EnergyPlus

Η δυναμική συμπεριφορά κάθε κτηρίου οφείλεται στο γεγονός ότι το κτήριο αυτό καθ' αυτό επηρεάζεται τόσο από εσωτερικούς όσο και από εξωτερικούς παράγοντες που επιδρούν στο ενεργειακό ισοζύγιο και στο ισοζύγιο μάζας του κτηρίου. Στοχεύοντας στη μοντελοποίηση αυτής της δυναμικής συμπεριφοράς, το θερμικό μοντέλο πρέπει να ενσωματώνει όλους τους μηχανισμούς μετάδοσης ενέργειας και μάζας, εσωτερικά και εξωτερικά του κτηρίου [22].

3.1.1 Μετάδοσης θερμότητας με αγωγή διαμέσου του κελύφους

Ο μηχανισμός της αγωγής αναφέρεται στη μετάδοση ενέργειας από σωματίδια υψηλότερης προς σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας, δια της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης. Στον κτηριακό τομέα, ο μηχανισμός αυτός περιγράφει την χρονικά μεταβαλλόμενη μετάδοση θερμότητας μέσα από το κέλυφος του κτηρίου. Η ταχύτητα με την οποία η μετάδοση αυτή πραγματοποιείται εξαρτάται από τη θερμική αντίσταση και τη θερμοχωρητικότητα των στρωμάτων υλικού που αποτελούν την διαστρωμάτωση του κελύφους.

Το EnergyPlus χρησιμοποιεί αναλυτικές εξισώσεις προκειμένου να υπολογίσει τη μετάδοση θερμότητας με αγωγή. Η βασική μορφή των εξισώσεων αυτών είναι η εξής:

$$\dot{q}_i = \sum_{k=0}^{n_b} b^k T_o^k - \sum_{k=0}^{n_c} c^k T_i^k + \sum_{k=1}^{n_d} d^k \dot{q}_i^k \quad (3.1)$$

$$\dot{q}_o = \sum_{k=0}^{n_a} a^k T_o^k - \sum_{k=0}^{n_b} b^k T_i^k + \sum_{k=1}^{n_d} d^k \dot{q}_o^k \quad (3.2)$$

T_i^k, T_o^k	η εσωτερική και η εξωτερική θερμοκρασία αντίστοιχα τη χρονική στιγμή $t - k\Delta t$
q_i^k, q_o^k	η ροή θερμότητας στην εσωτερική, εξωτερική επιφάνεια αντίστοιχα τη στιγμή $t - k\Delta t$
a^k	οι συντελεστές της εξίσωσης για τις εξωτερικές επιφάνειες, a^0, \dots, a^{n_a}
b^k	οι συντελεστές της εξίσωσης για τις ενδιάμεσες επιφάνειες, b^0, \dots, b^{n_b}
c^k	οι συντελεστές της εξίσωσης για τις εσωτερικές επιφάνειες, c^0, \dots, c^{n_c}
d^k	οι συντελεστές της εξίσωσης για τις ροές θερμότητας, d^0, \dots, d^{n_d}

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι σε περιπτώσεις πολύπλοκων μοντέλων όταν επιλέγουμε χρονικό βήμα μικρότερο του εξαλέπτου δημιουργούνται προβλήματα αστάθειας της προσομοίωσης.

Επιπλέον, το EnergyPlus επιτρέπει τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών προκειμένου να υπολογίσει τη μετάδοση θερμότητας με αγωγή. Ωστόσο, το γεγονός ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών αυξάνει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο της προσομοίωσης, καθιστά τη χρήση της μεθόδου αυτής απαραίτητη μόνο σε περιπτώσεις όπου το κέλυφος του κτηρίου αποτελείται από υλικά αλλαγής φάσης των οποίων, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και η ειδική θερμοχωρητικότητα εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Για την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών το EnergyPlus χρησιμοποιεί μια πεπλεγμένη (implicit) μέθοδο επίλυσης. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την μέθοδο αυτή είναι οι εξής:

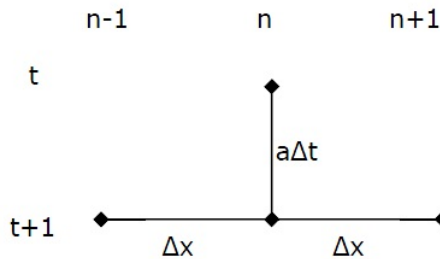
$$\frac{\rho c_p}{\lambda \Delta t} (T_n^{t+1} - T_n^t) = \frac{1}{\Delta x^2} (T_{n-1}^{t+1} - 2T_n^{t+1} + T_{n+1}^{t+1}) \quad (3.3)$$

$$h_n = f(T_n) \quad (3.4)$$

$$c_p = \frac{h_n^{t+1} + h_n^t}{T_n^{t+1} + T_n^t} \quad (3.5)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_1 (T_n - 20) \quad (3.6)$$

T_n^t	θερμοκρασία στον κόμβο n τη χρονική στιγμή t
h_n^t	ενθαλπία στον κόμβο n τη χρονική στιγμή t
c_p	ειδική θερμοχωρητικότητα
λ	συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
λ_0	συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στους 20°C
λ_1	μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ανά ένα βαθμό απόκλισης της θερμοκρασίας από τους 20°C .



Σχήμα 3.1: Σχήμα διακριτοποίησης για τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών του EnergyPlus

Το πλέγμα που χρησιμοποιείται δημιουργείται αυτόματα από το πρόγραμμα. Ένα Gauss Seidel σχήμα χρησιμοποιείται για την ανανέωση των θερμοκρασιών σε κάθε κόμβο. Σε κάθε επανάληψη υπολογίζονται οι ενθαλπίες και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της θερμοχωρητικότητας.

3.1.2 Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή σε εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες

Ο δεύτερος μηχανισμός αναφέρεται στη μετάδοση θερμότητας μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός κινούμενου ρευστού. Στον κτηριακό τομέα, η συναγωγή εντοπίζεται στα εσωτερικά και εξωτερικά επιφανειακά στρώματα του κελύφους του κτηρίου. Έτσι, το EnergyPlus μοντελοποιεί τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή διαμέσου εσωτερικών και τη συναγωγή εξωτερικών επιφανειών χωριστά.

Όσον αφορά στις εσωτερικές επιφάνειες το πρόγραμμα διαθέτει πέντε διαφορετικά μοντέλα συναγωγής. Ο κοινός στόχος των μοντέλων αυτών είναι να υπολογίσουν το συντελεστή συναγωγής σε κάθε επιφάνεια και το περιβάλλοντά της αέρα.

- Detailed: Ο συντελεστής συναγωγής $h_{conv,in}$ δίνεται από τη σχέση:

$$h_{conv,in} = A(T_{surf} - T_{air})^B \quad (3.7)$$

$h_{conv,in}$	συντελεστής εσωτερική συναγωγής
T_{surf}	θερμοκρασία επιφάνειας
T_{air}	θερμοκρασία αέρα ζώνης

Στο μοντέλο αυτό οι παράμετροι A , B εξαρτώνται από τον προσανατολισμό της επιφάνειας και την κατεύθυνση της ροής της θερμότητας.

- Simple: Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί σταθερούς συντελεστές συναγωγής, ανάλογα με το προσανατολισμό κάθε επιφάνειας.
- CIBSE: Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί σταθερούς συντελεστές συναγωγής σύμφωνα με τις πρότυπες τιμές του CIBSE.
- Ceiling diffuser: Πρόκειται για μοντέλο εξαναγκασμένης συναγωγής που συσχετίζει το συντελεστή συναγωγής με το ρυθμό αλλαγής αέρα (ACH) μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$h_{conv,in} = A + B \cdot ACH^C \quad (3.8)$$

$h_{conv,in}$	συντελεστής εσωτερική συναγωγής
ACH	ρυθμός αλλαγής αέρα

Οι παράμετροι A , B , C εξαρτώνται από τον προσανατολισμό της επιφάνειας.

- Cavity: Το συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που στο κτήριο που μοντελοποιείται υπάρχει κάποιος τοίχος Trombe.

Οι συντελεστές συναγωγής για τις εξωτερικές επιφάνειες και τον περιβάλλοντα αέρα μπορούν να υπολογιστούν μέσω έξι διαφορετικών μοντέλων.

- Detailed: Στο αναλυτικό μοντέλο η συναγωγή διακρίνεται σε εξαναγκασμένη και σε φυσική συναγωγή.

$$h_{conv,forc,ext} = 2.537W_f R_f \left(\frac{Pv_z}{A} \right)^{1/2} \quad (3.9)$$

$h_{conv,forc,ext}$	συντελεστής εξαναγκασμένης εξωτερικής συναγωγής
W_f	$W_f = 1$ για εκτεθειμένες στον άνεμο και $W_f = 0.5$ για υπήμενες επιφάνειες
R_f	συντελεστής τραχύτητας της επιφάνειας
v_s	τοπική ταχύτητα του ανέμου
A	εμβαδόν της επιφάνειας
P	περίμετρος της επιφάνειας.

$$h_{conv,nat,ext} = B(|T_{surf} - T_{air}|)^{1/3} \quad (3.10)$$

$h_{conv,nat,ext}$	συντελεστής φυσικής εξωτερικής συναγωγής
T_{surf}	θερμοκρασία επιφάνειας
T_{air}	εξωτερική θερμοκρασία αέρα

Στο μοντέλο αυτό η παράμετρος B εξαρτάται από την κλίση της επιφάνειας και τη κατεύθυνση της ροής της θερμότητας.

- Simple: Πρόκειται για το μοναδικό μοντέλο του EnergyPlus στο οποίο υπολογίζεται ένας ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία. Όσον αφορά στην ακτινοβολία, ο συντελεστής αυτός εμπεριέχει την ακτινοβολία προς τον ουρανό, το έδαφος και τον περιβάλλοντα αέρα, κάθε εξωτερικής επιφάνειας. Ο συντελεστής συναγωγής - ακτινοβολίας, για το συγκεκριμένο μοντέλο, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την τραχύτητα της επιφάνειας και την ταχύτητα του περιβάλλοντα ανέμου.

$$h_{ext} = A + Bv_z + Cv_z^2 \quad (3.11)$$

h_{ext}	συντελεστής εξωτερικής συναγωγής - ακτινοβολίας
v_s	τοπική ταχύτητα του ανέμου

Οι παράμετροι A , B , C εξαρτώνται από την τραχύτητα και τις ιδιότητες ακτινοβολίας της επιφάνειας.

- TARP: Στην τρέχουσα έκδοση του EnergyPlus το μοντέλο TARP είναι πανομοιότυπο του Detailed.
- BLAST: Στην τρέχουσα έκδοση του EnergyPlus το μοντέλο BLAST είναι πανομοιότυπο του Detailed.
- MoWiTT: Το συγκεκριμένο μοντέλο στηρίζεται σε μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στο Mobile Window Thermal Test [27]. Βάσει των μετρήσεων αυτών έχει εξαχθεί μια σχέση η οποία βρίσκει εφαρμογή σε πολύ ομαλές (πολύ μικρός συντελεστής τραχύτητας), κατακόρυφες επιφάνειες (π.χ. παράθυρα). Σε περιπτώσεις που το προς μελέτη κτήριο αποτελείται από επιφάνειες με υψηλό συντελεστή τραχύτητας και με πολύπλοκη γεωμετρία, το μοντέλο αυτό δημιουργεί ανακρίβειες και αστάθεια στη προσομοίωση.

- DOE-2: Πρόκειται για μοντέλο το οποίο αποτελεί συνδυασμό των μοντέλων BLAST και MoWiTT.

Όλα τα μοντέλα υπολογισμού της μετάδοσης θερμότητας στις εξωτερικές επιφάνειες του κελύφους συνυπολογίζουν την επίδραση της βροχής. Σε περιόδους που τα δεδομένα καιρού μας πληροφορούν για βροχοπτώσεις, οι επιφάνειες που είναι εκτεθειμένες στον άνεμο θεωρούνται υγρές. Για τις περιόδους αυτές, ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας των εν λόγω επιφανειών τίθεται ίσος με $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ και θεωρείται ότι οι επιφάνειες αυτές είναι εκτεθειμένες σε εξωτερική θερμοκρασία υγρού βολβού αντί της θερμοκρασίας ξηρού βολβού.

Επιπλέον, το EnergyPlus παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει σταθερούς συντελεστές ή χρονικά μεταβαλλόμενους συντελεστές βάσει κάποιου χρονοδιαγράμματος που ο ίδιος έχει επιλέξει.

3.1.3 Ακτινοβολία των εσωτερικών επιφανειών

Οι εσωτερικές επιφάνειες ενός δωματίου εκπέμπουν ακτινοβολία σύμφωνα με τη θερμοκρασία τους και την ικανότητα εκπομπής τους. Η ροή ενέργειας, που η ακτινοβολία αυτή επιφέρει, εξαρτάται από τη σχετική θέση και τις ιδιότητες αντανάκλασης των επιφανειών. Για τον υπολογισμό της ροής θερμότητας που οφείλεται στην ακτινοβολία, το EnergyPlus υποθέτει πως όλες οι εσωτερικές επιφάνειες είναι γκριζες επιφάνειες. Μια επιφάνεια θεωρείται γκριζα όταν η απορροφητικότητα της επιφάνειας αυτής είναι ίση με την ικανότητα εκπομπής της. Η ροή θερμότητας με ακτινοβολία υπολογίζεται ως εξής:

$$q_{LW,i,j} = A_i F_{i,j} (T_i^4 - T_j^4) \quad (3.12)$$

$q_{LW,i,j}$	ροή θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ των επιφανειών i και j
T_i, T_j	θερμοκρασία i και της j επιφάνειας αντίστοιχα
A_i	εμβαδόν της επιφάνειας i
$F_{i,j}$	συντελεστής ανταλλαγής ακτινοβολίας μεταξύ της i και της j επιφάνειας

3.1.4 Ακτινοβολία των εξωτερικών επιφανειών και του περιβάλλοντα χώρου

Αυτή η διαδικασία περιγράφει τη ανταλλαγή της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος μεταξύ των εξωτερικών επιφανειών του κελύφους του κτηρίου και του όγκου αέρα που περιβάλλει το κτήριο, των περιβαλλόντων κτηρίων και του εδάφους. Οι παράγοντες που επιδρούν σε αυτήν την διαδικασία είναι η αποτελεσματική θερμοκρασία ουρανού ως συνάρτηση της κάλυψης σύννεφων, η θερμοκρασία και η σχετική θέση των περιβαλλόντων στοιχείων (π.χ. γειτονικά κτήρια), η θερμοκρασία και η σχετική θέση του εδάφους, και οι θερμοκρασίες των εξωτερικών επιφανειών του κτηρίου.

$$q_{LW,o} = \varepsilon \sigma f_{ground} (T_{surf}^4 - T_{ground}^4) + \varepsilon \sigma f_{sky} (T_{surf}^4 - T_{sky}^4) + \varepsilon \sigma f_{air} (T_{surf}^4 - T_{air}^4) \quad (3.13)$$

$q_{LW,i,j}$	ροή θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ των επιφανειών i και j
T_{surf}	θερμοκρασία επιφάνειας
T_{air}	εξωτερική θερμοκρασία αέρα
T_{ground}	θερμοκρασία εδάφους
T_{sky}	αποτελεσματική θερμοκρασία ουρανού
f_{sky}	ουρανού
f_{air}	αέρα
f_{ground}	εδάφους
ε	ικανότητα εκπομπής
σ	σταθερά των Stefan και Boltzman.

3.1.5 Η Ηλιακή Ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία ασκεί σημαντική επίδραση στην ενεργειακή ισορροπία του κτηρίου. Ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια αδιαφανή εξωτερική επιφάνεια θα απορροφηθεί και θα διαβιβαστεί μερικώς στις εσωτερικές επιφάνειες του κελύφους. Η θερμοκρασία μιας εξωτερικής επιφάνειας, που εκτίθεται στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία, μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερη από την περιβαλλοντική θερμοκρασία και μπορεί έτσι να ασκήσει σημαντική επίδραση στην μετάδοση θερμότητας.

Τα ηλιακά κέρδη μιας εξωτερικής επιφάνειας είναι το άθροισμα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, της διάχυτης ακτινοβολίας από τον ουρανό και της διάχυτης ακτινοβολίας από το έδαφος.

$$q_{so} = a \left(I_{beam} \cos(\theta) \frac{A_s}{A} + I_{sky} F_{ss} + I_{ground} F_{sg} \right) \quad (3.14)$$

a	ηλιακή απορροφητικότητα της επιφάνειας
A	εμβαδόν της επιφάνειας
A_s	εμβαδόν του μέρους επιφάνειας που φωτίζεται από τον ήλιο
θ	γωνία πρόσπτωσης
I_{beam}	ένταση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας
I_{sky}, I_{ground}	ένταση της διάχυτης ακτινοβολίας από ουρανό και έδαφος
F_{ss}, F_{sg}	συντελεστής γωνίας μεταξύ επιφάνειας και ουρανού, επιφάνειας και εδάφους

Το μέγεθος των ηλιακών κερδών σε ένα κτήριο εξαρτάται σημαντικά από τη σκίαση των επιφανειών του. Η σκίαση μπορεί να προκληθεί είτε από μακρινά εμπόδια, όπως τα δέντρα και τα γειτονικά κτήρια, είτε λόγω κοίλης γεωμετρίας του κτηρίου είτε μέσω μηχανισμών σκίασης του κτηρίου (π.χ. περσίδες). Δεδομένου ότι το EnergyPlus χρησιμοποιεί μια πλήρη γεωμετρική περιγραφή του κτηρίου καθώς και των στοιχείων του περιβάλλοντα χώρου, η σκίαση του κτηρίου μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια για κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης και σύμφωνα με τη τρέχουσα θέση του ήλιου.

Το EnergyPlus διαθέτει τρία διαφορετικά μοντέλα για να συνυπολογίσει τη σκίαση στην εκτίμηση των ηλιακών κερδών από τις εξωτερικές επιφάνειες.

- **Minimal Shadowing:** Καμία εξωτερική σκίαση δεν υπολογίζεται, εκτός από τις σκιές που τα παράθυρα και οι πόρτες αποκαλύπτουν.

- **Full Exterior:** Σκιάσεις στις εξωτερικές επιφάνειες που προκαλούνται από προσαρτημένα στοιχεία σκίασης στις εξωτερικές επιφάνειες όλων των ζωνών υπολογίζονται.
- **Full Exterior with reflections:** Αυτό το μοντέλο υπολογίζει τις σκιάσεις που προκαλούνται από τα στοιχεία σκίασης, τα στοιχεία του περιβάλλοντα χώρου και το έδαφος.

Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που θα διαπεράσει τις διαφανείς επιφάνειες του κτηρίου μπορεί να απορροφηθεί μερικώς και να αντανakλαστεί απ' τις εσωτερικές επιφάνειες ή μπορεί να αφήσει τη ζώνη μέσω μιας διαφανούς επιφάνειας. Το EnergyPlus διαθέτει δύο διαφορετικά μοντέλα για να υπολογίσει την κατανομή της άμεσης ηλιακής ενέργειας στο εσωτερικό του κελύφους.

- **Minimal Shadowing:** Το μοντέλο αυτό θεωρεί πως όλη η άμεση ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στο δάπεδο, όπου και μερικώς απορροφάται σύμφωνα με την ηλιακή απορροφητικότητα.
- **Full Interior:** Το πρόγραμμα υπολογίζει την άμεση ακτινοβολία σε κάθε εσωτερική επιφάνεια σύμφωνα με την κατεύθυνση της άμεσης ακτινοβολίας και τη γεωμετρία του κτηρίου. Η άμεση ακτινοβολία θεωρείται ότι κατανέμεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια. Όπως και στο Minimal Shadowing, η άμεση ακτινοβολία απορροφάται μερικώς. Αυτή η επιλογή είναι μόνο διαθέσιμη για τα κυρτά κτήρια.

3.1.6 Θερμοκρασία Αέρα Θερμικής Ζώνης

Το EnergyPlus διαθέτει δύο διαφορετικά μοντέλα για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του αέρα σε κάθε θερμική ζώνη:

- **Well mixed:** Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί ένα κόμβο θερμοκρασίας ανά ζώνη. Ο κόμβος αέρα συνδέεται με τους κόμβους επιφάνειας ζώνης μέσω της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή.
- **Dynamic gradient:** Αυτή η επιλογή επιτρέπει τη μοντελοποίηση στρωμάτων θερμοκρασίας μέσα σε μια ζώνη, τα οποία ορίζονται με τον καθορισμό μιας κλίσης θερμοκρασίας. Η κλίση μεταβάλλεται δυναμικά ανάλογα με έναν από οι ακόλουθους πέντε παράγοντες:
 1. εξωτερική θερμοκρασία
 2. εσωτερική θερμοκρασία
 3. διαφορά εσωτερικής - εξωτερικής θερμοκρασίας
 4. φορτίο θέρμανσης
 5. φορτίο ψύξης

3.1.7 Φυσικός Αερισμός

Αερισμός είναι η διήθηση του εξωτερικού αέρα στο εσωτερικό του κτηρίου, η οποία πραγματοποιείται με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι η διήθηση του εξωτερικού αέρα μέσω των ρωγμών, χαραμιάδων και του πορώδους των επιφανειών των κατασκευαστικών υλικών της εξωτερικής τοιχοποιίας, του δαπέδου και της οροφής. Ο δεύτερος τρόπος είναι

μέσω των ανοιγμάτων του κτηρίου (παράθυρα, πόρτες). Ο αερισμός προκαλείται από τη διαφορά πίεσης και την ύπαρξη επιφανειακών δυνάμεων που προκαλούνται από θερμοκρασιακές διαφορές του αέρα.

Το EnergyPlus διαθέτει δύο διαφορετικά μοντέλα για την μοντελοποίηση του αερισμού:

- **Scheduled:** Στο μοντέλο αυτό καθορίζεται το μέγεθος της παροχής αέρα ανάλογα με τον όγκο της ζώνης ή ανάλογα με τις απαιτήσεις σε φρέσκο αέρα ανά άτομο και ορίζεται μια μέγιστη τιμή εναλλαγών αέρα για τον υπολογισμό του ρυθμού διήθησης αέρα.
- **Calculated:** Αυτή η επιλογή μοντελοποιεί την αεροστεγανότητα του κτηρίου και εξάγει αποτελέσματα που αφορούν τη διήθηση του εξωτερικού αέρα με βάση τα ανοίγματα (παράθυρα, πόρτες) συνυπολογίζοντας τις ρωγμές και λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα του ανέμου και τη διαφορά πίεσης. Η ροή αέρα μεταξύ δύο κόμβων υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$\dot{V} = C(\Delta p)^n \quad (3.15)$$

\dot{V}	ογκομετρική ροή αέρα
C	συντελεστής ροής (εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα της ρωγμής/ του ανοίγματος)
Δp	διαφορά πίεσης μεταξύ δύο κόμβων
n	εκθέτης ροής (για τυρβώδη ροή $n = 0.5$, για στρωτή ροή $n = 1$)

Η διαφορά πίεσης μέσα από ένα άνοιγμα ή μια ρωγμή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση Bernoulli:

$$\Delta p = (p_n - p_m) + \frac{\rho}{2}(v_n^2 - v_m^2) + \rho g(z_n - z_m) \quad (3.16)$$

\dot{V}	ογκομετρική ροή αέρα
C	συντελεστής ροής (εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα του ανοίγματος/ρωγμής)
Δp	διαφορά πίεσης μεταξύ των κόμβων n και m
p_n, p_m	στατική πίεση στην είσοδο και στην έξοδο του ανοίγματος/ρωγμής
v_n, v_m	ταχύτητα αέρα στην είσοδο και στην έξοδο του ανοίγματος/ρωγμής
z_n, z_m	υψόμετρο στην είσοδο και στην έξοδο του ανοίγματος/ρωγμής
ρ	πυκνότητα του αέρα
g	επιτάχυνση βαρύτητας

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του EnergyPlus στη μοντελοποίηση του αερισμού είναι ότι σε περιπτώσεις μεγάλων οριζόντιων ανοιγμάτων αδυνατεί να περιγράψει με ακρίβεια τη ροή αέρα μέσα από αυτές. Σε αυτές τις περιπτώσεις, επιλέγουμε να θεωρήσουμε τα οριζόντια ανοίγματα ως διαφανείς επιφάνειες με υψηλό συντελεστή ροής λόγω ρωγμών.

3.1.8 Μετάδοση θερμότητας σε επιφάνειες επαπτόμενες του εδάφους

Στο EnergyPlus, η μετάδοση θερμότητας σε επιφάνειες επαπτόμενες του εδάφους μοντελοποιείται καθορίζοντας τις μηνιαίες θερμοκρασίες στο εξωτερικό στρώμα της διαστρωμάτωσης του δαπέδου. Ο καθορισμός των θερμοκρασιών αυτών είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μέσω δύο διαφορετικών προγραμμάτων:

- Slab Program

- Basement Program

Και τα δύο προγράμματα χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στις τρεις διαστάσεις προκειμένου να υπολογίσουν τις θερμοκρασίες αυτές. Η διαφορά τους έγκυται στο γεγονός ότι το πρόγραμμα Basement δεν υπολογίζει μόνο τη θερμοκρασία στο εξωτερικό στρώμα της διαστρωμάτωσης του δαπέδου άλλα και τη θερμοκρασία στο εξωτερικό στρώμα της διαστρωμάτωσης τοίχων οι οποίοι ανήκουν στο υπόγειο ενός κτηρίου. Η βασική παραδοχή και των δύο προγραμμάτων είναι ότι το σχήμα του κτηρίου είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο. Έτσι σε περιπτώσεις που το κτήριο που προσομοιώνεται περιγράφεται από ένα πολύπλοκο γεωμετρικό σχήμα, τότε αυτό ποροσεγγίζεται από ένα παρόμοιο ορθογώνιο.

3.1.9 Εσωτερικά Θερμικά Φορτία

Τα εσωτερικά θερμικά φορτία που προέρχονται από τα φώτα, τους ανθρώπους και λοιπό εξοπλισμό συχνά συμμετέχουν στο ενεργειακό ισοζύγιο κάθε θερμικής ζώνης (ανάλογα με το χρονοδιάγραμμα λειτουργίας τους). Το EnergyPlus διαθέτει μοντέλα υπολογισμού των θερμικών φορτίων ανάλογα με την πηγή τους.

- Lights: Τα θερμικά φορτία που προέρχονται από τον τεχνητό φωτισμό καθορίζονται με βάση τον τύπο του φωτιστικού. Έτσι, για κάθε τύπο φωτιστικού η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται πολλαπλασιάζεται με αντίστοιχες τιμές του ποσοστού εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (radiant fraction), του ποσοστού ορατής ακτινοβολίας (visible fraction) και του ποσοστού μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή. Το ποσοστό μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή δεν αποτελεί είσοδο για το μοντέλο αλλά υπολογίζεται βάσει της ακόλουθης σχέσης:

$$F_{conv} = 1.0 - F_{radiant} - F_{visible} \quad (3.17)$$

F_{conv}	ποσοστό μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή λόγω τεχνητού φωτισμού
$F_{radiant}$	ποσοστό εκπεμπόμενης ακτινοβολίας λόγω τεχνητού φωτισμού
$F_{visible}$	ποσοστό ορατής ακτινοβολίας λόγω τεχνητού φωτισμού

Το ποσοστό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εκφράζει το μέγεθος της θερμότητας που εισέρχεται στο χώρο μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους εξαιτίας της λειτουργίας τεχνητού φωτισμού. Όμοια, το ποσοστό της ορατής ακτινοβολίας εκφράζει το μέγεθος της θερμότητας που εισέρχεται στο χώρο μέσω ακτινοβολίας μικρού μήκους εξαιτίας της λειτουργίας τεχνητού φωτισμού.

- Equipment: Τα θερμικά φορτία που οφείλονται στη λειτουργία του ηλεκτρικού εξοπλισμού διακρίνονται σε θερμικά φορτία λόγω ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος και σε θερμικά φορτία λόγω μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή. Για το μοντέλο ορίζεται ο συντελεστής εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ο οποίος εκφράζει το ποσό της θερμότητας που εκλύεται από τον ηλεκτρικό εξοπλισμό ως ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Το υπόλοιπο ποσό της θερμότητας θεωρείται ότι μεταδίδεται με συναγωγή. Για παράδειγμα, έστω ότι η τιμή του συντελεστή αυτού είναι 0.1. Τότε το μοντέλο θεωρεί ότι το 10% της θερμότητας που οφείλεται στη λειτουργία του ηλεκτρικού εξοπλισμού διανέμεται στις εσωτερικές επιφάνειες μέσω ακτινοβολίας ενώ το 90% αυτής μεταφέρεται στον αέρα με συναγωγή.

- **People:** Η εκτίμηση των θερμικών φορτίων που οφείλονται στους ανθρώπους που εντοπίζονται στις ζώνες του κτηρίου σχετίζεται άμεσα με τον μεταβολικό τους ρυθμό και τον συντελεστή ένδυσής τους.
 - Ως μεταβολικός ρυθμός ορίζεται η θερμική ενέργεια που παράγει το ανθρώπινο σώμα με ένα συγκεκριμένο ρυθμό. Ο μεταβολικός ρυθμός καθορίζεται από το είδος της εργασίας ενώ μεταβάλλεται ανάλογα με το συντελεστή μεγέθους του ανθρώπινου σώματος. Σε αυτό το σημείο, η βασική παραδοχή του EnergyPlus είναι ότι η επιφάνεια ενός άντρα ισούται με 1.8 m^2 και η τιμή αυτή πολλαπλασιάζεται επί 0.85 για γυναίκες και 0.75 για παιδιά. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο μεταβολικός ρυθμός για διάφορες δραστηριότητες.

Πίνακας 3.1: Μεταβολικός ρυθμός παραγωγής θερμότητας για διάφορες δραστηριότητες

Δραστηριότητα	W/m^2
Υπνος	40
Καθιστική Εργασία	60
Μελέτη	55
Γράψιμο	60
Δακτυλογράφηση	65

Έστω για παράδειγμα ότι σε ένα δωμάτιο βρίσκεται ένας άντρας και μια γυναίκα, οι οποίοι εκτελούν καθιστική εργασία. Το θερμικό τους φορτίο υπολογίζεται ως εξής:

$$q = 1.8 \text{ m}^2 \cdot 60 \text{ W/m}^2 + 0.85 \cdot 1.8 \text{ m}^2 \cdot 60 \text{ W/m}^2$$

- Η ένδυση μειώνει της απώλεια θερμότητας από το ανθρώπινο σώμα προς το περιβάλλον. Το EnergyPlus χρησιμοποιεί το συντελεστή ένδυσης (Clo-Value) ο οποίος εκφράζει την αντίσταση της ένδυσης στην απώλεια θερμότητας.

Όπως και στο μοντέλο Equipment, το μοντέλο People χρησιμοποιεί ένα συντελεστή εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ο οποίος εκφράζει το ποσό της θερμότητας που εκλύεται από τους ανθρώπους ως ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Το υπόλοιπο ποσό της θερμότητας θεωρείται ότι μεταδίδεται με συναγωγή. Για παράδειγμα, έστω ότι η τιμή του συντελεστή αυτού είναι 0.1. Τότε το μοντέλο θεωρεί ότι το 10% της θερμότητας που οφείλεται στο μεταβολικό ρυθμό των ενοίκων διανέμεται στις εσωτερικές επιφάνειες μέσω ακτινοβολίας ενώ το 90% αυτής μεταφέρεται στον αέρα με συναγωγή.

3.1.10 Θερμική Άνεση

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι ερευνητές προσπαθούν να μοντελοποιήσουν την θερμική, φυσιολογική και ψυχολογική απόκριση των ανθρώπων στο περιβάλλον τους. Οι ερευνητές βάσει εμπειρίας έχουν κατέληξει στο ότι η απόκριση αυτή των ενοίκων ενός κτηρίου εξαρτάται από σωματικές, περιβαλλοντικές και ψυχολογικές μεταβλητές οι οποίες επιδρούν στη θερμική άνεση.

Υπάρχουν δύο σωματικές μεταβλητές οι οποίες επιδρούν στη θερμική άνεση των ενοίκων:

η θερμική αντίσταση του ρουχισμού (Clo-Value) και ο μεταβολικός ρυθμός. Ο μεταβολικός ρυθμός εκφράζεται σε W/A_{Du} όπου A_{Du} είναι η επιφάνεια του σώματος σε m^2 και υπολογίζεται μέσω της σχέσης,

$$A_{Du} = 0.202(\text{weight})^{0.425}(\text{height})^{0.725}. \quad (3.18)$$

Χρησιμοποιώντας την σχέση αυτή, η τιμή $1.8 m^2$ που όπως αναφέραμε εκφράζει την επιφάνεια ενός άντρα, περιγράφει ένα άτομο με βάρος 70 kg και ύψος 1.73 m.

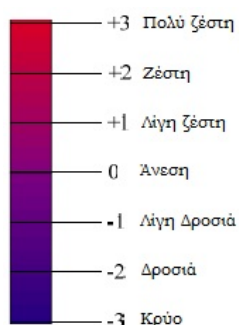
Οι περιβαλλοντικές μεταβλητές οι οποίες επιδρούν στη θερμική άνεση είναι:

- Θερμοκρασία αέρα
- Θερμοκρασία ακτινοβολίας
- Σχετική ταχύτητα αέρα
- Ατμοσφαιρική πίεση

Οι φυσιολογικές μεταβλητές οι οποίες επιδρούν στη θερμική άνεση είναι:

- Αισθητή θερμοκρασία
- Θερμοκρασία πυρήνα (κέντρο) του ανθρώπινου σώματος
- Ρυθμός εφίδρωσης
- Ξηρότητα του δέρματος
- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ του δέρματος και του εσωτερικού του σώματος

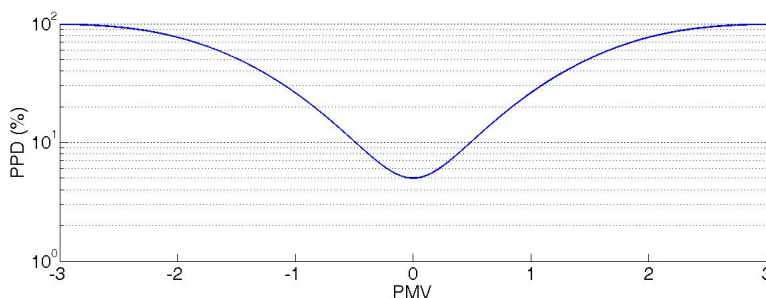
Ο ευρύτερα αποδεκτός δείκτης, που ποσοτικοποιεί τη θερμική αίσθηση των ανθρώπων, είναι η προβλεπόμενη μέση ψήφος (PMV - Predicted Mean Vote) [2]. Ο δείκτης PMV προβλέπει τη μέση ψήφο άνεσης ενός συνόλου ανθρώπων εκτεθειμένων στο ίδιο θερμικό περιβάλλον στη βαθμωτή κλίμακα του σχήματος που ακολουθεί [2].



Σχήμα 3.2: Επταβάθμια βαθμωτή κλίμακα θερμικής άνεσης σύμφωνα με τον Fanger [2]

Σχετιζόμενο με αυτόν το δείκτη είναι το προβλεπόμενο ποσοστό δυσαρεστημένων ανθρώπων (PPD - Predicted Percent of Dissatisfied people) που προσδιορίζει στοχαστικά (μέσω μιας εκθετικής συνάρτησης) όσους ψηφίζουν έξω από τις τρεις αποδεκτές βαθμίδες της κλίμακας (-1, 0 και +1). Ο δείκτης PPD υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3 [2]:

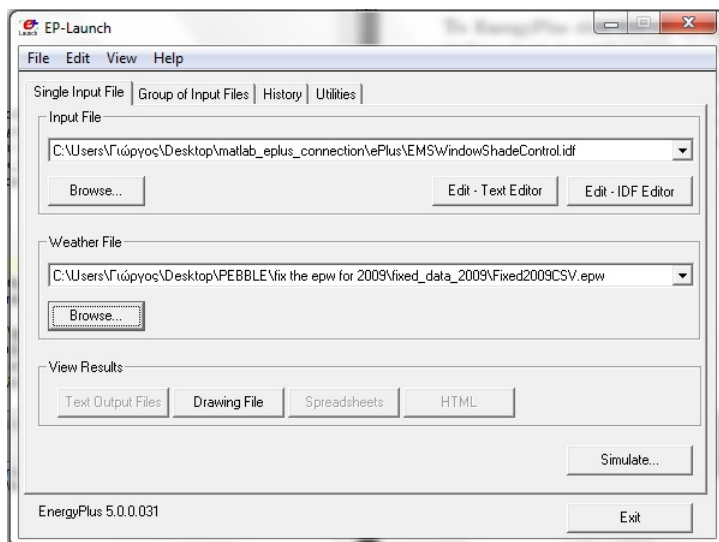
$$PPD = 100 - 95e^{-0.03353PMV^4 - 0.2179PMV^2} \quad (3.19)$$



Σχήμα 3.3: Συσχέτιση των δεικτών PPD, PMV

3.2 Ανάπτυξη του αρχείου IDF

Η εφαρμογή η οποία επιτρέπει στο χρήστη να μοντελοποιήσει το κτήριο στο EnergyPlus αυτόνομα ονομάζεται EP-Launch.



Σχήμα 3.4: EP-Launch

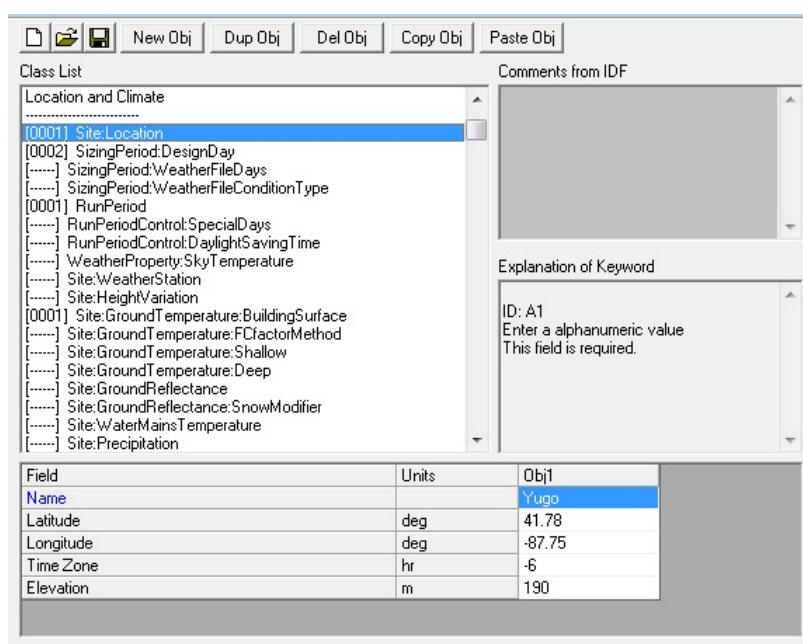
Η προσομοίωση του κτηρίου στο EP-Launch απαιτεί την δημιουργία δύο αρχείων εισόδου:

το αρχείο που περιγράφει το κτήριο και το σύστημα HVAC (IDF: Input Data File) και το αρχείο καιρού (EPW: EnergyPlus Weather file).

Στη παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία που πρέπει να δηλώσουμε στο αρχείο που περιγράφει το κτήριο και το σύστημα HVAC, ώστε η προσομοίωση να ολοκληρωθεί επιτυχώς. Το αρχείο IDF μπορεί να αναπτυχθεί είτε μέσω ενός απλού text editor, είτε μέσω του IDF-editor, ένα απλό “περιβάλλον” που παρέχεται στο χρήστη με την εγκατάσταση του EnergyPlus.

3.2.1 Τοποθεσία και Κλίματικές Συνθήκες (Location and Climate)

Η ενότητα Location and Climate του IDF-editor περιέχει πληροφορίες που αφορούν στην περιγραφή της περιοχής στην οποία βρίσκεται το προς μελέτη κτήριο.



Σχήμα 3.5: Location and Climate

Μερικά απ' τα πεδία της ενότητας αυτής είναι:

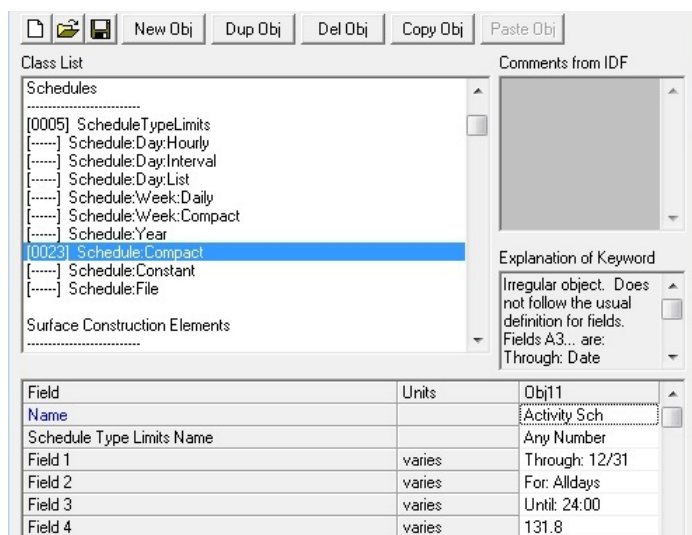
- **Site:Location:** Στο πεδίο αυτό δηλώνουμε το γεωγραφικό μήκος, το γεωγραφικό πλάτος, τη χρονική ζώνη και το υψόμετρο της περιοχής.
- **SizingPeriod:DesignDay:** Στο πεδίο αυτό δηλώνουμε τα χαρακτηριστικά των ημερών στις οποίες παρατηρούνται ακραίες συνθήκες. Τα χαρακτηριστικά αυτά χρησιμοποιούνται για τη διαστασιολόγηση του συστήματος θέρμανσης - ψύξης - κλιματισμού.
- **RunPeriod:** Το πεδίο RunPeriod καθορίζει το χρονικό διάστημα για το οποίο εκτελείται η προσομοίωση. Επιπλέον, στο πεδίο αυτό δηλώνουμε την προέλευση των ειδικών ημερών - διακοπών (Holidays - Special Days), των ημερών με ακραίες καιρικές συνθήκες (Design Days) κ.λπ., καθώς οι ημέρες αυτές μπορούν να δηλωθούν είτε μέσω

του αρχείου καιρού είτε μέσω της συμπλήρωσης αντίστοιχων πεδίων του IDF editor (π.χ. SizingPeriod:DesignDay για ημέρες με ακραίες καιρικές συνθήκες).

- Site:GroundTemperature:BuildingSurface: Εκτός από τις καιρικές συνθήκες που συμμετέχουν στη μεταφορά θερμότητας από το κτήριο προς το περιβάλλον και αντίστροφα, η θερμοκρασία του εδάφους θεωρείται απαραίτητη για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των ζωνών και του εδάφους. Στο πεδίο αυτό δηλώνονται οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες εδάφους.

3.2.2 Χρονοδιαγράμματα Δραστηριοτήτων (Schedules)

Η ενότητα των χρονοδιαγραμμάτων (schedules) μας επιτρέπει να επηρεάσουμε τον προγραμματισμό πολλών στοιχείων (όπως ο αριθμός ατόμων, το επίπεδο φωτισμού, οι θερμοστατικοί έλεγχοι, η δραστηριότητα των ατόμων, η σκίαση μέσω περσίδων, κ.λπ.). Τα χρονοδιαγράμματα στο EnergyPlus ορίζονται μέσω τριών πεδίων: το χρονοδιάγραμμα ημέρας (Schedule:Day), το χρονοδιάγραμμα εβδομάδας (Schedule:Week), και το ετήσιο χρονοδιάγραμμα. Η περιγραφή του ετήσιου χρονοδιαγράμματος απαιτεί τον ορισμό χρονοδιαγραμμάτων εβδομάδας, το σύνολο των οποίων είναι ικανό να περιγράψει το χρονοδιάγραμμα όλων των εβδομάδων του έτους. Επιπλέον, χρονοδιαγράμματα ημέρας πρέπει να οριστούν προκειμένου να περιγράψουν κάθε χρονοδιάγραμμα εβδομάδας. Ένα προαιρετικό πεδίο είναι ο τύπος των τιμών που λαμβάνει κάθε χρονοδιάγραμμα. Κάθε χρονοδιάγραμμα ημέρας αποτελείται απλά από ένα όνομα και τις τιμές που λαμβάνει το χρονοδιάγραμμα με αυτό το όνομα για τις 24 ώρες σε μια ημέρα. Το χρονοδιάγραμμα εβδομάδας αποτελείται από ένα προσδιοριστικό όνομα και πρόσθετα ονόματα που αντιστοιχούν σε ονόματα καθορισμένων χρονοδιαγραμμάτων ημέρας. Τέλος, το ετήσιο χρονοδιάγραμμα περιέχει ένα προσδιοριστικό όνομα και τα ονόματα των αντίστοιχων χρονοδιαγραμμάτων εβδομάδας.



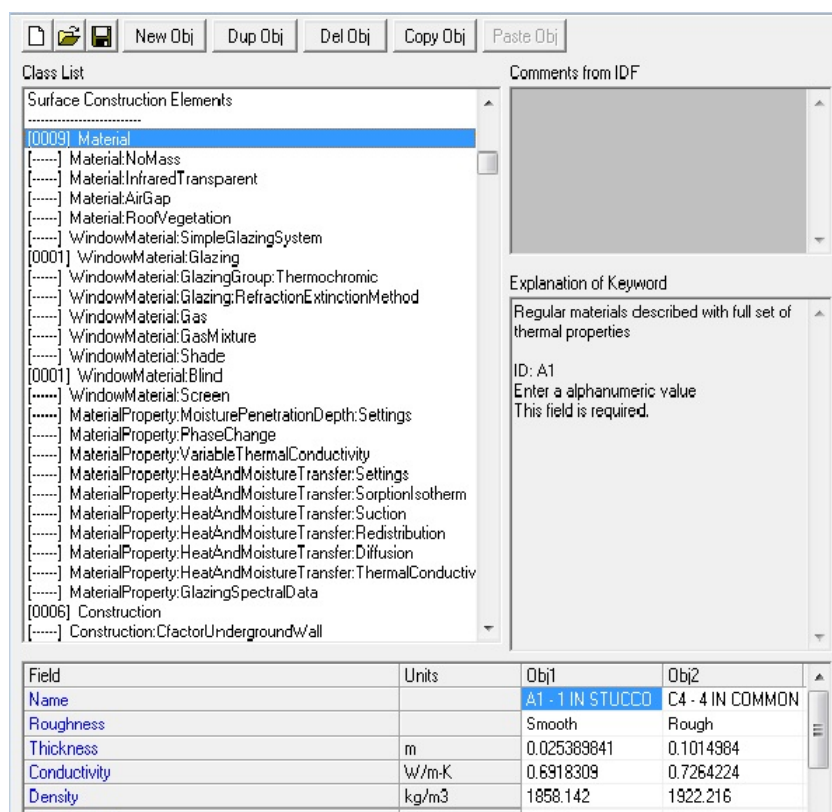
Σχήμα 3.6: Schedule:Compact

Ένας εναλλακτικός και ευέλικτος τρόπος ορισμού ενός ετήσιου χρονοδιαγράμματος είναι

μέσω του πεδίου Schedule:Compact. Σε αυτό το πεδίο ορίζουμε ένα χρονοδιάγραμμα μέσω μιας γραμμής εντολών, χωρίς να απαιτείται ο ορισμός των χρονοδιαγραμμάτων ημέρας και εβδομάδας. Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ορισμού ενός ετήσιου χρονοδιαγράμματος μέσω του Schedule:Compact.

3.2.3 Κατασκευαστικά Στοιχεία Επιφανειών (Surface Construction Elements)

Το EnergyPlus χρησιμοποιεί τα κατασκευαστικά στοιχεία κάθε επιφάνειας (συμπεριλαμβανομένων των εξωτερικών τοίχων, των εσωτερικών τοιχωμάτων, χωρισμάτων, πατωμάτων, ταβανιών, στεγών, παραθύρων και θυρών) με σκοπό να υπολογίσει τη μετάδοση θερμότητας που οφείλεται στα υλικά κατασκευής κάθε είδους επιφάνειας.



Σχήμα 3.7: Κατασκευαστικά Στοιχεία Επιφανειών

Για κάθε επιφάνεια η οποία αντιστοιχεί σε εξωτερικό τοίχο, εσωτερικό τοίχωμα, χώρισμα, πάτωμα, θύρα, ταβάνι ή στέγη, απαιτείται η συμπλήρωση δύο διαφορετικών πεδίων:

- **Material:** Στο πεδίο αυτό συμπληρώνονται χαρακτηριστικά όπως, θερμική αγωγιμότητα, πυκνότητα, πάχος και ειδική θερμοχωρητικότητα, κάθε κατασκευαστικού υλικού. Σε κάθε κατασκευαστικό υλικό αποδίδεται και ένα όνομα.
- **Construction:** Στο πεδίο αυτό συμπληρώνονται τα στρώματα υλικών απ' τα οποία αποτελείται κάθε είδος επιφάνειας. Ως στρώμα επιλέγεται κάποιο όνομα που έχει οριστεί

στο πεδίο Material. Σε κάθε διαφορετική διαστρωμάτωση ορίζεται και ένα όνομα κατασκευής (construction name). Να υπογραμμίσουμε ότι, η σειρά με την οποία τα στρώματα ορίζονται παίζει καθοριστικό ρόλο στην ορθή ανάπτυξη του μοντέλου.

Αντίστοιχα, για κάθε επιφάνεια η οποία αντιστοιχεί σε παράθυρο ή διαφανή θύρα απαιτείται η συμπλήρωση των εξής πεδίων:

- **WindowMaterial:Glazing:** Πρόκειται για το πεδίο στο οποίο δηλώνονται τα χαρακτηριστικά του βασικού υλικού των παραθύρων.
- **WindowMaterial:Gas:** Το πεδίο αυτό συμπληρώνεται μόνο σε περιπτώσεις που ο υαλοπίνακας είναι πολλαπλός και μεταξύ των επιμέρους στρωμάτων βασικού υλικού παρεμβάλεται κάποιο αέριο ως μέσο μόνωσης.
- **WindowMaterial:Blind:** Το πεδίο αυτό συμπληρώνεται μόνο σε περιπτώσεις που ο υαλοπίνακας περιέχει εσωτερικά σκίαστρα.
- **Construction:** Στο πεδίο αυτό συμπληρώνονται τα στρώματα υλικών απ' τα οποία αποτελείται κάθε είδος υαλοπίνακα. Ως στρώμα επιλέγεται κάποιο όνομα που έχει οριστεί στο πεδίο WindowMaterial:Glazing, WindowMaterial:Gas ή στο WindowMaterial:Blind. Σε κάθε διαφορετική διαστρωμάτωση ορίζεται και ένα όνομα κατασκευής (construction name). Να υπογραμμίσουμε ότι η σειρά με την οποία τα στρώματα ορίζονται παίζει καθοριστικό ρόλο στην ορθή ανάπτυξη του μοντέλου.

3.2.4 Θερμικές Ζώνες και Επιφάνειες (Thermal Zones and Surfaces)

Η θερμική ζώνη είναι ένας όγκος αέρα με σταθερή θερμοκρασία σε κάθε σημείο του. Το EnergyPlus υπολογίζει την ενέργεια που απαιτείται για να διατηρήσει κάθε ζώνη σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία για κάθε ώρα της ημέρας. Καθώς λοιπόν το EnergyPlus εκτελεί υπολογισμούς σε επίπεδο ζώνης, καθοριστικός παράγοντας για την περιγραφή του κτηρίου είναι η διαίρεση του κτηρίου σε ζώνες. Δεδομένου ότι ο διαχωρισμός του κτηρίου σε θερμικές ζώνες βασίζεται σε εμπειρικούς κανόνες, συνίσταται ως αρχική προσέγγιση η διαίρεση του κτηρίου βάσει των δωματίων του. Έτσι, αρχικά θεωρούμε ότι κάθε δωμάτιο αποτελεί και μια διαφορετική ζώνη. Οι θερμικές ζώνες ορίζονται στο IDF editor μέσω του πεδίου Zone.

Επιπλέον, στην ενότητα Θερμικές Ζώνες και Επιφάνειες του IDF editor μπορούμε γεωμετρικά να ορίσουμε κάθε τύπο επιφάνειας που λαμβάνει μέρος στη προσομοίωση του κτηρίου. Μερικοί απ' αυτούς τους τύπους είναι:

- **Wall Interzone, Wall Adiabatic, Wall Exterior, Wall Underground** οι οποίοι μπορούν συγκεντρωτικά να οριστούν στο Wall:Detailed. Πρόκειται για την τοιχοποιία του προς μελέτη κτηρίου.
- **Floor Interzone, Floor Adiabatic, Floor GroundContact** οι οποίοι μπορούν συγκεντρωτικά να οριστούν στο Floor:Detailed. Πρόκειται για το δάπεδο του προς μελέτη κτηρίου.
- **Roof, Ceiling Adiabatic, Ceiling Interzone** οι οποίοι μπορούν συγκεντρωτικά να οριστούν στο RoofCeiling:Detailed. Πρόκειται για την οροφή του προς μελέτη κτηρίου.

- Όλοι οι παραπάνω τύποι αποτελούν βασικές επιφάνειες του κτηρίου και μπορούν συγκεντρωτικά να οριστούν στο πεδίο BuildingSurface:Detailed.
- FenestrationSurface:Detailed: στο πεδίο αυτό ορίζονται όλες οι πόρτες και τα παράθυρα του κτηρίου.
- Shading:Building:Detailed: στο πεδίο αυτό ορίζονται όλες οι απομακρυνσμένες επιφάνειες που επιδρούν στη σκίαση του κτηρίου.

3.2.5 Εσωτερικά Θερμικά Φορτία (Internal Gains)

Η ενεργειακή κατανάλωση δεν οφείλεται εξολοκλήρου στις ιδιότητες του κελύφους του κτηρίου και στις συνθήκες του περιβάλλοντος χώρου. Στοιχεία όπως ο φωτισμός και λοιπός εξοπλισμός (π.χ. ηλεκτρικό, αέριο, κ.λπ.) καθώς και ο αριθμός των ατόμων και των δραστηριοτήτων τους αποτελούν εσωτερικά θερμικά φορτία και πρέπει να συνυπολογίζονται στην ενεργειακή κατανάλωση. Τα εσωτερικά θερμικά φορτία ορίζονται στον IDF editor στην ενότητα Internal Gains.

Class List

- Internal Gains
 - [0003] People
 - [.....] ComfortViewFactorAngles
 - [0002] Lights
 - [0003] ElectricEquipment
 - [.....] GasEquipment
 - [.....] HotWaterEquipment
 - [.....] SteamEquipment
 - [.....] OtherEquipment
 - [.....] ZoneBaseboard:OutdoorTemperatureControlled
- Daylighting
 - [.....] Daylighting:Controls

Comments from IDF

Explanation of Keyword

Sets internal gains for occupants in the zone.

ID: A1
Enter a alphanumeric value
This field is required.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		West Zone	EAST ZONE	NORTH ZONE
Zone Name		West Zone	EAST ZONE	NORTH ZONE
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
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

Σχήμα 3.8: Εσωτερικά Θερμικά Φορτία

Το πεδίο People περιέχει πληροφορίες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εσωτερικών θερμικών φορτίων που οφείλονται στους ενοίκους του κτηρίου ενώ παράλληλα ορίζεται το μοντέλο θερμικής άνεσης που θα χρησιμοποιηθεί ως μέσο ποσοτικοποίησης της θερμικής άνεσης των ενοίκων.

Το πεδίο Lights περιέχει πληροφορίες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εσωτερικών θερμικών φορτίων που οφείλονται στον τεχνητό φωτισμό.

Το πεδίο Electric Equipment περιέχει πληροφορίες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εσωτερικών θερμικών φορτίων που οφείλονται στον ηλεκτρικό εξοπλισμό του κτηρίου.

3.2.6 Σύστημα HVAC

Το σύστημα HVAC, ή αλλιώς σύστημα θέρμανσης - ψύξης - κλιματισμού, είναι υπεύθυνο για το θερμικό έλεγχο στο εσωτερικό περιβάλλον ενός κτηρίου και κατ' επέκταση για τη θερμική άνεση των ενοίκων. Χρησιμοποιείται για τον ενεργειακό έλεγχο και τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα ενώ παράλληλα διαμορφώνει επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας. Κάθε σύστημα HVAC μπορεί να προσομοιωθεί πλήρως μέσω του EnergyPlus. Αυτός είναι και ο λόγος που μια πληθώρα ενοτήτων και πεδίων αναφέρονται αποκλειστικά στη μοντελοποίηση του συστήματος HVAC. Τεχνικά χαρακτηριστικά και πρόγραμμα λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης - ψύξης - κλιματισμού, καθώς και των λεβήτων, ψυκτών και λοιπού εγκατεστημένου εξοπλισμού είναι μερικά απ' τα στοιχεία που συμπληρώνονται σε αυτά τα πεδία.

3.3 Το Αρχείο Καιρού στο EnergyPlus

Το αρχείο καιρού αποτελεί σημαντικό στοιχείο της ορθής προσομοίωσης του θερμικού μοντέλου ενός κτηρίου καθώς μας παρέχει πληροφορία σχετικά τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή που εντοπίζεται το προς μελέτη κτήριο, πληροφορία η οποία επηρεάζει απόλυτα τη θερμική απόδοση του. Προκειμένου όμως η πληροφορία αυτή να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κάποιο λογισμικό προσομοίωσης θερμικών μοντέλων πρέπει το αρχείο καιρού να έχει την δομή εκείνη που θα είναι απόλυτα συμβατή με το εν λόγω λογισμικό. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα στοιχεία τα οποία καταγράφονται σε ένα αρχείο καιρού και έπειτα να αναλύεται πλήρως η δομή του αρχείου καιρού που χρησιμοποιείται από το EnergyPlus.

3.3.1 Παρουσίαση των Δεδομένων

1. Θερμοκρασία ξηρού βολβού (Dry bulb temperature)

Η θερμοκρασία ξηρού βολβού είναι η θερμοκρασία του αέρα που μετριέται από ένα θερμόμετρο το οποίο εκτίθεται στον αέρα αλλά προστατεύεται από την ακτινοβολία και την υγρασία. Η θερμοκρασία ξηρού βολβού είναι η θερμοκρασία την οποία εκφράζουμε συνήθως ως θερμοκρασία αέρα. Αντίθετα από τη θερμοκρασία υγρού βολβού, η θερμοκρασία ξηρού βολβού δεν επηρεάζεται από το ποσοστό υγρασίας του αέρα. Αποτελεί σημαντική πληροφορία κατά το σχεδιασμό ενός κτηρίου και μια από τις σημαντικότερες μεταβλητές καιρικών συνθηκών που επηρεάζουν απόλυτα το δείκτη ανθρώπινης θερμικής άνεσης και την ενεργειακή απόδοση του κτηρίου. Λαμβάνει πραγματικές τιμές και όχι ακέραιες. Στο αρχείο καιρού, που περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο, το επιτρεπτό εύρος τιμών είναι το $[-70, 70]^{\circ}\text{C}$ ενώ σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική

στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 99.9.

2. Θερμοκρασία σημείου δρόσου (Dew point temperature)

Σημείο δρόσου ή θερμοκρασία σημείου δρόσου είναι η θερμοκρασία στην οποία μια συγκεκριμένη ποσότητα αέρα υπό σταθερή πίεση και υγρασιακό φορτίο φθάνει σε σχετική υγρασία 100%. Αυτό σημαίνει ότι ο αέρας γίνεται κορεσμένος από υδρατμούς και ότι με μια μικρή περαιτέρω πτώση της θερμοκρασίας ένα μέρος των υδρατμών του θα υγροποιηθεί, δηλαδή θα έχουμε συμπύκνωση. Κάποιες από τις επιφάνειες του εξωτερικού περιβλήματος του κτηρίου μπορούν εύκολα να φθάσουν στη θερμοκρασία σημείου δρόσου. Πρώτα θα φθάσουν οι επιφάνειες των τζαμιών, μετά οι επιφάνειες των θερμογεφυρών κ.ο.κ. Στόχος μας είναι να κρατάμε κατά το δυνατόν όλες τις επιφάνειες των εξωτερικών τοίχων πάνω από το σημείο δρόσου. Αυτό μπορούμε να το επιτύχουμε με την κατάλληλη θερμομόνωση ή με θέρμανση των επιφανειών αυτών με ρεύματα θερμού αέρα. Η θερμοκρασία του σημείου δρόσου αποτελεί σπουδαίο μετεωρολογικό στοιχείο για ένα τόπο και γι' αυτό πάντοτε αναφέρεται στους μετεωρολογικούς χάρτες με τα σύμβολα D.P. από τα αρχικά του αγγλικού όρου Dew Point (=Δρόσου Σημείο). Λαμβάνει πραγματικές τιμές και όχι ακέραιες. Στο αρχείο καιρού που περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο το επιτρεπτό εύρος τιμών είναι το $[-70, 70]^{\circ}\text{C}$ ενώ σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 99.9.

3. Σχετική υγρασία (Relative humidity)

Η σχετική υγρασία συνήθως εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό. Εκφράζει την ποσότητα των υδρατμών που υπάρχουν σε συγκεκριμένο όγκο ατμοσφαιρικού αέρα σε σχέση με τη μέγιστη ποσότητα των υδρατμών που θα μπορούσαν να υπάρχουν, ή αλλιώς που θα μπορούσε να κρατήσει στη μάζα του ο συγκεκριμένος αέρας. Η ποσότητα των υδρατμών που μπορεί να κρατήσει στη μάζα του ο ατμοσφαιρικός αέρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία· όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του αέρα, τόσο περισσότερους υδρατμούς μπορεί να κρατήσει. Η σχετική υγρασία λοιπόν εκφράζει το βαθμό κορεσμού. Αέρας με σχετική υγρασία 100% είναι κορεσμένος, δηλαδή περιέχει τη μέγιστη ποσότητα υδρατμών που μπορεί να κρατήσει. Όταν η σχετική υγρασία είναι μικρότερη από 100%, τότε ο αέρας είναι ακόρεστος. Λαμβάνει ποσοστιαίες τιμές. Στο αρχείο καιρού που περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο το επιτρεπτό εύρος τιμών είναι το $[0, 110]\%$ ενώ σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 99.9.

4. Ατμοσφαιρική στατική πίεση (Atmospheric Station Pressure)

Ατμοσφαιρική πίεση ονομάζεται η πίεση που ασκεί η ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της Γης. Πολλές φορές, η ατμοσφαιρική πίεση προσεγγίζεται από την υδροστατική πίεση που προκαλείται από την πίεση της ατμόσφαιρας στο σημείο μέτρησης. Η ατμοσφαιρική πίεση μειώνεται όσο αυξάνεται το υψόμετρο. Στο αρχείο καιρού που περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο η μονάδα μέτρησης είναι το Pa, το επιτρεπτό εύρος τιμών είναι το $[31000, 120000]$ ενώ σε

περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 999999.

5. Εξωγήινη Οριζόντια Ακτινοβολία (Extraterrestrial Horizontal Radiation)

Η εξωγήινη οριζόντια ακτινοβολία μετριέται σε Wh/m². Πρόκειται για δεδομένο το οποίο δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του EnergyPlus. Η ελάχιστη τιμή που πρέπει να δίνεται είναι το 0 ενώ σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 9999.

6. Άμεση Εξωγήινη Ακτινοβολία (Direct Extraterrestrial Radiation)

Η άμεση εξωγήινη, όπως και η εξωγήινη οριζόντια, ακτινοβολία μετριέται σε Wh/m². Πρόκειται για δεδομένο το οποίο δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του EnergyPlus. Η ελάχιστη τιμή που πρέπει να δίνεται είναι το 0 ενώ σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 9999.

7. Ακτινοβολούσα Ισχύς (Horizontal Infrared Radiation Intensity)

Η ακτινοβολούσα ισχύς μετριέται σε Wh/m². Αν δεν αποτελεί δεδομένο στο αρχείο καιρού τότε αυτή υπολογίζεται από την αδιαφανή κάλυψη ουρανού όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια. Η ελάχιστη τιμή που πρέπει να δίνεται είναι το 0 ενώ σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 9999.

$$\text{Horizontal IR} = \varepsilon \sigma T_{drybulb}^4 \quad (3.20)$$

$T_{drybulb}$	Θερμοκρασία ξηρού βολβού σε K
ε	ικανότητα εκπομπής
σ	σταθερά των Stefan και Boltzman: $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

Η ικανότητα εκπομπής υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\varepsilon = (0.787 + 0.764 \ln(\frac{T_{dewpoint}}{273}))(1 + 0.0224N + 0.0035N^2 + 0.00028N^3) \quad (3.21)$$

$T_{dewpoint}$	Θερμοκρασία σημείου δρόσου σε K
N	αδιαφανής κάλυψη ουρανού σε δέκατα

8. Συνολική Οριζόντια Ακτινοβολία (Global Horizontal Radiation)

Η συνολική οριζόντια ακτινοβολία είναι το άθροισμα της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας που προσπίπτουν σε μια οριζόντια επιφάνεια στη διάρκεια ενός χρονικού βήματος που καθορίζεται από το αρχείο καιρού και μετριέται σε Wh/m². Πρόκειται για δεδομένο το οποίο

δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του EnergyPlus. Η ελάχιστη τιμή που πρέπει να δίνεται είναι το 0 ενώ σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 9999.

9. Άμεση Κανονική Ακτινοβολία (*Direct Normal Radiation*)

Πρόκειται για την ηλιακή ακτινοβολία η οποία προσπίπτει σε μια επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ηλίου μέσα στο χρονικό βήμα που ορίζει το αρχείο καιρού. Σε αυτή δεν περιλαμβάνεται η άμεση οριζόντια ακτινοβολία. Μετρείται σε Wh/m^2 . Η ελάχιστη τιμή που πρέπει να δίνεται είναι το 0 ενώ σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 9999. Σε περίπτωση που δοθεί μια μη επιτρεπτή τιμή ή μια τιμή μεγαλύτερη ή ίση του 9999, η τιμή αυτή αντικαθίσταται με την τιμή 0.

10. Διάχυτη οριζόντια ακτινοβολία (*Diffuse Horizontal Radiation*)

Πρόκειται για την διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία η οποία προσπίπτει σε μια επιφάνεια οριζόντια στις ακτίνες του ηλίου μέσα στο χρονικό βήμα που ορίζει το αρχείο καιρού. Σε αυτή δεν περιλαμβάνεται η άμεση οριζόντια ακτινοβολία. Μετρείται σε Wh/m^2 . Η ελάχιστη τιμή που πρέπει να δίνεται είναι το 0 ενώ σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 9999. Σε περίπτωση που δοθεί μια μη επιτρεπτή τιμή ή μια τιμή μεγαλύτερη ή ίση του 9999, η τιμή αυτή αντικαθίσταται με την τιμή 0.

11. (*Global Horizontal Illuminance*)

Πρόκειται για δεδομένο το οποίο δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του EnergyPlus και δεν χρειάζεται να αναλυθεί περαιτέρω.

12. (*Direct Normal Illuminance*)

Πρόκειται για δεδομένο το οποίο δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του EnergyPlus και δεν χρειάζεται να αναλυθεί περαιτέρω.

13. (*Diffuse Horizontal Illuminance*)

Πρόκειται για δεδομένο το οποίο δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του EnergyPlus και δεν χρειάζεται να αναλυθεί περαιτέρω.

14. (*Zenith Luminance*)

Πρόκειται για δεδομένο το οποίο δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του EnergyPlus και δεν χρειάζεται να αναλυθεί περαιτέρω.

15. Κατεύθυνση Ανέμου (Wind Direction)

Η διεύθυνση του ανέμου χαρακτηρίζεται από το σημείο του ορίζοντα απ' όπου πνέει ο άνεμος και όχι προς τα που πνέει ο άνεμος. Εκφράζεται είτε σε μοίρες (αρχής γενομένης από το Βορρά), είτε με σύμβολα ανεμολογίου (ανεμορρόμβοι), είτε ονομαστικά (επίσημο ή γραικολεβαντίνικα όπως λέγονται τα κοινά). Οι άνεμοι στην Ελλάδα φέρουν ανάλογα με την διεύθυνση προέλευσής τους δύο ονόματα: Ένα επίσημο και ένα κοινό. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα ονόματα των κυρίων ανέμων (δηλαδή αυτών που πνέουν από κατεύθυνση πολλαπλάσια των 45 μοιρών) με Ελληνικό σύμβολο κατεύθυνσης, επίσημο όνομα, κοινό ή γραικολεβαντίνικο, διεθνές σύμβολο (ΔΣ) και όνομα διεθνές. Στο Weather file του

Πίνακας 3.2: Ονόματα των κύριων ανέμων

Διεύθυνση	Επίσημο	Κοινό	Δ.Σ.	Όνομα διεθνές
B (000°)	Βόρειος	Τραμουντάνα, Βοριάς	N	North
BA (045°)	Μέσης	Γραίγος	NE	Northeast
A (090°)	Απηλιώτης	Λεβάντες	E	East
NA (135°)	Εύρος	Σιρόκος	SE	Southeast
N (180°)	Νότιος	Όστρια, Νοτιάς	S	South
NA (225°)	Λίβας	Γαρμπής	SW	Southwest
Δ (270°)	Ζέφυρος	Πουνέντες	W	West
BA (315°)	Σκίρων	Μαϊστρος	NW	Northwest

EnergyPlus το μέγεθος αυτό μετριέται σε μοίρες. Λαμβάνει τιμές στο διάστημα [0, 360]. Σε περίπτωση άπνοιας η τιμή για τη κατεύθυνση ανέμου είναι 0°.

16. Ταχύτητα Ανέμου (Wind Speed)

Η ταχύτητα ανέμου είναι στοιχείο το οποίο μετριέται σε m/sec. Η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή είναι 0, η μέγιστη επιτρεπτή τιμή είναι 40, ενώ σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 99.

17. Συνολική Κάλυψη Ουρανού (Total Sky Cover)

Η συνολική κάλυψη ουρανού είναι το ποσοστό ουρανού που καλύπτεται από σύννεφα εκφρασμένο σε δέκατα (δηλαδή τιμή ίση με 1 σημαίνει ότι το 1/10 του ουρανού καλύπτεται από σύννεφα ενώ, τιμή ίση με 10 δηλώνει ολική κάλυψη). Η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή είναι

0, η μέγιστη επιτρεπτή τιμή είναι 10 ενώ, σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 99.

18. *Αδιαφανής Κάλυψη Ουρανού (Opaque Sky Cover)*

Η αδιαφανής κάλυψη ουρανού είναι το ποσό ουρανού που καλύπτεται από αδιαφανή σύννεφα εκφρασμένο σε δέκατα. Η αδιαφανής κάλυψη χρησιμοποιείται μόνο για τον υπολογισμό της οριζόντιας υπέρυθρης έντασης ακτινοβολίας όταν αυτή δεν δίνεται στο αρχείο καιρού. Η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή είναι 0, η μέγιστη επιτρεπτή τιμή είναι 10 ενώ σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 99.

19. *Ορατότητα (Visibility)*

Στη μετεωρολογία, η ορατότητα είναι ένα μέτρο της απόστασης στην οποία ένα αντικείμενο ή ένα φως μπορεί να διακριθεί σαφώς. Η μετεωρολογική ορατότητα αναφέρεται στη διαφάνεια του αέρα· έχει την ίδια τιμή τόσο στο σκοτάδι όσο και στο φως της ημέρας. Στο αρχείο καιρού που περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο η μονάδα μέτρησης είναι το km, ενώ σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 9999. Πρόκειται για δεδομένο το οποίο δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του EnergyPlus.

20. *Παρούσα παρατήρηση του καιρού (Present Weather Observation)*

Πρόκειται για δεδομένο το οποίο μας ενημερώνει για το αν έχουμε πληροφορία σχετικά με τις βροχοπτώσεις. Εάν η τιμή η οποία δίνεται είναι ίση με το 0, τότε διαθέτουμε πληροφορία σχετικά με τις βροχοπτώσεις και χρησιμοποιούνται οι κωδικοί παρούσας παρατήρησης που περιγράφονται με το επόμενο δεδομένο καιρού (Present Weather Codes). Εάν όμως η τιμή που δίνεται είναι το 9, τότε δεν διαθέτουμε πληροφορία σχετικά με τις βροχοπτώσεις και οι κωδικοί που περιγράφονται στο επόμενο δεδομένο καιρού δεν χρησιμοποιούνται.

21. *Κωδικοί της παρούσας παρατήρησης του καιρού (Present Weather Codes)*

Πρόκειται για ένα string 9 φυσικών αριθμών που περιγράφουν την παρούσα παρατήρηση του καιρού εφόσον αυτή υπάρχει.

22. *(Predictable Water)*

Πρόκειται για δεδομένο το οποίο δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του EnergyPlus και δεν χρειάζεται να αναλυθεί περαιτέρω.

23. Οπτικό Βάθος Ιόγω Αεροσλυμάτων (Aerosol Optical Depth)

Τεχνικά, αερόλυμα είναι ενσωμάτωση λεπτών στερεών μορίων ή υγρών σταγονιδίων σε ένα αέριο. Παραδείγματα είναι ο καπνός, η ατμοσφαιρική ρύπανση και η αιθαλομίχλη (νέφος). Μετρίεται σε χιλιοστά ενώ σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι .999. Πρόκειται για δεδομένο το οποίο δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του EnergyPlus.

24. Βάθος χιονιού (Snow Depth)

Πρόκειται για την απόσταση του ανώτερου στρώματος του χιονιού από την επιφάνεια της γης στην περιοχή που βρίσκεται το κτήριο που προσομοιώνουμε. Μετρίεται σε cm ενώ σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 999.

Σε περίπτωση που δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η τιμή που λαμβάνει για τη χρονική αυτή στιγμή είναι 99. Πρόκειται για δεδομένο το οποίο δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του EnergyPlus.

Πίνακας 3.3: Τιμές αντικατάστασης των στοιχείων του αρχείου καιρού

Data item	Supplied Value	Units
Dry Bulb Temperature	6	C
Dew Point Temperature	3	C
Relative Humidity	50	%
Wind Speed	2.5	m/s
Wind Direction	180	Deg
Total Sky Cover	5	(tenths)
Opaque Sky Cover	5	(tenths)
Visibility	777.7	Km
Ceiling Height	77777	m
Precipitable Water	0	Mm
Aerosol Optical Depth	0	Broadband turbidity
Snow Depth	0	Cm
Days Since Last Snow	88	Days
Radiation Values (Direct/Diffuse)	0.0	Wh/m ²
Illuminance Values	0.0	lux(or CD/m ²)

Να υπογραμμιστεί ότι είναι προτιμότερο σε περιπτώσεις που δεν διαθέτουμε πληροφορία για κάποια στοιχεία του αρχείου καιρού να αντικαθιστούμε την κενή πληροφορία με την τιμή αντικατάστασης που ορίζεται για κάθε στοιχείο στον παραπάνω πίνακα. Άρα, πρέπει να γίνεται μια αρχική επεξεργασία του αρχείου καιρού ώστε στην κενή πληροφορία να δίνουμε την

τιμή αντικατάστασης (replacement value) ώστε αυτή η κενή πληροφορία να μην μεταφράζεται από το EnergyPlus ως μια μεγάλη, μη επιτρεπτή τιμή (βλέπετε την τιμή που λαμβάνει κάθε μέγεθος σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, όταν δεν δίνεται η τιμή του μεγέθους για τη χρονική αυτή στιγμή).

3.3.2 Δομή

3.3.2.1 Meteonorm

Το λογισμικό Meteonorm μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν δεν υπάρχουν στοιχεία μέτρησης κοντά στη περιοχή του κτηρίου που προσομοιώνεται. Το Meteonorm υπολογίζει προσεγγιστικά ωριαία στοιχεία από τα στατιστικά στοιχεία που διατίθενται για την περιοχή προσομοίωσης. Όταν τα στατιστικά αυτά στοιχεία δεν είναι διαθέσιμα, το Meteonorm τα υπολογίζει με παρεμβολή στατιστικών στοιχείων άλλων γειτονικών περιοχών. Να υπογραμμιστεί ότι μια στατιστική προσέγγιση πρέπει να είναι η τελευταία λύση καθώς τα αρχεία καιρού που δημιουργούνται από στατιστικά στοιχεία δεν μας πληροφορούν για την πραγματική ωριαία ή καθημερινή μεταβλητότητα των καιρικών συνθηκών, πληροφορία που μας παρέχουν τα στοιχεία από πραγματικές μετρήσεις.

3.3.2.2 Το λογισμικό Weather Converter

Το λογισμικό Weather Converter χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που τα καιρικά στοιχεία της περιοχής προσομοίωσης είναι διαθέσιμα σε ένα αρχείο καιρού αλλά το αρχείο αυτό δεν έχει την κατάλληλη δομή ώστε να είναι συμβατό με το EnergyPlus. Τα αρχεία καιρού που είναι συμβατά με το EnergyPlus έχουν κατάληξη epw. Οι τύποι αρχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το Weather Converter, και κατά συνέπεια να παράγουν το τελικό αρχείο καιρού, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.4: Τύποι αρχείων συμβατοί με το Weather Converter

Επέκταση	Τύπος αρχείου
TM2	TMY2
IWC	IWEC
WY2	WYEC2
DAT	SAMSON
EPW	EnergyPlus E/E
FMT	DOE-2 Formatted File
CSV	Comma Delimited File (EPW Format)
CLM	ESP-r Climate Formatted File
ASC	BLAST ASCII
TMY	TMY
SWE	SWERA
WEA	Ecotect WEA file

Ο τύπος αρχείου που επιλέγουμε να αναλύσουμε είναι το csv καθώς αναλύεται περισσότερο στο εγχειρίδιο του EnergyPlus και έτσι θα αποφεύγονται πιθανά λάθη κατά τη δημιουργία

του αρχείου καιρού. Οι λόγοι για τους οποίους αποφασίζουμε να χρησιμοποιήσουμε το Weather Converter είναι οι εξής:

- Είναι ορθότερο να χρησιμοποιούμε αρχεία καιρού που αποτελούνται από πραγματικές μετρήσεις παρά να χρησιμοποιούμε αρχεία τα οποία αποτελούνται από στατιστικά στοιχεία.
- Δεδομένου ότι διαθέτουμε τις μετρήσεις για τα βασικότερα στοιχεία του αρχείου καιρού της περιοχής που βρίσκεται το κτήριο που θα προσομοιώσουμε, θα ήταν παράλογο να χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα meteonorm.

3.3.2.3 Περιγραφή του CSV format

Το csv format του αρχείου καιρού, το οποίο χρησιμοποιείται από το Weather Converter, χωρίζεται σε 9 υποενότητες και αναλύονται παρακάτω. Κάθε υποενότητα αποτελείται από τους τίτλους των στοιχείων που αυτές περιλαμβάνουν και τις μετρήσεις των στοιχείων αυτών.

1. Location Header/Data (CSV)

Η υποενότητα αυτή παράγει τις πληροφορίες που απαιτούνται για το αντικείμενο θέσης. Όταν χρησιμοποιείται μόνο ένα αντικείμενο για την περίοδο προσομοίωσης (δηλ. ένα αρχείο καιρού), το αντικείμενο θέσης δεν απαιτείται. Όταν όμως η πληροφορία αυτή δίνεται στο αρχείο καιρού τότε χρησιμοποιείται και αγνοείται οποιοδήποτε άλλο λήμμα αντικειμένου θέσης (το αντικείμενο θέσης μπορεί να περιγραφεί και μέσω της συμπλήρωσης κάποιων στοιχείων στο idf editor).

Location Title, Latitude{N + /S-}, Longitude{E + /W}, TimeZone{+/- GMT}, Elevation{m}
 LOCATION_SYDNEY_AUS_IWEC_Data_947670, -33.95, 151.18, 10.0, 3.0

2. Design Conditions Header/Data (CSV)

Πρόκειται για τις design conditions που ισχύουν για την περιοχή στην οποία το αρχείο καιρού αναφέρεται. Προς το παρόν στα αρχεία καιρού τα οποία είναι συμβατά με το EnergyPlus χρησιμοποιούνται μόνο design conditions οι οποίες περιλαμβάνονται στο ASHRAE Handbook of Fundamentals 2009 για περιοχές που καθορίζονται από το location title. Η υποενότητα αυτή δεν χρειάζεται να περιλαμβάνεται στο CSV αρχείο που θα αναπτύξουμε καθώς η πληροφορία αυτή προστίθεται αυτόματα στο EPW αρχείο χρησιμοποιώντας το Weather Converter εκτός αν το location title που δίνουμε δεν περιλαμβάνεται στο ASHRAE Handbook of Fundamentals 2009.

Number of Design Conditions, Title of Design Condition, Design Stat, HDB 99.6%, HDB 99%, X WS 1%, X WS 2.5%, X WS5%, CM WS .4%, CM MDB .4%, CM WS 1%, CM MDB 1%, MWS 99.6%, PWD 99.6%, MWS .4%, PWD .4%, X MnDB Max, X MnDB Min, XStdDB Max, X StdDB Design Stat, CDB .4%, C MWB .4%, CDB 1%, C MWB 1%, CDB 2%, C MWB 2%, E WB .4%, EWB 1%, E MDB 1%, E WB 2%, E MDB 2%, DP .4%, HR .4%, MDB .4%, DP 1%, HR 1%, MDB 1%, DP 2%, HR 2%, MDB 2%, , Units, {°C}, {°C}, {m/s}, {m/s}, {m/s}, {m/s}, {°C}, {m/s},

{°C}, {m/s}, {Degree}, {m/s}, {Degree}, {°C}, {°C}, {°C}, {°C}, Units, {°C}, {°C}, {°C}, {°C}, {°C}, {°C}, {°C}, {°C}, {°C}, {°C}, {g/kg}, {°C}, {°C}, {g/kg}, {°C}, {°C}, {g/kg}, {°C}

1, World Climate D. Data 2001 ASHRAE Handbook, HEATING, 5.8, 6.8, 11.3, 9.9, 8.8, 11.1, 14.2, 9.1, 13.4, 1.1, 320, 5.3, 300, 39.3, 3.1, 2.9, 1.9, COOLING, 32.2, 20, 29.5, 19.7, 27.9, 20.1, 23, 28, 22.3, 26.2, 21.7, 25.3, 21.7, 16.4, 24.8, 21.1, 15.8, 24.3, 20.6, 15.3, 23.9, 6.7

Στην περίπτωση που το location name που δίνουμε δεν περιλαμβάνεται στο ASHRAE Handbook of Fundamentals 2009 , θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν design conditions και η δομή για την παρούσα υποενότητα είναι:

Number of Design Conditions, Title of Design Condition,
0

3. Typical/Extreme Periods Header/Data (CSV)

Πρόκειται για τις Typical/ Extreme Periods που ισχύουν για την περιοχή στην οποία το αρχείο καιρού αναφέρεται. Προς το παρόν στα αρχεία καιρού τα οποία είναι συμβατά με το EnergyPlus χρησιμοποιούνται μόνο Typical/Extreme Periods οι οποίες περιλαμβάνονται στο ASHRAE Handbook of Fundamentals 2009 για περιοχές που καθορίζονται από το location title. Η υποενότητα αυτή δεν χρειάζεται να περιλαμβάνεται στο CSV αρχείο που θα αναπτύξουμε καθώς η πληροφορία αυτή προστίθεται αυτόματα στο EPW αρχείο χρησιμοποιώντας το Weather Converter εκτός αν το location title που δίνουμε δεν περιλαμβάνεται στο ASHRAE Handbook of Fundamentals 2009.

Number of Typical/Extreme Periods,Period Name,Period Type,Period Start Day,Period End Day,< repeat to #
periods >
6,Summer - Week Nearest Max Temperature For Period,Extreme,1/ 4,1/10,Summer - Week Nearest Average
Temperature For Period,Typical,11/29,12/ 5,Winter - Week Nearest Min Temperature For Period,Extreme,7/
3,7/ 9,Winter - Week Nearest Average Temperature For Period,Typical,6/ 5,6/11,Autumn - Week Nearest
Average Temperature For Period,Typical,3/22,3/28,Spring - Week Nearest Average Temperature For
Period,Typical,8/ 1,8/ 7

4. Ground Temperatures Header/Data (CSV)

Πρόκειται για τις Ground Temperatures που ισχύουν για την περιοχή στην οποία το αρχείο καιρού αναφέρεται. Προς το παρόν στα αρχεία καιρού τα οποία είναι συμβατά με το EnergyPlus χρησιμοποιούνται μόνο Ground Temperatures οι οποίες περιλαμβάνονται στο ASHRAE Handbook of Fundamentals 2009. Η υποενότητα αυτή δεν χρειάζεται να περι-

λαμβάνεται στο CSV αρχείο που θα αναπτύξουμε καθώς η πληροφορία αυτή προστίθεται αυτόματα στο EPW αρχείο χρησιμοποιώντας το Weather Converter.

Num. of Gr. Temperature Depths, Ground Temperature Depth {m}, Soil Conductivity {W/mK}, Soil Density {kg/m³}, Soil Specific Heat {J/kgK}, Jan {C}, Feb {C}, Mar {C}, Apr {C}, May {C}, Jun {C}, Jul {C}, Aug {C}, Sep {C}, Oct {C}, Nov {C}, Dec {C}, < repeat to N of temp. depths > 3, .5, , , 20.69, 22.30, 22.69, 22.26, 19.95, 17.43, 15.09, 13.43, 12.99, 13.86, 15.84, 18.29, 2, , , 19.18, 20.71, 21.41, 21.40, 20.16, 18.43, 16.58, 15.03, 14.25, 14.45, 15.59, 17.28, 4, , , 18.18, 19.38, 20.10, 20.30, 19.82, 18.80, 17.56, 16.35, 15.56, 15.39, 15.89, 16.89

5. Holiday/Daylight Saving Header/Data (CSV)

Στην παρούσα υποενότητα δηλώνουμε περιόδους ή ημέρες, οι οποίες διαφέρουν από το πλήθος λόγω χαμηλότερων καταναλώσεων ενέργειας. Η υποενότητα αυτή περιλαμβάνει την πρώτη και τελευταία ημέρα του Daylight Saving Time. Προκειμένου να χρησιμοποιήσουμε την πληροφορία αυτή πρέπει να πληκτρολογήσουμε Yes για τα αντίστοιχα στοιχεία στο Run Period Object του αρχείου idf.

Leap Year Observed?, Daylight Saving Start Date, Daylight Saving End Date, Number of Holidays, Holiday, Name, Holiday Date, < repeat for # Holidays >
No, 0, 0, 0

6. Comment 1 Header/Data (CSV)

Στην υποενότητα αυτή ο δημιουργός του αρχείου καιρού έχει τη δυνατότητα να γράψει κάποιο πρώτο σχόλιο - διευκρίνιση για το αρχείο.

Comment Line # 1

"IWEC- WMO# 947670 - South-west Pacific - Original Source Data (c) 2001 American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Inc., Atlanta, GA, USA. www.ashrae.org All rights reserved as noted in the License Agreement and Additional Conditions. DISCLAIMER OF WARRANTIES: The data is provided 'as is' without warranty of any kind, either expressed or implied. The entire risk as to the quality and performance of the data is with you. In no event will ASHRAE or its contractors be liable to you for any damages, including without limitation any lost profits, lost savings, or other incidental or consequential damages arising out of the use or inability to use this data."

7. Comment 2 Header/Data (CSV)

Στην υποενότητα αυτή ο δημιουργός του αρχείου καιρού έχει τη δυνατότητα να γράψει κάποιο δεύτερο σχόλιο - διευκρίνιση για το αρχείο.

Comment Line # 2

– Ground temps produced with a standard soil diffusivity of 2.3225760E-03 (m**2/day)

8. Data Period Header/Data (CSV)

Πρόκειται για το σημείο στο οποίο ο δημιουργός του αρχείου καιρού καταγράφει την περίοδο στη οποία ο αρχείο καιρού αναφέρεται, την ημερομηνία έναρξης (περιλαμβάνεται και η ημέρα έναρξης) και την ημερομηνία λήξης.

Number of Data Periods [DP], Number of Intervals per Hour, DP Name/Description, DP Start Day of Week, DP Start

Day, DP End Day, < repeat to # Data Periods >

1, 1, Data, Sunday, 1/ 1, 12/31

9. Data Records (CSV)

Η υποενότητα αυτή αποτελείται από 3 μέρη. Το πρώτο μέρος είναι η γραμμή με τις συντομογραφίες των τίτλων των στοιχείων του (short names):

Date, HH : MM, Datasource, DryBulb {C}, DewPoint {C}, RelHum {%}, AtmosPressure {Pa}, ExtHorzRad {Wh/m2}, ExtDirRad {Wh/m2}, HorzIRSky {Wh/m2}, GloHorzRad {Wh/m2}, DirNormRad {Wh/m2}, DifHorzRad {Wh/m2}, GloHorzIllum {lux}, DirNormIllum {lux}, DifHorzIllum {lux}, ZenLum {Cd/m2}, WindDir {deg}, WindSpd {m/s}, TotSkyCvr {.1}, OpSkyCvr {.1}, Visibility {km}, Ceiling Hgt {m}, PresWeathObs, PresWeathCodes, Precip Wtr {mm}, Aerosol OptDepth{.001}, SnowDepth {cm}, Days Last Snow

Στη δεύτερη γραμμή, που αποτελεί και το 2ο μέρος, περιγράφονται αναλυτικά οι τίτλοι των στοιχείων της υποενότητας (longer names):

Date, HH : MM, Datasource, Dry Bulb Temperature {C}, Dew Point Temperature{C}, Relative Humidity {%}, Atmospheric Pressure {Pa}, Extraterrestrial Horizontal Radiation {Wh/m2}, Extraterrestrial Directl Radiation{Wh/m2}, Horizontal Infrared Radiation Intensity from Sky {Wh/m2}, Global Horizontal Radiation {Wh/m2}, Direct Normal Radiation {Wh/m2}, Diffuse Horizontal Radiation {Wh/m2}, Global Horizontal Illuminance{lux}, Direct Norma Illuminance {lux}, Diffuse Horizontal Illuminance {lux}, Zenith Luminance {Cd/m2}, Wind Direction {deg}, Wind Speed {m/s}, Total Sky Cover {.1}, Opaque Sky Cover{.1}, Visibility {km}, Ceiling Height {m}, Present Weather Observation, Present WeatherCodes, Precipitable Water {mm}, Aerosol Optical Depth {.001}, Snow Depth {cm}, Days Since Last Snow

Το υπόλοιπο της υποενότητας αποτελείται από τις μετρήσεις των στοιχείων με τίτλους που περιγράφονται από τα 2 παραπάνω μέρη. Κάθε γραμμή αποτελεί τις μετρήσεις των στοιχείων τη χρονική στιγμή που καθορίζεται από τις 2 πρώτες τιμές της γραμμής (Date, HH:MM):

1983/1/1, 01 : 00, C9C9C9C9 * 0?9?9?9?9?9?9 * 0C8C8C8C * 0 * 0E8 * 0 * 0, 26.2, 19.2, 65, 101100, 0, 1415, 412, 0, 0, 0, 0, 0, 180, 6.5, 9, 7, 23.3, 77777, 9, '999999999, 0, 0.2300, 0, 88

Η ορθή καταγραφή και χρήση των δεδομένων του αρχείου καιρού αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ολοκλήρωση μιας αξιόπιστης προσομοίωσης θερμικού μοντέλου. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η μέτρηση και κατά συνέπεια καταγραφή όλων των στοιχείων που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο, όπως και στο αρχείο καιρού που στοχεύουμε να δημιουργήσουμε. Οφείλουμε λοιπόν, να αναφερθούμε στην ευαισθησία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε απουσία δεδομένων για στοιχεία του αρχείου καιρού. Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την ανάλυση ευαισθησίας είναι η εξής:

1. Δημιουργία μιας συνάρτησης στο λογισμικό Matlab που θα επεμβαίνει στα δεδομένα ενός υπάρχοντος αρχείου καιρού με csv format. Η συνάρτηση αυτή διαγράφει κάθε φορά τη στήλη που αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο της επιλογής μας από το αρχείο καιρού.
2. Δημιουργία ενός απλού θερμικού μοντέλου στο πρόγραμμα θερμικής προσομοίωσης EnergyPlus.
3. Προσομοίωση του μοντέλου τόσο με το αρχικό όσο και με κάθε τροποποιημένο αρχείο καιρού και σύγκριση των αποτελεσμάτων (θερμοκρασία και υγρασία θερμικής ζώνης) των προσομοιώσεων.

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα στοιχεία που επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι τα εξής:

1. Εξωτερική θερμοκρασία ξηρού βολβού,
2. Εξωτερική σχετική υγρασία,
3. Ταχύτητα του ανέμου,
4. Κατεύθυνση του ανέμου,
5. Ηλιακή ακτινοβολία.

Κεφάλαιο 4

Στρατηγικές Ελέγχου και Προσαρμοστική Βελτιστοποίηση

Τα συστήματα ελέγχου της λειτουργίας κτηρίων αποτελούν πρακτικά μη γραμμικά συστήματα ελέγχου μεγάλης κλίμακας. Οι αλγόριθμοι προσαρμοστικής βελτιστοποίησης όπως ο αλγόριθμος ταυτόχρονων διαταραχών (SPSA) [18], ο Cross Entropy (CE) [21, 8], ο Policy learning by Weighting Exploration with the Returns (PoWER) [13, 24] και ο Adaptive Fine Tunning (AFT) παρέχουν ίσως μια ελπιδοφόρα προσέγγιση για την ανάπτυξη μιας συστηματικής μεθοδολογίας για την αυτόματη και αποδοτική βελτιστοποίηση αυτών των συστημάτων. Η βασική ιδέα των αλγορίθμων προσαρμοστικής βελτιστοποίησης περιγράφεται μέσα από τα ακόλουθα βήματα:

1. Εκτίμηση του δείκτη απόδοσης σε μία ή περισσότερες διαταραχές του παρόντος συνόλου των παραμέτρων του ελεγκτή.
2. Μεταβολή των τρέχουσων παραμέτρων του ελεγκτή χρησιμοποιώντας μια εκτίμηση της κλίσης του δείκτη απόδοσης η οποία υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις εκτιμήσεις του δείκτη απόδοσης του προηγούμενου βήματος.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το μαθηματικό υπόβαθρο των παραπάνω αλγορίθμων και καταγράφονται τα βήματα τα οποία ακολουθήσαμε για τη ανάπτυξη τους στο λογισμικό Matlab.

4.1 Ο αλγόριθμος Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SP-SA)

Έστω ότι θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε τη συνάρτηση $J(\theta)$ μεταβάλλοντας τις τιμές του διανύσματος $\theta \in \mathbb{R}^p$. Υποθέτουμε ότι δεν γνωρίζουμε αναλυτικά την κλίση $\nabla J(\theta)$ και δεν μπορούμε να μετρήσουμε ή να υπολογίσουμε τις τιμές της $\nabla J(\theta)$ για κάθε $\theta \in \mathbb{R}^p$. Μπορούμε όμως για οποιοδήποτε διάνυσμα θ να μετρήσουμε ή να υπολογίσουμε το $J(\theta) + \varepsilon$, όπου ε ο θόρυβος της μέτρησης - υπολογισμού.

Ο τυπικός αλγόριθμος στοχαστικής προσέγγισης έχει τη μορφή:

$$\theta(j+1) = \theta(j) - \lambda_j g(\theta(j), j) \quad (4.1)$$

όπου $g(\theta(j), j) \in \mathbb{R}^p$ η εκτίμηση της κλίσης $\nabla J(\theta)$ και λ_j μια μη αρνητική ακολουθία. Η επιλογή αυτής της ακολουθίας πρέπει να είναι τέτοια ώστε :

1. Καθώς πλησιάζουμε στη βέλτιστη λύση (θ^*) ο προστιθέμενος κίνδυνος να μειώνεται ($\lambda_j \rightarrow 0$),
2. Να αποφεύγεται η προώρη και λανθασμένη σύγκλιση του αλγορίθμου ($\sum_j \lambda_j = \infty$).

Η προσέγγιση της ταυτόχρονης διαταραχής εκτιμά πως η g για κάθε παράμετρο θ_i , $i = 1, 2, \dots, p$ υπολογίζεται βάσει του τύπου :

$$g_i(\theta(j), j) = \frac{J(\theta(j) + c_j \Delta(j)) - J(\theta(j) - c_j \Delta(j))}{2c_j \Delta_i(j)} \quad (4.2)$$

όπου $c_j > 0$ για κάθε j (μια αποδεκτή επιλογή για τα c_j είναι η χρήση μιας ακολουθίας της οποίας οι τιμές μειώνονται καθώς ο αριθμός της επανάληψης αυξάνεται), και

$$\Delta(j) = \begin{bmatrix} \Delta_1(j) \\ \vdots \\ \Delta_p(j) \end{bmatrix}$$

είναι ένα διάνυσμα τυχαίων, ανεξάρτητων διαταραχών. Μια θεωρητικά αποδεκτή επιλογή είναι οι τιμές του διανύσματος $\Delta(j)$ να ακολουθούν την συμμετρική κατανομή Bernoulli, με μέση τιμή μηδέν.

Υπάρχουν αρκετές παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν για τον αλγόριθμο SPSA και παρουσιάζουμε μερικές οδηγίες για την επιλογή αυτών των παραμέτρων. Όσον αφορά στην επιλογή των ακολουθιών που χρησιμοποιούνται στον SPSA ,

$$\lambda_j = \frac{\lambda}{(\lambda_0 + j)^{a_1}} \quad (4.3)$$

όπου $\lambda > 0$, $\lambda_0 > 0$ και $a_1 > 0$. Επιπλέον,

$$c_j = \frac{c}{j^{a_2}} \quad (4.4)$$

όπου $c > 0$ και $a_2 > 0$. Ύστερα από εφαρμογές σε μεγάλης κλίμακας προβλήματα, έχει βρεθεί ότι αποτελεσματικές τιμές των a_1 και a_2 είναι οι εξής :

$$a_1 = 0.602$$

$$a_2 = 0.101$$

Αποτελούν τις χαμηλότερες επιτρεπτές τιμές οι οποίες ικανοποιούν τις συνθήκες των ακολουθιών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ωστόσο, τιμές $a_1 \in [0.602, 1]$ και $a_2 \in [0.101, \frac{1}{6}]$ πιθανόν να είναι αποδεκτές και αποτελεσματικές για τον αλγόριθμο.

Ακόμα, επιλέγουμε η παράμετρος λ_0 προσεγγιστικά να ισούται με το 10% του μέγιστου αριθμού των επαναλήψεων, ενώ το λ να προσπαθεί να επιτύχει μια σημαντική αλλαγή στην συνάρτηση κόστους σε κάθε επανάληψη.

Συνοπτικά ο αλγόριθμος SPSA παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 4.1: Ο αλγόριθμος SPSA

Αρχικοποίηση των συντελεστών λ_0, a_1, a_2 , και του διανύσματος θ .

Για $j = 1$ έως Μέγιστο πλήθος επαναλήψεων

1. Υπολόγισε $\lambda_j = \frac{\lambda}{(\lambda_0 + j)^{a_1}}$ και $c_j = \frac{c}{j^{a_2}}$
2. Δημιούργησε το τυχαίο διάνυσμα $\Delta(j)$ οι τιμές του οποίου ακολουθούν τη συμμετρική κατανομή Bernoulli, με μέση τιμή μηδέν.
3. Υπολόγισε τις τιμές $J(\theta(j) + c_j \Delta(j))$ και $J(\theta(j) - c_j \Delta(j))$.
4. Για $j = 1$ έως p

$$g_i(\theta(j), j) = \frac{J(\theta(j) + c_j \Delta(j)) - J(\theta(j) - c_j \Delta(j))}{2c_j \Delta_i(j)} \text{ (προσέγγιση του διανύσματος κλίσης)}$$

Τέλος
5. Ενημέρωσε την εκτίμηση θ : $\theta(j+1) = \theta(j) - \lambda_j g(\theta(j), j)$

Τέλος

4.2 Ο αλγόριθμος Adaptive Fine Tunning (AFT)

Ο αλγόριθμος Adaptive Fine Tunning (AFT) βασίζεται στις ιδέες του αλγόριθμου Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SPSA). Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι, η κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης στον SPSA προσεγγίζεται μέσω των τιμών της συνάρτησης που ελήφθησαν κατά την τελευταία μόνο επανάληψη του αλγορίθμου, ενώ στον AFT η προσέγγιση της κλίσης πραγματοποιείται μέσω της χρήσης ενός γραμμικού ως προς τις παραμέτρους, μη γραμμικού προσεγγιστή που λαμβάνει πληροφορίες πολλών μετρήσεων της συνάρτησης με χρονικό ορίζοντα που ορίζεται από το χρήστη. Θα περιγράψουμε τον αλγόριθμο AFT μέσω των βημάτων που ακολουθούν.

Έστω ότι θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε τη συνάρτηση $J(\theta)$ μεταβάλλοντας τις τιμές του διανύσματος $\theta \in \mathbb{R}^p$. Υποθέτουμε ότι δεν γνωρίζουμε αναλυτικά την κλίση $\nabla J(\theta)$ και δεν μπορούμε να μετρήσουμε ή να υπολογίσουμε τις τιμές της $\nabla J(\theta)$ για κάθε $\theta \in \mathbb{R}^p$. Μπορούμε όμως για οποιοδήποτε διάνυσμα θ να μετρήσουμε ή να υπολογίσουμε το $J(\theta)$.

1. Αρχικοποίηση: Αρχικοποιούμε τις τιμές των παραμέτρων θ και των μεταβλητών L_r, L_h, L_g .

Με L_r συμβολίζουμε τον αριθμό των επαναλήψεων κατά τις οποίες πραγματοποιείται προσθήκη τυχαίου θορύβου στο αρχικό διάνυσμα των παραμέτρων. Η μεταβλητή L_r μπορεί να λάβει οποιαδήποτε θετική τιμή, τιμή η οποία αντιστοιχεί στο πλήθος των ζευγών $(\theta, J(\theta))$ που απαιτούνται για την αρχική εκτίμηση του προσεγγιστή. Συνεπώς, η αρχική εκτίμηση του προσεγγιστή δεν θα ξεκινήσει πριν το πλήθος των επαναλήψεων ξεπεράσει την τιμή L_r .

Η παράμετρος L_h αναφέρεται στον αριθμό των μετρήσεων της συνάρτησης που χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση της σε κάθε επανάληψη. Αν θέσουμε την παράμετρο L_h ίση με 30 σημαίνει ότι ο προσεγγιστής θα χρησιμοποιήσει τα αποτελέσματα των 30 τελευταίων

επαναλήψεων του αλγορίθμου προκειμένου να υπολογίσει την κλίση της συνάρτησης.

Συνδιάζοντας την πληροφορία που παρέχουν οι παραπάνω παράμετροι μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

Πίνακας 4.2: Καθορισμός του πλήθους των σημείων του προσεγγιστή

Για $j = 1$ έως Μέγιστο πλήθος επαναλήψεων

Αν $j \leq L_r$

1. Συγκεντρώνουμε ζεύγη $(\theta, J(\theta))$
2. Δεν εκτιμούμε την προσέγγιση της συνάρτησης J

Αλλιώς αν $L_r < j \leq L_h$

1. Συγκεντρώνουμε ζεύγη $(\theta, J(\theta))$
2. Εκτιμούμε την προσέγγιση της συνάρτησης J με όλα τα ζεύγη σημείων που έχουμε.

Αλλιώς

1. Συγκεντρώνουμε ζεύγη $(\theta, J(\theta))$
2. Εκτιμούμε την προσέγγιση της συνάρτησης J με τα τελευταία L_h ζεύγη σημείων.

Τέλος

Τέλος

2. Εκτίμηση του προσεγγιστή $\hat{J} = w^T \varphi(\theta)$: Η προσέγγιση της συνάρτησης J σε κάθε επανάληψη παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.3: Ανάπτυξη των συναρτήσεων βάσης $\varphi(\theta)$ και υπολογισμός των w

Για $j = 1$ έως Μέγιστο πλήθος επαναλήψεων

Το σύνολο των σημείων που θα χρησιμοποιηθούν για τον προσεγγιστή βρέθηκαν μέσω του πίνακα 4.2. Ονομάζουμε το σύνολο αυτό S .

Για $i = 1$ έως S

Επιλέγουμε L_g τυχαία στοιχεία του διανύσματος παραμέτρων θ που έστω ότι αντιστοιχούν στις τυχαίες θέσεις $P(1), P(2), \dots, P(L_g)$ του διανύσματος.

Για $k = 1$ έως L_g

Δημιουργούμε τη συνάρτηση βάσης $\varphi_k(\theta(P(k)))$ του προσεγγιστή χρησιμοποιώντας την κατανομή *Gauss* για το $P(k)$ στοιχείο που τυχαία επιλέχθηκε:

$$\varphi_k(\theta(P(k))) = \exp(-\theta(P(k))^2)$$

Τέλος

$$w = \arg \min_w \sum_{i=1}^S (J(\theta(i)) - \hat{J}(\theta(i)))^2$$

Τέλος

Τέλος

Έτσι, για κάθε επανάληψη του αλγορίθμου έχουμε κατασκευάσει το διάνυσμα των συναρτήσεων βάσεις του προσεγγιστή και το διάνυσμα w που ελαχιστοποιεί το σφάλμα ελαχίστων τετραγώνων του προσεγγιστή για το σύνολο των σημείων που καθορίζεται από τον πίνακα 4.2.

Μια εναλλακτική μέθοδος για την εκτίμηση του προσεγγιστή είναι η παλινδρόμηση με Support Vector Machines (SVMs). Σε αυτή τη μέθοδο η συνάρτηση σφάλματος ελαχίστων τετραγώνων αντικαθίσταται με την ϵ - χωρίς ευαισθησία συνάρτηση σφάλματος [23], η οποία αποδίδει μηδενικό σφάλμα εάν η απόλυτη διαφορά της προβλεπόμενης τιμής \hat{J} από τον στόχο J είναι μικρότερη από την τιμή ϵ όπου $\epsilon > 0$. Έστω ότι η νέα συνάρτηση σφάλματος E_e είναι γραμμικά μεταβαλλόμενη της διαφοράς αυτής τότε:

$$E_e(\hat{J} - J) = \begin{cases} 0, & \text{εάν } |\hat{J} - J| < \epsilon \\ |\hat{J} - J| - \epsilon, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.5)$$

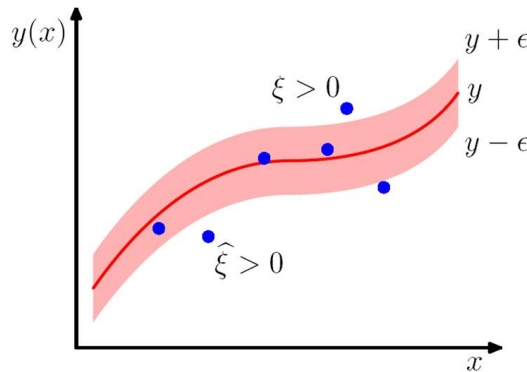
Στη συνέχεια, εισάγουμε μεταβλητές χαλάρωσης (slack variables) στο πρόβλημα μας. Για κάθε σημείο $(\theta_n, J_n(\theta_n))$, χρειαζόμαστε δύο μεταβλητές χαλάρωσης $\xi_n \geq 0$ και $\hat{\xi}_n \geq 0$, όπου $\xi_n > 0$ αντιστοιχεί σε ένα σημείο για το οποίο $J_n > \hat{J}_n + \epsilon$, και $\hat{\xi}_n > 0$ αντιστοιχεί σε ένα σημείο για το οποίο $J_n < \hat{J}_n - \epsilon$. Το νέο πρόβλημα ελαχιστοποίησης σφάλματος διαμορφώνεται ως εξής:

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \hat{\xi}_i) \quad (4.6)$$

υ.π.

$$\begin{aligned} \hat{J}_n + \epsilon + \xi_n - J_n &\geq 0 \\ -\hat{J}_n + \epsilon + \hat{\xi}_n + J_n &\geq 0 \\ \xi_n &\geq 0 \\ \hat{\xi}_n &\geq 0 \end{aligned}$$

Με την παραπάνω διατύπωση του προβλήματος έχουμε ορίσει ένα σωλήνα η διάμετρος του οποίου εξαρτάται από την παράμετρο ϵ . Τα σημεία τα οποία βρίσκονται εντός του σωλήνα έχουν μηδενικό σφάλμα ενώ, όσο απομακρυνόμαστε από τα όρια του σωλήνα το σφάλμα αυξάνεται γραμμικά.



Σχήμα 4.1: Αξονομετρική όψη του υποθετικού κτηρίου

Στη συνέχεια, θεωρούμε τη μέθοδο Lagrange. Η επαυξημένη συνάρτηση σύμφωνα με τη μέθοδο Lagrange είναι:

$$L = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \hat{\xi}_i) - \sum_{i=1}^N (\mu \xi_i + \hat{\mu} \hat{\xi}_i) - \sum_{i=1}^N \alpha_i (\epsilon + \xi_i + \hat{J}_i - J_i) - \sum_{i=1}^N \hat{\alpha}_i (\epsilon + \hat{\xi}_i - \hat{J}_i + J_i) \quad (4.7)$$

Εφαρμόζοντας τη θεωρία σαγματικού σημείου (Saddle Point) και τις συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker [3] καταλήγουμε στο ότι ο νέος προσεγγιστής θα δίνεται από την εξίσωση:

$$\begin{aligned} \hat{J}(\theta) &= \sum_{i=1}^N (a_i - \hat{a}_i) \phi(\theta_i)^T \phi(\theta) \\ &= \sum_{i=1}^N (a_i - \hat{a}_i) k(\theta, \theta_i) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Στη παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιούμε συναρτήσεις kernel $k(\theta_n, \theta_m)$. Μερικές γνωστές συναρτήσεις kernel είναι οι γραμμικές, οι πολυωνυμικές, οι σιγμοειδείς και οι ακτινικές συναρτήσεις. Στο πειράματα 2 έως 5, που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 6, οι συναρτήσεις kernel είναι ακτινικές-γκουσιανές, δηλαδή συναρτήσεις της μορφής:

$$k(\theta, \theta_i) = \exp\left(-\frac{\|\theta - \theta_i\|^2}{2\sigma^2}\right)$$

Στο πειράματα 2 έως 5 του κεφαλαίου 6, χρησιμοποιείται η παράμετρος v αντί της ϵ [17]. Σ' αυτή την περίπτωση το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής: Αντί να ορίσουμε τον σωλήνα που εξαρτάται από την παράμετρο ϵ , ορίζουμε ότι το μέγιστο πλήθος σημείων των δεδομένων που θα αποτελούν διανύσματα υποστήριξης (θα βρίσκονται μέσα ή πάνω στα όρια του σωλήνα) ισούται με vN .

Σε αυτήν την περίπτωση η ακρίβεια του προσεγγιστή εξαρτάται από τις παραμέτρους C , v και από κάποιες παραμέτρους των συναρτήσεων kernel που έχουμε επιλέξει. Η επιλογή "καλών" τιμών για τις παραμέτρους αυτές γίνεται χρησιμοποιώντας τη θεωρία n-fold cross validation.

3. Χρήση του προσεγγιστή για την εκτίμηση της κλίσης: Για το πλήθος S βρίσκουμε το $\theta(j)$ που αντιστοιχεί στην καλύτερη λύση έως τότε και το συμβολίζουμε με $\theta^*(j)$. Τότε δημιουργούμε διαταραχές στο διάνυσμα $\theta^*(j)$ βάσει της σχέσης:

$$\theta_m(j) = \theta^*(j) - a\Delta(j) \quad (4.9)$$

όπου a μια σταθερά και

$$\Delta(j) = \begin{bmatrix} \Delta_1(j) \\ \vdots \\ \Delta_p(j) \end{bmatrix}$$

είναι ένα διάνυσμα τυχαίων, ανεξάρτητων διαταραχών. Μια θεωρητικά αποδεκτή επιλογή είναι οι τιμές του διανύσματος $\Delta(j)$ να ακολουθούν την συμμετρική κατανομή Bernoulli, με μέση τιμή μηδέν.

Η εκτίμηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για τα διαταραγμένα $\theta(j)$ υπολογίζεται μέσω της σχέσης (4.8), όταν χρησιμοποιείται η θεωρία των Support Vector Machines, ή μέσω ακόλουθης σχέσης, στις υπόλοιπες περιπτώσεις:

$$\hat{J}(\theta_m(j)) = w^T \varphi(\theta_m(j)) \quad (4.10)$$

Προκειμένου να εκτελέσουμε μια καλή εξερεύνηση στο χώρο που βρίσκεται κοντά στο $\theta^*(j)$ δεν αρκούμαστε σε ένα μόνο διάνυσμα διαταραχών του διανύσματος $\theta^*(j)$. Οπότε, επαναλαμβάνουμε τα όσα αναφέραμε στο βήμα 3 έως τώρα, για ένα πλήθος N επαναλήψεων που ορίζεται από το χρήστη. Στο τέλος των επαναλήψεων αυτών θα έχουν προκύψει N ζεύγη σημείων $(\theta_m(j), \hat{J}(\theta_m(j)))$. Από το σύνολο των $\theta_m(j)$ επιλέγουμε εκείνο που αντιστοιχεί στην καλύτερη τιμή της \hat{J} . Το επιλεγμένο $\theta_m^*(j)$ αποτελεί το διάνυσμα παραμέτρων της επόμενης επανάληψης του αλγορίθμου:

$$\theta(j+1) = \theta_m^*(j) \quad (4.11)$$

4.3 Ο αλγόριθμος Policy learning by Weighting Exploration with the Returns (PoWER)

Ένα πεδίο που ασχολείται ενεργά με τη μάθηση αυτόνομων συστημάτων ελέγχου είναι η Ενισχυτική Μάθηση (Reinforcement Learning). Εδώ η διαδικασία της μάθησης είναι αυτόνομη, καθώς δεν απαιτείται κάποιος δάσκαλος να διδάξει στο σύστημα πώς πρέπει να αντιδρά σε κάθε περίπτωση, αλλά το ίδιο το σύστημα μέσα από την αλληλεπίδρασή του με το περιβάλλον μαθαίνει ποιες ενέργειες είναι προς όφελός του και ποιες εις βάρος του, ακολουθώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία που ακολουθούμε και για τους αλγορίθμους προσαρμοστικής βελτιστοποίησης.

Ένας αλγόριθμος ο οποίος προέρχεται από το πεδίο της Ενισχυτικής Μάθησης είναι ο Policy learning by Weighting Exploration with the Returns (PoWER) των Kober and Peters [13].

Έστω ότι θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε τη συνάρτηση $J(\theta)$ μεταβάλλοντας τις τιμές του διανύσματος $\theta \in \mathbb{R}^p$. Υποθέτουμε ότι δεν γνωρίζουμε αναλυτικά την κλίση $\nabla J(\theta)$ και δεν μπορούμε να μετρήσουμε ή να υπολογίσουμε τις τιμές της $\nabla J(\theta)$ για κάθε $\theta \in \mathbb{R}^p$. Μπορούμε όμως για οποιοδήποτε διάνυσμα θ να μετρήσουμε ή να υπολογίσουμε το $J(\theta)$.

Υποθέτουμε ότι

$$\Delta(j) = \begin{bmatrix} \Delta_1(j) \\ \vdots \\ \Delta_p(j) \end{bmatrix}$$

είναι ένα διάνυσμα τυχαίων, ανεξάρτητων διαταραχών. Επιλέγουμε οι τιμές του διανύσματος $\Delta(j)$ να ακολουθούν τη κατανομή Gauss, με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση σ^2 .

Πίνακας 4.4: Ο αλγόριθμος PoWER

Για $j = 1$ έως Μέγιστο πλήθος επαναλήψεων

Για $i = 1$ έως N

1. $\theta(j, i) = \theta(j) + \Delta(i)$
2. Υπολογίζουμε το $r(i, 1 : T)$ που αντιστοιχεί στο διάνυσμα των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης J σε ένα σύνολο T δεδομένων του διανύσματος κατάστασης, όταν το διάνυσμα παραμέτρων $\theta(j, i)$ είναι σταθερό για το σύνολο T .

Για $t = 1$ έως T

Υπολογίζουμε $Q(i, t) = \sum_{k=t}^T r(i, k)$

Τέλος

Τέλος

1. Βρίσκουμε τα 2 καλύτερα Q και τα αποθηκεύουμε στον πίνακα Q^*
2. Υπολογίζουμε το $\theta(j+1)$ μέσω της σχέσης:

$$\theta(j+1) = \theta(j) + \frac{\sum_{i=1}^N \Delta(i) \sum_{t=1}^T Q(i, t)}{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T Q(i, t)}$$

Τέλος

4.4 Ο αλγόριθμος Cross Entropy (CE)

Ένας ακόμα αλγόριθμος προσαρμοστικής βελτιστοποίησης είναι ο Cross Entropy (CE) [8, 21].

Έστω ότι θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε τη συνάρτηση $J(\theta)$ μεταβάλλοντας τις τιμές του διανύσματος $\theta \in \mathbb{R}^p$. Υποθέτουμε ότι δεν γνωρίζουμε αναλυτικά την κλίση $\nabla J(\theta)$ και δεν μπορούμε να μετρήσουμε ή να υπολογίσουμε τις τιμές της $\nabla J(\theta)$ για κάθε $\theta \in \mathbb{R}^p$. Μπορούμε όμως για οποιοδήποτε διάνυσμα θ να μετρήσουμε ή να υπολογίσουμε το $J(\theta)$.

Υποθέτουμε και πάλι ότι

$$\Delta(j) = \begin{bmatrix} \Delta_1(j) \\ \vdots \\ \Delta_p(j) \end{bmatrix}$$

είναι ένα διάνυσμα τυχαίων, ανεξάρτητων διαταραχών και επιλέγουμε οι τιμές του διανύσματος $\Delta(j)$ να ακολουθούν τη κατανομή *Gauss*, με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση $\sigma^2(j)$ να μεταβάλλεται πλέον σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου ως εξής:

Έστω ότι δημιουργούμε ένα σύνολο N σημείων $(\theta_m(j), J(\theta_m(j)))$ τα οποία προκύπτουν από N τυχαία διανύσματα $\Delta(j)$ όπου:

$$\theta_m(j) = \theta(j) + \Delta(j)$$

Κατατάσσουμε τα σημεία κατά φθίνουσα σειρά των J και απ' αυτά επιλέγουμε τα πρώτα B (το B ορίζεται από το χρήστη). Τότε, υπολογίζουμε το νέο διάνυσμα παραμέτρων:

$$\theta(j+1) = \sum_{i=1}^B \frac{\theta_m(i)}{B} \quad (4.12)$$

και η νέα τυπική απόκλιση της κατανομής *Gauss* είναι η εξής:

$$\sigma^2(j+1) = \sum_{i=1}^B \frac{(\theta(j+1) - \theta_m(i))^2}{B} \quad (4.13)$$

Στο πίνακα 4.5 παρουσιάζεται σε μορφή ψευδοκώδικα ο αλγόριθμος Cross Entropy.

Πίνακας 4.5: Ο αλγόριθμος CE

<p>Για $j = 1$ έως Μέγιστο πλήθος επαναλήψεων</p> <p> Για $i = 1$ έως N</p> <p> 1. $\theta_m(i) = \theta(j) + \Delta(j)$ με $\Delta(j) \sim N(0, \sigma^2(j))$</p> <p> 2. Λαμβάνουμε τη μέτρηση $J_B(i) = J(\theta_m(i))$</p> <p> Τέλος</p> <p> 1. Κατατάσσουμε τα σημεία $(\theta_m(i), J_B(i))$, $i = 1, \dots, N$ κατά φθίνουσα σειρά των J</p> <p> 2. Υπολογίζουμε το $\theta(j+1)$ και το $\sigma^2(j+1)$ μέσω των σχέσεων:</p> $\theta(j+1) = \sum_{i=1}^B \frac{\theta_m(i)}{B}$ $\sigma^2(j+1) = \sum_{i=1}^B \frac{(\theta(j+1) - \theta_m(i))^2}{B}$ <p> Τέλος</p>
--

Για την εφαρμογή των αλγορίθμων προσαρμοστικής βελτιστοποίησης, που παρουσιάστηκαν παραπάνω, στο μοντέλο προσομοίωσης του EnergyPlus απαιτείται ο ορίσμος

1. της αντικειμενικής συνάρτησης J που καλούμαστε να βελτιστοποιήσουμε και για την οποία δεν γνωρίζουμε την αναλυτική της μορφή αλλά μπορούμε να την μετρήσουμε - υπολογίσουμε
2. του διανύσματος κατάστασης x , που αποτελείται από το σύνολο των μεταβλητών που θεωρούμε ότι επιδρούν στο αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης και
3. του διανύσματος των αποφάσεων ελέγχου u , που αποτελούν τις αποφάσεις στις οποίες η βελτιστοποίηση καταλήγει για τα συστήματα ελέγχου που θεωρούμε πως υπάρχουν στο κτήριο.

Στα πείραματά που παρουσιάζονται στο 6ο κεφάλαιο, χρησιμοποιούνται γραμμικοί ελεγκτές:

$$u = \theta \cdot x \quad (4.14)$$

οπού θ είναι το διάνυσμα ή η μήτρα (ανάλογα με τη διάσταση του διανύσματος u) των παραμέτρων ελέγχου.

Επιπλέον σε κάθε αλγόριθμο απαιτείται ο ορισμός των ελεύθερων παραμέτρων του.

- Στον αλγόριθμο SPSA οι ελεύθερες παράμετροι είναι οι λ , λ_0 , a_1 , a_2 , c το αρχικό διάνυσμα παραμέτρων ελέγχου $\theta(0)$ και οι ακολουθίες λ_j , c_j .
- Στον αλγόριθμο AFT με SVR οι ελεύθερες παράμετροι είναι L_r , L_h οι συναρτήσεις kernel και το αρχικό διάνυσμα παραμέτρων ελέγχου $\theta(0)$.
- Στον αλγόριθμο PoWER οι ελεύθερες παράμετροι είναι
- Στον αλγόριθμο CE οι ελεύθερες παράμετροι είναι το B και το αρχικό διάνυσμα παραμέτρων ελέγχου $\theta(0)$.

Κεφάλαιο 5

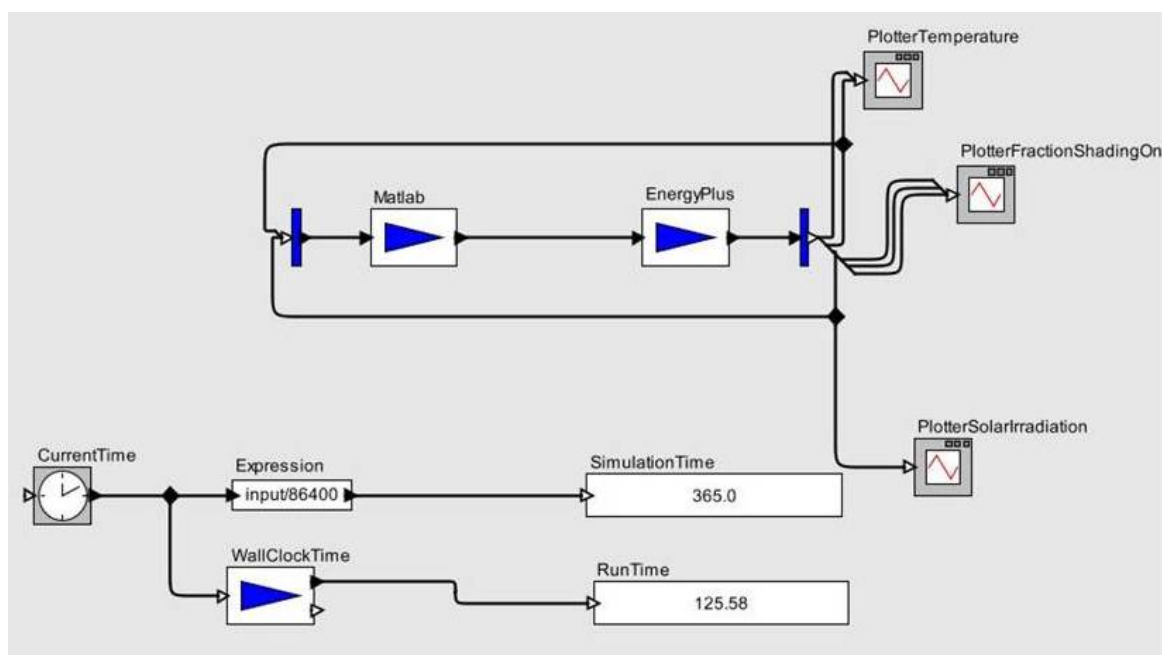
Ενσωμάτωση των Στρατηγικών Ελέγχου στο Θερμικό Μοντέλο

5.1 Παρουσίαση του Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB)

Έχοντας επιλέξει το EnergyPlus ως λογισμικό ανάπτυξης θερμικού μοντέλου αναζητούμε τον τρόπο με τον θα ενσωματώσουμε στρατηγικές ελέγχου στο θερμικό μας μοντέλο. Καταλήγουμε ότι η ενσωμάτωση στρατηγικών ελέγχου θα πραγματοποιηθεί μέσω του Building Controls Virtual Test Bed [25]. Το Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB) είναι ένα λογισμικό, που αναπτύχθηκε από το Lawrence Berkeley National Laboratory και διατίθεται μέσω της ιστοσελίδας <http://simulationresearch.lbl.gov/bcvtb>. Πρόκειται για ένα περιβάλλον προσομοίωσης που βρίσκει εφαρμογή στην ανάπτυξη αλγορίθμων και στρατηγικών ελέγχου για μεγάλα ενεργειακά συστήματα σε κτήρια (π.χ. HVAC, φωτισμός, σκίαση, κλπ.). Επιτρέπει επίσης, σε έμπειρους χρήστες τη σύνδεση διαφορετικών προγραμμάτων προσομοίωσης για κατανεμημένη προσομοίωση ή για προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο και επικοινωνία αυτής με κάποιο σύστημα ελέγχου κτηρίων. Για παράδειγμα, το BCVTB προσφέρει τη δυνατότητα η προσομοίωση του κελύφους του κτηρίου και του συστήματος HVAC να πραγματοποιηθεί στο EnergyPlus και η προσομοίωση της λογικής ελέγχου στο Matlab. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης του BCVTB ανταλλάσσονται δεδομένα μεταξύ των δύο λογισμικών. Ένα μοντέλο του συστήματος για την εν λόγω συνδεδεμένη προσομοίωση φαίνεται στο σχήμα 5.1.

Το BCVTB βασίζεται στο περιβάλλον του λογισμικού Ptolemy II που έχει αναπτυχθεί από το Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια στο Μπέρκλεϊ. Έως σήμερα τα λογισμικά τα οποία μπορούν να συνδεθούν στο BCVTB είναι:

- EnergyPlus,
- Dymola,
- MATLAB,
- Simulink,
- BACnet



Σχήμα 5.1: Μοντέλο Ptolemy του γραφικού περιβάλλοντος Vergil για τη συνδεδεμένη προσομοίωση Matlab - EnergyPlus

Επιπλέον, κάθε εκτελέσιμο αρχείο μπορεί να κληθεί μέσα από το BCVTB. Αυτό επιτρέπει, για παράδειγμα, τη χρήση του Radiance για την αξιολόγηση των επιδόσεων φωτός μέσα σε ένα κλειστό σύστημα ελέγχου που υλοποιείται στο BCVTB.

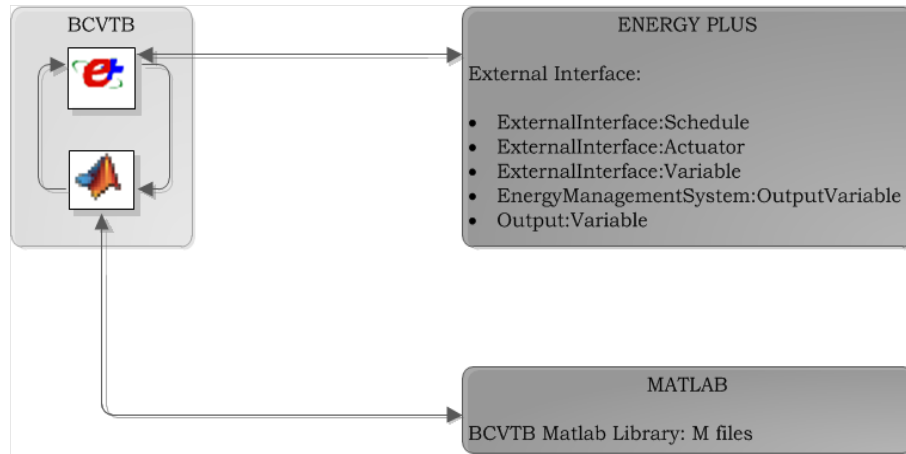
5.2 Αρχιτεκτονική του Συστήματος

Στόχος της παραγράφου αυτής είναι ο αναγνώστης να κατανοήσει κάθε τρόπο με τον οποίο μπορεί να επέμβει και να τροποποιήσει τις παραμέτρους ενός μοντέλου που προσομοιώνεται στο EnergyPlus μέσω εντολών που καταγράφονται στο Matlab και βασίζονται σε αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου αυτού, όταν τα 2 λογισμικά αυτά συνδέονται έμμεσα στο BCVTB. Το σχήμα 5.2 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική της σύνδεσης των λογισμικών EnergyPlus και Matlab με το BCVTB.

5.2.1 Αλγόριθμος Ανταλλαγής Δεδομένων

Στο BCVTB, ανταλλάσσονται δεδομένα μεταξύ των λογισμικών που ενσωματώνονται σε αυτό, συμπεριλαμβανομένων των EnergyPlus και Matlab, χρησιμοποιώντας ένα σταθερό χρονικό βήμα συγχρονισμού. Ο αλγόριθμος για την ανταλλαγή δεδομένων είναι ο εξής:

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα σύστημα με δύο λογισμικά, με το λογισμικό 1 να είναι το EnergyPlus και το λογισμικό 2 να είναι το Matlab. Ας υποθέσουμε ακόμα ότι κάθε λογισμικό επιλύει μια συνήθη διαφορική εξίσωση η οποία συνδέεται με τη διαφορική εξίσωση που επιλύει το άλλο λογισμικό. Έστω N ο αριθμός των χρονικών βημάτων και $(1, \dots, k, \dots, N)$ τα χρονικά βήματα. Θα χρησιμοποιήσουμε τους δείκτες 1 και 2 για τη μεταβλητή κατάσταση



Σχήμα 5.2: Αρχιτεκτονική του συστήματος σύνδεσης των λογισμικών Matlab και EnergyPlus στο BCVTB

και τη συνάρτηση που υπολογίζει τη μεταβλητή κατάστασης του επόμενου βήματος για τα λογισμικά 1 και 2, αντίστοιχα. Τότε:

$$x_1(k+1) = f_1(x_1(k), x_2(k))$$

$$x_2(k+1) = f_2(x_2(k), x_1(k))$$

Για την μετάβαση από το βήμα k στο βήμα $k+1$ το κάθε λογισμικό χρησιμοποιεί τον δικό του αλγόριθμο για να υπολογίσει τη νέα του κατάσταση. Στο τέλος του βήματος, το λογισμικό 1 στέλνει τη νέα κατάσταση $x_1(k+1)$ στο BCVTB και λαμβάνει την κατάσταση $x_2(k+1)$ από το BCVTB. Η αντίστοιχη ανταλλαγή καταστάσεων πραγματοποιείται και για το λογισμικό 2. Το BCVTB συγχρονίζει τα δεδομένα με τέτοιο τρόπο ώστε να μη χρίζει σημασίας η σειρά με την οποία τα προγράμματα καλούνται από το BCVTB. Στη συνέχεια αυτής της παραγράφου παρουσιάζεται το πως πραγματοποιείται η επικοινωνία και η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ EnergyPlus - BCVTB και Matlab - BCVTB.

5.2.2 Επικοινωνία EnergyPlus - BCVTB

Ο χρήστης μπορεί να επενεργήσει μέσω του BCVTB σε τρία πεδία εισόδου του EnergyPlus και αυτά είναι τα εξής:

- ExternalInterface:Schedule
- ExternalInterface:Actuator
- ExternalInterface:Variable

Το ExternalInterface:Schedule αποτελεί πεδίο του EnergyPlus που επιτρέπει στο χρήστη να επηρεάζει το πρόγραμμα λειτουργίας στοιχείων όπως, η πυκνότητα κατοίκησης, ο φωτισμός, η γωνία των περσίδων των παραθύρων, ο θερμοστατικός έλεγχος και η δραστηριότητα κατοίκων. Σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης, η τιμή κάθε αντικειμένου που ορίζεται

στο πεδίο ExternalInterface:Schedule ισούται με την τιμή που έλαβε από το εξωτερικό περιβάλλον (BCVTB). Τα άλλα δύο πεδία απαιτούν τη γνώση της γλώσσας προγραμματισμού Erl, μια γλώσσα η οποία χρησιμοποιείται από το EnergyPlus για τη μοντελοποίηση συστημάτων ελέγχου βασισμένων όμως μόνο σε απλούς κανόνες (rule based control) μέσα στο ίδιο το EnergyPlus. Το BCVTB μπορεί ακόμα να επικοινωνήσει με τα ακόλουθα πεδία του EnergyPlus:

- Output:Variable
- EnergyManagementSystem:OutputVariable

Όσα αντικείμενα ορίζονται στα δύο αυτά πεδία μπορούν να αποσταλούν από το EnergyPlus στο BCVTB σε κάθε χρονικό βήμα.

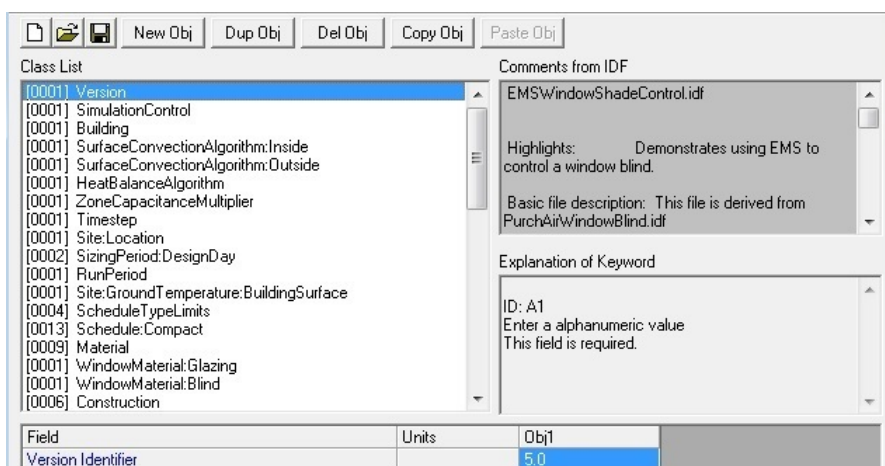
Για τον καθορισμό της ανταλλαγής δεδομένων EnergyPlus - BCVTB, απαιτούνται τα εξής τρία βήματα από τον χρήστη:

1. Ανάπτυξη του αρχείου idf του EnergyPlus
2. Ανάπτυξη του αρχείου xml για τον καθορισμό των αντικειμένων που ανταλλάσσονται
3. Ανάπτυξη του μοντέλου Ptolemy στο γραφικό περιβάλλον Vergil

Το τρίτο βήμα ορίζει την σύνδεση των επιμέρους λογισμικών μέσω του BCVTB και θα αποτελέσει τον επίλογο αυτού του κεφαλαίου.

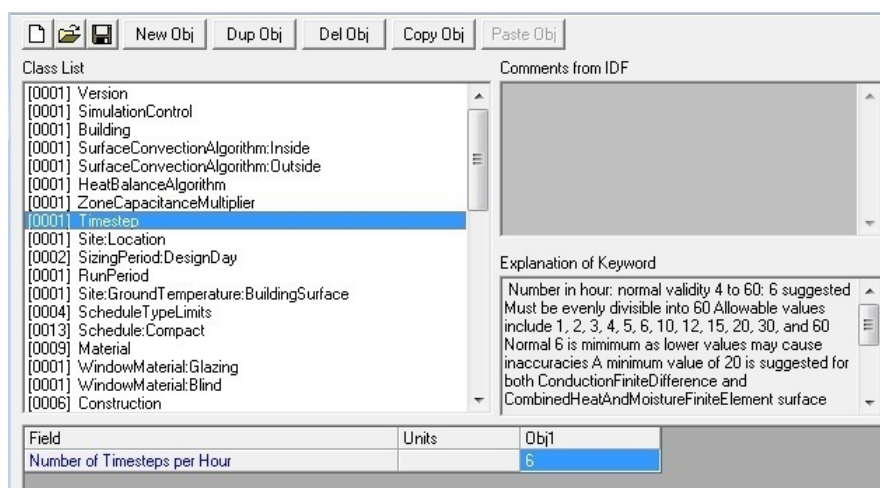
5.2.2.1 Ανάπτυξη του αρχείου idf του EnergyPlus

Έστω ότι έχουμε αναπτύξει το αρχείο εισόδου που αποτελεί το θερμικό μοντέλο του προς μελέτη κτηρίου. Στοχεύοντας στην επικοινωνία του EnergyPlus με το BCVTB απαιτείται η συμπλήρωση των κατάλληλων τιμών σε συγκεκριμένα πεδία του αρχείου εισόδου. Το αρχικό πεδίο το οποίο πρέπει να προσέξουμε είναι η έκδοση (Version) του EnergyPlus στην οποία το μοντέλο έχει αναπτυχθεί.



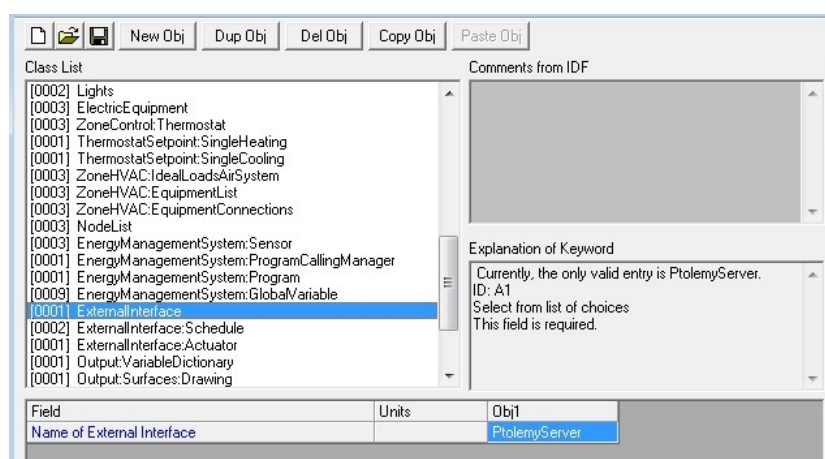
Σχήμα 5.3: Η έκδοση (Version) του EnergyPlus στην οποία το μοντέλο έχει αναπτυχθεί

Προς το παρόν, για την ανάπτυξη του αρχείου εισόδου προτείνεται η έκδοση 5 καθώς είναι συμβατή με την τελευταία έκδοση του BCVTB. Ένα άλλο πεδίο το οποίο παίζει καθοριστικό ρόλο στη σωστή επικοινωνία EnergyPlus - BCVTB είναι το χρονικό βήμα της προσομοίωσης (timestep).



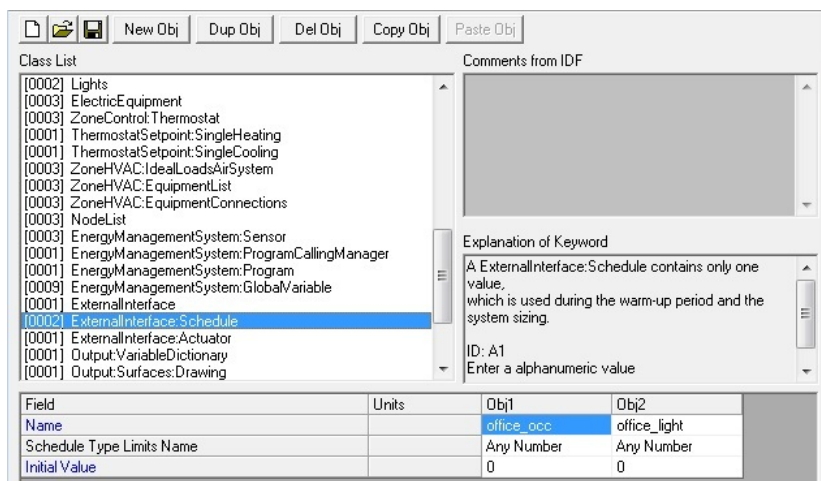
Σχήμα 5.4: Ορισμός του χρονικού βήματος της προσομοίωσης (timestep)

Η τιμή του πεδίου αυτού ορίζει το πλήθος των βημάτων που πραγματοποιούνται σε μια ώρα. Συνεπώς η τιμή 6 που φαίνεται στο σχήμα 4 καθορίζει ως χρονικό βήμα της προσομοίωσης τα 10 λεπτά. Το βήμα αυτό πρέπει να συμπίπτει με το βήμα που ορίζεται στο μοντέλο Ptolemy όπως θα δούμε παρακάτω, διαφορετικά ο συγχρονισμός των EnergyPlus - BCVTB χάνεται και οδηγούμαστε σε ανεπιθύμητο τερματισμό της προσομοίωσης. Το πεδίο το οποίο ορίζει το εξωτερικό περιβάλλον με το οποίο το EnergyPlus επικοινωνεί είναι το ExternalInterface.



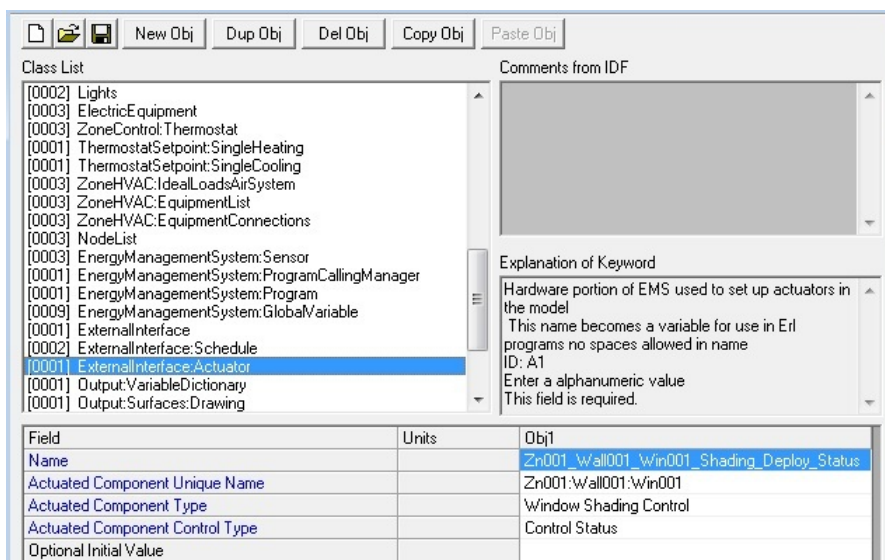
Σχήμα 5.5: Ορισμός του εξωτερικού περιβάλλοντος με το οποίο το EnergyPlus επικοινωνεί

Στη περίπτωση που μελετάμε, το εξωτερικό περιβάλλον είναι το BCVTB και το όνομα που πρέπει να συμπληρωθεί στο πεδίο αυτό είναι PtolemyServer. Τα υπόλοιπα πεδία είναι τα πεδία με τα οποία το BCVTB επικοινωνεί. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο τα πεδία αυτά δηλώνονται μέσω του idf editor.

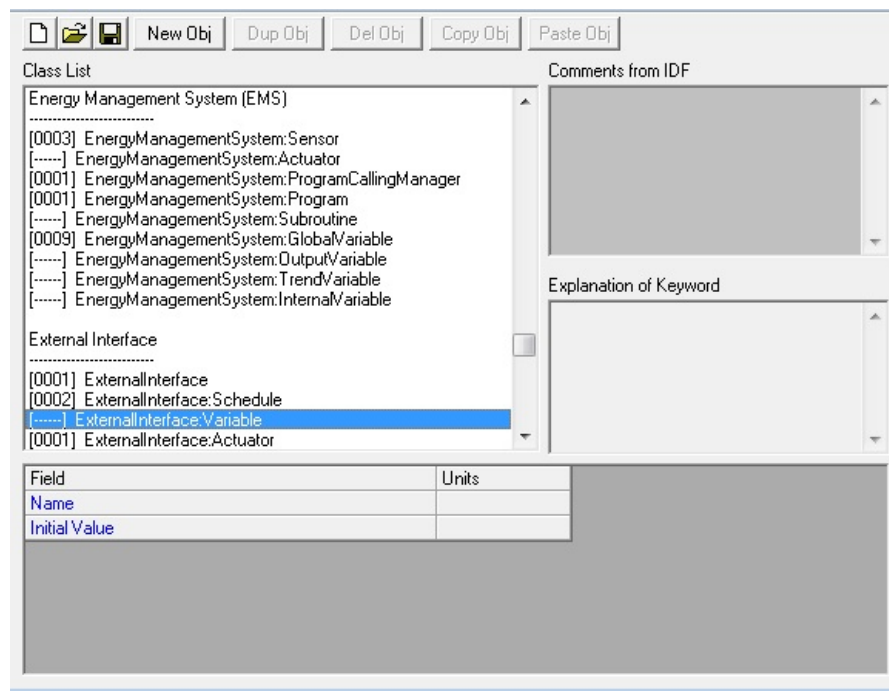


Σχήμα 5.6: Ορισμός των αντικειμένων στο πεδίο ExternalInterface:Schedule

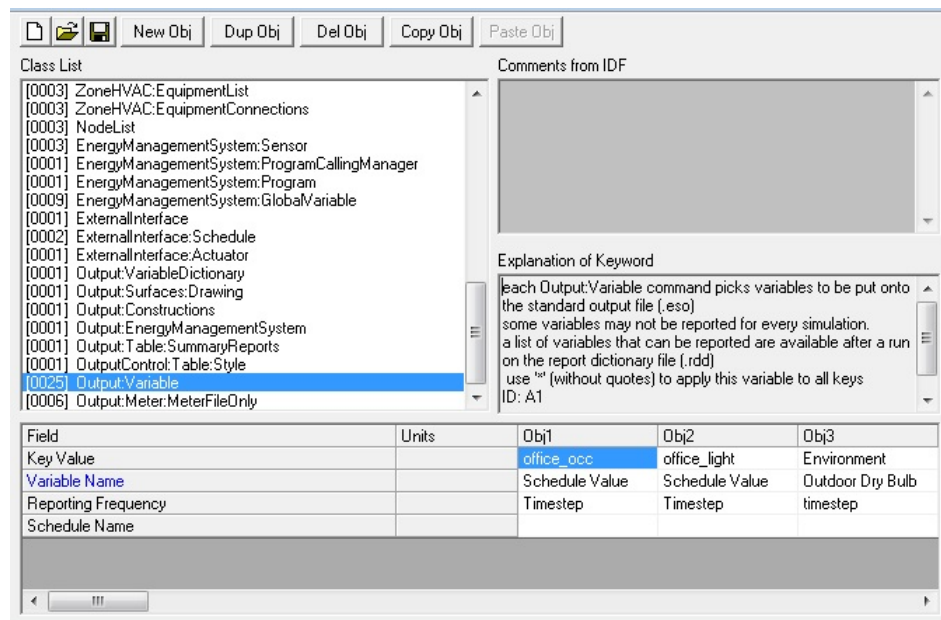
Μέσω των 2 αντικειμένων που φαίνονται στο παραπάνω σχήμα ορίζουμε ότι οι τιμές για τα schedules, με ονόματα office occ, office light, σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης λαμβάνονται από το εξωτερικό περιβάλλον.



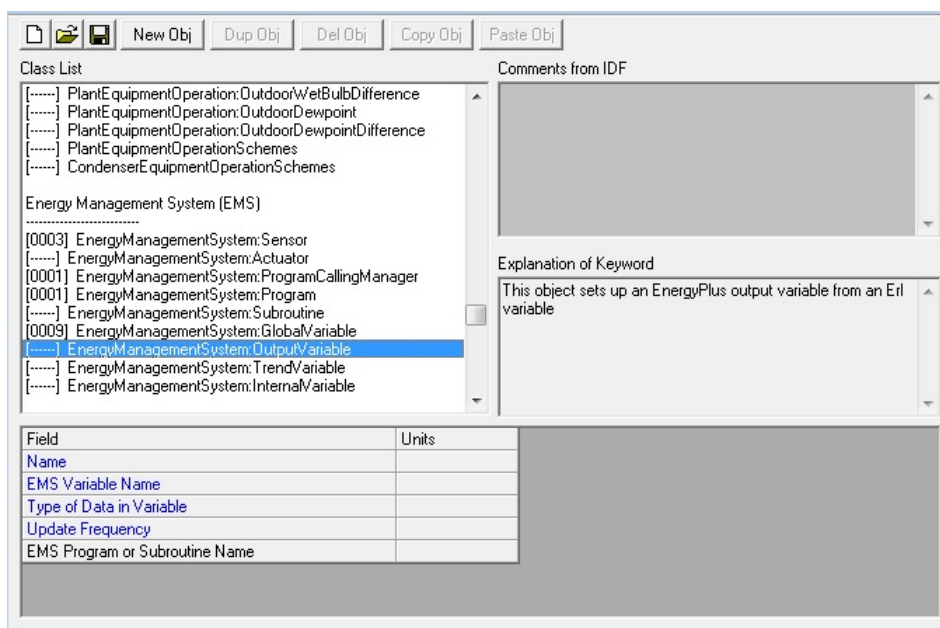
Σχήμα 5.7: Ορισμός των αντικειμένων στο πεδίο ExternalInterface:Actuator



Σχήμα 5.8: Ορισμός των αντικειμένων στο πεδίο ExternalInterface:Variable



Σχήμα 5.9: Ορισμός των αντικειμένων στο πεδίο Output:Variable



Σχήμα 5.10: Ορισμός των αντικειμένων στο πεδίο EMS:OutputVariable

5.2.2.2 Ανάπτυξη του αρχείου xml για τον καθορισμό των αντικειμένων που ανταλλάσσονται

Το αρχείο εισόδου του EnergyPlus έχει ενημερωθεί πλέον, για τα δεδομένα που θα ανταλλάσει με το εξωτερικό περιβάλλον με το οποίο συνδέεται (BCVTB). Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο και για το BCVTB. Για το BCVTB τα δεδομένα τα οποία πρόκειται να ανταλλαχτούν μεταξύ EnergyPlus και BCVTB ορίζονται σε ένα xml αρχείο το οποίο ονομάζεται variables.cfg. Το αρχείο αυτό πρέπει να βρίσκεται στο ίδιο φάκελο με το idf αρχείο εισόδου του EnergyPlus. Το xml ξεκινάει με την ακόλουθη επικεφαλίδα:

```
<?xmlversion = "1.0" encoding = "ISO - 8859 - 1"? >
<!DOCTYPEBCVTB - variablesSYSTEM"variables.dtd" >
```

Η επικεφαλίδα ακολουθείται από το εξής στοιχείο:

```
< BCVTB - variables >

< /BCVTB - variables >
```

Όπως βλέπετε το στοιχείο αυτό αποτελείται από 2 γραμμές. Ανάμεσα στις 2 γραμμές αυτές καταγράφονται όλα τα αντικείμενα τα οποία ορίζουν την ανταλλαγή δεδομένων. Η σειρά με την οποία καταγράφονται τα αντικείμενα ορίζει τη σειρά με την οποία αποθηκεύονται τα δεδομένα στα διανύσματα εισόδου και εξόδου του BCVTB. Για παράδειγμα, έστω ότι θέλουμε

το BCVTB να διαβάσει τη θερμοκρασία ζώνης και τη σχετική υγρασία ζώνης σε κάθε χρονικό βήμα. Αν ορίσουμε πρώτα τη θερμοκρασία ζώνης και ύστερα τη σχετική υγρασία ζώνης στο `variables.cfg` τότε το διάνυσμα εισόδου του BCVTB θα αποτελείται από τα δύο αυτά στοιχεία με πρώτο τη θερμοκρασία ζώνης και δεύτερο τη σχετική υγρασία ζώνης.

Όπως αναφέραμε παραπάνω το BCVTB μπορεί να στείλει δεδομένα στα αντικείμενα τα οποία ορίζονται στα πεδία `ExternalInterface:Schedule`, `ExternalInterface:Actuator`, `ExternalInterface:Variable` του `EnergyPlus`. Για να ορίσουμε την αποστολή δεδομένων σε κάποιο αντικείμενο που ορίζεται στο πεδίο `ExternalInterface:Schedule` στο `variables.cfg`, γράφουμε:

```
< variablesource = "Ptolemy" >
< EnergyPlusschedule = "NAME" / >
< /variable >
```

όπου, `NAME` είναι το όνομα του αντίστοιχου αντικειμένου που ορίζεται στο πεδίο `ExternalInterface:Schedule` του `EnergyPlus`. Για να ορίσουμε την αποστολή δεδομένων σε κάποιο αντικείμενο που ορίζεται στο πεδίο `ExternalInterface:Actuator`, γράφουμε:

```
< variablesource = "Ptolemy" >
< EnergyPlusactuator = "NAME" / >
< /variable >
```

όπου, `NAME` είναι το όνομα του αντίστοιχου αντικειμένου που ορίζεται στο πεδίο `ExternalInterface:Actuator` του `EnergyPlus`. Για να ορίσουμε την αποστολή δεδομένων σε κάποιο αντικείμενο που ορίζεται στο πεδίο `ExternalInterface:Variable`, γράφουμε:

```
< variablesource = "Ptolemy" >
< EnergyPlusvariable = "NAME" / >
< /variable >
```

όπου, `NAME` είναι το όνομα του αντίστοιχου αντικειμένου που ορίζεται στο πεδίο `ExternalInterface:Variable` του `EnergyPlus`.

Το BCVTB μπορεί ακόμα να λάβει δεδομένα απ' τα αντικείμενα τα οποία ορίζονται στα πεδία `Output:Variable` και `EnergyManagementSystem:OutputVariable`. Για να ορίσουμε την αποστολή δεδομένων σε κάποιο αντικείμενο που ορίζεται στο πεδίο `Output:Variable`, γράφουμε:

```
< variablesource = "EnergyPlus" >
< EnergyPlusname = "NAME" type = "TYPE" / >
< /variable >
```

όπου, NAME είναι το όνομα του αντίστοιχου αντικειμένου που ορίζεται στο πεδίο Output:Variable του EnergyPlus. Τέλος, για να ορίσουμε την αποστολή δεδομένων σε κάποιο αντικείμενο που ορίζεται στο πεδίο EnergyManagementSystem:OutputVariable, γράφουμε:

```
< variablesource = "EnergyPlus" >
< EnergyPlusname = "EMS"type = "TYPE" / >
< /variable >
```

5.2.3 Επικοινωνία Matlab - BCVTB

Για την επικοινωνία Matlab - BCVTB απαιτείται η δημιουργία ενός αρχείου matlab (.m file). Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε τα στοιχεία που πρέπει να περιλαμβάνει το m file ώστε να πραγματοποιείται η ανταλλαγή δεδομένων σε κάθε βήμα. Τα στοιχεία αυτά είναι τα εξής:

1. Αρχικοποίηση των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν
2. Πρόσβαση στη βιβλιοθήκη της matlab του BCVTB

```
addpath(strcat(getenv('BCVTB_HOME'),' /lib/matlab'));
```

3. Establish the socket connection

```
sockfd = establishClientSocket('socket.cfg');
```

4. Καθορισμός της ανταλλαγής δεδομένων

```
[retVal, flaRea, simTimRea, dblValRea] = ...
    exchangeDoublesWithSocket(sockfd, flaWri, length(u),
    simTimWri, ..., dblValWri);
```

Ας αναφερθούμε στο τι δηλώνουν οι παραπάνω παράμετροι της συνάρτησης:

- sockfd - Socket file descriptor
- flaWri - Communication flag to write to the socket stream. Set to zero for normal operation, or to a negative value to stop the exchange.
- nDblRea - Το πλήθος των μεταβλητών οι οποίες λαμβάνονται από το BCVTB.
- simTimWri - Η παρούσα χρονική στιγμή της προσομοίωσης σε δευτερόλεπτα η οποία γράφεται στο BCVTB.

- `dblValWri` - Το διάστημα των τιμών των μεταβλητών οι οποίες στέλνονται στο BCVTB.
- `retVal` - Μια μεταβλητή που παίρνει μη αρνητική τιμή όταν η ανταλλαγή δεδομένων είναι επιτυχής και αρνητική όταν εμφανίζεται σφάλμα κατά την ανταλλαγή δεδομένων.
- `flaRea` - Communication flag read from the socket stream. `flaRea < 0` indicates that the BCVTB will stop due to an error and not send any more data. `flaRea == 0` is for normal operation. `flaRea == 1` indicates that the final simulation time has been reached and no more data will be exchanged.
- `simTimRea` - Η παρούσα χρονική στιγμή της προσομοίωσης σε δευτερόλεπτα η οποία διαβάζεται από το socket.
- `dblValRea` - Το διάστημα των τιμών των μεταβλητών οι οποίες διαβάζονται από το socket.

Το στοιχείο αυτό καλείται σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης.

5. Κλείσιμο του socket στο τέλος της προσομοίωσης.

```
closeIPC(sockfd);
```

6. Έξοδος από τη MATLAB.

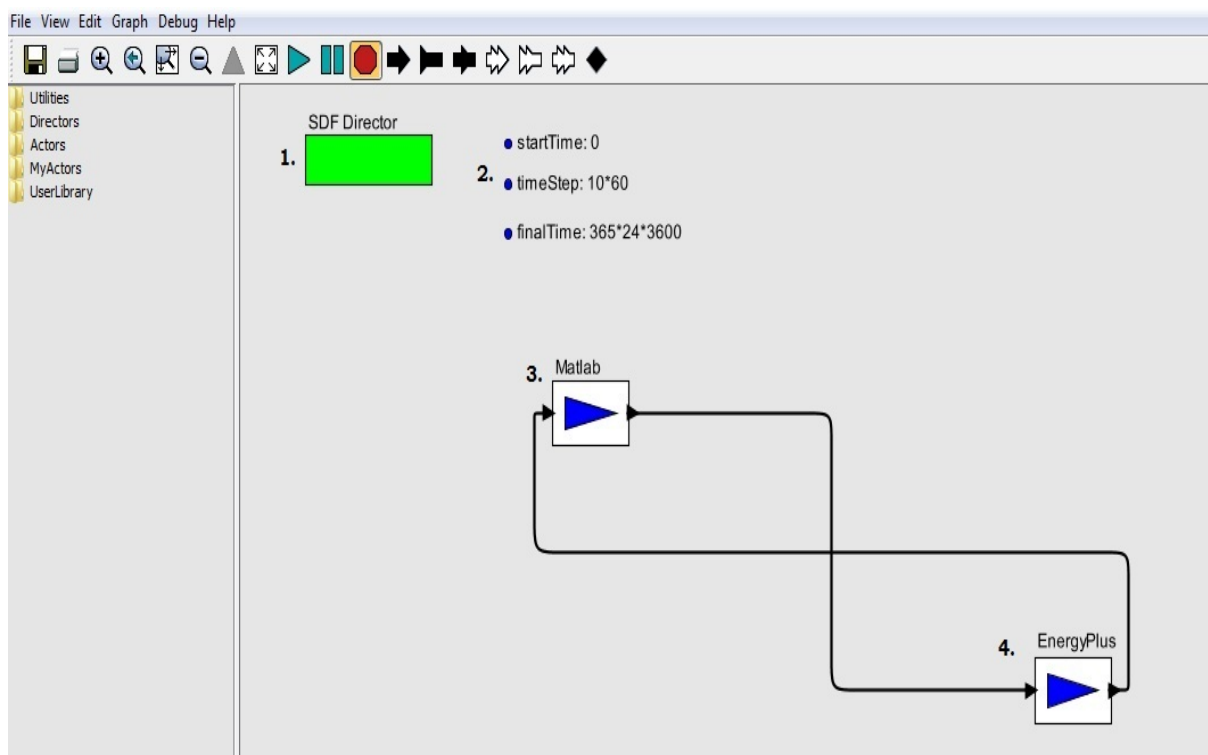
```
exit
```

5.2.4 Ανάπτυξη του μοντέλου Ptolemy στο γραφικό περιβάλλον Vergil

Ακολουθώντας τα παραπάνω βήματα πραγματοποιήσαμε τη καταγραφή των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ EnergyPlus - BCVTB και Matlab - BCVTB. Απομένει, λοιπόν, η έμμεση σύνδεση των 2 λογισμικών μέσω του BCVTB. Για τη σύνδεση αυτή θα αναπτύξουμε ένα μοντέλο Ptolemy στο γραφικό περιβάλλον Vergil. Το σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζει το τελικό μοντέλο Ptolemy και αριθμεί τα στοιχεία τα οποία πρέπει να περιλαμβάνει ώστε να επιτευχθεί η σωστή σύνδεση.

Σύμφωνα με το σχήμα αυτό τα στοιχεία τα οποία πρέπει να οριστούν είναι:

1. SDF Director
2. Η αρχή, το τέλος και το χρονικό βήμα της προσομοίωσης
3. Το Matlab στο γραφικό περιβάλλον
4. Το EnergyPlus στο γραφικό περιβάλλον



Σχήμα 5.11: Αρίθμηση των στοιχείων του μοντέλου Ptolemy που απαιτούνται για τη σωστή σύνδεση EnergyPlus - Matlab

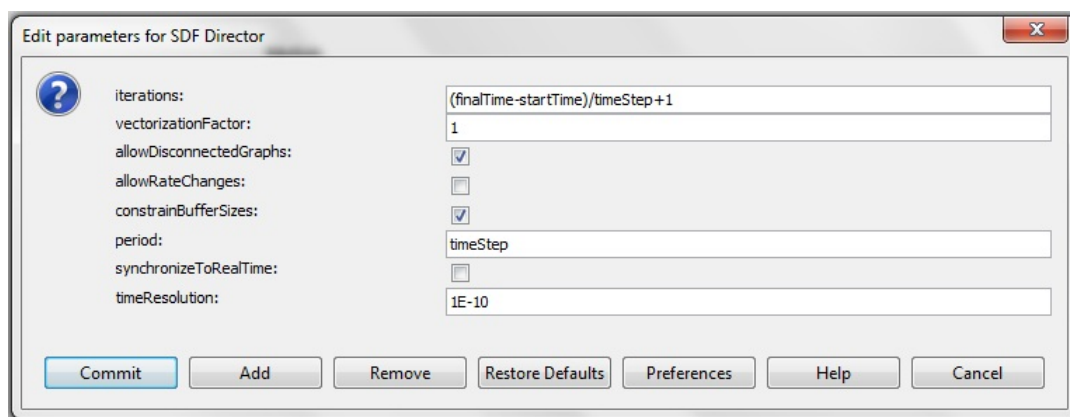
1. SDF Director

Στο γραφικό περιβάλλον της Ptolemy II, διάφορα υπολογιστικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθορίσουν τον τρόπο με τον οποίο κάθε actor, που ορίζεται στο γραφικό περιβάλλον, αλληλεπιδρά με τους υπόλοιπους actors. Το υπολογιστικό μοντέλο το οποίο επιλέγεται ορίζεται από έναν director που πρέπει να περιλαμβάνεται στο μοντέλο Ptolemy. Για το BCVTB χρησιμοποιούμε τον Synchronous Dataflow director, ο οποίος στην Ptolemy II ονομάζεται SDF Director. Ο Director μπορεί να τοποθετηθεί στο μοντέλο ανοίγοντας το φάκελο Directors και σύροντας το εικονίδιο του από το αριστερό τμήμα του παραθύρου που φαίνεται στο σχήμα 11. Κάνοντας διπλό κλικ στο εικονίδιο του SDF Director μπορούμε να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους του.

2. Η αρχή, το τέλος και το χρονικό βήμα της προσομοίωσης

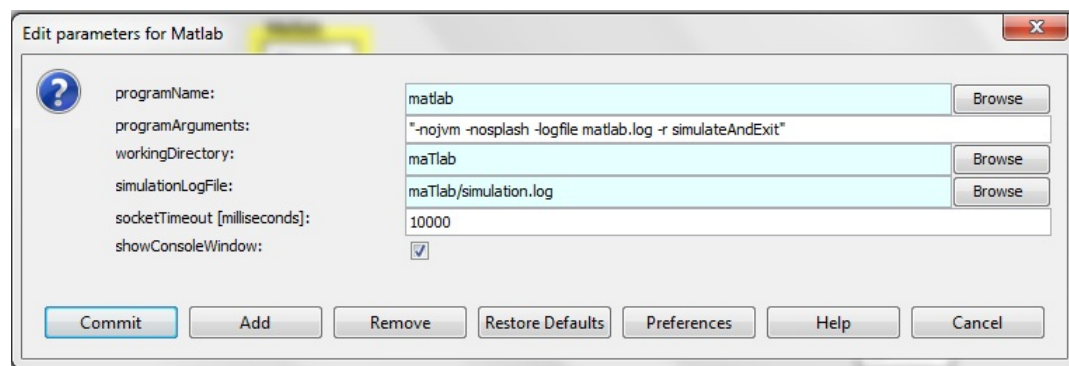
Επιπλέον, στο μοντέλο Ptolemy ορίζονται οι παράμετροι, `startTime`, `timeStep` και `finalTime`. Εκφράζονται σε μονάδες δευτερολέπτου και πρέπει να συμπίπτουν με την έναρξη, το χρονικό βήμα και συνολική διάρκεια που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα προσομοίωσης. Οι παράμετροι `startTime`, `timeStep` και `finalTime` χρησιμοποιούνται και για τη ρύθμιση των παραμέτρων του SDF Director (βλέπετε σχήμα 5.12).

3. Το Matlab στο γραφικό περιβάλλον



Σχήμα 5.12: Καθορισμός των παραμέτρων του SDF Director

Στο μοντέλο Ptolemy το Matlab αποτελεί ένα Simulator Actor. Ο Simulator Actor μπορεί να τοποθετηθεί στο μοντέλο ανοίγοντας το φάκελο Actors, το φάκελο Simulator Actors και σύροντας το εικονίδιο του από το αριστερό τμήμα του παραθύρου που φαίνεται στο σχήμα 11. Κάνοντας διπλό κλικ στο εικονίδιο του Simulator Actor μπορούμε να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους του. Οι παράμετροι οι οποίες πρέπει να οριστούν για το Matlab φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 5.13: Καθορισμός των παραμέτρων του Matlab Actor

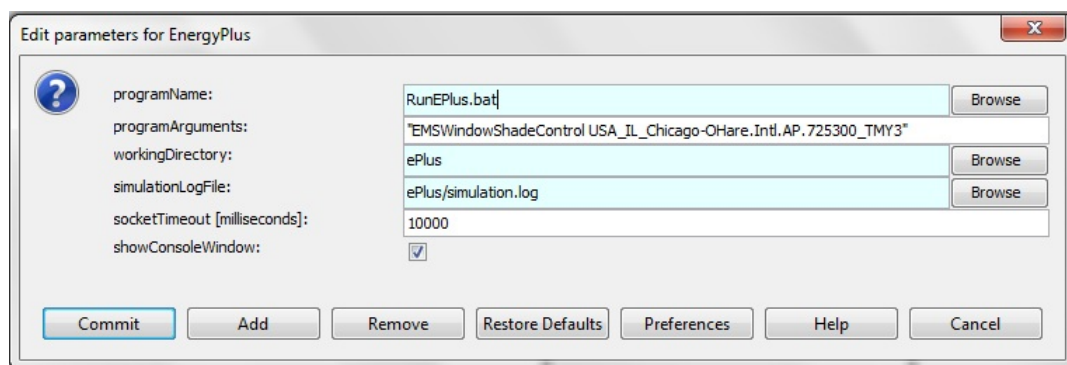
Σύμφωνα με το σχήμα αυτό δηλώνουμε τα εξής:

- **programName** : Το όνομα του εκτελέσιμου αρχείου που προκαλεί την έναρξη του actor είναι **matlab**.
- **programArguments** : Το αρχείο **m.file** το οποίο θα τρέχει με τον συγκεκριμένο actor είναι το **simulateAndExit**.
- **workingDirectory** : Το Directory στο οποίο βρίσκεται το αρχείο **simulateAndExit** είναι το **maTlab**.

- `simulationLogFile` : Το αρχείο καταγραφής συμβάντων (log file) της προσομοίωσης του Matlab βρίσκεται στο φάκελο `matlab`.
- `socketTimeout[milliseconds]` : Χρόνος σε χιλιοστά του δευτερολέπτου για την αρχική σύνδεση του socket. Κατά την έναρξη της προσομοίωσης, το BCVTB περιμένει το πρόγραμμα προσομοίωσης για να συνδεθεί μέσω socket στο BCVTB. Εάν το πρόγραμμα προσομοίωσης δεν συνδεθεί, εντός του χρόνου που καθορίζεται σε αυτή τη παράμετρο, το BCVTB θα σταματήσει εμφανίζοντας ένα λάθος.

4. Το EnergyPlus στο γραφικό περιβάλλον

Στο μοντέλο Ptolemy το EnergyPlus, όπως και το Matlab, αποτελεί ένα Simulator Actor. Ο Simulator Actor του EnergyPlus, τοποθετείται στο μοντέλο με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο τοποθετείται και ο Simulator Actor του Matlab. Οι παράμετροι οι οποίες πρέπει να οριστούν για το EnergyPlus φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 5.14: Καθορισμός των παραμέτρων του EnergyPlus Actor

Σύμφωνα με το σχήμα αυτό δηλώνουμε τα εξής:

- `programName` : Το όνομα του εκτελέσιμου αρχείου που προκαλεί την έναρξη του actor είναι `RunEPlus.bat`.
- `programArguments` : Το αρχείο idf το οποίο θα τρέχει με τον συγκεκριμένο actor είναι το `EMSWindowShadeControl`. Το αρχείο καιρού που θα χρησιμοποιείται είναι το `USA_IL_Chicago – OHare.Intl.AP.725300_TMY3`. Το αρχείο αυτό θα πρέπει να βρίσκεται στο φάκελο Weather Data του EnergyPlus.
- `workingDirectory` : Το Directory στο οποίο βρίσκεται το αρχείο `EMSWindowShadeControl` είναι το `ePlus`.
- `simulationLogFile` : Το log file της προσομοίωσης του EnergyPlus βρίσκεται στο φάκελο `ePlus`.

- `socketTimeout[milliseconds]` : Χρόνος σε χιλιοστά του δευτερολέπτου για την αρχική σύνδεση στο `socket`. Κατά την έναρξη της προσομοίωσης, το BCVTB περιμένει το πρόγραμμα προσομοίωσης για να συνδεθεί μέσω `socket` στο BCVTB. Εάν το πρόγραμμα προσομοίωσης δεν συνδεθεί, εντός του χρόνου που καθορίζεται σε αυτή τη παράμετρο, το BCVTB θα σταματήσει εμφανίζοντας ένα λάθος.

Κεφάλαιο 6

Πειράματα

Έχοντας αναλύσει το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά στη μοντελοποίηση θερμικών μοντέλων στο EnergyPlus, στην ανάπτυξη στρατηγικών ελέγχου που προκύπτουν απ' την εφαρμογή αλγορίθμων προσαρμοστικής βελτιστοποίησης και στον τρόπο με τον οποίο οι στρατηγικές αυτές εφαρμόζονται σε θερμικά μοντέλα, παρουσιάζουμε την ενσωμάτωση στρατηγικών ελέγχου που προκύπτουν από αλγορίθμους προσαρμοστικής βελτιστοποίησης σε δύο υποθετικά - πειραματικά κτήρια. Σε αυτό το κεφάλαιο επιδιώκουμε να αναπτύξουμε στρατηγικές ελέγχου που αποσκοπούν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κάθε υποθετικού κτηρίου χωρίς τη χρήση εκτεταμένων μετρήσεων στο εν λόγω κτήριο αλλά με τη βοήθεια του θερμικού του μοντέλου.

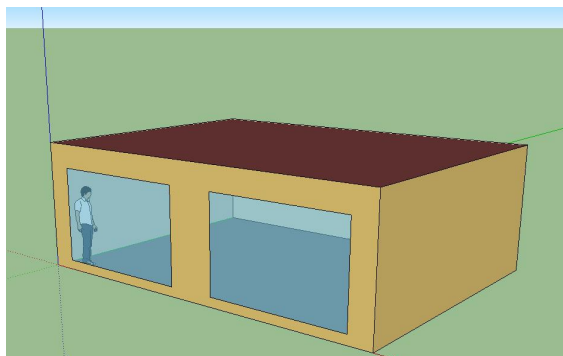
6.1 Πείραμα 1

Στόχος του πειράματος 1 είναι να αποδείξει ότι, οι αλγόριθμοι προσαρμοστικής βελτιστοποίησης SPSA, PoWER, CE, που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4 συγκλίνουν στην ίδια βέλτιστη λύση, με ίδιες ή διαφορετικές αποφάσεις ελέγχου καθώς και να μελετήσουμε την ταχύτητα σύγκλισης του καθενός και την ποιότητα της λύσης (του ελεγκτή). Έτσι, το κτήριο στο οποίο οι αλγόριθμοι και κατα συνέπεια οι στρατηγικές ελέγχου εφαρμόζονται, επιλέγουμε να είναι ιδιαίτερα απλό με, μία θερμική ζώνη, ένα νότιο παράθυρο και μοναδικό ελεγχόμενο σύστημα τις εσωτερικές περσίδες του παραθύρου. Στη συνέχεια της παραγράφου, παρουσιάζεται αναλυτικά το κτήριο, ορίζεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης και παρατίθενται τα αποτελέσματα στα οποία οι αλγόριθμοι προσαρμοστικής βελτιστοποίησης κατέληξαν.

6.1.1 Περιγραφή του Κτηρίου

Το υποθετικό κτήριο που μοντελοποιείται, θεωρούμε ότι βρίσκεται σε υψόμετρο 190 m, γεωγραφικό μήκος -87.5° και γεωγραφικό πλάτος 41.78° . Αποτελείται από ένα και μόνο όροφο ο οποίος αποτελεί και τη μοναδική θερμική ζώνη του κτηρίου. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται φωτογραφίες, όπως αυτές προκύπτουν από την εφαρμογή *OpenStudio* του *Google SketchUp Pro*, και τα στοιχεία του εν λόγω κτηρίου.

1. Γεωμετρία του κτηρίου



Σχήμα 6.1: Αξονομετρική όψη του υποθετικού κτηρίου

Πίνακας 6.1: Οι θερμικές ζώνες - γραφεία του πειραματικού κτηρίου

Περιγραφή	Εμβαδόν επιφάνειας (m ²)	Ύψος (m)
Κτήριο	48	2.7
West Zone	48	2.7

2. Κατασκευαστικά στοιχεία

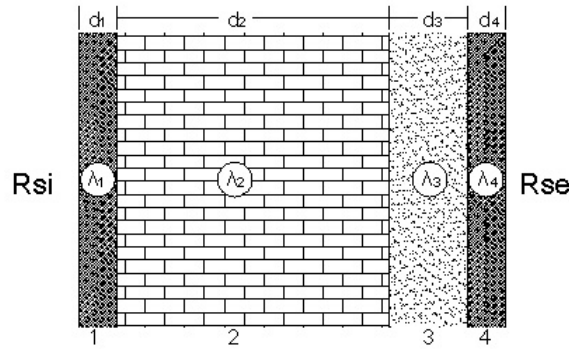
Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 3, το EnergyPlus χρησιμοποιεί τα κατασκευαστικά στοιχεία του κτηρίου με σκοπό να υπολογίζει τη μετάδοση θερμότητας που οφείλεται στα υλικά κατασκευής της τοιχοποιίας, του δαπέδου και στο είδος των υαλοπινάκων. Τα κατασκευαστικά στοιχεία για το κτήριο που μοντελοποιούμε επιλέγονται να είναι τα εξής:

- **Τοιχοποιία:** Η εξωτερική τοιχοποιία αποτελείται από 0.2 m τσιμεντόλιθο με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda = 0.51 \text{ W/mK}$, 0.066 m κοινό υαλονήμα με $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$ και 0.009 m στρώμα ξύλου με $\lambda = 0.14 \text{ W/mK}$.
- **Οροφή:** Η οροφή του κτηρίου είναι επίπεδη, κατασκευασμένη από 0.01 m γυψοσανίδα με $\lambda = 0.16 \text{ W/mK}$, 0.112 m υαλονήμα με $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$ και 0.019 m άγνωστο υλικό με $\lambda = 0.14 \text{ W/mK}$.
- **Δάπεδο:** Το δάπεδο του κτηρίου αποτελείται από 0.025 m ξύλινο δάπεδο με $\lambda = 0.14 \text{ W/mK}$ και μόνωση η οποία μεταφράζεται σε θερμική αντίσταση $25.05 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Η θερμική συμπεριφορά κάθε επιφάνειας περιγράφεται μέσω του συντελεστή θερμοπερατότητας ($U - Value$). Η τιμή που αποδίδεται σε κάθε τύπο επιφάνειας για το συντελεστή θερμοπερατότητας εκφράζει την ποσότητα θερμότητας ανα μονάδα χρόνου που περνά μέσα από 1 m² της επιφάνειας πάχους d (m) όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των εξωτερικών στρωμάτων είναι ίση με 1 K. Για τον υπολογισμό του συντελεστή $U - Value$ απαιτείται η γνώση των παρακάτω βασικών στοιχείων:

- Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (λ): Είναι η ποσότητα θερμότητας ανα μονάδα χρόνου που περνά μέσα από τις απέναντι πλευρές ομοιογενούς υλικού πάχους 1 m όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών αυτών είναι ίση με 1 K.
- Θερμική Αντίσταση (R): Είναι η αντίσταση των στοιχείων στην ροή θερμότητας διαμέσου ομοιογενούς υλικού για διαφορά θερμοκρασίας στις δυο πλευρές του στοιχείου 1 K.
- Εσωτερική Επιφανειακή Αντίσταση (R_{si}): Είναι η αντίσταση στη ροή θερμότητας πάνω στην εσωτερική επιφάνεια του κατασκευαστικού στοιχείου.
- Εξωτερική Επιφανειακή Αντίσταση (R_{se}): Είναι η αντίσταση στη ροή θερμότητας πάνω στην εξωτερική επιφάνεια του κατασκευαστικού στοιχείου.

Έστω ότι το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει την διαστρωμάτωση μιας υποθετικής επιφάνειας και τα στοιχεία κάθε στρώματος αυτής.



Σχήμα 6.2: Διαστρωμάτωση μιας υποθετικής επιφάνειας

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας της υποθετικής επιφάνειας υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_{se}} \quad (6.1)$$

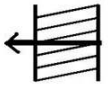
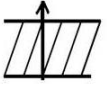
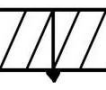
όπου R_T η συνολική αντίσταση στην ροή θερμότητας του στοιχείου κατασκευής που αποτελείται από ομοιογενές επιφάνειες. Όμως γνωρίζουμε ότι η θερμική αντίσταση κάθε ομοιογενούς υλικού i δίνεται από τη σχέση:

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (6.2)$$

Συνεπώς, η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας για την υποθετική επιφάνεια υπολογίζεται από τον τύπο:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^4 \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{se}} \quad (6.3)$$

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές που συνήθως αποδίδονται στην εσωτερική και εξωτερική θερμική αντίσταση.

R_{ei} ($m^2 K / W$)			R_{se} ($m^2 K / W$)
Διεύθυνση ροής θερμότητας			
			
0.13	0.10	0.17	0.04

Σχήμα 6.3: Τιμές των εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειακών θερμικών αντιστάσεων

Οι τιμές αυτές έχουν υπολογιστεί με $\varepsilon = 0.9$ και το συνθήκες θερμοκρασίας $10^\circ C$ και ταχύτητας αέρα 4 m/s . Στις περιπτώσεις όπου συνθήκες διαφέρουν σημαντικά, τότε οι επιφανειακές αντιστάσεις μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τη σχέση (6.7) του Οδηγού Θερμομόνωσης των Κτιρίων 2010.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν τον σχέση (6.3), υπολογίσαμε τους συντελεστές θερμοπερατότητας για τις επιφάνειες του υποθετικού κτηρίου και οι τιμές τους παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 6.2: Συντελεστές θερμοπερατότητας των επιφανειών του πειραματικού κτηρίου

Τύπος επιφάνειας	Συντελεστής θερμοπερατότητας ($W/m^2 K$)
εξωτερική τοιχοποιία	0.44
οροφή	0.31
δάπεδο	0.04

3. Χρονοδιαγράμματα

Τα χρονοδιαγράμματα (schedules) μας πληροφορούν για τον προγραμματισμό πολλών στοιχείων, όπως ο αριθμός ατόμων, το επίπεδο φωτισμού, οι θερμοστατικοί έλεγχοι, η δραστηριότητα των ατόμων, οι μοίρες των περσίδων, κ.λπ. Για το πείραμα που μελτάμε μερικά απ' τα χρονοδιαγράμματα που χρησιμοποιούμε είναι τα εξής:

1. Πρόγραμμα λειτουργίας του κτηρίου
2. Πυκνότητα ανθρώπινου δυναμικού στο κτήριο
3. Μεταβολικός ρυθμός ενοίκων.

4. Εσωτερικά φορτία

Τα εσωτερικά φορτία για το υποθετικό κτήριο οφείλονται μόνο στο ανθρώπινο δυναμικό του κτηρίου, καθώς έχουμε θεωρήσει ότι το πειραματικό κτήριο δεν είναι εξοπλισμένο με

τεχνητό φωτισμό και ηλεκτρικό εξοπλισμό. Το φορτίο που οφείλεται στο ανθρώπινο δυναμικό υπολογίζεται ως εξής: Πολλαπλασιάζουμε το πλήθος των ανθρώπων με την τιμή που καθορίζεται από το χρονοδιάγραμμα πυκνότητας ανθρώπινου δυναμικού και το γινόμενο αυτό επί την τιμή του μεταβολικού ρυθμού των ενοίκων (για όλα τα πειράματα, η τιμή αυτή ισούται με 108 W).

6.1.2 Ανάπτυξη του μοντέλου προσαρμοστικής βελτιστοποίησης

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, για την εφαρμογή των αλγορίθμων προσαρμοστικής βελτιστοποίησης, στο μοντέλο προσομοίωσης του EnergyPlus απαιτείται ο ορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης J που καλούμαστε να βελτιστοποιήσουμε και για την οποία δεν γνωρίζουμε την αναλυτική της μορφή αλλά μπορούμε να την μετρήσουμε - υπολογίσουμε του διανύσματος κατάστασης x , που αποτελείται από το σύνολο των μεταβλητών που θεωρούμε ότι επιδρούν στο αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης και του διανύσματος των αποφάσεων ελέγχου u , που αποτελούν τις αποφάσεις στις οποίες η βελτιστοποίηση καταλήγει για τα συστήματα ελέγχου που θεωρούμε πως υπάρχουν στο κτήριο. Επιπλέον σε κάθε αλγόριθμο απαιτείται ο ορισμός των ελεύθερων παραμέτρων του.

1. Αντικειμενική συνάρτηση

α. Αρχικός στόχος των στρατηγικών ελέγχου που θα εφαρμοστούν στο εν λόγω πειραματικό κτήριο είναι η ελαχιστοποίηση της μέσης απόκλισης της εσωτερικής θερμοκρασίας ζώνης από τα επιθυμητά επίπεδα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα (π.χ. μέση απόκλιση σε μια ημέρα). Έτσι, η αντικειμενική συνάρτηση $J(\theta)$ επιλέγεται να είναι η εξής:

$$J(\theta) = \frac{\sum_{t=1}^N J(\theta, t)}{N}$$

όπου,

$$J(\theta, t) = \begin{cases} 0 & \text{εάν } T_{min} \leq T(\theta, t) \leq T_{max} \\ T_{min} - T(\theta, t) & \text{εάν } T(\theta, t) < T_{min} \\ T(\theta, t) - T_{max} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (6.4)$$

T_{min}, T_{max} η ελάχιστη και η μέγιστη επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία αντίστοιχα.

Στο πείραμα που μελετάμε θέτουμε $T_{min} = 20^\circ\text{C}$, $T_{max} = 26^\circ\text{C}$.

$T(\theta, t)$ η εσωτερική θερμοκρασία ζώνης τη χρονική στιγμή t όταν το διάνυσμα παραμέτρων ελέγχου είναι θ και η απόφαση για το σύστημα ελέγχου είναι $u(\theta, t) = \theta \cdot x(t)$. Το διάνυσμα κατάστασης $x(t)$ ορίζεται παρακάτω.

Η εσωτερική θερμοκρασία ζώνης αποτελεί στοιχείο εξόδου της προσομοίωσης και υπολογίζεται από το EnergyPlus. Οπότε, το BCVTB καλείται να λαμβάνει την τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας ζώνης από το EnergyPlus και να την αποστέλει στο Matlab σε κάθε χρονικό βήμα.

β. Στη συνέχεια ως εναλλακτικό στόχο, θέτουμε την ελαχιστοποίηση του μέσου προβλεπόμενου ποσοστού δυσαρεστημένων ανθρώπων (Predicted Percent of Dissatisfied people).

Τότε, η νέα αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται να είναι η εξής:

$$J(\theta) = \frac{\sum_{t=1}^N \text{FangerPPD}(\theta, t)}{N} \quad (6.5)$$

όπου,

$\text{FangerPPD}(\theta, t)$ το PPD κατά τον Fanger τη χρονική στιγμή t όταν το διάνυσμα παραμέτρων ελέγχου είναι θ και η απόφαση για το σύστημα ελέγχου είναι $u(\theta, t) = \theta \cdot x(t)$. Το διάνυσμα κατάστασης $x(t)$ ορίζεται παρακάτω.

Το προβλεπόμενο ποσοστό δυσανεσθημένων ανθρώπων αποτελεί στοιχείο εξόδου της προσομοίωσης και υπολογίζεται από το EnergyPlus. Συνεπώς, όπως και στην περίπτωση της εσωτερικής θερμοκρασίας ζώνης, το BCVTB καλείται να λαμβάνει την τιμή του προβλεπόμενου ποσοστού δυσανεσθημένων ανθρώπων από το EnergyPlus και να την αποστέλει στο Matlab σε κάθε χρονικό βήμα.

2. Διάνυσμα κατάστασης

Θεωρούμε ότι το σύνολο των στοιχείων που επιδρούν στο αποτέλεσμα και των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων αποτελείται από τέσσερις μεταβλητές:

1. Εξωτερική θερμοκρασία ξηρού βολβού
2. Εσωτερική θερμοκρασία ζώνης
3. Εξωτερική σχετική υγρασία
4. Εσωτερική σχετική υγρασία ζώνης

Συνεπώς, σε κάθε χρονικό βήμα ισχύει $x \in \mathbb{R}^4$.

3. Διάνυσμα αποφάσεων ελέγχου

Υποθέτουμε ότι έλεγχος πραγματοποιείται μόνο για τη ρύθμιση της γωνίας των περσίδων του νότιου παραθύρου (blinds angle). Συνεπώς, στο εν λόγω πείραμα πρόκειται για μεταβλητή και όχι για διάνυσμα απόφασης ελέγχου, δηλαδή ισχύει $u \in \mathbb{R}$.

Συνδιάζοντας, λοιπόν, τις διαστάσεις του διανύσματος αποφάσεων ελέγχου και του διανύσματος κατάστασης και θεωρώντας γραμμικούς ελεγκτές καταλήγουμε ότι $\theta^T \in \mathbb{R}^4$.

4. Ελεύθερες παράμετροι

Λαμβάνοντας υπόψη τα όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4 και ύστερα από πλήθος δοκιμών οι τιμές των ελεύθερων παραμέτρων κάθε αλγορίθμου επιλέγονται να είναι οι εξής:

SPSA:

$$a_1 = 0.602$$

$$a_2 = 0.101$$

$$\lambda = 300$$

$$\lambda_0 = 1$$

$$c = 10$$

$$\lambda_j = \frac{\lambda}{(\lambda_0 + j)^{a_1}}$$

$$c_j = \frac{c}{j^{a_2}}$$

$$\theta^T(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

PoWER:

$$\theta^T(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

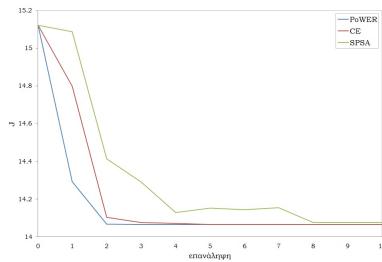
CE:

$$B = 2$$

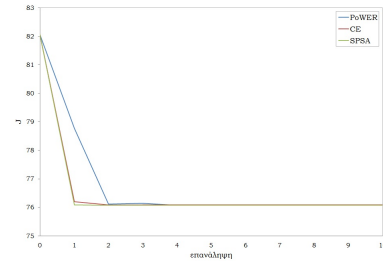
$$\theta^T(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

6.1.3 Αποτελέσματα

Όπως φαίνεται στα σχήματα 6.4 και 6.5, ανεξαρτήτως της αντικειμενικής συνάρτησης, οι αλγόριθμοι SPSA, CE, PoWER καταλήγουν στην ίδια τιμή. Διαφέρει όμως η ταχύτητα με την οποία συγκλίνουν στην τιμή αυτή. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε την θερμοκρασιακή απόκλιση (εξίσωση 6.4), πρώτος φαίνεται να συγκλίνει ο PoWER με τον CE να ακολουθεί και τον SPSA τελευταίο, ενώ στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε το προβλεπόμενο ποσοστό δυσαρεστημένων ανθρώπων (εξίσωση 6.5), ταχύτερος είναι ο SPSA με τον CE να ακολουθεί και τον PoWER τελευταίο. Στο σχήμα 6.6 παρατηρούμε την ευαισθησία που παρουσιάζουν

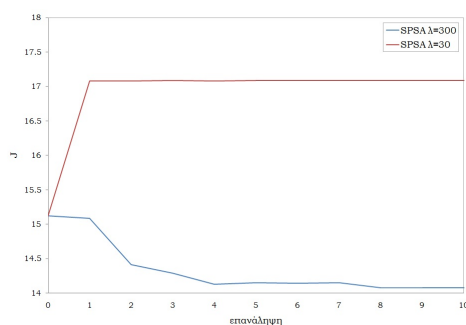


Σχήμα 6.4: Απόδοση των αλγορίθμων SPSA, CE, PoWER με αντικειμενική συνάρτηση τη θερμοκρασιακή απόκλιση από τα επιθυμητά επίπεδα



Σχήμα 6.5: Απόδοση των αλγορίθμων SPSA, CE, PoWER με αντικειμενική συνάρτηση το προβλεπόμενο ποσοστό δυσαρεστημένων ανθρώπων

οι αλγόριθμοι στην επιλογή τιμών για τις ελεύθερες παραμέτρους. Συγκεκριμένα, στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται οι τιμές στις οποίες ο αλγόριθμος SPSA συγκλίνει, για δύο διαφορετικές τιμές του συντελεστή λ .



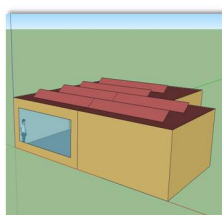
Σχήμα 6.6: Κάτοψη του υποθετικού κτηρίου

6.2 Πείραμα 2

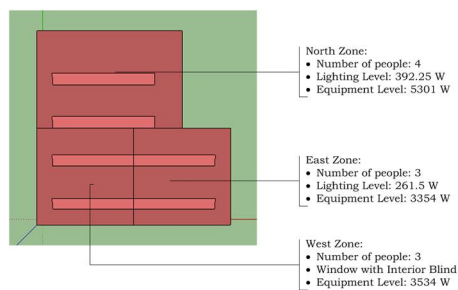
6.2.1 Περιγραφή του Κτηρίου

Το υποθετικό κτήριο που μοντελοποιείται, θεωρούμε ότι εντοπίζεται στην περιοχή που παρουσιάστηκε στο πείραμα 1. Αποτελείται από ένα και μόνο όροφο ο οποίος χωρίζεται σε 3 γραφεία. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται φωτογραφίες, όπως αυτές προκύπτουν από την εφαρμογή *OpenStudio* του *Google SketchUp Pro*, και τα στοιχεία του εν λόγω κτηρίου.

1. Γεωμετρία του κτηρίου



Σχήμα 6.7: Αξονομετρική όψη του υποθετικού κτηρίου



Σχήμα 6.8: Κάτοψη του υποθετικού κτηρίου

Πίνακας 6.3: Οι θερμικές ζώνες - γραφεία του πειραματικού κτηρίου

Περιγραφή	Εμβαδόν επιφάνειας (m ²)	Ύψος (m)
Κτήριο	130	3
West Zone	37	3
East Zone	37	3
North Zone	56	3

2. Κατασκευαστικά στοιχεία

Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 3, το EnergyPlus χρησιμοποιεί τα κατασκευαστικά στοιχεία του κτηρίου με σκοπό να υπολογίζει τη μετάδοση θερμότητας που οφείλεται στα υλικά κατασκευής της τοιχοποιίας, του δαπέδου και στο είδος των υαλοπινάκων. Τα κατασκευαστικά στοιχεία για το κτήριο που μοντελοποιούμε επιλέγονται να είναι τα εξής:

- **Τοιχοποιία:** Η εξωτερική τοιχοποιία αποτελείται από 1 in γυψομάρμαρο (στόκο) με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda = 0.69 \text{ W/mK}$, 4 in κοινό οπτόπλινθο (τούβλο) με $\lambda = 0.73 \text{ W/mK}$ και 3/4 in γυψοσανίδα με $\lambda = 0.73 \text{ W/mK}$. Η εσωτερική τοιχοποιία αποτελείται από 3/4 in γυψοσανίδα με $\lambda = 0.73 \text{ W/mK}$, 8 in πύλινο πλακάκι τοίχου με $\lambda = 0.57 \text{ W/mK}$ και 3/4 in γυψοσανίδα με $\lambda = 0.73 \text{ W/mK}$.
- **Οροφή:** Η οροφή του κτηρίου είναι επίπεδη, κατασκευασμένη από 1/2 in πέτρα με $\lambda = 1.44 \text{ W/mK}$, 3/8 in πύλημα με $\lambda = 0.19 \text{ W/mK}$, 1 in πυκνής μόνωσης με $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$, 2 in σκληρό σκυρόδεμα με $\lambda = 1.73 \text{ W/mK}$.
- **Δάπεδο:** Το δάπεδο του κτηρίου αποτελείται από 8 in σκληρό σκυρόδεμα με $\lambda = 1.73 \text{ W/mK}$.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν τον σχέση (6.3), υπολογίσαμε τους συντελεστές θερμοπερατότητας για τις επιφάνειες του υποθετικού κτηρίου και οι τιμές τους παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 6.4: Συντελεστές θερμοπερατότητας των επιφανειών του πειραματικού κτηρίου

Τύπος επιφάνειας	Συντελεστής θερμοπερατότητας (W/m ² K)
εξωτερική τοιχοποιία	2.70
εσωτερική τοιχοποιία	2.08
οροφή	1.17
δάπεδο	3.08

3. Χρονοδιαγράμματα

Τα χρονοδιαγράμματα (schedules) μας πληροφορούν για τον προγραμματισμό πολλών στοιχείων, όπως ο αριθμός ατόμων, το επίπεδο φωτισμού, οι θερμοστατικοί έλεγχοι, η δραστηριότητα των ατόμων, οι μοίρες των περσίδων, κ.λπ. Για το πείραμα που μελετάμε μερικά απ' τα χρονοδιαγράμματα που χρησιμοποιούμε είναι τα εξής:

1. Διαθεσιμότητα συστήματος θέρμανσης και συστήματος ψύξης
2. Πρόγραμμα λειτουργίας του κτηρίου
3. Πυκνότητα ανθρωπίνου δυναμικού στο κτήριο
4. Μεταβολικός ρυθμός ενοίκων
5. Πυκνότητα φωτισμού
6. Πυκνότητα ηλεκτρικού εξοπλισμού
7. Heating - Cooling Setpoints

Πολλά απ' αυτά τα χρονοδιαγράμματα διαφέρουν από πείραμα σε πείραμα το οποίο εκτελείται.

4. Εσωτερικά φορτία

Τα εσωτερικά φορτία για το υποθετικό κτήριο οφείλονται στο ανθρώπινο δυναμικό του κτηρίου, στο φωτισμό και στον ηλεκτρικό εξοπλισμό. Στα πειράματα που ακολουθούν, άλλοτε επιλέγεται να είναι μηδενικά και άλλοτε επιλέγεται να λαμβάνουν τις τιμές που παρουσιάζονται στο σχήμα 6.2. Το φορτίο που οφείλεται σε φωτισμό και το φορτίο που οφείλεται σε ηλεκτρικό εξοπλισμό είναι οι τιμές Lighting Level και Equipment Level αντίστοιχα του σχήματος 6.2. Το φορτίο που οφείλεται στο ανθρώπινο δυναμικό υπολογίζεται ως εξής: Πολλαπλασιάζουμε το πλήθος των ανθρώπων με την τιμή που καθορίζεται από το χρονοδιάγραμμα πυκνότητας ανθρωπίνου δυναμικού και το γινόμενο αυτό επί την τιμή του μεταβολικού ρυθμού των ενοίκων (για όλα τα πειράματα, η τιμή αυτή ισούται με 108 W).

5. Το σύστημα HVAC

Το σύστημα θέρμανσης-ψύξης-κλιματισμού αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα κατανάλωσης ενέργειας του κτηρίου με αποτέλεσμα οι περισσότερες στρατηγικές ελέγχου στην υπάρχουσα βιβλιογραφία να απευθύνονται στην αυτόματη λειτουργία του συστήματος HVAC με σκοπό τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης.

Το σύστημα HVAC στο πειραματικό κτήριο διαμορφώνεται ως εξής:

- Η θέρμανση του κτηρίου πραγματοποιείται με τη χρήση λέβητα-καυστήρα. Για την καύση χρησιμοποιείται πετρέλαιο. Ο συντελεστής απόδοσης του λέβητα εκτιμάται ότι λαμβάνει την τιμή 0.8, ενώ οι απώλειες θερμότητα που οφείλονται στις σωληνώσεις 5 %. Σε περίπτωση που το σύστημα λέβητα-καυστήρα δεν αρκεί για να καλύψει τις ανάγκες σε θέρμανση, τίθενται σε λειτουργία αυτόνομες κλιματιστικές μονάδες. Το σύστημα

θέρμανσης, όπως διαμορφώνεται από τα παραπάνω υποσυστήματα, είναι διαθέσιμο όλες τις ημέρες της χειμερινής περιόδου.

- Η ψύξη του κτηρίου πραγματοποιείται με τη χρήση κλιματιστικών. Ο συντελεστής απόδοσης των κλιματιστικών είναι περίπου 2.5 (COP) και οι απώλειες θερμότητας που οφείλονται στη διανομή αέρα στη ζώνη είναι 5 %. Το σύστημα ψύξης είναι διαθέσιμο όλες τις ημέρες της θερινής περιόδου.

6.2.2 Ανάπτυξη του μοντέλου προσαρμοστικής βελτιστοποίησης

1. Αντικειμενική συνάρτηση

Θέτουμε ως στόχο την ελαχιστοποίηση το άθροισμα της μέσης ηλεκτρικής ενεργειακής κατανάλωσης και του μέσου προβλεπόμενου ποσοστού δυσαρεστημένων ανθρώπων (Predicted Percent of Dissatisfied people). Τότε, η νέα αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται να είναι η εξής:

$$J(\theta) = \frac{\sum_{t=1}^N \text{Electric Consumption}(\theta, t)}{N} + \frac{\sum_{t=1}^N \text{FangerPPD}(\theta, t)}{N} \quad (6.6)$$

όπου,

$\text{FangerPPD}(\theta, t)$	το PPD κατά τον Fanger τη χρονική στιγμή t όταν το διάνυσμα παραμέτρων ελέγχου είναι θ και η απόφαση για το σύστημα ελέγχου είναι $u(\theta, t) = \theta \cdot x(t)$. Το διάνυσμα κατάστασης $x(t)$ ορίζεται παρακάτω.
$\text{Electric Consumption}(\theta, t)$	η ηλεκτρική κατανάλωση τη χρονική στιγμή t όταν το διάνυσμα παραμέτρων ελέγχου είναι θ και η απόφαση για το σύστημα ελέγχου είναι $u(\theta, t) = \theta \cdot x(t)$. Το διάνυσμα κατάστασης $x(t)$ ορίζεται παρακάτω.

Τόσο το προβλεπόμενο ποσοστό δυσαρεστημένων ανθρώπων όσο και η ηλεκτρική κατανάλωση αποτελούν στοιχεία εξόδου της προσομοίωσης και υπολογίζονται από το EnergyPlus. Συνεπώς, το BCBTVB καλείται να λαμβάνει τις τιμές του προβλεπόμενου ποσοστού δυσαρεστημένων ανθρώπων και της ηλεκτρικής κατανάλωσης από το EnergyPlus και να τις αποστέλλει στο Matlab σε κάθε χρονικό βήμα.

2. Διάνυσμα κατάστασης

Θεωρούμε ότι το σύνολο των στοιχείων που επιδρούν στο αποτέλεσμα και των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων αποτελείται από εννέα μεταβλητές:

1. Εξωτερική θερμοκρασία ξηρού βολβού
2. Εσωτερική θερμοκρασία κάθε ζώνης (τρεις μεταβλητές)
3. Εξωτερική σχετική υγρασία
4. Εσωτερική σχετική υγρασία κάθε ζώνης (τρεις μεταβλητές)
5. Ηλιακή ακτινοβολία

Συνεπώς, σε κάθε χρονικό βήμα ισχύει $x \in \mathbb{R}^9$.

3. Διάνυσμα αποφάσεων ελέγχου

Υποθέτουμε ότι έλεγχος πραγματοποιείται για τη ρύθμιση της γωνίας των περσίδων του νότιου παραθύρου (blinds angle) της δυτικής ζώνης, για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας αναφοράς ψύξης κάθε ζώνης και για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας αναφοράς θέρμανσης κάθε ζώνης. Συνεπώς, στο εν λόγω πείραμα ισχύει $u \in \mathbb{R}^7$.

Συνδιάζοντας, λοιπόν, τις διαστάσεις του διανύσματος αποφάσεων ελέγχου και του διανύσματος κατάστασης και θεωρώντας γραμμικούς ελεγκτές καταλήγουμε ότι $\theta^T \in \mathbb{R}^{7 \times 9}$.

4. Ελεύθερες παράμετροι

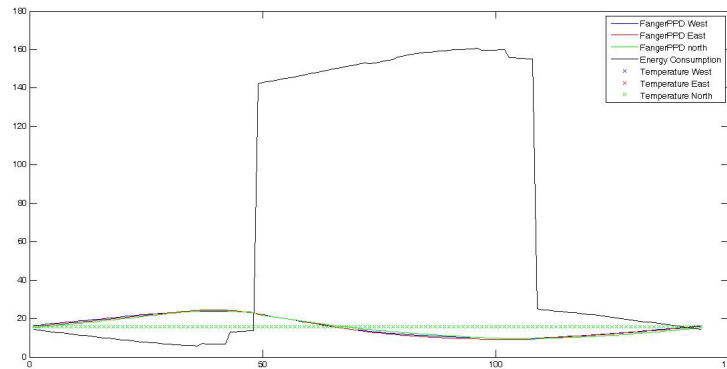
Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιούμε σε αυτό το πείραμα και σε όσα ακολουθούν είναι ο AFT με SVMs και οι ελεύθερες παράμετροι του αλγορίθμου επιλέγονται να είναι οι εξής:

$$\sigma = 0.3$$

$$\theta^T(0) = \mathbf{0}$$

6.2.3 Αποτελέσματα

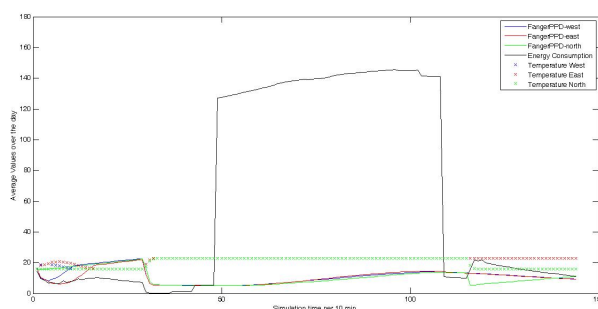
Έχοντας αναπτύξει το θερμικό μοντέλο και το πρόβλημα βελτιστοποίησης, αρχικά προσομοιώνουμε μια αρκετά απλή λογική ελέγχου για το πρόβλημα μας. Θέτουμε τις θερμοκρασίες αναφοράς (setpoints) των συστημάτων (HVAC) των τριών ζωνών στους 17°C και λαμβάνουμε από το EnergyPlus τις τιμές της ενεργειακής κατανάλωσης και του προβλεπόμενου ποσοστού δυσαρεστημένων ανθρώπων. Σύμφωνα με το σχήμα 6.9, το μοντελοποιημένο σύστημα



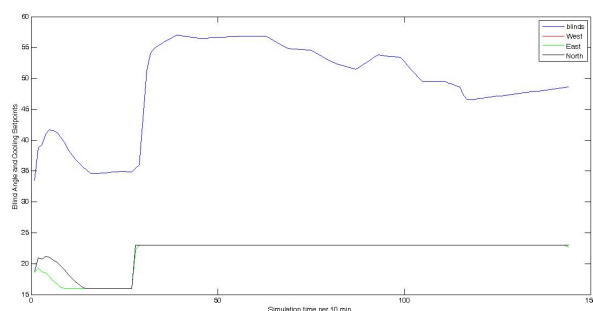
Σχήμα 6.9: Αποτελέσματα χωρίς την εφαρμογή ελέγχου για το πειραματικό κτήριο στο Graz

HVAC φαίνεται να είναι επαρκές για το πειραματικό κτήριο, καθώς σε κάθε ζώνη και σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης η εσωτερική θερμοκρασία ζώνης διατηρείται στα επιθυμητά επίπεδα. Η κατακόρυφη αύξηση και η κατακόρυφη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης οφείλονται στο πρόγραμμα λειτουργίας του ηλεκτρικού εξοπλισμού των ζωνών, σύμφωνα με το οποίο η έναρξη της λειτουργίας του κτηρίου υφίσταται στις 7:00 π.μ και το τέλος της στις 6:00 μ.μ. Επιπλέον, βλέπουμε ότι το ποσοστό των δυσαρεστημένων ανθρώπων διατηρείται σε

χαμηλά επίπεδα κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κτηρίου. Το ερώτημα που τίθεται πλέον είναι εάν ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης μπορεί να επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα της αντικειμενικής συνάρτησης, διατηρώντας τη θερμική άνεση των ενοίκων και μειώνοντας την ενεργειακή κατανάλωση. Έτσι, εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης για την ίδια μέρα. Ύστερα από ένα πλήθος επαναλήψεων ο αλγόριθμος καταλήγει στα αποτελέσματα που φαίνονται στα σχήματα 6.10 και 6.11. Όπως παρατηρούμε τόσο η ενεργειακή κατανάλωση

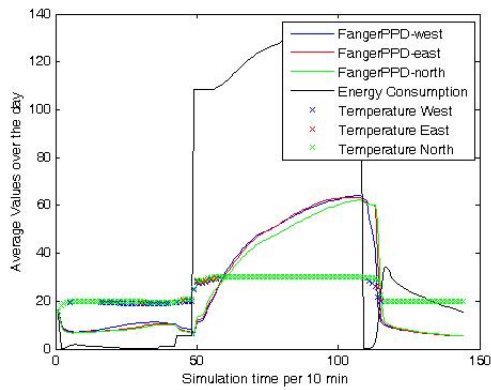


Σχήμα 6.10: Η τελική απόδοση του ελεγκτή στο πειραματικό κτήριο στο Graz

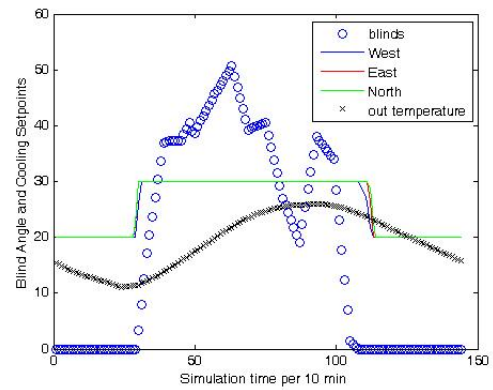


Σχήμα 6.11: Αποφάσεις ελέγχου των περσίδων και των θερμοκρασιών αναφοράς του συστήματος θέρμανσης-ψύξης - κλιματισμού στο πειραματικό στο Graz

όσο και όσο και το προβλεπόμενο ποσοστό δυσανεσθημένων ανθρώπων μειώνεται. Παρ' όλα αυτά, το σχήμα 6.10 δείχνει μια παράλογη συμπεριφορά του ελεγκτή από το βήμα 120 και έπειτα, όπου παρατηρούμε μια μικρή αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης λόγω του συστήματος HVAC της νότιας ζώνης που συνοδεύεται από πτώση της θερμοκρασίας αναφοράς του. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους: κακή μοντελοποίηση του κτηρίου, τοπικό βέλτιστο του αλγορίθμου βελτιστοποίησης κ.λπ. Προκειμένου να προχωρήσουμε σε πολυπλοκότερες προσομοιώσεις, οφείλουμε να εντοπίσουμε την πηγή της συμπεριφορά αυτής. Έτσι, επαναλαμβάνουμε το ίδιο πείραμα αλλά χωρίς να λάβουμε υπόψη το προβλεπόμενο ποσοστό δυσανεσθημένων ανθρώπων στην αντικειμενική συνάρτηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 6.12 και 6.13. Σύμφωνα με το σχήμα 6.12, η συμπεριφορά του ελεγκτή είναι η αναμενόμενη. Επιτρέπει την αύξηση του ποσοστού δυσανεσθημένων ανθρώπων έτσι ώστε να διατηρήσει τη ενεργειακή

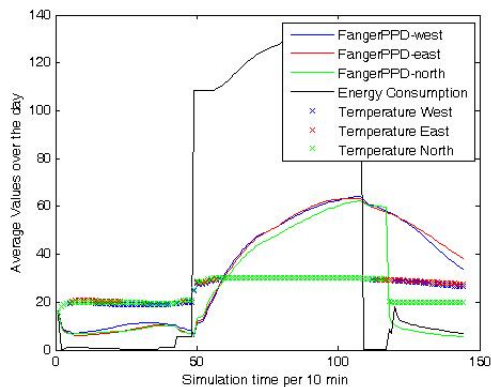


Σχήμα 6.12: Απόδοση ενός καλού ελεγκτή στο πειραματικό κτήριο

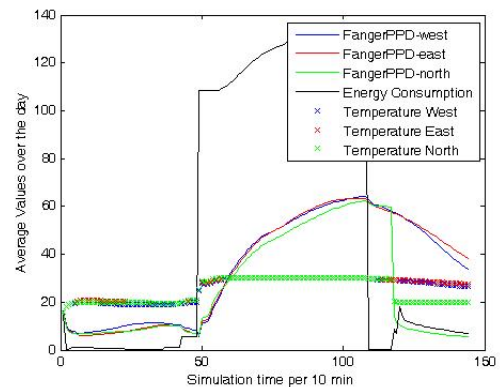


Σχήμα 6.13: Αποφάσεις ενός καλού ελεγκτή στο πειραματικό κτήριο

κατανάλωση σε χαμηλά επίπεδα. Η παράλογη συμπεριφορά όμως εξακολουθεί να υπάρχει. Επιπλέον, οι θερμοκρασίες αναφοράς θέτονται στους 30°C (τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή) κατά τη διάρκεια λειτουργία του κτηρίου, αποφεύγοντας έτσι την ενεργειακή κατανάλωση από τη λειτουργία του HVAC. Στη συνέχεια, δοκιμάζουμε το ίδιο πείραμα επιτρέποντας όμως μεγαλύτερο πλήθος επαναλήψεων στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης και καταλήγουμε στα αποτελέσματα που ακολουθούν. Στο σχήμα 6.14 μπορούμε να δούμε ότι η ξαφνική απότομη

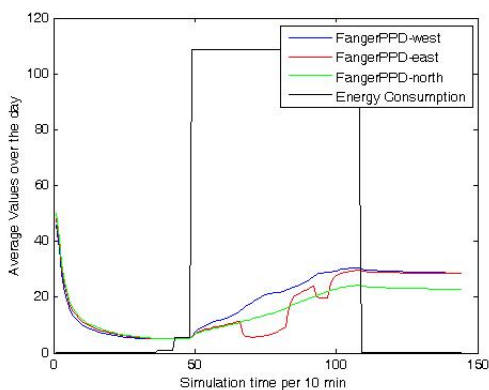


Σχήμα 6.14: Απόδοση ενός καλύτερου ελεγκτή (περισσότερες επαναλήψεις) στο πειραματικό κτήριο

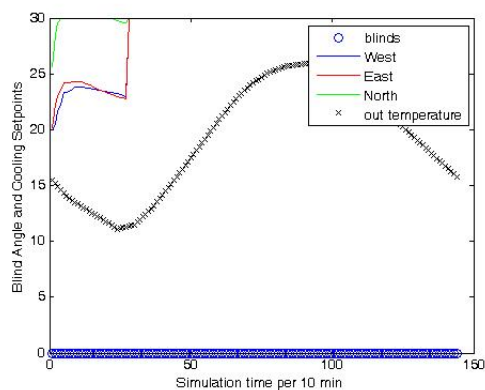


Σχήμα 6.15: Αποφάσεις ενός καλύτερου ελεγκτή (περισσότερες επαναλήψεις) στο πειραματικό κτήριο

αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης στο βήμα 115 έχει μειωθεί, θέτοντας τις θερμοκρασίες αναφοράς των συστημάτων HVAC στους 30°C για όλη τη μέρα, εκτός του συστήματος της νότιας ζώνης όπου η θερμοκρασία αναφοράς πέφτει στους 20°C μετά το βήμα 115, προκαλώντας την εν λόγω ξαφνική απότομη αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Τέλος επιτρέπουμε στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης να τρέξει το ίδιο πείραμα για ένα ακόμα μεγαλύτερο πλήθος επαναλήψεων και τα αποτελέσματα αυτού φαίνονται στα σχήματα 6.16 και 6.17. Στο σχήμα 6.16 παρατηρούμε ότι η ενεργειακή κατανάλωση μηδενίζεται κατά τα διαστήματα της ημέρας που το κτήριο δεν λειτουργεί, θέτοντας τις θερμοκρασίες αναφοράς του



Σχήμα 6.16: Απόδοση του τελικού ελεγκτή (περισσότερες επαναλήψεις) στο πειραματικό κτήριο



Σχήμα 6.17: Αποφάσεις του τελικού ελεγκτή (περισσότερες επαναλήψεις) στο πειραματικό κτήριο

συστήματος HVAC και στις τρεις ζώνες στους 30°C . Αυτό λοιπόν δηλώνει ότι, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης στις προηγούμενες προσομοιώσεις κατέληξε σε κάποιο τοπικό ελάχιστο το οποίο οδήγησε σε μη αναμενόμενες αλλαγές της στρατηγικής ελέγχου.

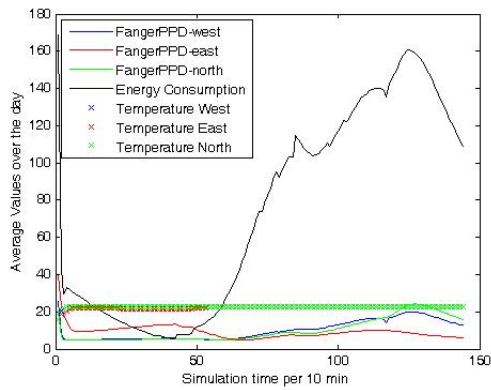
6.3 Πείραμα 3

Αν και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το πείραμα 2 ήταν ενθαρρυντικά, συνεχίζουμε με τη δοκιμή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σε το πείραμα 3 όπου το κτήριο βρίσκεται σε μια περιοχή με αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά. Έτσι, στο πείραμα αυτό ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αξιολογείται για το ίδιο κτήριο όταν αυτό εντοπίζεται στην περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης, 7 χιλιόμετρα βορειοδυτικά των Χανίων. Βρίσκεται σε υψόμετρο 146 m, σε γεωγραφικό μήκος 24.15° και γεωγραφικό πλάτος 35.53° .

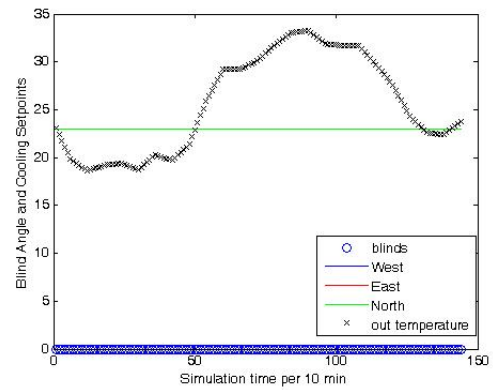
Ένα σημαντικό στοιχείο του εν λόγω πειράματος είναι ότι για την προσομοίωση του κτηρίου χρησιμοποιούμε αρχείο καιρού με πραγματικά δεδομένα της περιοχής. Τα δεδομένα καιρού προέρχονται από το Εργαστήριο Ατμοσφαιρικών Αιωρούμενων Σωματιδίων του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης που λειτουργεί υπό την επίβλεψη του κου Συμεωνίδη Λεάνδρου. Από τα δεδομένα αυτά επιλέγουμε τη μέρα της θερινής περιόδου με τη μεγαλύτερη διακύμανση των θερμοκρασιών ξηρού βολβού. Επιπλέον, θεωρούμε ότι όλος ο εξοπλισμός, εκτός του συστήματος HVAC, προγραμματίζεται έτσι ώστε να μην καταναλώνει ενέργεια, στοχεύοντας στην απλοποίηση του προβλήματος και εκτιμώντας ότι θα έχουμε καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Τα διανύσματα x , u και θ παραμένουν τα ίδια.

6.3.1 Αποτελέσματα

Στα σχήματα 6.18 και 6.19 παρατηρούμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όταν θέτουμε τη θερμοκρασία αναφοράς των συστημάτων HVAC στους 23°C . Παρατηρώντας τα σχήματα αυτά φαίνεται ότι η ενεργειακή κατανάλωση αρχίζει να υφίσταται όταν η εξωτερική θερμοκρασία ξεπερνά τη θερμοκρασία αναφοράς που έχουμε θέσει.

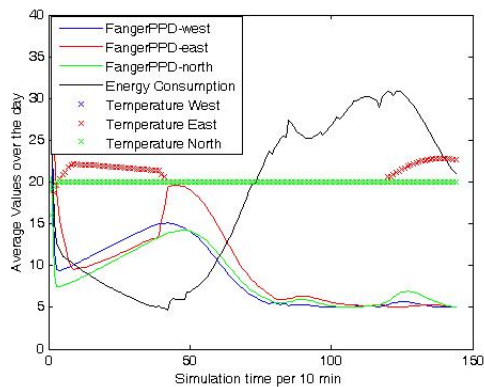


Σχήμα 6.18: Απόδοση του συστήματος όταν η θερμοκρασία αναφοράς των συστημάτων HVAC ρυθμίζεται στους 23°C

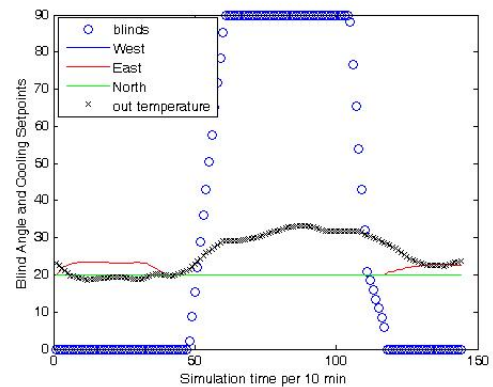


Σχήμα 6.19: Οι αποφάσεις του συστήματος όταν η θερμοκρασία αναφοράς των συστημάτων HVAC ρυθμίζεται στους 23°C

Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης και στην αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιούμε μόνο τον όρο του προβλεπόμενου ποσοστού δυσανεσθημένων ανθρώπων (βλέπετε εξίσωση 6.6). Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος θα προσπαθήσει να αυξήσει τη θερμική άνεση αντί να μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου φαίνονται στα σχήματα 6.20 και 6.21. Όπως παρατηρούμε, ο αλγόριθμος αποφασίζει οι θερμοκρασίες αναφοράς των συστημάτων HVAC να τεθούν στους 20°C για όλη τη διάρκεια της ημέρας, μειώνοντας έτσι σημαντικά το ποσοστό δυσανεσθημένων ανθρώπων και αυξάνοντας την ενεργειακή κατανάλωση, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο. Το επόμενο βήμα είναι

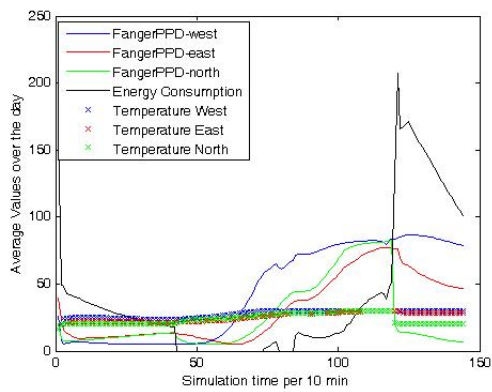


Σχήμα 6.20: Απόδοση της στρατηγικής ελέγχου στην οποία ο αλγόριθμος καταλήγει για το κτήριο στα Χανιά, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη θερμική άνεση

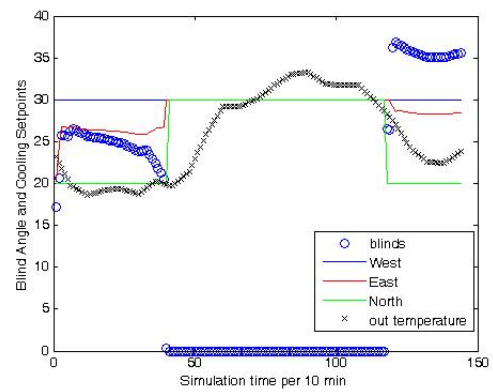


Σχήμα 6.21: Στρατηγική ελέγχου στην οποία ο αλγόριθμος καταλήγει για το κτήριο στα Χανιά, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη θερμική άνεση

η εφαρμογή του αλγορίθμου όταν τόσο η θερμική όσο και η ενεργειακή κατανάλωση λαμβάνονται υπόψη. Στα σχήματα 6.22 και 6.23 βλέπουμε τα αποτελέσματα του αλγορίθμου για τη νέα αντικειμενική συνάρτηση. Στο σχήμα 6.22 φαίνεται ότι, το προβλεπόμενο ποσοστό δυσανεσθημένων ανθρώπων αυξάνεται τις απογευματινές ώρες, αν και η εσωτερική θερμοκρα-

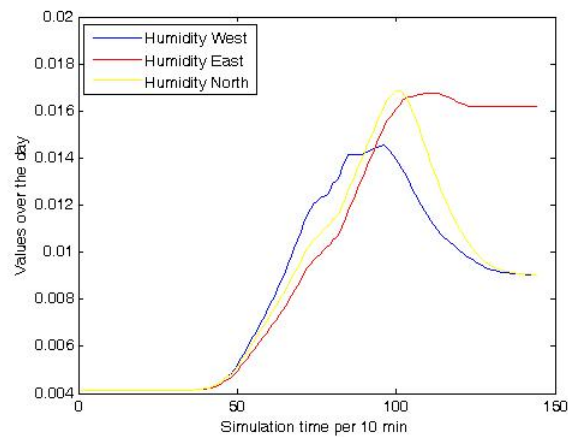


Σχήμα 6.22: Απόδοση της στρατηγικής ελέγχου στην οποία ο αλγόριθμος καταλήγει για το κτήριο στα Χανιά



Σχήμα 6.23: Στρατηγική ελέγχου στην οποία ο αλγόριθμος καταλήγει για το κτήριο στα Χανιά

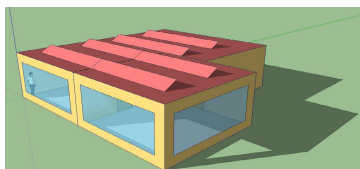
σία ζώνης διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το γεγονός αυτό πιθανώς να οφείλεται στα υψηλά ποσοστά υγρασίας σε κάθε ζώνη κατά τις ώρες αυτές.



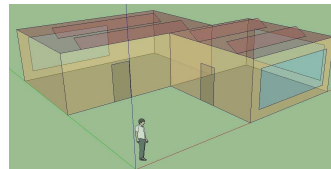
Σχήμα 6.24: Τα επίπεδα υγρασίας στο πειραματικό κτήριο

6.4 Πείραμα 4

Στο πείραμα αυτό αυξάνουμε την πολυπλοκότητα του προηγούμενου προβλήματος προσθέτοντας τρία επιπλέον παράθυρα στο κτήριο και προσθέτοντας στον ελεγκτή τέσσερις ακόμα μεταβλητές ελέγχου που εκφράζουν τις μοίρες στις οποίες ανοίγει το κάθε παράθυρο. Έτσι, επιτρέπουμε για το πρόβλημα μας τον φυσικό αερισμό των θερμικών ζωνών. Στις

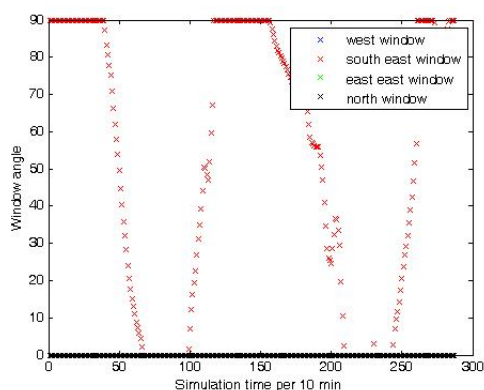


Σχήμα 6.25: Το νέο κτήριο ύστερα από την πρόσθεση τριών νέων παραθύρων

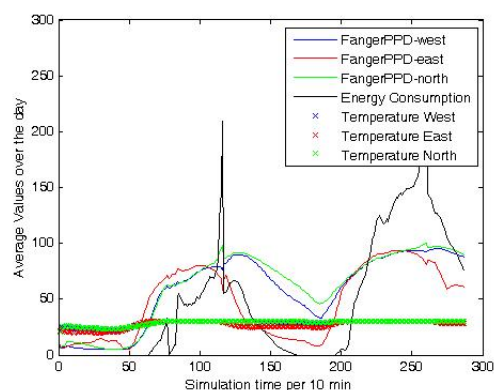


Σχήμα 6.26: Τα νέα ανοίγματα του πειραματικού κτηρίου

αρχικές προσομοιώσεις του πειράματος μελετάμε τις αποφάσεις του αλγορίθμου βελτιστοποίησης όταν επιτρέπεται φυσικός αερισμός μέσω του νοτίου παραθύρου της ανατολικής ζώνης (σχήματα 6.27, 6.28), τις αποφάσεις του αλγορίθμου βελτιστοποίησης όταν επιτρέπεται φυσικός αερισμός μόνο μέσω του ανατολικού παραθύρου της ανατολικής ζώνης (σχήματα 6.29, 6.30) και τέλος όταν επιτρέπεται φυσικός αερισμός μέσω των δύο προαναφερόμενων παραθύρων συγχρόνως (σχήματα 6.31, 6.32). Όπως παρατηρούμε στις δύο πρώτες προσομοι-

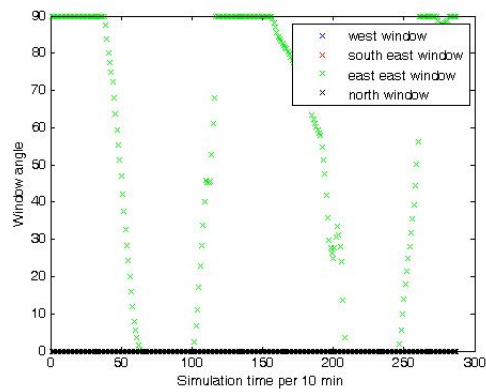


Σχήμα 6.27: Στρατηγική ελέγχου όταν επιτρέπεται φυσικός αερισμός μέσω του νοτίου παραθύρου της ανατολικής ζώνης

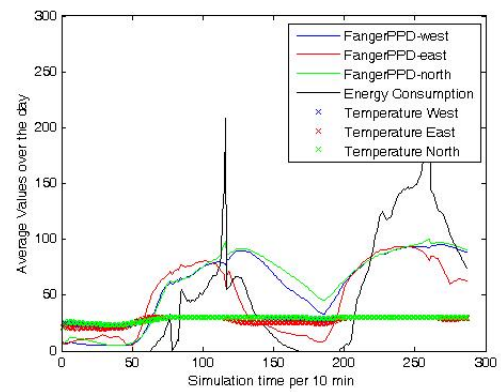


Σχήμα 6.28: Απόδοση στρατηγικής ελέγχου όταν επιτρέπεται φυσικός αερισμός μέσω του νοτίου παραθύρου της ανατολικής ζώνης

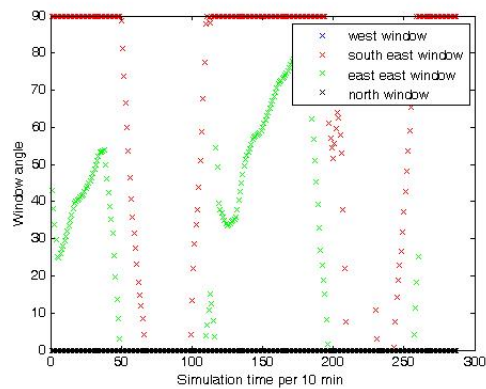
ώσεις ο αλγόριθμος καταλήγει σε αναμενόμενες αποφάσεις ελέγχου για τον φυσικό αερισμό, σύμφωνα με τις οποίες επιτρέπει τον φυσικό αερισμό μέσω του ελεγχόμενου παραθύρου κατά τη διάρκεια της νύχτας. Αυτές οι αποφάσεις έχουν σημαντική επίδραση στη θερμική άνεση των ενοίκων αφού όπως βλέπουμε στα σχήματα... το ποσοστό δυσαρεστημένων ανθρώπων στην ανατολική ζώνη διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα συγκρίτικα με το αντίστοιχο ποσοστό στις άλλες δύο ζώνες. Επιπλέον, ο αλγόριθμος καταλήγει σε πιο ομαλά αποτελέσματα όταν επιτρέπεται αερισμός μέσω των δύο παραθύρων συγχρόνως. Στη συνέχεια, ορίζοντας ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων, επιτρέπουμε στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης να καταλήξει σε αποφάσεις και για τα τέσσερα παράθυρα του κτηρίου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα



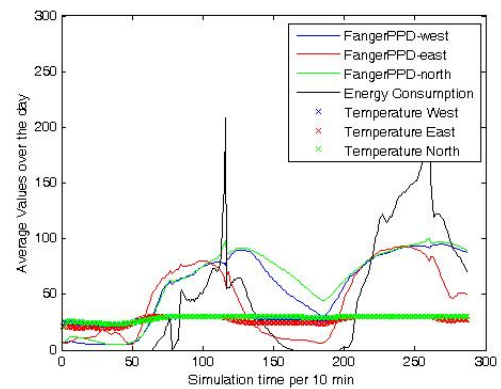
Σχήμα 6.29: Στρατηγική ελέγχου όταν επιτρέπεται φυσικός αερισμός μέσω του ανατολικού παραθύρου της ανατολικής ζώνης



Σχήμα 6.30: Απόδοση στρατηγικής ελέγχου όταν επιτρέπεται φυσικός αερισμός μέσω του ανατολικού παραθύρου της ανατολικής ζώνης

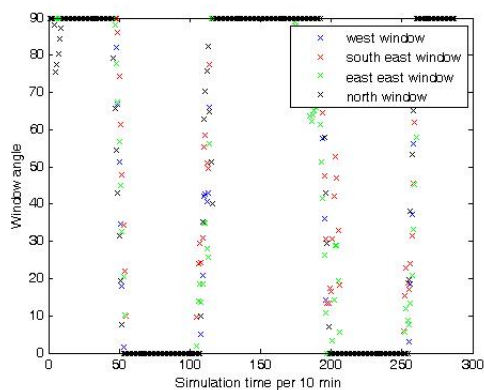


Σχήμα 6.31: Στρατηγική ελέγχου των παραθύρων όταν επιτρέπεται φυσικός αερισμός μέσω και των δύο παραθύρων της ανατολικής ζώνης

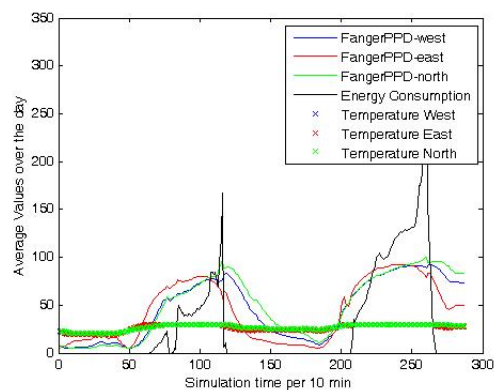


Σχήμα 6.32: Απόδοση της στρατηγικής ελέγχου όταν επιτρέπεται φυσικός αερισμός μέσω και των δύο παραθύρων της ανατολικής ζώνης

σχήματα 6.33 και 6.34, όπου παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος καταλήγει στο ότι βέλτιστη λύση αποτελεί ο βραδινός φυσικός αερισμός.



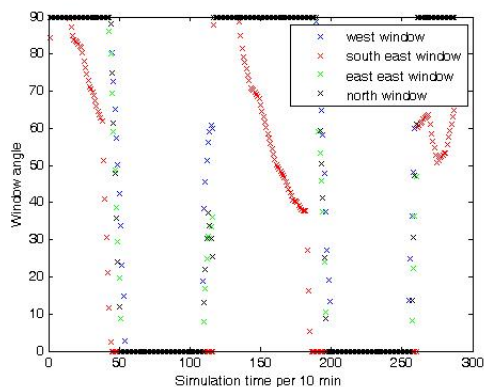
Σχήμα 6.33: Στρατηγική ελέγχου των παραθύρων του κτηρίου ύστερα από μεγάλο αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου



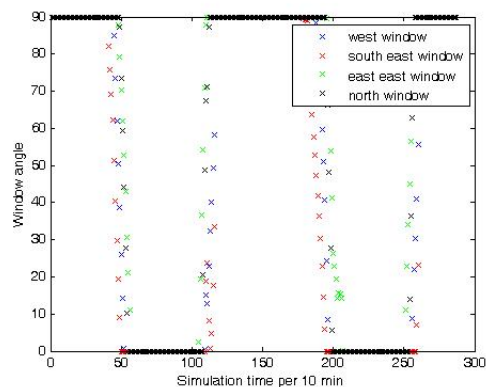
Σχήμα 6.34: Απόδοση της στρατηγικής ελέγχου των παραθύρων του κτηρίου ύστερα από μεγάλο αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου

6.5 Πείραμα 5

Έως τώρα έχουμε καταλήξει στο συμπέρασμα ότι ο φυσικός αερισμός είναι μία καλή στρατηγική, ίσως η καλύτερη. Το ερώτημα που τίθεται είναι αν πρόκειται για τη βέλτιστη λύση. Έτσι, στο πείραμα αυτό αποφασίζουμε να εφαρμόσουμε ένα αλγόριθμο εύρεση ολικού (και όχι τοπικού) βέλτιστου στο ίδιο πρόβλημα. Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιούμε τον γενετικό αλγόριθμο που διατίθεται μέσω της βιβλιοθήκης του Matlab. Τα αποτελέσματα φαίνονται



Σχήμα 6.35: Στρατηγική ελέγχου στην οποία ο γενετικός αλγόριθμος καταλήγει



Σχήμα 6.36: Στρατηγική ελέγχου στην οποία ο αλγόριθμος AFT καταλήγει όταν η αρχική μήτρα παραμέτρων είναι η τελική μήτρα παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου

στο σχήμα 6.35 και φαίνεται ότι ο γενετικός αλγόριθμος καταλήγει σε μια όμοια στρατηγική νυχτερινού φυσικού αερισμού με τη στρατηγική ελέγχου που ο αλγόριθμος AFT κατέληξε. Καθώς ο γενετικός αλγόριθμος συγκλίνει κοντά στο ολικό βέλτιστο και όχι ακριβώς σε αυτό στις περισσότερες περιπτώσεις, προτείνουμε την εφαρμογή του αλγορίθμου AFT χρησιμοποιώντας ως αρχικό διάνυσμα παραμέτρων ελέγχου το τελικό διάνυσμα παραμέτρων ελέγχου στο οποίο ο γενετικός αλγόριθμος κατέληξε. Η εφαρμογή αυτή δίνει τα αποτελέσματα που φα-

ίνονται στο σχήμα 6.36, στα οποία συγκλίνει χρησιμοποιώντας σημαντικά μικρότερο πλήθος επαναλήψεων απ' αυτό που χρησιμοποιήσαμε στο πείραμα 4.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μια σημαντική προσπάθεια παρουσίασης της θερμικής μοντελοποίησης κτηρίων στο EnergyPlus και αναλυτικότερα, στα υπολογιστικά μοντέλα, στο αρχείο εισόδου και το αρχείο καιρού που το λογισμικό αυτό χρησιμοποιεί, καθώς και των προτεινόμενων αλγορίθμων προσαρμοστικής βελτιστοποίησης οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των βέλτιστων στρατηγικών ελέγχου με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μια λεπτομερής περιγραφή του Building Controls Virtual Test Bed μέσω του οποίου ενοματώνουμε τις στρατηγικές ελέγχου, στις οποίες οι αλγόριθμοι συγκλίνουν, στο θερμικό μοντέλο. Τέλος παρουσιάστηκαν διάφορα πειράματα τα οποία μας οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι οι αλγόριθμοι προσαρμοστικής βελτιστοποίησης, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη θερμικών μοντέλων με αρκετή ώστε ακρίβεια καταλήγουν σε ευσταθή και λογικά αποτελέσματα.

Σαν μελλοντική εργασία προτείνεται η εφαρμογή των αλγορίθμων προσαρμοστικής βελτιστοποίησης σε πολυπλοκότερα θερμικά μοντέλα, η αναζήτηση της αντικειμενικής συνάρτησης που περιγράφει πλήρως το πρόβλημα που καλούμαστε να επιλύσουμε και τέλος η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αλγορίθμων προσαρμοστικής βελτιστοποίησης με τα αποτελέσματα της εφαρμογής συστημάτων ελέγχου που διατίθενται στην αγορά. Στόχος της σύγκρισης αυτής είναι η απόδειξη ότι η ενσωμάτωση αλγορίθμων προσαρμοστικής βελτιστοποίησης στη διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης στρατηγικής ελέγχου πιθανώς να αποτελεί αποδοτικότερη λύση από τη χρήση των εμπορικών συστημάτων ελέγχου.

Βιβλιογραφία

- [1] P.R. Armstrong, S.B. Leeb, and L.K. Norford. Control with building mass-Part I: Thermal response model. *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS*, 112(1):449, 2006.
- [2] ASHRAE. ASHRAE Standard, ANSI/ASHRAE Standard 55-2004: thermal environmental conditions for human occupancy. 2004.
- [3] D.P. Bertsekas, WW Hager, and OL Mangasarian. *Nonlinear programming*. Athena Scientific Belmont, MA, 1999.
- [4] J.E. Braun, K.W. Montgomery, and N. Chaturvedi. Evaluating the performance of building thermal mass control strategies. *HVAC&R Research*, 7(4):403–428, 2001.
- [5] JA Clarke, J. Cockroft, S. Conner, JW Hand, NJ Kelly, R. Moore, T. O'Brien, and P. Strachan. Simulation-assisted control in building energy management systems. *Energy and buildings*, 34(9):933–940, 2002.
- [6] D.B. Crawley, J.W. Hand, M. Kummert, and B.T. Griffith. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4):661–673, 2008.
- [7] D.B. Crawley, L.K. Lawrie, F.C. Winkelmann, W.F. Buhl, Y.J. Huang, C.O. Pedersen, R.K. Strand, R.J. Liesen, D.E. Fisher, M.J. Witte, et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4):319–331, 2001.
- [8] P.T. De Boer, D.P. Kroese, S. Mannor, and R.Y. Rubinstein. A tutorial on the cross-entropy method. *Annals of Operations Research*, 134(1):19–67, 2005.
- [9] H. Doukas, K.D. Patlitzianas, K. Iatropoulos, and J. Psarras. Intelligent building energy management system using rule sets. *Building and Environment*, 42(10):3562–3569, 2007.
- [10] AI Dounis and C. Caraiscos. Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment–A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7):1246–1261, 2009.
- [11] MM Gouda, S. Danaher, and CP Underwood. Quasi-adaptive fuzzy heating control of solar buildings. *Building and Environment*, 41(12):1881–1891, 2006.

- [12] SA Klein, WA Beckman, JW Mitchell, JA Duffie, NA Duffie, TL Freeman, JC Mitchell, JE Braun, BL Evans, JP Kummer, et al. TRNSYS 16-A TRaNsient SYstem simulation program, user manual. *Solar Energy Laboratory. Madison: University of Wisconsin-Madison*, 2004.
- [13] J. Kober and J. Peters. Policy search for motor primitives in robotics. *Advances in neural information processing systems*, 22, 2009.
- [14] J. Kunz, T. Maile, and V. Bazjanac. Summary of the energy analysis of the first year of the Stanford Jerry Yang & Akiko Yamazaki Environment & Energy (Y2E2) Building. Technical report, Technical Report, 2009.
- [15] DL Loveday and GS Virk. Artificial intelligence for buildings. *Applied Energy*, 41(3):201–221, 1992.
- [16] A. Mahdavi. Simulation-based control of building systems operation. *Building and Environment*, 36(6):789–796, 2001.
- [17] B. Scholkopf, A.J. Smola, R.C. Williamson, and P.L. Bartlett. New support vector algorithms. *Neural Computation*, 12(5):1207–1245, 2000.
- [18] J.C. Spall. An overview of the simultaneous perturbation method for efficient optimization. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 19(4):482–492, 1998.
- [19] H.C. Spindler and L.K. Norford. Naturally ventilated and mixed-mode buildings-Part I: Thermal modeling. *Building and Environment*, 44(4):736–749, 2009.
- [20] H.C. Spindler and L.K. Norford. Naturally ventilated and mixed-mode buildings-Part II: Optimal control. *Building and Environment*, 44(4):750–761, 2009.
- [21] I. SZITA and A. LDRINCZ. Learning tetris using the noisy cross-entropy method. *Neural computation*, 18(12):2936–2941, 2006.
- [22] L. UIUC. EnergyPlus Engineering Document: The Reference to EnergyPlus Calculations. *US Department of Energy*, 2004.
- [23] V.N. Vapnik. *The nature of statistical learning theory*. Springer Verlag, 2000.
- [24] Nikos Vlassis, Marc Toussaint, Georgios Kontes, and Savas Piperidis. Learning Model-free Robot Control by a Monte Carlo EM Algorithm. *Autonomous Robots*, 27(2):123–130, 2009.
- [25] M. Wetter. A Modular Building Controls Virtual Test Bed for the Integrations of Heterogeneous Systems. 2008.
- [26] J.A. Wright, H.A. Loosemore, and R. Farmani. Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 34(9):959–972, 2002.
- [27] M. Yazdanian and JH Klems. Measurement of the exterior convective film coefficient for windows in low-rise buildings. *ASHRAE transactions*, 100(1):1087–1096, 1994.