

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



**Σύγκριση Λογισμικών Θερμικής Προσομοίωσης Κτηρίων με τη Μέθοδο
Building Energy Simulation TEST (BESTEST)**

Σκληβανιώτης Κωνσταντίνος Φοίβος

**Επιβλέποντες:
Ρόβας Δημήτριος
Λιλής Ν. Γεώργιος**

Χανιά, Ιούλιος 2012

Ευχαριστίες

Κατ' αρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή, Δρ Δημήτριο Ρόβα. Σαν διδάσκων στα μαθήματα της Θερμοδυναμικής και της Μετάδοσης Θερμότητας, με έκανε να ενδιαφερθώ και να αγαπήσω την ιδέα της επιστήμης και να ανακαλύψω το ερευνητικό πεδίο που με ενδιαφέρει περισσότερο.

Σαν επιβλέπων της διπλωματικής μου εργασίας, μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ και να εντρυφήσω πάνω στο επιστημονικό αντικείμενο που προτιμώ και έχω επιλέξει να συνεχίσω τις σπουδές μου. Επίσης, τον ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια του κατά την εκπόνηση της εργασίας και για τη στήριξη του για τα επόμενα βήματα που διάλεξα να ακολουθήσω στη ζωή μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Γεώργιο Ν. Λιλή, ο οποίος ανέπτυξε το λογισμικό SRC, για την συνεργασία που είχαμε τους τελευταίους τρεις μήνες καθώς και για την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα Γεώργιο Γιαννάκη, για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια της μου διπλωματικής εργασίας καθώς και την συνεχή στήριξη και συμβουλές που ήταν πάντα διαθέσιμος να προσφέρει.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω να αναφερθώ και στην υπόλοιπη ερευνητική ομάδα του ερευνητικού προγράμματος PEBBLE, Γεώργιο Κόντε, Ελευθερία Κοντογιάννη, Νόπη Εξιζίδου και Κυριάκο Κατσιγαράκη αφού η συνεργασία μαζί τους ήταν μια σημαντική ερευνητική εμπειρία και η δημιουργία μιας καλής φιλίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Μάρκο και Μαρία και την αδελφή μου Μυρτώ, για τη στήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια για την επίτευξη των στόχων μου κατά τη φοίτηση μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	iv
Σχήματα	viii
Πίνακες	x
Περίληψη	1
1. Εισαγωγή	3
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	7
2.1. Θερμική προσομοίωση κτηρίων	7
2.1.1 Το λογισμικό TEE-KENAK	9
2.2. Building Information Modeling – gbXML και IFC	9
2.2.1 gbXML – green building XML	9
2.2.2 IFC – Industry Foundation Classes	9
2.3. Διαδικασία αξιολόγησης λογισμικών θερμικής προσομοίωσης	9
2.3.1 Η μέθοδος BESTEST	10
2.3.2 Διαφορές IEA BESTEST και HERS BESTEST	11
3. Το λογισμικό θερμικής προσομοίωσης SRC και το πρότυπο gbXML	15
3.1. Η έννοια της θερμικής αντίστασης	15
3.1.1 Θερμική αντίσταση αγωγής	15
3.1.2 Θερμική αντίσταση συναγωγής	15
3.1.3 Συνολική θερμική αντίσταση τοίχου	16
3.1.4 Συνολική θερμική αντίσταση από το εξωτερικό περιβάλλον στο εσωτερικό κτηρίου	16
3.2. Αρχεία gbXML	17
3.2.1 Προσδιορισμός του κελύφους ενός κτηρίου σε αρχεία gbXML	18
3.2.2 Προσδιορισμός των θερμικών ζωνών ενός κτηρίου	19
3.2.3 Προσδιορισμός των θερμικών ιδιοτήτων των επιφανειών στο gbXML	20
3.3. Μοντελοποίηση στο SRC	21
3.3.1 Το στοιχείο SRC	23
3.3.2 Θερμό-ηλεκτρικό δίκτυο κόμβων του μοντέλου SRC	23
3.3.3 Πίνακας R	24
3.3.4 Πίνακας C	25
3.3.5 Συνολική περιγραφή του συστήματος	25
3.3.6 Είσοδος αρχείου gbXML - xml_read	25
3.3.7 Γεωμετρία κτηρίου - GEO.mat	25
3.3.8 Υλικά και θερμικές ιδιότητες - MAT.mat	26
3.3.9 Χρονικός Προγραμματισμός – Χρονοδιαγράμματα (schedules)	26
3.3.10 Υπολογισμός θερμοκρασίας κόμβων	26
3.3.11 Υπολογισμός συντελεστή συναγωγής	27

3.3.12	Συντελεστές όψεως (F_CALC.mat) – Εσωτερική ακτινοβολία μεγάλου μήκους (Qint_LWR.mat)	29
3.3.13	Ηλιακά κέρδη	30
3.3.14	Ροή αέρα από χαραμάδες και ρωγμές του κτηριακού κελύφους (Infiltration)	30
3.3.15	Εξαερισμός	31
3.3.16	Σύστημα HVAC	32
3.3.17	Ιδανικό Σύστημα Θέρμανσης – Ψύξης	33
3.3.18	Εσωτερικά Κέρδη	34
3.4.	Εκτέλεση Θερμικής Προσομοίωσης στο λογισμικό SRC	34
4.	Η μέθοδος IEA BESTEST	36
4.1.	Γενική περιγραφή των στοιχείων μοντελοποίησης της μεθόδου IEA BESTEST	36
4.2.	Βασικοί κανόνες μοντελοποίησης	37
4.3.	Γενική περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε	38
4.4.	Βασικά στοιχεία της μοντελοποίησης	38
4.4.1	Μετεωρολογικές συνθήκες και θερμική κατάσταση εδάφους	38
4.4.2	Ροή αέρα από χαραμάδες και ρωγμές του κτηριακού κελύφους (infiltration)	39
4.4.3	Εσωτερικά κέρδη (Internal gains)	40
4.4.4	Συντελεστές συναγωγής και ακτινοβολίας	40
4.4.5	Διαφανές παράθυρο	42
4.4.6	Επιφάνεια Σκίασης	44
4.4.7	Κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας στις εσωτερικές επιφάνειες	44
4.4.8	Σύστημα θέρμανσης, ψύξης και εξαερισμού – HVAC	46
4.4.9	Θερμοστάτης και Χρονικός Προγραμματισμός HVAC (schedule)	47
4.4.10	Αποτελέσματα που συγκρίνονται	48
4.4.11	Υλικά μικρής θερμικής αντίστασης – Diagnostic Cases & Cases 600-650	48
4.4.12	Υλικά μεγάλης θερμικής αντίστασης - Cases 900-960	49
4.4.13	Τοίχος υψηλής θερμικής αγωγιμότητας	50
4.5.	Αναπαράσταση και περιγραφή των περιπτώσεων (cases)	50
4.5.1	Διαγνωστικές Περιπτώσεις	50
4.5.2	Γενικευμένες περιπτώσεις	51
4.5.3	Case 960	52
4.6.	Πινάκες και διαγράμματα περιγραφής μεθόδου IEA BESTEST	53
5.	Το λογισμικό EnergyPlus	67
5.1.	Σχεδίαση των κτηρίων	67
5.2.	Γενικές παράμετροι κτηρίου - Building	67
5.2.1	North Axis	68
5.2.2	Terrain	68
5.2.3	Loads Tolerance Coverage Value	68
5.2.4	Temperature Convergence Tolerance Value	69
5.2.5	Solar Distribution: Full Interior and Exterior	69
5.2.6	Minimum Number of Warm Up Days: 6	70

5.3.	Υπολογισμός Ηλιακών Δεδομένων - Shadow Calculation	70
5.3.1	Calculation Frequency: 10	70
5.4.	Συντελεστής Συναγωγής - Surface Convection Algorithm: Inside,Outside.....	70
5.5.	Μεταφορά Θερμότητας και Υγρασίας - Heat Balance Algorithm.....	71
5.5.1	Algorithm: Conduction Transfer Function	71
5.5.2	Surface Temperature Upper Limit: 200	71
5.6.	Χρονικό Βήμα - Timestep	71
5.7.	Περιοχή - Site: Location	71
5.8.	Χρονική Περίοδος Προσομοίωσης - Run Period	71
5.9.	Θερμοκρασία Εδάφους - Site Ground Temperature: Building Surface	72
5.10.	Χρονικός Προγραμματισμός - Schedule: Compact	72
5.11.	Υλικά - Material	73
5.12.	Υλικά Παραθύρων - Window Material: Glazing.....	73
5.13.	Δομή Επιφανειών - Construction	74
5.14.	Κανόνες Γεωμετρίας - Global Geometry Rules	74
5.14.1	Starting Vertex Position: Upper Left Corner	75
5.14.2	Vertex Entry Direction: Counterclock Wise	75
5.14.3	Coordinate System: Relative	76
5.15.	Θερμική Ζώνη - Zone	76
5.16.	Επιφάνειες Κτηρίου - Building Surface: Detailed.....	76
5.17.	Παράθυρα Κτηρίου - Fenestration Surface: Detailed.....	77
5.18.	Επιφάνεια Σκίασης – Shading:Zone:Detailed	78
5.19.	Εσωτερικά Κέρδη - Other Equipment	78
5.20.	Ροή Αέρα Από Ρωγμές και Χαραμάδες - ZoneInfiltration: Design Flow Rate	79
5.21.	Ιδανικό Σύστημα HVAC	80
5.21.1	HVAC Template: Thermostat	80
5.21.2	HVAC Template: Zone: Ideal Loads Air System.....	81
6.	Αποτελέσματα Πειραμάτων	83
6.1.	Προσπίπτουσα ακτινοβολία στους τοίχους.....	95
6.2.	Case 600.....	83
6.2.1	Case 600 – Θερμοκρασία αέρα θερμικής ζώνης χωρίς σύστημα HVAC Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
6.2.2	Ποσοστό υγρασίας στον αέρα θερμική ζώνης..... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
6.3.	Μετάδοση θερμότητας με αγωγή - Case195.....	86
6.4.	Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή - Case 200-195.....	89
6.5.	Ικανότητα εκπομπής και απορρόφησης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους επιφανειών	90
6.5.1	Έλεγχος ικανότητας εκπομπής ακτινοβολίας εξωτερικών τοίχων.....	93
6.5.2	Ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας εσωτερικών επιφανειών	99
6.6.	Σύνοψη πειραματικών αποτελεσμάτων	100
	Συμπεράσματα.....	103
	Βιβλιογραφία.....	105

Σχήματα

Σχήμα 3-1: Θερμικές αντιστάσεις σε τοίχο [21].....	16
Σχήμα 3-2: Μετάδοση θερμότητας σε τοίχο [21].....	16
Σχήμα 3-3: Δομή πληροφορίας κατασκευαστικών χαρακτηριστικών επιφάνειας.....	20
Σχήμα 3-4:Το στοιχείο SRC.....	23
Σχήμα 3-5:Παράδειγμα αναπαράστασης κτηρίου μιας θερμικής ζώνης σαν ά ηλεκτρικό κύκλωμα	24
Σχήμα 3-6: View factors.....	29
Σχήμα 4-1: Διάθλαση και ανάκλαση φωτός υπό διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης[3]	44
Σχήμα 4-2: Ηλιακή απόκλιση δ [18].....	46
Σχήμα 4-3: Γωνία ύψους του ηλίου[18].....	46
Σχήμα 4-4: Γωνία αζιμούθιου[18]	46
Σχήμα 4-5:Case 195.....	50
Σχήμα 4-6:Case 200.....	51
Σχήμα 4-7: Case 600.....	51
Σχήμα 4-8:Case 610.....	51
Σχήμα 4-9:Case620.....	52
Σχήμα 4-10:Case630.....	52
Σχήμα 4-11: Case 960	53
Σχήμα 4-12: Πίνακας Χρονοδιαγράμματος, τοιχοποιίας, εσωτερικών κερδών και ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες - Διαγνωστικές περιπτώσεις.....	54
Σχήμα 5-1:EnergyPlus - Building.....	68
Σχήμα 5-2:και ταύτιση βόρειου άξονα κτηρίου με τον αληθή Βορρά.....	68
Σχήμα 5-3: Κυρτά & μη κυρτά κτήρια [15].....	69
Σχήμα 5-4:EnergyPlus - Shadow Calculation	70
Σχήμα 5-5:EnergyPlus - Timestep	71
Σχήμα 5-6:EnergyPlus - Site:Location.....	71
Σχήμα 5-7:EnergyPlus - RunPeriod.....	72
Σχήμα 5-8:EnergyPlus - SiteGroundTemperature:Building Surface	72
Σχήμα 5-9:EnergyPlus - Schedule:Compact	73
Σχήμα 5-10:EnergyPlus - Material	73
Σχήμα 5-11:EnergyPlus - Window Material:Glazing	74
Σχήμα 5-12:EnergyPlus - Construction	74
Σχήμα 5-13:EnergyPlus - GlobalGeometryRules	75
Σχήμα 5-14:EnergyPlus - Σύστημα συντεταγμένων	75
Σχήμα 5-15:Καταγραφή κορυφών επιφάνειας	75
Σχήμα 5-16:EnergyPlus - Zone	76
Σχήμα 5-17:EnergyPlus - BuildingSurface:Detailed	77
Σχήμα 5-18:EnergyPlus - FenetrationSurface:Detailed	77
Σχήμα 5-19:Shading:Zone:Detailed	78
Σχήμα 5-20:EnergyPlus - OtherEquipment.....	79
Σχήμα 5-21:EnergyPlus - ZoneInfiltration:DesignFlowRate	79
Σχήμα 5-22:EnergyPlus - HVACTemplate:Thermostat	80
Σχήμα 5-23:EnergyPlus - HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSytem.....	81

Σχήμα 6-1: Προσπίπτουσα ακτινοβολία στον ανατολικό τοίχο	96
Σχήμα 6-2: Προσπίπτουσα ακτινοβολία στον βόρειο τοίχο	96
Σχήμα 6-3: Προσπίπτουσα ακτινοβολία στον βόρειο τοίχο	97
Σχήμα 6-4: Προσπίπτουσα ακτινοβολία στην οροφή	97
Σχήμα 6-5: Προσπίπτουσα ακτινοβολία στον νότιο τοίχο	98
Σχήμα 6-6: Προσπίπτουσα ακτινοβολία στον δυτικό	98
Σχήμα 6-7: Ετήσια θερμικά φορτία – Case 600	84
Σχήμα 6-8: Μέγιστη θερμική ισχύς - Case 600	84
Σχήμα 6-9: Θερμοκρασία αέρα θερμικής ζώνης χωρίς σύστημα HVAC - Case 600	85
Σχήμα 6-10: Στιγμιότυπο θερμοκρασίας αέρα θερμικής ζώνης χωρίς σύστημα HVAC - Case 600	85
Σχήμα 6-11: Ποσοστό υγρασίας στον αέρα της θερμικής ζώνης	86
Σχήμα 6-12: Ετήσια θερμικά φορτία - Case 195	87
Σχήμα 6-13: Μέγιστη θερμική ισχύς - Case 195	87
Σχήμα 6-14: Θερμοκρασία αέρα θερμικής ζώνης χωρίς σύστημα HVAC - Case 195	88
Σχήμα 6-15: Στιγμιότυπο θερμοκρασίας αέρα θερμικής ζώνης χωρίς σύστημα HVAC - Case 195	88
Σχήμα 6-16: Διαφορά ετήσιων θερμικών φορτίων - Case 200-195	89
Σχήμα 6-17: Διαφορά μέγιστης θερμικής ισχύος - Case 200-195	90
Σχήμα 6-18: Ετήσιο θερμικό φορτίο θέρμανσης Case 210, Case215, Case220	90
Σχήμα 6-19: Ετήσιο θερμικό φορτίο ψύξης Case 210, Case215, Case220	91
Σχήμα 6-20: Μέγιστη θερμική ισχύς θέρμανσης Case 210, Case215, Case220	91
Σχήμα 6-21: Μέγιστη θερμική ισχύς ψύξης Case 210, Case215, Case220	92
Σχήμα 6-22: Διαφορά ετήσιων θερμικών φορτίων - Case 210-200	94
Σχήμα 6-23: Διαφορά μέγιστης θερμικής ισχύος - Case 210-200	94
Σχήμα 6-24: Διαφορά ετήσιων φορτίων - Case 220-215	95
Σχήμα 6-25: Διαφορά μέγιστης θερμικής ισχύος - Case 220-215	95
Σχήμα 6-26: Διαφορά ετήσιων θερμικών φορτίων - Case 215-200	99
Σχήμα 6-27: Διαφορά μέγιστης θερμικής ισχύος - Case 215-200	99
Σχήμα 6-28: Διαφορά ετήσιων θερμικών φορτίων - Case 220-210	100
Σχήμα 6-29: Διαφορά μέγιστης θερμικής ισχύος - Case 220-210	100

Πίνακες

Πίνακας 2-1: Διαφορές βασικών παραμέτρων	11
Πίνακας 2-2: Παράθυρα.....	11
Πίνακας 2-3: Θερμική μάζα	12
Πίνακας 2-4: Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία	12
Πίνακας 2-5 - Μηχανολογικός εξοπλισμός	12
Πίνακας 3-1 - Μεταβλητές αλγορίθμου TARP	27
Πίνακας 3-2 - Συντελεστής τραχύτητας.....	28
Πίνακας 4-1 - Χαρακτηριστικά τοποθεσίας & καιρού κατά την εφαρμογή της μεθόδου IEA BESTEST	38
Πίνακας 4-2 - Ροή αέρα από ρωγμές και μικρά ανοίγματα.....	39
Πίνακας 4-3 - Συνδυασμένος συντελεστής συναγωγής & ακτινοβολίας εξωτερικών τοίχων	41
Πίνακας 4-4 - Συνδυασμένος συντελεστής συναγωγής & ακτινοβολίας εσωτερικών τοίχων	41
Πίνακας 4-5 - Συντελεστής ακτινοβολίας.....	42
Πίνακας 4-6 - Ιδιότητες παραθύρου	42
Πίνακας 4-7 - Διαπερατότητα παραθύρου υπό συγκεκριμένες γωνίες	43
Πίνακας 4-8 - Ποσοστό πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε επιφάνεια.....	44
Πίνακας 4-9 - Παροχή ανεμιστήρα.....	47
Πίνακας 4-10 - Εξωτερικοί τοίχοι	48
Πίνακας 4-11 - Πάτωμα	48
Πίνακας 4-12 - Οροφή.....	48
Πίνακας 4-13 - Εξωτερικοί τοίχοι	49
Πίνακας 4-14 - Πάτωμα.....	49
Πίνακας 4-15 - Οροφή.....	49
Πίνακας 4-16 - Υλικά τοίχου υψηλής θερμικής αγωγιμότητας.....	50
Πίνακας 4-17 - Θερμικά χαρακτηριστικά κοινού τοίχου	52
Πίνακας 4-18:Πίνακας απορρόφησης και εκπομπής ακτινοβολίας μικρού και μεγάλου μήκους - Διαγνωστικές περιπτώσεις	55
Πίνακας 4-19:Πληροφορίες παραθύρων - Διαγνωστικές περιπτώσεις	56
Πίνακας 4-20:Πίνακας Χρονοδιαγράμματος, τοιχοποιίας, εσωτερικών κερδών και ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες - Γενικευμένες περιπτώσεις (Case 395 - Case 650)	57
Πίνακας 4-21:Πληροφορίες απορρόφησης και εκπομπής ακτινοβολίας μικρού και μεγάλου μήκους - Γενικευμένες περιπτώσεις (Case 395 - Case 650).....	58
Πίνακας 4-22:Πληροφορίες παραθύρων - Γενικευμένες περιπτώσεις (Case395 - Case650)	59
Πίνακας 4-23:Πληροφορίες χρονοδιαγράμματος, τοιχοποιίας, εσωτερικών κερδών και ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες - Γενικευμένες περιπτώσεις (Case 800 - Case 950)	60
Πίνακας 4-24:Πληροφορίες απορρόφησης και εκπομπής ακτινοβολίας μικρού και μεγάλου μήκους - Γενικευμένες περιπτώσεις (Case 800 - Case 950).....	61
Πίνακας 4-25:Πληροφορίες παραθύρων- Γενικευμένες περιπτώσεις (Case 800 - Case 950).....	62
Πίνακας 6-1:Διαφορές θερμικών φορτίων SRC & EnergyPlus - Case 600	84
Πίνακας 6-2:Διαφορές θερμικών φορτίων SRC & EnergyPlus - Case 195	87
Πίνακας 6-3:φορτίων SRC & EnergyPlus - Case 200	89
Πίνακας 6-4:Διαφορές θερμικών φορτίων SRC & EnergyPlus - Case 210	92
Πίνακας 6-5:Διαφορές θερμικών φορτίων SRC & EnergyPlus - Case 215.....	93

Πίνακας 6-6: Διαφορές θερμικών φορτίων SRC & EnergyPlus - Case 220	93
--	----

Διαγράμματα Ροής

Διάγραμμα ροής 1:Αλγόριθμος πρόβλεψης - διόρθωσης ιδανικού συστήματος HVAC	34
Διάγραμμα ροής 2:Case600 - Case650	63
Διάγραμμα ροής 3:Case 900 - Cas 950.....	64
Διάγραμμα ροής 4:Διαγνωστικές περιπτώσεις C	65
Διάγραμμα ροής 5:Διαγνωστικές περιπτώσεις A,B.....	66

Περίληψη

Η θερμική προσομοίωση κτηρίων είναι η διαδικασία κατά την οποία προσομοιώνεται με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και κατάλληλων λογισμικών, η θερμική συμπεριφορά ενός κτηρίου. Αποτελεί ένα εργαλείο με βάση το οποίο μπορεί να επιτευχθεί μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα υφιστάμενα κτήρια, ενώ ταυτόχρονα οδηγεί στον σχεδιασμό νέων με χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Σήμερα υπάρχει πληθώρα λογισμικών θερμικής προσομοίωσης τα οποία επιτρέπουν την προσέγγιση του προβλήματος με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, λόγω των διαφορετικών μαθηματικών μοντέλων στα οποία βασίζονται οι ενεργειακοί υπολογισμοί. Παρ' όλα αυτά, η ύπαρξη διαφορετικών μοντέλων μεταξύ των λογισμικών, έχει ως αποτέλεσμα την παρατήρηση αποκλίσεων μεταξύ των αποτελεσμάτων που παράγονται. Έτσι, είναι απαραίτητη η ύπαρξη μεθόδων ελέγχου οι οποίες αποσκοπούν στη αξιολόγηση των λογισμικών και στον έλεγχο της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων που παράγουν. Η μέθοδος IEA BESTEST, η οποία αναπτύχθηκε από την IEA (International Energy Agency), αποτελεί μια μέθοδο αξιολόγησης λογισμικών, σύμφωνα με την οποία πραγματοποιείται θερμική προσομοίωση πάνω σε μια σειρά από κτήρια με συγκεκριμένα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και υπό καθορισμένες καιρικές συνθήκες. Στη συνέχεια, με βάση τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που παράγονται από τα διάφορα λογισμικά, αξιολογούνται οι δυνατότητες τους και εντοπίζονται οι παράμετροι οι οποίες προκαλούν τυχόν αποκλίσεις.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί θερμική προσομοίωση κτηρίων, προαπαιτείται η σχεδίαση τους με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και την αξιοποίηση λογισμικών σχεδίασης CAD. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την ανάγκη για ύπαρξη διαλειτουργικότητας μεταξύ των λογισμικών θερμικής προσομοίωσης και των λογισμικών σχεδίασης CAD. Η έννοια της διαλειτουργικότητας συσχετίζεται με την ολοκληρωμένη και έγκυρη ανταλλαγή της πληροφορίας που αφορά ένα κτήριο μεταξύ των λογισμικών που προαναφερθήκαν. Το πρόβλημα της έλλειψης διαλειτουργικότητας επιχειρούν να λύσουν τα πρότυπα gbXML και IFC τα οποία περιγράφουν με ένα συγκεκριμένο τρόπο, όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά ενός κτηρίου, τα αφενός περιγράφουν με ολοκληρωμένο τρόπο την αρχιτεκτονική σχεδίαση του και αφετέρου εμπεριέχουν όλη την απαραίτητη πληροφορία προκειμένου να γίνει θερμική προσομοίωση.

Η ανάγκη για διεύρυνση της διαλειτουργικότητας και η ύπαρξη ενός λογισμικού ανοιχτού κώδικα το οποίο θα είναι σε μια συνεχή διαδικασία βελτίωσης και στο οποίο θα επιτρέπεται η δόκιμη και εφαρμογή διαφορετικών μαθηματικών μοντέλων, οδήγησε στην υλοποίηση του λογισμικού SRC, το οποίο αναπτύσσεται στο πολυτεχνείο Κρήτης υπό την αιγίδα του ερευνητικού προγράμματος PEBBLE. Το SRC μετρά λίγους μήνες ζωής ενώ βρίσκεται στη φάση της αξιολόγησης των παραγόμενων αποτελεσμάτων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε αντικείμενο την αξιολόγηση του λογισμικού SRC με βάση τη μέθοδο IEA BESTEST καθώς και μια προσπάθεια για βελτίωση και διεύρυνση των χαρακτηριστικών και δυνατοτήτων του. Η αξιολόγηση του SRC βασίστηκε κυρίως στη σύγκριση με το λογισμικό θερμικής προσομοίωσης EnergyPlus, για το λόγο ότι θεωρείται ένα από τα πιο αξιόπιστα, ευρέως διαδομένα και δοκιμασμένα. Ταυτόχρονα, εξεταστήκαν τρόποι σύμφωνα τους οποίους μπορεί να γίνει η κατασκευή ενός μοντέλου με βάση το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί θερμική προσομοίωση κτηρίων. Τέλος, έγινε μια μελέτη πάνω στους τρόπους και τα προβλήματα αναπαράστασης ενός κτηρίου δίνοντας έμφαση στο πρότυπο gbXML, με τη χρήση του λογισμικού σχεδίασης κτηρίων Autodesk Revit MEP.

1. Εισαγωγή

Το μεγαλύτερο μέρος των παραγωγικών δραστηριοτήτων του ανθρώπου απαιτεί τη χρήση ενεργειακών πόρων. Σήμερα, το σημαντικότερο μέρος της παραγόμενης ενέργειας παράγεται με συμβατικές μεθόδους – π.χ. καύση υδρογονανθράκων – τα αποθέματα των οποίων είναι πεπερασμένα και, σε ορισμένες περιπτώσεις περιορισμένα, ενώ συνάμα η χρήση τους προκαλεί σημαντική επιβάρυνση στο περιβάλλον. Η παραγωγή ενέργειας με χρήση ανανεώσιμων πηγών, όπως η ηλιακή και η αιολική, αποτελεί έναν βιώσιμο και περιβαλλοντικά φιλικό τρόπο για την κάλυψη μέρους των ενεργειακών αναγκών. Στα πλαίσια αυτά η ενεργειακή στρατηγική των ανεπτυγμένων χωρών προσπαθεί να αυξήσει τη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και παράλληλα στον περιορισμό των ενεργειακών απαιτήσεων σε τομείς κατανάλωσης όπως η βιομηχανία, οι μεταφορές και ο τριτογενής τομέας. Στην πρώτη περίπτωση, αυτό αντιστοιχεί στην παροχή κινήτρων για την εγκατάσταση και χρήση ΑΠΕ· ενώ στη δεύτερη περίπτωση ενεργειακά πιστοποιητικά αποσκοπούν στην ποσοτικοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας και στη συνέχεια στην εξεύρεση ικανοποιητικών, με ενεργειακά κριτήρια, λύσεων για μείωση της ενεργειακής έντασης (energy intensity).

Δεδομένου ότι, ο τριτογενής τομέας ευθύνεται για το 40% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας(1), κρίνεται απαραίτητη η αξιοποίηση εναλλακτικών σεναρίων που αποσκοπούν στην μείωση του ποσοστού αυτού. Η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτηρίων, μπορεί να επιτευχτεί με ποικίλους τρόπους. Στα υφιστάμενα κτήρια τα οποία είναι υπεύθυνα για το συντριπτικό ποσοστό αυτής, μπορούν να επιτευχθούν χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις μέσω επεμβάσεων όπως η ενίσχυση της μόνωσης του κτηριακού κελύφους, η χρήση τεχνικών παθητικού σχεδιασμού για τη μείωση των θερμικών απαιτήσεων, ή η αντικατάσταση υφιστάμενων συστημάτων θέρμανσης και ψύξης με καινούργια περισσότερο αποδοτικά. Παρ' όλα αυτά, τέτοιες εφαρμογές αποτελούν δαπανηρές και χρονοβόρες λύσεις οι οποίες πολλές φορές μπορεί να μην επιτύχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Όσον αφορά τα νεόδμητα κτήρια, το φάσμα τεχνικών μείωσης των ενεργειακών απαιτήσεων, διευρύνεται μέσω της αξιοποίησης σεναρίων βιοκλιματικού σχεδιασμού καθώς και των αυξημένων δυνατοτήτων χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παράλληλα, τόσο στα νεόδμητα όσο και στα υφιστάμενα κτήρια, ο σωστός σχεδιασμός πρέπει να συνδυάζεται με ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας τα οποία να επιτρέπουν την ολιστική διαχείριση των ελεγχόμενων υποσυστημάτων του κτηρίου (παράθυρα, ελεγχόμενα σκίαστρα, κλιματιστικές μονάδες κλπ).

Ειδικά για τον κτηριακό τομέα, η θερμική προσομοίωση αποτελεί ένα εργαλείο βάσει του οποίου δύναται η αξιολόγηση των προαναφερθέντων εναλλακτικών σεναρίων. Πρόκειται για τη διαδικασία κατά την οποία, προσομοιώνεται με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και κατάλληλων λογισμικών, η θερμική συμπεριφορά ενός κτηρίου. Η δυνατότητα αυτή είναι δίνει την ευκαιρία, για την εύρεση καλών λύσεων που αφορούν τη κατασκευή και τους τρόπους λειτουργίας ενός νέου κτηρίου. Τις τελευταίες δυο δεκαετίες, έχει αναπτυχτεί πληθώρα λογισμικών θερμικής προσομοίωσης κτηρίων. Τα λογισμικά αυτά χρησιμοποιούν μαθηματικά μοντέλα, προκειμένου να περιγράψουν τους διαφόρους μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας, οι οποίοι επηρεάζουν τα θερμικά συμπεριφορά ενός κτηρίου: Μετάδοση θερμότητας δια μέσου των τοίχων με αγωγή, απώλειες λόγω συναγωγής, ηλιακά κέρδη λόγω ακτινοβολία, η διάχυση και μεταφορά υγρασίας κα. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος, που προέρχεται από τους πολλούς και διαφορετικούς μηχανισμούς οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη οδηγούν στη χρήση πολλών και διαφορετικών μοντελοποιητικών προσεγγίσεων με αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλές διαθέσιμες προσεγγίσεις. Σήμερα, υπάρχουν λογισμικά με πολλές και διαφορετικές δυνατότητες, στα οποία πολλές φορές εντοπίζονται ικανότητες και αδυναμίες πάνω στη μοντελοποίηση διαφόρων παραμέτρων(2). Η διαφορετικότητα αυτή σημαίνει ότι διαφορετικά εργαλεία μπορεί να δώσουν (ορισμένες φορές σημαντικές) αποκλίσεις στα εκτιμώμενα θερμικά και ενεργειακά μεγέθη. Η προσέγγιση της πραγματικότητας σχετίζεται με τις επί μέρους απλοποιητικές και μοντελοποιητικές παραδοχές οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπ όψη κατά την επεξεργασία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Επιπρόσθετα τα λαμβανόμενα αποτελέσματα σχετίζονται άμεσα με τη λογική επιλογή οριακών/λειτουργικών συνθηκών οι οποίες βασίζονται πολλές φορές σε εκτιμήσεις της πραγματικής χρήσης (π.χ. λειτουργία παραθύρων, ωράριο εργαζομένων, είδη χρήσης χώρων κτλ).

Η θερμική προσομοίωση ενός κτηρίου, προϋποθέτει τον σχεδιασμό του με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η σχεδίαση κτηρίων, πραγματοποιείται με την αξιοποίηση λογισμικών CAD, όπως το Autodesk REVIT και το Google Sketchup, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα στους μηχανικούς να αναπαριστούν είτε στις 2 είτε στις 3 διαστάσεις του χώρου, τα κτήρια τα οποία πρόκειται να κατασκευαστούν, ενώ ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα μελέτης και βελτιστοποίησης τους. Βέβαια, ένα κτήριο μπορεί να σχεδιαστεί υπό διαφορετικές οπτικές. Ο σχεδιασμός με αρχιτεκτονικά κριτήρια στοχεύει περισσότερο στην εξωτερική και εσωτερική εμφάνιση του κτηρίου. Στην αντίθετη κατεύθυνση, ο σχεδιασμός με ενεργειακά κριτήρια πραγματοποιείται με γνώμονα την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας από τα κτήρια. Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις οι σχεδιαστικοί στόχοι είναι αντικρουόμενοι και πρέπει να υπάρχει συμβιβασμός μεταξύ ενεργειακών και αισθητικών/λειτουργικών αναγκών.

Σε αυτό το σημείο, γίνεται αντιληπτή η ανάγκη της διαλειτουργικότητας μεταξύ των λογισμικών σχεδίασης CAD και των λογισμικών θερμικής προσομοίωσης. Η έννοια της διαλειτουργικότητας, σχετίζεται με την δυνατότητα αξιοποίησης την πληροφορίας, ταυτόχρονα και από τις δυο κατευθύνσεις. Πιο συγκεκριμένα, προκείμενου να διαπιστωθεί εάν ένα κτήριο που σχεδιάζεται μόνο με αρχιτεκτονικά κριτήρια είναι ενεργοβόρο, θα πρέπει να αξιολογηθούν εκτιμηθούν οι θερμικές απαιτήσεις του με χρήση ενός λογισμικού θερμικής προσομοίωσης. Αυτό σημαίνει ότι η πληροφορία που αφορά τα κατασκευαστικά και αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του, θα πρέπει να είναι άμεσα διαθέσιμη και συμβατή και να παρέχεται από το αρχιτεκτονικό σχέδιο χωρίς την ανάγκη προσαρμογής και τροποποιήσεων για την αξιοποίηση της από το λογισμικό θερμικής προσομοίωσης. Επιπλέον, θα πρέπει στο σχέδιο του κτηρίου να υπάρχουν και χαρακτηριστικά που απαιτούνται κατά τη θερμική προσομοίωση, όπως θερμική αγωγιμότητα, ειδικές θερμοχωρητικότητες κτλ. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητο να υπάρχει διαλειτουργικότητα, ώστε οι πληροφορίες που αφορούν τα σχεδιαστικά και θερμικά χαρακτηριστικά ενός κτηρίου να συγκεντρώνονται σε ένα αρχείο το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί από το πλήθος των αντίστοιχων λογισμικών. Είναι χαρακτηριστικό, όπως αναφέρει το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας των Η.Π.Α. (NIST), ότι στη συγκεκριμένη χώρα, χάνονται πάνω από 16 εκ. δολάρια λόγω της αδυναμίας των λογισμικών να υποστηρίζουν επαρκώς τις πληροφορίες που αφορούν τα κτήρια και έχουν ως αποτέλεσμα την έλλειψη διαλειτουργικότητας(3). Η έλλειψη αυτή, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του καταναλισκόμενου χρόνου για την ανάπτυξη του θερμικού μοντέλου καθώς ο μελετητής επανασχεδιάζει το κτήριο και δεν χρησιμοποιεί την υπάρχουσα πληροφορία. Επίσης, η δυσκολία στην επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών ομάδων έχει το αποτέλεσμα να αναλύεται σημαντικός χρόνος στη διασαφήνιση λεπτομερειών αντί για την βελτίωση της σχεδίασης – σε όλες τις περιπτώσεις αυτό οδηγεί σε χαμηλότερη παραγωγικότητα και δυσλειτουργικά αποτελέσματα, τα οποία σχεδόν πάντα οδηγούν σε αύξηση του κατασκευαστικού και λειτουργικού κόστους. Το πρόβλημα της διαλειτουργικότητας επιχειρούν να λύσουν τα πρότυπα δομής της πληροφορίας που αφορά τα κτήρια, gbXML (green building XML) και IFC (Industry Foundation Classes). Τα συγκεκριμένα πρότυπα περιγράφουν ενός συγκεκριμένο τρόπο δόμησης της πληροφορίας σε ένα αρχείο, ενώ μπορούν να παραχθούν από το πλήθος των λογισμικών σχεδίασης CAD και των λογισμικών θερμικής προσομοίωσης. Αποσκοπούν στο να εμπεριέχουν τις πληροφορίες που αφορούν τόσο τη γεωμετρία ενός κτηρίου όσο και τις θερμικές ιδιότητες των υλικών που είναι κατασκευασμένα, καθώς και πληροφορίες που αφορούν τα συστήματα HVAC, αισθητήρες θερμοκρασίας κτλ.

Κατά τη διεξαγωγή του ερευνητικού προγράμματος PEBBLE, αναπτύχθηκε το λογισμικό θερμικής προσομοίωσης SRC. Σκοπός της ανάπτυξης του είναι η διεύρυνση της διαλειτουργικότητας, την οποία επιχειρεί να επιτύχει χρησιμοποιώντας τα πλεονεκτήματα τα οποία χαρακτηρίζουν τα αρχεία gbXML. Ταυτόχρονα, αποτελεί την προσπάθεια για την υλοποίηση ενός λογισμικού ανοιχτού κώδικα, το οποίο θα βρίσκεται σε μια δυναμική διαδικασία βελτίωσης και εξέλιξης. Η ανάπτυξη του λογισμικού πραγματοποιήθηκε με χρήση της πλατφόρμας MATLAB, λόγω του πλήθους εργαλείων που διαθέτει έτοιμα καθώς και της δυνατότητας που προσφέρει για γρήγορη προτυποποίηση.

Το γεγονός ότι αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση διαφορετικών μαθηματικών μοντέλων στα διάφορα λογισμικά, παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις δημιούργησε την ανάγκη για την ανάπτυξη τεχνικών και μεθόδων με τις οποίες θα μπορούν να αξιολογούνται και να συγκρίνονται λογισμικά μεταξύ τους. Έτσι, το 1995, αναπτύχθηκε, η μέθοδος BESTEST (Building Energy Simulation TEST) (4)(5), η οποία αποτέλεσε τη βάση για τη σύγκριση λογισμικών θερμικής προσομοίωσης. Περιγράφει την προσομοίωση μιας σειράς από περιπτώσεις κτηρίων, με συγκεκριμένα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, οι οποίες εκτελούνται υπό συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες. Παράλληλα, τα διαγνωστικά μονοπάτια της μεθόδου, δίνουν τη δυνατότητα για τον εντοπισμό των εκάστοτε μοντελοποιητικών αδυναμιών καθώς και λαθών υλοποίησης.

Η παρούσα διπλωματική, πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της αξιολόγησης και αναβάθμισης του λογισμικού θερμικής προσομοίωσης SRC, με τη χρήση της μεθόδου IEA BESTEST όπου τα παραγόμενα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα της τρέχουσας έκδοσης του λογισμικού EnergyPlus (EnergyPlus v7.1.0). Η επιλογή του EnergyPlus στηρίχτηκε στο γεγονός ότι θεωρείται ένα από τα πιο αξιόπιστα, ευρέως διαδομένα και δοκιμασμένα. Επίσης, έγινε μια μελέτη πάνω στους τρόπους και τα προβλήματα αναπαράστασης ενός κτηρίου δίνοντας έμφαση στο πρότυπο gbXML, με τη χρήση του λογισμικού σχεδίασης κτηρίων Autodesk Revit MEP. Έτσι, το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια βιβλιογραφική ανασκόπηση, πάνω στα πρότυπα gbXML και IFC, στα λογισμικά θερμικής προσομοίωσης και τους τρόπους αξιολόγησης και σύγκρισης τους. Επίσης, γίνεται μια αναφορά στους τρόπους και τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την μοντελοποίηση κτηρίων με χρήση λογισμικών CAD. Το δεύτερο κεφάλαιο, αποτελεί μια έρευνα, περιγραφή και ανάλυση του λογισμικού SRC, των φαινομένων μετάδοσης θερμότητας που μοντελοποιούνται, καθώς και των αρχείων gbXML τα οποία χρησιμοποιεί το λογισμικό. Επίσης, πραγματοποιείται περιγραφή των στοιχείων και παραμέτρων εκείνων οι οποίες βελτιώθηκαν και προστέθηκαν κατά την παρούσα διπλωματική. Το τρίτο κεφάλαιο, είναι μια αναφορά και ανάλυση της μεθόδου IEA BESTEST, καθώς και όλων εκείνων των παραμέτρων που επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά ενός κτηρίου. Ακολουθεί το τέταρτο κεφάλαιο, το οποίο περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο έγινε η μοντελοποίηση και υλοποίηση της μεθόδου BESTEST στο λογισμικό EnergyPlus, καθώς και το μαθηματικό και φυσικό υπόβαθρο των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η αναφορά των αποτελεσμάτων από την αξιολόγηση και σύγκριση των λογισμικών EnergyPlus και SRC καθώς και η ερμηνεία των παραγόντων που τις επηρέασαν. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο, παραθέτονται κάποια συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω εξέλιξη της παρούσας διπλωματικής.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται εργαλεία και εργασίες που θέτουν το πλαίσιο στο οποίο κινείται η παρούσα διπλωματική εργασία. Στο πρώτο μέρος, γίνεται μια κριτική επισκόπηση των λογισμικών θερμικής προσομοίωσης που είναι διαθέσιμα καθώς και των δυνατοτήτων τους· στο δεύτερο μέρος, παρουσιάζονται οι κτηριακά πληροφοριακά μοντέλα gbXML (Green Building XML) και IFC (Industry Foundation Classes). Στο τελευταίο γίνεται σύντομη αναφορά πάνω στους τρόπους αξιολόγησης και πιστοποίησης λογισμικών θερμικής προσομοίωσης.

2.1. Θερμική προσομοίωση κτηρίων

Η θερμική προσομοίωση κτηρίων, είναι η διαδικασία κατά την οποία προσομοιώνεται με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, η θερμική συμπεριφορά ενός κτηρίου με καθορισμένη γεωμετρία και υλικά, υπό συγκεκριμένες μετεωρολογικές συνθήκες. Η θερμική προσομοίωση αποσκοπεί στην ακριβή πρόβλεψη χρονικά μεταβαλλόμενων θερμικών μεγεθών, όπως οι θερμοκρασίες σε εσωτερικούς χώρους και στην τοιχοποιία. Στη σχεδιαστική φάση, η προσομοίωση πραγματοποιείται ώστε να εκτιμηθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις κατά τη λειτουργία του κτηρίου, να γίνει η σωστή διαστασιολόγηση των συστημάτων αλλά και να εντοπιστούν προβλήματα στον ενεργειακό σχεδιασμό. Προφανώς η ευκολία που προέρχεται από την γρήγορη προτυποποίηση, επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών σχεδιαστικών λύσεων και τον προσδιορισμό της «καλύτερης» υπό το πρίσμα του κόστους υλοποίησης και το προσδοκώμενων οφελών σε θέματα ενεργειακών απαιτήσεων αλλά και θερμικής άνεσης. Κάτι εξίσου σημαντικό, το οποίο δοκιμάζεται τα τελευταία χρόνια, είναι να σχεδιασθούν και να δοκιμασθούν σε επίπεδο προσομοίωσης τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας και, σε προχωρημένες περιπτώσεις, να εφαρμοστούν τεχνικές προβλεπτικού ελέγχου βασισμένος σε αυτά τα μοντέλα.

Η υλοποίηση ενός λογισμικού θερμικής προσομοίωσης βασίζεται κάθε φορά σε συγκεκριμένα μαθηματικά μοντέλα τα οποία μπορούν να περιγράψουν τα φαινόμενα αυτά που επηρεάζουν θερμικά το κτήριο. Κάποιες προσπάθειες οι οποίες έχουν ομοιότητες με τον τρόπο μοντελοποίησης και ανάπτυξης του λογισμικού SRC είναι οι ακόλουθες:

Το 1990, σε δημοσίευση που αφορούσε τη διαχείριση ενέργειας(6), εξηγείται ότι ενεργειακή ισορροπία σε ένα κτήριο καθορίζεται από την επίδραση θερμικών φορτίων λόγω των μετεωρολογικών φαινομένων που επικρατούν όπως, η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η βροχή, ο άνεμος και η υγρασία. Έτσι, ο ισολογισμός ενέργειας είναι:

$$Q_C + Q_G + Q_F + Q_I - Q_P - Q_E - Q_S \pm \Delta Q = Q_N (J)$$

Όπου:

- Q_C Η απώλεια θερμότητας από συναγωγή με τον εξωτερικό αέρα
- Q_G Η απώλεια θερμότητας από αγωγή με το έδαφος
- Q_F Η απώλεια θερμότητας από εξαερισμό
- Q_I Η απώλεια θερμότητας από ροή αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους
- Q_P Τα κέρδη θερμότητας από τους χρήστες του κτηρίου
- Q_E Τα κέρδη θερμότητας από τον ηλεκτρικό εξοπλισμό
- Q_S Τα κέρδη θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία
- ΔQ Η αποθήκευση θερμότητας στο κτήριο
- Q_N Οι ενεργειακές απαιτήσεις κτηρίου

Στα πλαίσια δημοσίευσης που έγινε το 1995(7), προτείνεται η υλοποίηση ενός λογισμικού θερμικής προσομοίωσης που ονομάζεται CODYRUN, το οποίο βασίζεται στην ανάλυση των κόμβων. Το συγκεκριμένο μοντέλο, βασίζεται στη θερμό-ηλεκτρική αναλογία, όπου ένα κτήριο αναπαριστάται σαν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα και στο οποίο οι επιφάνειες και οι αέρινοι όγκοι των θερμικών ζωνών αποτελούν κόμβους του. Αφορά κτήρια, μιας ή περισσότερων θερμικών ζωνών στις οποίες τα θερμικά μεγέθη αλλάζουν δυναμικά. Χαρακτηριστικό του είναι το μεγάλο εύρος παραμέτρων που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο χρήστης προκειμένου να προσομοιώσει το κτήριο που επιθυμεί.

Σε δημοσίευση που έγινε το 2001(8) και πρόεκυψε από συνεργασία ερευνητικών κέντρων στη Βραζιλία, προτείνεται η δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο περιγράφει τη θερμική συμπεριφορά ενός κτηρίου και είναι βασισμένο στα εγχειρίδια της ASHRAE(9) και των επιστημονικών σημειώσεων Fundamentals of Heat Transfer(10). Η υλοποίηση του γίνεται σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB για το λόγο ότι διαθέτει πληθώρα έτοιμων μαθηματικών συναρτήσεων, σε αντίθεση με άλλες γλώσσες όπως η Fortran και η C.

Σήμερα, υπάρχει μια πληθώρα λογισμικών τα οποία μπορούν να εκτελέσουν θερμική προσομοίωση για ένα κτήριο. Το κάθε ένα έχει δυνατότητες και αδυναμίες που αφορούν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Γενικά χαρακτηριστικά μοντελοποίησης
- Θερμικά φορτία στις ζώνες
- Κέλυφος του κτηρίου
- Φυσικός και ηλιακός φωτισμός
- Ροή αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους του αέρα
- Εξαερισμός και ροή αέρα μεταξύ των ζωνών
- Συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- Ηλεκτρικός εξοπλισμός
- Συστήματα HVAC
- Τις εκπομπές στο περιβάλλον
- Οικονομική αξιολόγηση
- Δυνατότητα παροχής μετεωρολογικών δεδομένων
- Δημοσιοποίηση των αποτελεσμάτων
- Διαλειτουργικότητα
- Άδειες που διαθέτουν
- Συνεργασία με άλλα προγράμματα
- Διαθεσιμότητα

Τα πιο διαδεδομένα λογισμικά είναι ενώ η σύνοψη των δυνατοτήτων τους περιγράφεται σε αντίστοιχη δημοσίευση(2):

- BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics)
- BSim (Danish Building Research Institute)
- DeST (Designer's Simulation Toolkits)
- DOE2.1E
- ECOTECH
- EnerWin
- Energy Express
- Energy10
- EnergyPlus
- eQUEST
- ESPr
- HAP (Hourly Analysis Program)
- HEED
- IDA ICE (Indoor Climate and Energy)
- IES<VE> (<Virtual Environment>)
- PowerDomus
- SUNREL

- Tas
- TRACE (Trane Air Conditioning Economics)
- TRNSYS (Transient Systems Simulation)

2.1.1 Το λογισμικό TEE-KENAK

Το TEE-KENAK είναι ένα λογισμικό θερμικής προσομοίωσης που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα, με σκοπό την ενεργειακή επιθεώρηση και την κατάταξη κτηρίων σε μια κλίμακα ενεργειακής κατανάλωσης. Αναπτύχθηκε από την Ομάδα Εξοικονόμησης Ενέργειας, του Ινστιτούτου Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΙΕΠΒΑ) του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ) στο πλαίσιο του προγράμματος συνεργασίας με το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (ΤΕΕ), ενώ βασίζεται στο πρόγραμμα EPA-NR.

Η διαδικασία αξιολόγησης ενός κτηρίου με το λογισμικό TEE-KENAK στηρίζεται στην σύγκριση του εξεταζομένου κτηρίου με ένα κτήριο αναφοράς(11). Το λογισμικό καθορίζει τα χαρακτηριστικά του κτηρίου αναφοράς ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και την τοποθεσία του κτηρίου που αξιολογείται. Έτσι, το κτήριο αναφοράς έχει την ίδια γεωμετρία, τοποθεσία, χρήση και μετεωρολογικά δεδομένα με το κτήριο που εξετάζεται. Το κτήριο αναφοράς ουσιαστικά αντικατοπτρίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις που έχει το αξιολογούμενο κτήριο ανάλογα με τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης, τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κλπ. Τέλος, το κτήριο κατατάσσεται σε μια κλίμακα η οποία είναι η εξής: {A+,A,B+,B,Γ,Δ} όπου με A+ χαρακτηρίζονται τα κτήρια υψηλής ενεργειακής απόδοσης και με Δ τα κτήρια χαμηλής ενεργειακής απόδοσης.

2.2. Building Information Modeling – gbXML και IFC

Προκειμένου να επιτυγχάνεται διαλειτουργικότητα μεταξύ των διάφορων λογισμικών σχεδίασης και θερμικής προσομοίωσης κτηρίων, έχουν αναπτυχθεί δυο πρότυπα αρχεία τα οποία αποσκοπούν στο να περιέχουν όλη την απαραίτητη πληροφορία με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ευρέως διαχειρίσιμη. Αυτά είναι τα gbXML και IFC.

2.2.1 gbXML – green building XML

Το πρότυπο gbXML περιγράφει ένα τρόπο για την καταγραφή της πληροφορίας που αφορά πράσινα κτήρια. Σκοπός του είναι να διευκολύνει την μεταφορά της πληροφορίας που αφορά τη σχεδίαση κτηρίων με χρήση CAD σε λογισμικά θερμικής και ενεργειακής προσομοίωσης. Η πληροφορία καταγράφεται με τη χρήση της γλώσσας XML ενώ τυγχάνει αποδοχής από τις μεγαλύτερες εταιρίες που σχετίζονται με τους τομείς της σχεδίασης και προσομοίωσης κτηρίων όπως οι Autodesk, Graphisoft, και Bentley. Κατά συνέπεια, επιτρέπει τη συνεργασία μεταξύ λογισμικών σχεδίασης όπως τα Autodesk Revit, Architectural Desktop, και Graphisoft's ArchiCAD και λογισμικών θερμικής προσομοίωσης όπως τα DOE-2, E-QUEST και HAP. Οι λόγοι που χρησιμοποιείται η γλώσσα XML είναι διότι αφενός δίνει τη δυνατότητα για ευρεία χρήση της, και αφετέρου μπορεί να δομεί την πληροφορία με λειτουργικό τρόπο.

2.2.2 IFC – Industry Foundation Classes

Το IFC είναι ένα μοντέλο δεδομένων του οποίου σκοπός είναι η περιγραφή κτηρίων με τη χρήση ενός μόνο αρχείου, έτσι ώστε να μην είναι αναγκαία η δυνατότητα από τα διάφορα λογισμικά, να υποστηρίζουν πολλαπλούς τύπους αρχείων. Χαρακτηριστικό των αρχείων IFC είναι η ικανοποίηση των “απαιτήσεων ανταλλαγής”. Δηλαδή, τα αρχεία IFC αποσκοπούν στη προσπάθεια να εμπεριέχουν όλη την απαραίτητη πληροφορία για την ομαλή μετάβαση από τη μια φάση στην άλλη, κατά την ανάπτυξη ενός κτηρίου, έτσι ώστε να μην προκαλείται σύγχυση και αβεβαιότητα.

2.3. Διαδικασία αξιολόγησης λογισμικών θερμικής προσομοίωσης

Η αξιολόγηση ενός λογισμικού θερμικής προσομοίωσης μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους(4),(5):

1. Πειραματική αξιολόγηση,
2. Αναλυτική επαλήθευση,
3. Σύγκριση λογισμικών θερμικής προσομοίωσης.

Κατά την πειραματική αξιολόγηση, γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που παράγει ένα λογισμικό θερμικής προσομοίωσης, και μετρήσεων που έχουν γίνει είτε σε ένα πραγματικό κτήριο, είτε σε περιβάλλον εργαστηρίου. Τα πλεονεκτήματα της εμπειρικής αξιολόγησης είναι:

- Δυνατότητα αξιολόγησης για κτήρια με μεγάλη πολυπλοκότητα,
- Τα αποτελέσματα που συγκρίνονται, προσεγγίζουν την πραγματικότητα

ενώ τα μειονεκτήματά της είναι:

- Αποκλείσεις οργάνων μέτρησης
- Υψηλό κόστος οργάνων μέτρησης
- Δυνατότητα αξιολόγησης κτηρίων υπό περιορισμένες συνθήκες
- Έλλειψη πληροφοριών που αφορούν το κτήριο που προσομοιώνεται
- Δυσκολία στον ταύτιση των οριακών συνθηκών (μείωση των αβεβαιοτήτων) μεταξύ του λογισμικού και της πραγματικότητας.

Κατά την αναλυτική επαλήθευση, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που παράγει ένα λογισμικό θερμικής προσομοίωσης και των αποτελεσμάτων τα οποία προκύπτουν με την λύση μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες περιγράφουν τη μετάδοση θερμότητας σε ένα κτήριο, υπό πολύ άπλες και περιορισμένες αρχικές συνθήκες. Τα πλεονεκτήματα της αναλυτικής επαλήθευσης είναι:

- Μέθοδος μικρού κόστους
- Ακριβή αποτελέσματα με βάση τη μαθηματική λύση
- Ανυπαρξία αβεβαιότητας για τα δεδομένα εισόδου

και τα μειονεκτήματά της είναι:

- Μικρό εύρος κτηρίων που μπορούν να προσεγγιστούν
- Έλλειψη πραγματικής δοκιμής για το κτήριο που αξιολογείται

Κατά τη σύγκριση λογισμικών θερμικής προσομοίωσης, γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που παράγει ένα λογισμικό θερμικής προσομοίωσης και των αποτελεσμάτων που έχουν παραχθεί από άλλα λογισμικά τα οποία θεωρούνται αξιόπιστα και ευρέως διαδεδομένα. Τα πλεονεκτήματα της σύγκρισης λογισμικών είναι:

- Ανυπαρξία αβεβαιότητας για τα δεδομένα εισόδου
- Δυνατότητα σύγκρισης για κτήρια με μεγάλη πολυπλοκότητα
- Δυνατότητα σύγκρισης σε μεγάλο εύρος κτηρίων
- Μέθοδος μικρού κόστους και μεγάλης ταχύτητας

Ενώ τα μειονεκτήματά της σύγκρισης λογισμικών είναι:

- Δεν υπάρχει αξιολόγηση με βάση πραγματικά δεδομένα

2.3.1 Η μέθοδος BESTEST

Η μέθοδος BESTEST(4) αποτελεί έναν τρόπο αξιολόγησης λογισμικών θερμικής προσομοίωσης με βάση τη σύγκριση αναμεταξύ τους. Υπάρχουν διαφορές εκδόσεις της μεθόδου οι οποίες μπορούν να προσεγγιστούν εύκολα από τα περισσότερα λογισμικά που υπάρχουν. Η ανάπτυξη της μεθόδου έγινε έτσι ώστε αφενός να μπορεί να γίνεται μια καταγραφή των δυνατοτήτων του εκάστοτε λογισμικού, και αφετέρου για να τον εντοπισμό των παραμέτρων εκείνων οι οποίες προκαλούν λανθασμένα αποτελέσματα και ασυμφωνίες. Οι εκδόσεις της μεθόδου που υπάρχουν είναι οι εξής:

- IEA BESTEST: Η έκδοση IEA BESTEST είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη για την αξιολόγηση λογισμικών θερμικής προσομοίωσης. Σκοπός της είναι η αφενός να δοκιμάσει τις δυνατότητες ενός λογισμικού πάνω σε κάποιες γενικές περιπτώσεις κτηρίων και να αποτελέσει ένα εργαλείο για τον εντοπισμό των παραμέτρων ή αλγορίθμων που οφείλονται τα εσφαλμένα αποτελέσματα προσομοιώσεων.
- HERS BESTEST: Η έκδοση HERS BESTEST σχεδιάστηκε έτσι ώστε να αξιολογεί τη δυνατότητα των λογισμικών να επιτυγχάνουν θερμική προσομοίωση κατοικιών.
- HERS FLORIDA BESTEST: Η έκδοση HERS FLORIDA BESTEST είναι πανομοιότυπη με την έκδοση HERS BESTEST με τη διάφορα ότι αφορά κατοικίες που βρίσκονται σε περιοχές με θερμό κλίμα
- HVAC BESTEST: Η έκδοση HVAC BESTEST αποσκοπεί στην διερεύνηση της δυνατότητας των λογισμικών θερμικής προσομοίωσης να μοντελοποιούν τα διάφορα συστήματα HVAC.

2.3.2 Διαφορές IEA BESTEST και HERS BESTEST

Στους πίνακες που ακολουθούν, συνοψίζονται οι διαφορές που εντοπίζονται ανάμεσα στην έκδοση IEA BESTEST και HERS BESTEST αφού αποτελούν τις δυο εκδόσεις που κατά τις οποίες μπορεί να γίνει η βασική αξιολόγηση λογισμικών και της μοντελοποίησης των μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας. Οι διαφορές εντοπίζονται στις παραμέτρους που μοντελοποιούνται σε κάθε περίπτωση(12), ενώ αποτέλεσαν το κριτήριο για την επιλογή της έκδοσης που χρησιμοποιήθηκε κατά την παρούσα διπλωματική.

Πίνακας 2-1: Διαφορές βασικών παραμέτρων

TEST	HERS	IEA
Θερμική αντίσταση οροφής & τοίχων	Ναι	Όχι
Ροή αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους (infiltration)	Ναι	Ναι
Εσωτερικά κέρδη	Ναι	Ναι
Ενεργοβόρο κτήριο	Ναι	Όχι

Πίνακας 2-2: Παράθυρα

TEST	HERS	IEA
Ύπαρξη παραθύρων	Ναι	Ναι
Προσανατολισμός παραθύρων	Ναι	Ναι
Επιφάνεια σκίασης νότιου τοίχου	Ναι	Ναι
Επιφάνεια σκίασης δυτικού και ανατολικού τοίχου	Ναι	Ναι
Διαπερατότητα παραθύρου	Όχι	Ναι
Window combined thermal optic	Ναι	Όχι
Μετάδοση θερμότητας με αγωγή στο παράθυρο	Ναι	Ναι

Πίνακας 2-3: Θερμική μάζα

TEST	HERS	IEA
Υλικά χαμηλής θερμικής αντίστασης	Ναι	Ναι
Υλικά υψηλής θερμικής αντίστασης	Ναι	Ναι
Αλληλεπίδραση θερμικής μάζας και ηλιακής ακτινοβολίας	Ναι	Ναι
Έλλειψη Αλληλεπίδρασης θερμικής μάζας και ηλιακής ακτινοβολίας	Όχι	Ναι
Αλληλεπίδραση νότιας επιφάνειας σκίασης και ηλιακής ακτινοβολίας	Όχι	Ναι
Αλληλεπίδραση Διαπερατότητας παραθύρων και ηλιακής ακτινοβολίας	Όχι	Ναι
Αλληλεπίδραση Σκίασης παραθύρων και ηλιακής ακτινοβολίας	Όχι	Ναι
Μετάδοση θερμότητας μεταξύ θερμικών ζωνών	Όχι	Ναι

Πίνακας 2-4: Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία

TEST	HERS	IEA
Απορρόφηση ακτινοβολίας μικρού μήκους από εξωτερική πλευρά επιφανειών	Ναι	Ναι
Απορρόφηση ακτινοβολίας μικρού μήκους από εσωτερική πλευρά επιφανειών	Όχι	Ναι
Εκπομπή ακτινοβολίας από εξωτερική πλευρά επιφανειών	Όχι	Ναι
Εκπομπή ακτινοβολίας από εσωτερική πλευρά επιφανειών	Όχι	Ναι
Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή	Όχι	Ναι

Πίνακας 2-5 - Μηχανολογικός εξοπλισμός

TEST	HERS	IEA
Θερμοστάτης τύπου Setback	Όχι	Ναι
Θερμοστάτης τύπου Setback	Όχι	Ναι
Εξαερισμός	Όχι	Ναι

Ο λόγος για τον οποίο επιλέχτηκε η μέθοδος IEA BESTEST είναι διότι οι παράμετροι μοντελοποίησης της είναι συγκριτικά περισσότερες και κατά συνέπεια παρέχει τη δυνατότητα για αξιολόγηση μεγαλύτερου αριθμού μοντέλων που αφορούν την θερμική συμπεριφορά των κτηρίων. Επίσης, το γεγονός ότι η μέθοδος HERS BESTEST στοχεύει στην αξιολόγηση των παραμέτρων που αφορούν κτήρια τύπου κατοικίας, έρχεται σε αντίθεση με τον σκοπό για τον οποίο έχει αναπτυχθεί το SRC το οποίο δεν περιορίζεται σε κάποιους συγκεκριμένου κτηριακούς τύπους.

3. Το λογισμικό θερμικής προσομοίωσης SRC και το πρότυπο gbXML

Το SRC (System Resistance Capacitor) είναι ένα λογισμικό θερμικής προσομοίωσης το οποίο αναπτύσσεται από το Μάιο του 2011, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ευρωπαϊκής χρηματοδότησης PEBBLE (Positive Energy Buildings Through Better Control Decisions) στο πολυτεχνείο Κρήτης. Έχει υλοποιηθεί κυρίως σε γλώσσα MATLAB ενώ χρησιμοποιεί αρχεία εισόδου gbXML (green building XML) για να εξάγει τις πληροφορίες που αφορούν τη γεωμετρία και τις θερμικές ιδιότητες των υλικών.

Αποτελεί μια προσπάθεια για τη υλοποίηση ενός λογισμικού το οποίο είναι ευέλικτο και βασίζεται στη διεύρυνση της διαλειτουργικότητας. Επίσης, σκοπός του είναι η δημιουργία ενός λογισμικού που από τη μια ο κώδικας του είναι ανοιχτός, άμεσα προσβάσιμος και επεξεργάσιμος έτσι ώστε όχι μόνο να μπορεί να βελτιώνεται συνεχώς αλλά να αποτελέσει ένα εργαλείο για την εφαρμογή βέλτιστων στρατηγικών ελέγχου σε κτήρια και δυναμικής διαχείρισης των συστημάτων του. Ταυτόχρονα, ο ανοιχτός κώδικας, επιτρέπει τη δοκιμή διαφορετικών μοντέλων τα οποία περιγράφουν ένα μηχανισμό ή μια παράμετρο που επηρεάζει τη θερμική συμπεριφορά του κτηρίου. Βρίσκεται στο στάδιο, του ελέγχου των αποτελεσμάτων που παράγει και στον εντοπισμό των παραμέτρων εκείνων που επηρεάζουν την εγκυρότητα τους. Το κύριο μέτρο σύγκρισης του SRC είναι το EnergyPlus για το λόγο ότι θεωρείται ένα από τα πιο αξιόπιστα λογισμικά θερμικής προσομοίωσης που υπάρχουν.

Για την ομαλή περιγραφή του λογισμικού SRC απαιτείται η επεξήγηση των βασικών αρχών μετάδοσης θερμότητας. Γι' αυτό το λόγο ακολουθεί μια σύντομη εισαγωγή στους μηχανισμούς αυτούς που περιγράφουν το φαινόμενο ενώ η ανάλυση γίνεται με έμφαση στη μετάδοση θερμότητας που παρατηρείται σε ένα κτήριο.

3.1. Η έννοια της θερμικής αντίστασης

3.1.1 Θερμική αντίσταση αγωγής

Στη θεωρία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, η ηλεκτρική αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ενός υλικού. Αντίστοιχα, όταν υπάρχει μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας σε ένα τοίχο, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας είναι αντιστρόφως ανάλογος της θερμικής αντίστασης που παρουσιάζει το υλικό. Η αναγωγή ενός προβλήματος θερμικής φύσης σε αντίστοιχη ηλεκτρική, ονομάζεται θερμό-ηλεκτρική αναλογία. Έτσι:

$$R_{cond} = \frac{T_1 - T_2}{Q} = \frac{L}{k * A}$$

Όπου:

R_{cond} Η θερμική αντίσταση μιας επιφάνειας ($\frac{m^2K}{W}$)

Και

$$Q = \frac{\Delta T}{R}$$

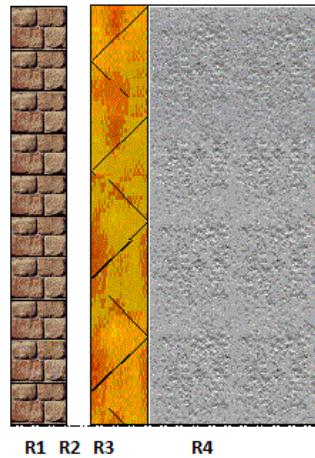
3.1.2 Θερμική αντίσταση συναγωγής

Όταν υπάρχει μετάδοση θερμότητας με συναγωγή ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας είναι ανάλογος του συντελεστή συναγωγής h . Έτσι, με βάση τη θερμό-ηλεκτρική αναλογία ορίζουμε ως θερμική αντίσταση συναγωγής μεταξύ μιας επιφάνειας με εμβαδόν A και ενός ρευστού το παρακάτω μέγεθος:

$$R_{conv} = \frac{T_s - T_{inf}}{Q} = \frac{1}{A * h}$$

Και

$$Q = \frac{T_S - T_{inf}}{R_{conv}}$$



Σχήμα 3-1: Θερμικές αντιστάσεις σε τοίχο [21]

3.1.3 Συνολική θερμική αντίσταση τοίχου

Οι τοίχοι ενός κτηρίου αποτελούνται τις περισσότερες φορές από πολλαπλές στρώσεις υλικών με διαφορετικές θερμικές ιδιότητες και κατά συνέπεια διαφορετική θερμική αγωγιμότητα.

Θεωρώντας αντίστοιχα όταν υπάρχουν ηλεκτρικές αντιστάσεις σε σειρά η παράλληλα, ότι μπορούμε να εξάγουμε μια συνολική ηλεκτρική αντίσταση με βάση το νόμο του Kirchhoff, αντίστοιχα εξάγουμε μια ενιαία θερμική αντίσταση για ένα τοίχο με πολλαπλά υλικά τα οποία είναι τοποθετημένα παράλληλα η σε σειρά η οποία υπολογίζεται ως εξής:

Για σύνδεση αντιστάσεων εν σειρά:

$$R_{cond} = \sum_{i=1}^n R_i$$

Για παράλληλη σύνδεση αντιστάσεων:

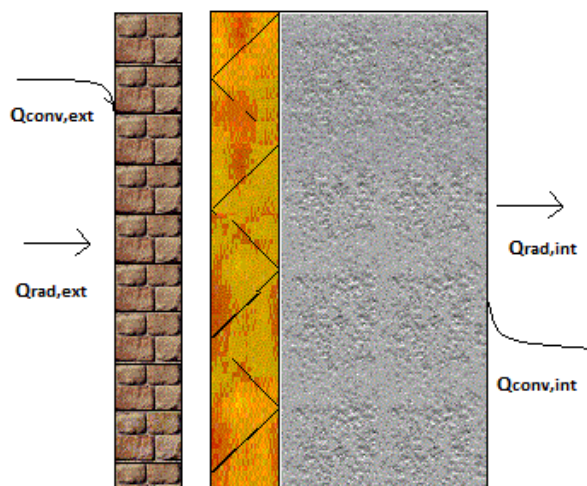
$$\frac{1}{R_{cond}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

Όπου:

R_i Η θερμική αντίσταση του αντιστοίχου υλικού i ($\frac{m^2K}{W}$)

3.1.4 Συνολική θερμική αντίσταση από το εξωτερικό περιβάλλον στο εσωτερικό κτηρίου

Η μετάδοση θερμότητας μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και του αέρα μιας θερμικής ζώνης που



Σχήμα 3-2: Μετάδοση θερμότητας σε τοίχο [21]

χωρίζονται από τοιχοποιία, μπορεί μοντελοποιηθεί με την χρήση θερμικών αντιστάσεων. Πιο συγκεκριμένα, από το εξωτερικό περιβάλλον στην εξωτερική πλευρά του τοίχου, η μετάδοση θερμότητας εξαρτάται από την εξωτερική θερμική αντίσταση συναγωγής. Η μετάδοση θερμότητας μεταξύ της εξωτερικής και της εσωτερικής πλευράς ενός τοίχου εξαρτάται από την συνολική θερμική αντίσταση των υλικών και η μετάδοση θερμότητας μεταξύ του αέρινου όγκου και του τοίχου εξαρτάται από την εσωτερική θερμική αντίσταση συναγωγής

Έτσι, η συνολικός ρυθμός μετάδοσης θερμότητας περιγράφεται ως εξής:

$$Q = \frac{T_{env,ext} - T_{int}}{R_{total}}$$

Όπου

$$R_{total} = R_{conv,ext} + R_{cond} + R_{conv,int}$$

3.2. Αρχεία gbXML

Τα περισσότερα προγράμματα αρχιτεκτονικής σχεδίασης δίνουν τη δυνατότητα στο χρηστή να εξάγει το αρχιτεκτονικό σχέδιο μαζί με τις πληροφορίες που αφορούν τις θερμικές ιδιότητες των υλικών από τα οποία είναι φτιαγμένοι οι τοίχοι ενός κτηρίου. Το είδος αρχείου που εμπεριέχει αυτές τις πληροφορίες ονομάζεται gbXML (green building XML). Ουσιαστικά, γίνεται χρήση της γλώσσας XML προκειμένου να περιγράψει με όσο το δυνατόν περισσότερη λεπτομέρεια ένα πράσινο κτήριο.

Το λογισμικό δέχεται ως είσοδο, αρχεία gbXML προκειμένου να ορίσει ένα θερμό-ηλεκτρικό δίκτυο κόμβων, να αντλήσει τις πληροφορίες που αφορούν τις θερμικές ιδιότητες των υλικών καθώς και να ορίσει την γεωμετρία των θερμικών ζωνών. Η ανάλυση των στοιχείων του gbXML που ακολουθεί, περιορίζεται σε αυτά τα οποία χρησιμοποιούνται από το λογισμικό καθώς και στο σύνολο της πληροφορίας που εξάγεται από το λογισμικό σχεδίασης Autodesk Revit 2013 για τη δημιουργία των αρχείων στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.

Το χαρακτηριστικό της γλώσσας προγραμματισμού XML που αξιοποιείται για την περιγραφή ενός πράσινου κτηρίου, είναι ο τρόπος δόμησης της πληροφορίας. Δηλαδή, ο τρόπος περιγραφής των αντικειμένων και η ιδιότητα τους να αποτελούνται από άλλα αντικείμενα μικρότερης τάξης που ονομάζονται child nodes ενώ τα ίδια αποτελούν ταυτόχρονα child nodes διαφορετικών αντικειμένων μεγαλύτερης τάξης. Πρέπει να τονισθεί ότι child nodes ονομάζονται στοιχεία που είναι ακριβώς μια τάξη μικρότερα από τα στοιχεία τα οποία ανήκουν. Η έννοια της τάξης εντοπίζεται στον τρόπο που είναι αλληλοκαθορισμένα τα αντικείμενα μέσα σε ένα αρχείο gbXML. Παράλληλα, τα στοιχεία ίδιας τάξης ονομάζονται sibling nodes.

Για παράδειγμα:

```
<Azimuth>180.000000</Azimuth>
<CartesianPoint>
  <Coordinate>-9.086924</Coordinate>
  <Coordinate>0.664736</Coordinate>
  <Coordinate>0.000000</Coordinate>
</CartesianPoint>
```

Τα στοιχεία Azimuth και CartesianPoint είναι ίδιας τάξης και έχουν την μεταξύ τους ιδιότητα να είναι sibling nodes.

Τα στοιχεία Coordinate αποτελούν child nodes του στοιχείου CartesianPoint και είναι μιας τάξης μικρότερα από αυτό. Επίσης, εμπεριέχεται η πληροφορία ότι ένα καρτεσιανό σημείο δομείται από τρεις συγκεκριμένες συντεταγμένες στον τρισδιάστατο χώρο.

Επίσης, αξιοποιείται το γεγονός ότι το κάθε στοιχείο εμπεριέχει πληροφορίες οι οποίες ονομάζονται attributes, χωρίς να εξαρτάται από άλλα στοιχεία μικρότερης τάξης. Για παράδειγμα

```
<Surface id="su-3" surfaceType="ExteriorWall" constructionIdRef="cons-1">
```

Το στοιχείο surface έχει τις πληροφορίες (attributes) id, surfaceType και constructionIdRef.

3.2.1 Προσδιορισμός του κελύφους ενός κτηρίου σε αρχεία gbXML

Η έννοια του κελύφους ενός κτηρίου έχει να κάνει με το σύνολο των δομικών επιφανειών, όπως εσωτερικοί εξωτερικοί τοίχοι, πατώματα και οροφές που αποτελούν το κτήριο και γίνεται με την συνολική καταγραφή όλων αυτών των επιφανειών. Οι επιφάνειες που αποτελούν το κτήριο, δομούνται ως δισδιάστατες επιφάνειες προσδιορισμένες στον τρισδιάστατο χώρο. Η δισδιάστατη επιφάνεια που αντιπροσωπεύει την τρισδιάστατη σε ένα λογισμικό CAD, είναι η ενδιάμεση νοητή επιφάνεια που υπάρχει μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής πλευράς. Επίσης, στα αρχεία gbXML, δεν ορίζονται καμπύλες επιφάνειες. Για αναπαράσταση τους, πραγματοποιείται ο κατακερματισμός τους σε πολλές επίπεδες, οι οποίες συνθέτουν την καμπύλη επιφάνεια.

Ο προσδιορισμός τους στο χώρο γίνεται με καρτεσιανά σημεία τα οποία αντιπροσωπεύουν τις κορυφές μιας επιφάνειας. Το σύστημα προσδιορισμού των συντεταγμένων είναι το παγκόσμιο (global), δηλαδή, όλες οι συντεταγμένες των καρτεσιανών σημείων προσδιορίζονται με βάση ένα αρχικό σημείο (0,0,0). Επίσης, βλέποντας εξωτερικά ένα κτήριο, έχει γίνει η υπόθεση ότι η θετική φορά του άξονα z θεωρείται η προς τα πάνω, θετική φορά του άξονα x θεωρείται η ανατολή και θετική φορά του άξονα y θεωρείται ο βορράς. Η καταγραφή των καρτεσιανών σημείων γίνεται με τέτοια σειρά ώστε να ακολουθείται η αντίθετη φορά του ρολογιού, κοιτώντας την εξωτερική πλευρά της επιφάνειας. Οι επιφάνειες σε αρχεία gbXML μοντελοποιούνται με τα παρακάτω αντικείμενα:

Name: Το συγκεκριμένο αντικείμενο εμπεριέχει σε κωδικοποιημένη μορφή πληροφορίες που αφορούν την επιφάνεια που ανήκει. Χρησιμοποιεί συντομογραφία λέξεων προκειμένου να κάνει τον αντίστοιχο προσδιορισμό. Οι πληροφορίες αυτές αφορούν τα εξής:

- Προσανατολισμός: Προσδιορίζει την κατεύθυνση της επιφάνειας, αν δηλαδή η εξωτερική της πλευράς κοιτά βόρεια, νότια κλπ. Οι δυνατές επιλογές είναι {N/NE/E/SE/S/SW/W/NW/N/T/B/X}. Το γράμμα T (Top) δείχνει επιφάνεια που κοιτάζει προς τα πάνω, το γράμμα B (Bottom), ενώ το γράμμα X δείχνει επιφάνεια σκίασης.
- Θερμικές ζώνες που ανήκει: Προσδιορίζει τις θερμικές ζώνες στις οποίες ανήκει η επιφάνεια, αναγράφοντας τον αντίστοιχο αύξοντα αριθμό.
- Έκθεση: Προσδιορίζει εάν η επιφάνεια είναι εξωτερική, εσωτερική ή υπόγεια. Οι δυνατές επιλογές είναι {E/I/U}. Το γράμμα E (Exterior) δείχνει εξωτερική επιφάνεια, το γράμμα I (Interior) δείχνει εσωτερική επιφάνεια και το γράμμα U (Underground) δείχνει υπόγεια επιφάνεια.
- Τύπος: Προσδιορίζει τον τύπο της επιφάνειας. Δηλαδή, αν είναι τοίχος, οροφή κλπ. Οι δυνατές επιλογές είναι {W/C/R/F/S}. Το γράμμα W (Wall) σημαίνει ότι η επιφάνεια είναι τοίχος, το γράμμα C (Ceiling) σημαίνει ότι είναι πάτωμα, το γράμμα R (Roof) σημαίνει ότι είναι οροφή, το γράμμα F (Floor) σημαίνει ότι είναι πάτωμα και το γράμμα S (Shade) σημαίνει ότι είναι επιφάνεια σκίασης.
- Τύπος ανοίγματος: Εάν πρόκειται για επιφάνεια που είναι άνοιγμα, προσδιορίζει τον τύπο της. Δηλαδή, παράθυρο, πόρτα κλπ. Οι δυνατές επιλογές είναι {W/D/O}. Το γράμμα W (Window) σημαίνει παράθυρο, το γράμμα D (Door) σημαίνει πόρτα και το γράμμα O (Opening) σημαίνει άλλο είδος ανοίγματος.
- Αύξοντες αριθμός: Είναι ο αύξων αριθμός της επιφάνειας

Παράδειγμα:N-101-102-E-W-84

RectangularGeometry: Το αντικείμενο αυτό χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό πληροφοριών που αφορούν τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας της επιφάνειας. Έχει σαν child nodes τα παρακάτω στοιχεία:

AdjacentSpaceId: Πρόκειται για το αντικείμενο στο οποίο προσδιορίζονται οι θερμικές ζώνες στις οποίες ανήκει η επιφάνεια.

Azimuth: Το αζιμούθιο μιας επιφάνειας είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του αληθινού βορά και της προβολής του κάθετου διανύσματος της εξωτερικής πλευράς κάθε επιφάνειας, στο επίπεδο x-y.

Tilt: Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της εξωτερικής πλευράς της επίπεδης επιφάνειας και του επιπέδου x-y.

Height: Είναι το ύψος που έχει μια επιφάνεια

Width: Είναι το πλάτος που έχει μια επιφάνεια.

PlanarGeometry Πρόκειται για το αντικείμενο το οποίο εμπεριέχει τα καρτεσιανά σημεία τα οποία περιγράφουν μια επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο με βάση τους κανόνες που έχουν αναφερθεί.

Opening: Είναι τα ανοίγματα τα οποία υπάρχουν σε μια επιφάνεια όπως παράθυρα, πόρτες κλπ. Προσδιορίζονται με τα ίδια στοιχεία που προσδιορίζονται και οι επιφάνειες με τη διάφορα ότι αποτελούν child nodes των επιφανειών και όχι sibling nodes.

Surface Attributes

surfaceType: Πρόκειται για το πεδίο στο καθορίζεται το είδος της επιφάνειας. Δηλαδή, αν πρόκειται για εσωτερικό ή εξωτερικό τοίχο, πάτωμα κλπ.

ConstructionIdRef: Με βάση το συγκεκριμένο πεδίο, προσδιορίζεται το είδος της κατασκευής μιας επιφάνειας.

3.2.1.1 Παράδειγμα επιφάνειας σε αρχείο gbXML:

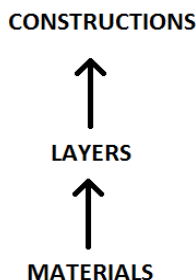
```
<Surface id="su-1" surfaceType="ExteriorWall" constructionIdRef="cons-1">
  <Name>N-1-E-W-1</Name>
  <AdjacentSpaceId spaceIdRef="sp-1-Room"></AdjacentSpaceId>
  <RectangularGeometry>
    <Azimuth>0.000000</Azimuth>
    <CartesianPoint>
      <Coordinate>-0.999924</Coordinate>
      <Coordinate>6.751736</Coordinate>
      <Coordinate>0.000000</Coordinate>
    </CartesianPoint>
    <Tilt>90.000000</Tilt>
    <Height>2.840800</Height>
    <Width>8.087000</Width>
  </RectangularGeometry>
  <PlanarGeometry>
    <PolyLoop>
      <CartesianPoint>
        <Coordinate>-9.086924</Coordinate>
        <Coordinate>6.751736</Coordinate>
        <Coordinate>0.000000</Coordinate>
      </CartesianPoint>
      <CartesianPoint>
        <Coordinate>-9.086924</Coordinate>
        <Coordinate>6.751736</Coordinate>
        <Coordinate>2.840800</Coordinate>
      </CartesianPoint>
      <CartesianPoint>
        <Coordinate>-0.999924</Coordinate>
        <Coordinate>6.751736</Coordinate>
        <Coordinate>2.840800</Coordinate>
      </CartesianPoint>
      <CartesianPoint>
        <Coordinate>-0.999924</Coordinate>
        <Coordinate>6.751736</Coordinate>
        <Coordinate>0.000000</Coordinate>
      </CartesianPoint>
    </PolyLoop>
  </PlanarGeometry>
  <CADObjectId>Basic Wall: Generic - 200mm [608863]</CADObjectId>
</Surface>
```

3.2.2 Προσδιορισμός των θερμικών ζωνών ενός κτηρίου

Το δεύτερο είδος πληροφορίας που εμπεριέχεται σε ένα αρχείο gbXML και αξιοποιείται από το λογισμικό SRC, είναι αυτό που αφορά των γεωμετρικό προσδιορισμό των θερμικών ζωνών. Η περιγραφή των θερμικών ζωνών γίνεται με την καταγραφή του συνόλου των επιφανειών που τις συνθέτουν. Αντίστοιχα με τον προσδιορισμό του κελύφους, οι επιφάνειες είναι δυο διαστάσεων, ενώ η περιγραφή υπακούει στους ίδιους κανόνες και γίνεται με το σύνολο των καρτεσιανών σημείων που προσδιορίζουν τις κορυφές τους.

3.2.3 Προσδιορισμός των θερμικών ιδιοτήτων των επιφανειών στο gbXML

Κάθε επιφάνεια ενός κτηρίου έχει συγκεκριμένες θερμικές ιδιότητες. Η πληροφορία που αφορά τις ιδιότητες αυτές πρέπει να είναι δομημένη με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι άμεσα και εύκολα αξιοποιήσιμη από ένα



Σχήμα 3-3: Δομή πληροφορίας κατασκευαστικών χαρακτηριστικών επιφάνειας

λογισμικό θερμικής προσομοίωσης προκειμένου να μπορεί να διεκπεραιώσει σωστούς υπολογισμούς.

Η λογική της σύνθεσης της πληροφορίας είναι η εξής. Σε ένα αρχείο υπάρχουν αντικείμενα material που αφορούν τα μεμονωμένα υλικά του κτηρίου. Από τα material δομούνται συνθέσεις υλικών, layers, οι οποίες χρησιμοποιούνται από τα αντικείμενα construction για να περιγράψουν τον τρόπο που είναι κατασκευασμένο ένα είδος επιφάνειας. Η διαδικασία περιγράφεται από το παρακάτω σχήμα:

3.2.3.1 Material

Το πεδίο material εμπεριέχει τις θερμικές ιδιότητες των υλικών που υπάρχουν σε ένα κτήριο. Τα material χρησιμοποιούνται από το πεδίο layer για τη σύνθεση διάφορων υλικών με συγκεκριμένη σειρά. Οι θερμικές ιδιότητες καθορίζονται από το λογισμικό σχεδίασης στο οποίο δημιουργείται γραφικά το κτήριο. Οι πληροφορίες που εμπεριέχει είναι οι εξής:

- Name: Είναι το όνομα του υλικού προσδιορισμένο στο λογισμικό σχεδίασης του κτηρίου
- R – value: Είναι η θερμική αντίσταση του υλικού
- Thickness: Είναι το πάχος του υλικού
- Conductivity: Είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού
- Density: Είναι η πυκνότητα του υλικού
- Specific heat: Είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού

Material Attributes

Id: Πρόκειται για την ονομασία η οποία είναι μοναδική για κάθε υλικό (material). Χρησιμοποιείται στο πεδίο layer για να προσδιοριστεί η χρήση του σε μια σύνθεση υλικών.

Είναι ενδιαφέρον να τονισθεί ότι εάν ένα υλικό υπάρχει σε διάφορες επιφάνειες με διαφορετικό πάχος, τότε θα υπάρχει αντίστοιχα μέσα στο αρχείο gbXML τόσες φορές όσες είναι και ο αριθμός που εναλλάσσεται το πάχος του σε κάθε επιφάνεια.

Παράδειγμα Material:

```
<Material id="mat-lay-cons-1-1">
  <Name>B Wd Sdng: 9 [mm]</Name>
  <R-value unit="SquareMeterKPerW">0.064286</R-value>
  <Thickness unit="Meters">0.009000</Thickness>
  <Conductivity unit="WPerMeterK">0.140000</Conductivity>
  <Density unit="KgPerCubicM">530.000000</Density>
  <SpecificHeat unit="JPerKgK">900.000000</SpecificHeat>
</Material>
```

3.2.3.2 Layer

Το πεδίο layer περιγράφει ουσιαστικά, τοποθέτηση υλικών (material) με συγκεκριμένη σειρά. Η σειρά καταγραφής των ονομάτων των υλικών, γίνεται από την πλευρά που θεωρείται εξωτερική προς την πλευρά που θεωρείται εσωτερική. Χρησιμοποιείται σαν ένας κατάλογος από υλικά, με βάση τον οποίο

προσδιορίζεται η κατασκευή μιας επιφάνειας στη συνέχεια.

Layer Attributes

Id: Πρόκειται για την μοναδική ονομασία η για κάθε σύνθεση υλικών (layer). Η ονομασία αυτή, χρησιμοποιείται στο κάθε πεδίο construction, για να προσδιοριστεί η σύνθεση των υλικών από την οποία αποτελείται.

Παράδειγμα Layer

```
<Layer id="lay-cons-2">
  <MaterialId materialIdRef="mat-lay-cons-2-1"></MaterialId>
  <MaterialId materialIdRef="mat-lay-cons-2-2"></MaterialId>
</Layer>
```

3.2.3.3 Construction

Κάθε επιφάνεια χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο είδος κατασκευής. Οι πληροφορίες της κατασκευής μιας επιφάνειας αφορούν την τραχύτητα της, τη σύνθεση των υλικών (layer) από την οποία αποτελείται, την συνοπτικά ικανότητα απορρόφησης ακτινοβολίας μικρού μήκους και ένα όνομα το οποίο περιγράφει με κωδικοποιημένη χαρακτηριστικά της. Το πεδίο Construction αφορά τις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν μια ολόκληρη επιφάνεια και όχι επιμέρους στρώσεις υλικών. Ο αριθμός των αντικειμένων construction σε ένα αρχείο gbXML ισούται με τα είδη των επιφανειών που υπάρχουν σε ένα κτήριο. Για παράδειγμα, αν σε ένα κτήριο, οι τοίχοι είναι φτιαγμένοι από μπετόν και σοβά, και οι οροφές και τα πατώματα από μέταλλο και ξύλο, τότε ο αριθμός των construction μέσα στο αρχείο θα είναι δυο. Η κατασκευή κάθε επιφάνειας προσδιορίζεται με βάση το construction που τη χαρακτηρίζει και αποτελεί ιδιότητα της.

Το πεδίο Construction αποτελείται από τα παρακάτω αντικείμενα:

- Name: Είναι το όνομα το οποίο περιγράφει συνοπτικά την κατασκευή
- U-value: Είναι η συνολική θερμική αντίσταση της κατασκευής υψωμένη στην δύναμη -1
- Absorptance: Είναι ο συντελεστής απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας της εξωτερικής επιφάνειας
- Roughness: Είναι η τραχύτητα της εξωτερικής επιφάνειας
- LayerId: Προσδιορίζει την σύνθεση των υλικών (layer) από την οποία αποτελείται μια κατασκευή

Constructions Attributes

Id: Πρόκειται για την κωδικοποιημένη ονομασία η οποία είναι μοναδική για κάθε κατασκευή (construction). Η ονομασία αυτή χρησιμοποιείται από τις διάφορες επιφάνειες, προκειμένου να προσδιοριστεί η κατασκευή τους.

Παράδειγμα Construction:

```
<Construction id="cons-1">
  <Name>Basic Wall: Generic – 200mm</Name>
  <U-value unit="WPerSquareMeterK">0.558882</U-value>
  <Absorptance unit="Fraction" type="ExtIR">0.000000</Absorptance>
  <Roughness value="Rough"></Roughness>
  <LayerId layerIdRef="lay-cons-1"></LayerId>
</Construction>
```

3.3. Μοντελοποίηση στο SRC

Σε κάθε λογισμικό θερμικής προσομοίωσης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός μοντέλου με βάση το οποίο αναπαριστάται ένα κτήριο καθώς και όλα τα φαινόμενα που επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά του.

Η σύνθεση του θερμικού μοντέλου στο λογισμικό SRC βασίζεται στη θερμό-ηλεκτρική αναλογία σύμφωνα με την οποία, το κτήριο αναπαριστάται σαν ένα δίκτυο κόμβων, πυκνωτών, αντιστάσεων και πηγών ενέργειας. Επίσης, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δυο θερμικών στοιχείων, που έχει σαν αποτέλεσμα την μετάδοση θερμότητας μεταξύ τους, έχει μοντελοποιηθεί σαν τη διαφορά τάσης σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την κίνηση των ηλεκτρονίων. Πιο συγκεκριμένα:

Οι εξωτερικές και εσωτερικές πλευρές των επιφανειών που ανήκουν σε ένα κτήριο αναπαριστώνται σαν

κόμβοι. Ο λόγος για τον οποίο τίθενται διαφορετικοί κόμβοι για την εσωτερική και την εξωτερική πλευρά μιας επιφάνειας είναι διότι συμπεριφέρονται με διαφορετικό τρόπο. Για παράδειγμα, σε περίπτωση βροχής ή ισχυρού άνεμου, η εξωτερική πλευρά επηρεάζεται ενώ η εσωτερική παραμένει ανέπαφη. Ταυτόχρονα, επιτρέπεται η βαθύτερη μελέτη των θερμικών χαρακτηριστικών του κτηρίου. Για παράδειγμα, μπορεί να εξεταστεί η εξωτερική και η εσωτερική θερμοκρασία ενός τοίχου και με βάση αυτές να βγουν συμπεράσματα για διαφορές άλλες παραμέτρους όπως η ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης, οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν αέρινους όγκους θερμικών ζωνών καθώς και εξωτερικά στοιχεία όπως το έδαφος και ο περιβάλλον αέρας. Στις επιφάνειες που είναι δομικά πατώματα, τοποθετείται ένας κόμβος στην εσωτερική πλευρά της και ένας κόμβος στην εξωτερική πλευρά που ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το έδαφος.

Ο κάθε κόμβος i έχει μια συγκεκριμένη θερμοκρασία σε κάθε χρονική στιγμή, η οποία κατοχυρώνεται σε έναν πίνακα T μεγέθους $(n \times \text{frames})$ όπου n είναι ο αριθμός των κόμβων και frames ο αριθμός των στιγμιότυπων που είναι χωρισμένος ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ανάλογα με το χρονικό βήμα.

Επίσης, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δυο κόμβων, όπως αντίστοιχα η διαφορά τάσης σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, είναι η συνθήκη που ενεργοποιεί την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ τους. Για παράδειγμα, σε ένα τοίχο όπου η εξωτερική και η εσωτερική πλευρά έχουν διαφορετική θερμοκρασία θα υπάρξει μετάδοση θερμότητας από τη θερμότερη προς την ψυχρότερη πλευρά. Το έδαφος αποτελεί μια πηγή θερμότητας, ενώ η θερμοκρασία του θεωρείται ότι παραμένει σταθερή. Έτσι, στον κόμβο που αντιπροσωπεύει το έδαφος τοποθετείται μια πηγή συνεχούς ρεύματος. Ταυτόχρονα, ο εξωτερικός αέρας αποτελεί επίσης πηγή θερμότητας. Παρ' όλα αυτά επειδή η θερμοκρασία του μεταβάλλεται συνεχώς, στον αντίστοιχο κόμβο του κυκλώματος έχει τοποθετηθεί πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η σύνδεση των κόμβων γίνεται μέσω ηλεκτρικών αντιστάσεων. Οι ηλεκτρικές αντιστάσεις αντιπροσωπεύουν τη συνολική θερμική αντίσταση τοίχων ή την θερμική αντίσταση μεταξύ μιας επιφάνειας και του εξωτερικού περιβάλλοντος ή ενός εσωτερικού χώρου, η οποία καθορίζει αντίστοιχα την μετάδοση θερμότητας με συναγωγή ή ακτινοβολία. Η πληροφορία που αφορά τις θερμικές αντιστάσεις, περιλαμβάνεται στον πίνακα R , μεγέθους $n \times n$ όπου n είναι ο αριθμός των κόμβων του συστήματος.

Τα κατασκευαστικά στοιχεία ενός κτηρίου καθώς και ο αέρας μιας θερμικής ζώνης έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας ανάλογα με την ειδική θερμοχωρητικότητα τους. Δηλαδή, μέρος της ενέργειας που θα δεχτούν, θα το αποθηκεύσουν, ενώ το υπόλοιπο θα μεταφερθεί με κάποιο μηχανισμό. Η αποθήκευση ενέργειας σε ένα τοίχο, μοντελοποιείται στο λογισμικό SRC σύμφωνα με τη θερμό-ηλεκτρική αναλογία, με τη χρήση δυο πυκνωτών, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στον εσωτερικό και εξωτερικό κόμβο του τοίχου που αντιστοιχούν. Επίσης, η αποθήκευση θερμικής ενέργειας από τον αέρα μιας ζώνης μοντελοποιείται με ένα μόνο πυκνωτή στον κόμβο που της αντιστοιχεί. Μια επιφάνεια, μπορεί να αποτελείται από πολλαπλές στρώσεις υλικών οι οποίες πιθανόν να παρουσιάζουν μεγάλη διάφορα πάχους αναμεταξύ τους. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον διαχωρισμού του τρόπου κατανομής των αντιστάσεων σε ομοιόμορφο και ανομοιόμορφο. Έτσι, στο λογισμικό SRC, η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας στον εσωτερικό και εξωτερικό κόμβο n και m αντίστοιχα κάθε επιφάνειας υπολογίζεται ως εξής:

Αρχικά υπολογίζεται η χωρητικότητα C_i κάθε στρώσης υλικού k στην επιφάνεια:

$$C_k = \rho_k * Cp_k * Th_k * A$$

Όπου:

ρ_i Η πυκνότητα του υλικού k ($\frac{kg}{m^3}$)

Cp_i Η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού k ($\frac{J}{kg K}$)

Th_i Το πάχος του υλικού k (m)

A Το εμβαδόν της επιφάνειας (m^2)

Στη συνέχεια, αν η κατανομή είναι ομοιόμορφη, η χωρητικότητα του εξωτερικού και εσωτερικού κόμβου i, j αντίστοιχα είναι:

$$C_i = C_j = \frac{\sum_{k=1}^b C_k}{2}$$

b Ο αριθμός των υλικών που αποτελούν την επιφάνεια

Αλλιώς, αν η κατανομή είναι ανομοιομόρφη και ο αριθμός των υλικών b , είναι ζυγός τότε:

$$C_i = \sum_{k=1}^{b/2} C_k$$

$$C_j = \sum_{k=(\frac{b}{2})+1}^b C_k$$

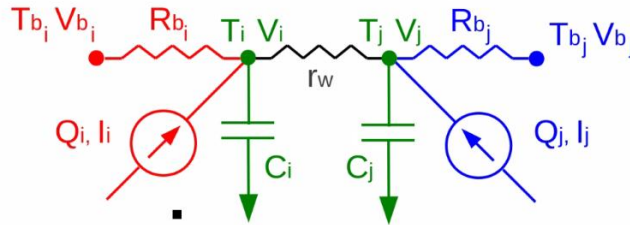
Τέλος, αν η κατανομή είναι ανομοιομόρφη ο αριθμός των υλικών b είναι μονός και C_{middle} η χωρητικότητα του μεσαίου υλικού, τότε:

$$C_i = \sum_{k=1}^{(b-1)/2} C_k + \frac{C_{middle}}{2}$$

$$C_j = \sum_{k=(b+1)/2}^b C_k + \frac{C_{middle}}{2}$$

Ο κάθε κόμβος δέχεται ή απορρίπτει κάποιο ποσό ενέργειας λόγω της αλληλεπίδρασης του με τους υπόλοιπους κόμβους ή λόγω φαινομένων όπως η ροή αέρα από ρωγμές του κελύφους και χαραμάδες και τα εσωτερικά κέρδη. Με βάση τη θερμό-ηλεκτρική αναλογία, η ενέργεια που δέχεται ή απορρίπτει ένας κόμβος μοντελοποιείται με μια πηγή ρεύματος. Το ποσό της ενέργειας που δέχεται ή απορρίπτει ένας κόμβος κατοχυρώνεται σε ένα πίνακα Q_n μεγέθους $n \times 1$ όπου n είναι ο αριθμός των.

3.3.1 Το στοιχείο SRC



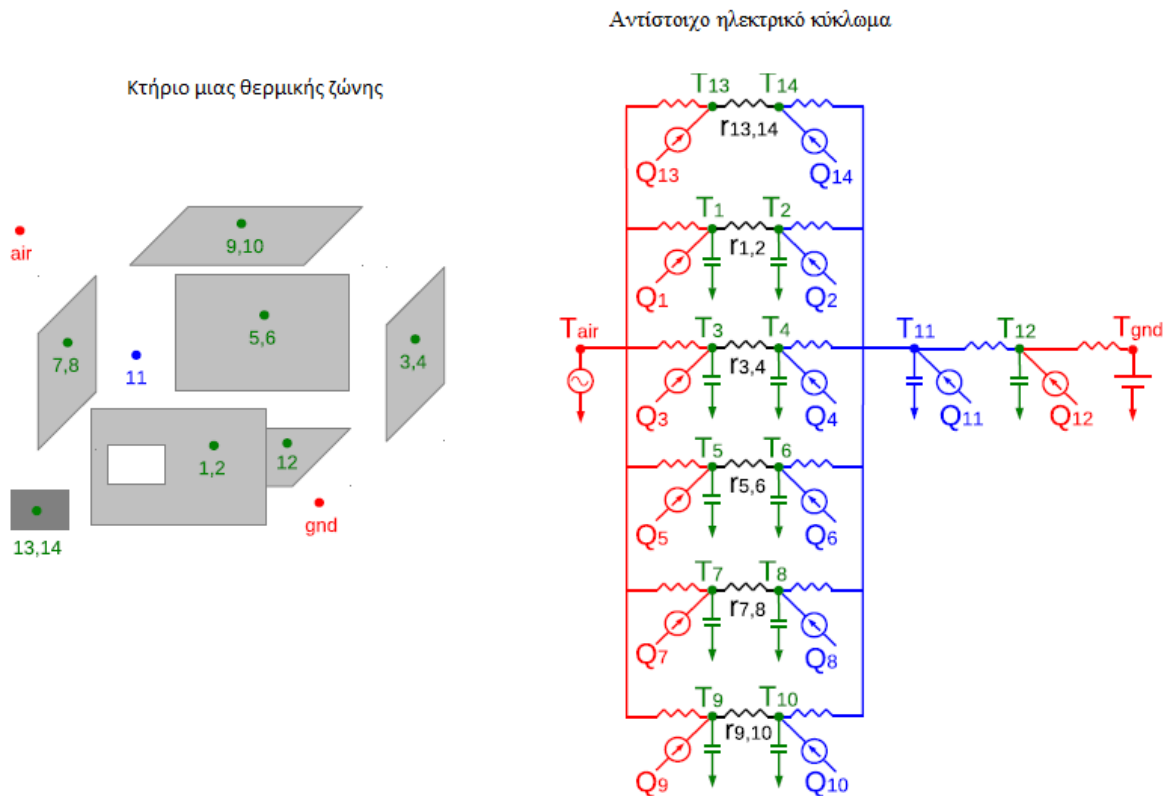
Σχήμα 3-4: Το στοιχείο SRC

Το στοιχείο SRC περιέχει τους κόμβους που αναφέρονται σε μια επιφάνεια, αέρα της θερμικής ζώνης και τον εξωτερικό αέρα. Ταυτόχρονα, συνδυάζει τη σύνδεση μέσω θερμικών αντιστάσεων, την αποθήκευση ενέργειας με πυκνωτές και την αποδοχή ή απόρριψη φορτίου. Η εξίσωση που συνδυάζει το ρυθμό αποθήκευσης ενέργειας, τις θερμικές αντιστάσεις και τις θερμοκρασίες μεταξύ των κόμβων του θερμικού στοιχείου SRC είναι η εξής:

$$\begin{bmatrix} C_i & 0 \\ 0 & C_j \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{\partial T_i}{\partial x} \\ \frac{\partial T_j}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(-\frac{1}{R_j^b} - \frac{1}{r_{i,j}}\right) & \frac{1}{r_{i,j}} \\ \frac{1}{r_{i,j}} & \left(-\frac{1}{r_{i,j}} - \frac{1}{R_j^b}\right) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_i^b}{R_i^b} \\ \frac{T_j^b}{R_j^b} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_i \\ Q_j \end{bmatrix}$$

3.3.2 Θερμό-ηλεκτρικό δίκτυο κόμβων του μοντέλου SRC

Εν τέλει, το κτήριο που πρόκειται να προσομοιωθεί αναπαριστάται σαν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα με κόμβους, αντιστάσεις, πυκνωτές και πηγές ρεύματος. Η σύνθεση του είναι ουσιαστικά η σύνδεση των στοιχείων SRC που περιγράφουν κάθε μέρος του κτηρίου.



Σχήμα 3-5: Παράδειγμα αναπαράστασης κτηρίου μιας θερμικής ζώνης σαν $\dot{a}$ ηλεκτρικό κύκλωμα

3.3.3 Πίνακας R

Ο πίνακας R περιέχει πληροφορίες που αφορούν τις θερμικές αντιστάσεις που υπάρχουν στο κύκλωμα. Είναι διαστάσεων $n \times n$ όπου n είναι ο αριθμός των κόμβων του μοντέλου. Το στοιχείο (i,j) του πίνακα R μπορεί να αναφέρεται στα εξής:

Στη θερμική αντίσταση μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος του κτηρίου ή του εδάφους και ενός κόμβου που αντιστοιχεί σε εξωτερική επιφάνεια τοίχου. Η συγκεκριμένη θερμική αντίσταση υπολογίζεται σε κάθε χρονικό βήμα με βάση τον αλγόριθμο TARP(13). Το στοιχείο (i,j) είναι της μορφής:

$$\frac{1}{R_{out}}$$

Στη θερμική αντίσταση αγωγής μεταξύ ενός εξωτερικού και ενός εσωτερικού κόμβου μιας επιφάνειας. Η συγκεκριμένη πληροφορία καθορίζεται με βάση την θερμική αντίσταση μιας επιφάνειας που είναι καθορισμένη στο αρχείο gbXML. Το στοιχείο (i,j) είναι της μορφής:

$$\frac{1}{r_{i,j}}$$

Στη θερμική αντίσταση μεταξύ του εσωτερικού αέρινου όγκου μιας θερμικής ζώνης και ενός κόμβου που αντιστοιχεί στη εσωτερική επιφάνεια ενός τοίχου. Η συγκεκριμένη θερμική αντίσταση υπολογίζεται σε κάθε χρονικό βήμα με βάση τον αλγόριθμο TARP. Το στοιχείο (i,j) είναι της μορφής:

$$\frac{1}{R_{in}}$$

Για τους κόμβους οι οποίοι δεν συνδέονται, τα αντίστοιχα στοιχεία του πίνακα είναι 0 ενώ τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα είναι το παρακάτω άθροισμα:

$$\sum_{j=1}^n -\frac{1}{r_{i,j}}$$

Όπου j οι κομβοί που συνδέονται με τον κόμβο i.

3.3.4 Πίνακας C

Ο πίνακας C είναι διαγώνιος και εμπεριέχει πληροφορίες για την δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας του συνόλου των κόμβων n του κτηρίου. Η μορφή του είναι η εξής:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & C_i & \vdots \\ 0 & \cdots & C_N \end{bmatrix}$$

3.3.5 Συνολική περιγραφή του συστήματος

Εν τέλει το σύστημα περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{1}{dt} C(T_{n+1} - T_n) = [R_n]T_n + Q_n$$

Όπου:

- C Ο πίνακας αποθήκευσης θερμικού φορτίου
- T_n Η θερμοκρασία του κόμβου n
- R_n Ο πίνακας των θερμικών αντιστάσεων
- Q_n Ο πίνακας με το θερμικό φορτίο που δέχεται η απορρίπτει ο κόμβος n

3.3.6 Είσοδος αρχείου gbXML - xml_read

Το λογισμικό SRC δέχεται σαν είσοδο, αρχεία gbXML, έτσι ώστε να μοντελοποιήσει σαν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, το κτήριο για το οποίο θα γίνει η θερμική προσομοίωση. Τα αρχεία εισάγονται στο MATLAB και με τη χρήση της συνάρτησης **xml_read.mat** μετατρέπεται σε δομή κλάσεων. Η μετατροπή σε κλάσεις σημαίνει τη δημιουργία μιας δομής δεδομένων που μοιάζει με δέντρο, το οποίο αποτελείται από τα διάφορα αντικείμενα που περιέχει το αρχείο gbXML. Η συγκεκριμένη διαδικασία, ακολουθείται προκειμένου η πληροφορία που πρέπει να αξιοποιηθεί για να γίνει η θερμική προσομοίωση, να έχει τέτοια δομή έτσι ώστε να είναι διαχωρίσιμη από το MATLAB στην οποία έχει αναπτυχτεί το λογισμικό SRC.

Η συνάρτηση xml_read του MATLAB είναι ουσιαστικά ένα πρόγραμμα το οποίο έχει τη δυνατότητα να διαβάσει ένα οποιοδήποτε αρχείο xml και να το μετατρέψει σε δομή κλάσεων. Η ανάπτυξη του έγινε εκτός του πλαισίου ανάπτυξης του λογισμικού SRC και η παροχή του πηγαίου κώδικα έγινε στα πλαίσια ανταλλαγής αρχείων μέσω του ισότοπου της MATHWORKS(14).

3.3.7 Γεωμετρία κτηρίου - GEO.mat

Στη συγκεκριμένη συνάρτηση **GEO.mat**, δημιουργούνται οι πίνακες οι οποίοι εμπεριέχουν όλες της πληροφορίες που αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όλων των επιφανειών και των θερμικών ζωνών. Επίσης, πραγματοποιείται η κατανομή των κόμβων οι οποίοι αντιστοιχούν στις πλευρές των επιφανειών ή στις θερμικές ζώνες.

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα κάθε επιφάνειας είναι η σειρά με την οποία αναφέρεται μέσα στο αρχείο gbXML και με βάση αυτήν, γίνεται ο προσδιορισμός των στοιχείων των γεωμετρικών πινάκων που την αφορούν. Για παράδειγμα, αν η τρίτη κατά σειρά επιφάνεια που υπάρχει μέσα σε ένα αρχείο gbXML είναι ένας τοίχος, τότε στον πίνακα AZ (Su×1) που περιέχει το αζιμουθιο όλων των επιφανειών και Su είναι ο συνολικός αριθμός επιφανειών στο κτήριο, η τιμή του πίνακα που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο τοίχο είναι αυτή που βρίσκεται στη θέση AZ(3,1).

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι σημαντικότεροι πίνακες που δημιουργούνται μέσω της συνάρτησης GEO.mat είναι οι SpCon και SysInd. Ο πίνακας SpCon είναι διαστάσεων SpSu X 2 όπου SpSu είναι ο αριθμός των επιφανειών σε κάθε θερμική ζώνη. Η πρώτη στήλη αναφέρει τον αριθμό της θερμικής ζώνης και η δεύτερη

αναφέρει πληροφορίες για τη συνδεσιμότητα της κάθε επιφάνειας.

Ο πίνακας SysInd είναι διαστάσεων (SuNum×2). Η πρώτη στήλη αναφέρει τον αριθμό του κόμβου που αντιστοιχεί στην εσωτερική πλευρά μιας επιφάνειας και η δεύτερη στήλη, τον αριθμό του κόμβου που αντιστοιχεί στην εξωτερική της επιφάνεια.

3.3.8 Υλικά και θερμικές ιδιότητες - MAT.mat

Πέραν από τους πίνακες που εμπεριέχουν τις γεωμετρικές πληροφορίες του κτηρίου, είναι απαραίτητη και η δημιουργία συγκεκριμένων πινάκων που αφορούν τις θερμικές ιδιότητες των επιφανειών του.

Η συνάρτηση **MAT.mat** η οποία αναπτύχθηκε κατά την παρούσα διπλωματική, καταγράφει τις πληροφορίες αυτές χρησιμοποιώντας την ιδιότητα (attribute) constructionIdRef κάθε επιφάνειας για να προσδιορίσει το είδος και τις θερμικές ιδιότητες της κατασκευής της, και τα υλικά που την αποτελούν.

Επίσης, σε μια επιφάνεια η οποία αποτελείται από παραπάνω από ένα υλικό, η ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας καθώς ο συντελεστής απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας είναι διαφορετικός στη εσωτερική και εξωτερική της πλευρά. Τα λογισμικά σχεδίασης CAD όπως το REVIT 2013 δεν έχουν τη δυνατότητα εμφάνισης της ικανότητας εκπομπής ακτινοβολίας των επιφανειών ενώ ταυτόχρονα ο συντελεστής απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας περιορίζεται μόνο στην εξωτερική τους πλευρά. Η αδυναμία αυτή των λογισμικών σχεδίασης, είχε ως αποτέλεσμα τον σχεδιασμό του SRC, έτσι ώστε η πληροφορία να προσδιορίζεται από τον χρήστη και να μην γίνεται αυτόματη ενημέρωση μέσω της συνάρτησης.

Προκειμένου η καταγραφή της πληροφορίας να είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και να μην χρειάζεται η παρέμβαση του χρήστη, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί είτε κάποιο λογισμικό το οποίο να μπορεί να αποδίδει αυτή τη πληροφορία, είτε οι μελλοντικές εκδόσεις των υπαρχόντων λογισμικών να έχουν αυτή τη δυνατότητα.

3.3.9 Χρονικός Προγραμματισμός – Χρονοδιαγράμματα (schedules)

Ορισμένα χαρακτηριστικά του κτηρίου ή φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας τα οποία επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά του, χρειάζονται κάποιο χρονικό προγραμματισμό σύμφωνα με τον οποίο είναι ενεργά ή ανενεργά. Επίσης, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός μιας ή περισσότερων τιμών οι οποίες καθορίζουν τα φαινόμενα αυτά. Ένα παράδειγμα είναι το σύστημα HVAC, για το οποίο πρέπει να έχει καθοριστεί μια τιμή για την παροχή του εξερχόμενου αέρα.

Κατά συνέπεια, έγινε απαραίτητη η σχεδίαση συναρτήσεων στο MATLAB οι οποίες ονομάζονται schedules και καλούνται από το χρήστη έτσι ώστε καθορίζει τις συγκεκριμένες παραμέτρους. Οι συναρτήσεις αυτές αφορούν τα παρακάτω χαρακτηριστικά και φαινόμενα:

- Εσωτερικά κέρδη
- Ροή από χαραμάδες και ρωγμές του κτηριακού κελύφους
- Προγραμματισμός συστήματος HVAC
- Προγραμματισμός ιδανικού συστήματος θέρμανσης – ψύξης
- Άνοιγμα παραθύρων
- Άνοιγμα περσίδων
- Εξαερισμός με ανεμιστήρα

3.3.10 Υπολογισμός θερμοκρασίας κόμβων

Οι υπολογισμοί του μοντέλου SRC πραγματοποιούνται με χρονικό βήμα 10 λεπτών. Σε κάθε χρονικό βήμα, υπολογίζεται το θερμικό φορτίο, το οποίο απορρίπτεται ή προστίθεται σε κάθε κόμβο, μέσω συναρτήσεων οι οποίες μοντελοποιούν τους εκάστοτε μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας, και κατοχυρώνεται σε ένα πίνακα μεγέθους (n×1), όπου n είναι ο αριθμός των κόμβων στο κτήριο. Επίσης, γίνεται επανυπολογισμός των παραμέτρων εκείνων οι οποίες αλλάζουν δυναμικά, όπως ο πίνακας αντιστάσεων R και ο πίνακας πυκνωτών C και εξαρτώνται από τις συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό ή εξωτερικό περιβάλλον του κτηρίου.

Για τον συνολικό υπολογισμό του φορτίου στους κόμβους, καλείται σε κάθε χρονικό βήμα η συνάρτηση **coretherm.mat**. Η συγκεκριμένη συνάρτηση καλεί τις επιμέρους άλλες συναρτήσεις οι οποίες υπολογίζουν

μεμονωμένα το θερμικό φορτίο ενός μηχανισμού μετάδοσης θερμότητας. Στη συνέχεια αθροίζει τα επιμέρους θερμικά φορτία στον πίνακα Qn ο οποίος εμπεριέχει το συνολικό θερμικό φορτίο που θα δεχτεί ο κάθε κόμβος. Η συνάρτηση **coretherm.mat** καλείται μέσω της συνάρτησης **mdl.mat** η οποία υπολογίζει εν τέλει και την θερμοκρασία κάθε κόμβου σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$T_n = T_{n,prev} + \frac{C_{n,n}}{R * T_{n,prev} + Q} * dt$$

3.3.11 Υπολογισμός συντελεστή συναγωγής

Η μετάδοση θερμότητας μεταξύ των επιφανειών ενός κτηρίου και το αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος ή του αέρα της θερμικής ζώνης πραγματοποιείται μέσω συναγωγής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο συντελεστής συναγωγής που επηρεάζει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας καθορίζεται από πολλούς παράγοντες όπως, την κίνηση του ρευστού, την ταχύτητα του, την ύπαρξη βροχής ή υγρασίας κλπ. Κατά συνέπεια, είναι αναγκαίος ο επανυπολογισμός του σε κάθε χρονικό βήμα.

Στο λογισμικό SRC, ο υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής, πραγματοποιείται με τη χρήση του αλγορίθμου TARP(15). Επίσης, σε χρονικά βήματα στα οποία υπάρχει ένδειξη βροχής, ο συντελεστής αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό και η τιμή του είναι $1000 \frac{W}{K*m^2}$. Παραλληλα, οι τιμές του πίνακα θερμικών αντιστάσεων R που είναι συνάρτηση του συντελεστή συναγωγής υφίσταται τις αντίστοιχες αλλαγές σε κάθε χρονικό βήμα.

3.3.11.1 Αλγόριθμος TARP

Για τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή στις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος TARP (Thermal Analysis Research Program)(15) ο οποίος βασίζεται στη διάφορα θερμοκρασίας που εμφανίζεται σε περισσότερες από μια κατευθύνσεις. Για την υλοποίηση του, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μεταβλητές:

Πίνακας 3-1 - Μεταβλητές αλγορίθμου TARP

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδες
A	Εμβαδόν επιφάνειας	m^2
h_c	Συνολικός συντελεστής συναγωγής	$\frac{W}{m^2 K}$
h_f	Συντελεστής εξαναγκασμένης συναγωγής	$\frac{W}{m^2 K}$
h_n	Συντελεστής φυσικής συναγωγής	$\frac{W}{m^2 K}$
P	Περίμετρος επιφάνειας	m
R_f	Πολλαπλασιαστής Τραχύτητας	-
T_{air}	Θερμοκρασία αέρα	$^{\circ}C/K$
T_{so}	Θερμοκρασία εξωτερικής πλευράς επιφάνειας	$^{\circ}C/K$
ΔT	Διαφορά θερμοκρασίας επιφάνειας και αέρα ($T_{so} - T_{air}$)	$^{\circ}C/K$
V_Z	Ταχύτητα ανέμου στο ύψος του κέντρου βάρους της επιφάνειας	m/s
W_f	Κατεύθυνση ανέμου	-

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδες
φ	Γωνία μεταξύ κάθετου άξονα εδάφους και εξωτερικού κάθετου άξονα επιφάνειας	Μοίρες
Roughness Index	Συντελεστής τραχύτητας	-

Στον αλγόριθμο TARP, η συναγωγή διαχωρίζεται σε φυσική και εξαναγκασμένη όπως και στην πραγματικότητα. Έτσι, ο συνολικός συντελεστής συναγωγής είναι:

$$h_c = h_n + h_f$$

Και

$$h_f = 2.537 * W_f * R_f * \left(\frac{P * V}{A} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Όπου:

- $W_f = 1$ εάν η κατεύθυνση του ανέμου είναι προς την επιφάνεια
- $W_f = 0.5$ εάν η κατεύθυνση του ανέμου δεν είναι προς την επιφάνεια

Ο συντελεστής φυσικής συναγωγής συσχετίζει τη διαφορά θερμοκρασίας και τον προσανατολισμό της επιφάνειας. Για μηδενική διαφορά θερμοκρασίας ($\Delta T = 0$) και καθετές επιφάνειες είναι:

$$h_n = 1,31 * |\Delta T|^{\frac{1}{3}}$$

Για διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T < 0$ και επιφάνειες που κοιτούν προς τα πάνω, ή για διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T > 0$ και επιφάνειες που κοιτούν προς τα κάτω:

$$h_n = \frac{9,482 * |\Delta T|^{\frac{1}{3}}}{7,283 - |\cos \Sigma|}$$

Όπου:

Σ Η κλίση μεταξύ της επιφάνειας και του εδάφους

Για διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T > 0$ και επιφάνειες που κοιτούν προς τα πάνω, ή για διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T < 0$ και επιφάνειες που κοιτούν προς τα κάτω:

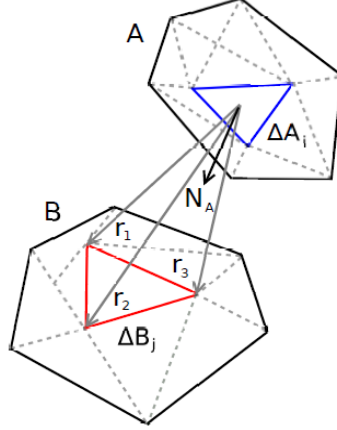
$$h_n = \frac{1,81 * |\Delta T|^{\frac{1}{3}}}{1,382 - |\cos \Sigma|}$$

Πίνακας 3-2 - Συντελεστής τραχύτητας

Συντελεστής τραχύτητας	Rf	Παράδειγμα Υλικού
1 (πολύ τραχύ)	2,17	Σοβάς
2 (τραχύ)	1,67	Τούβλο
3 (μέσο τραχύ)	1,52	Τσιμέντο
4 (μέσο λείο)	1,13	Ξύλο
5 (λείο)	1,11	Γύψος
6 (πολύ λείο)	1,00	Γυαλί

3.3.12 Συντελεστές όψεως (F_CALC.mat) – Εσωτερική ακτινοβολία μεγάλου μήκους (Qint_LWR.mat)

Οι επιφάνειες μιας θερμικής ζώνης, ανταλλάσσουν θερμότητα με τη μορφή ακτινοβολίας. Για να υπολογιστεί το ποσό ενέργειας που μεταδίδεται, πρέπει να είναι γνωστός ο τρόπος που βλέπει η κάθε επιφάνεια τις υπόλοιπες. Για να γίνει αυτό, εφαρμόζεται ο ημι-αναλυτικός αλγόριθμος(16),(17) μέσω της συνάρτησης **F_CALC.mat** κατά τον οποίο δυο επιφάνειες χωρίζονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό τριγώνων πλήθους n_A



Σχήμα 3-6: View factors

και n_B για τις επιφάνειες A και B αντίστοιχα. Κάθε ζευγάρι τριγώνων ΔA_i και ΔB_j συνισφέρει στο υπολογισμό της τιμής που καθορίζει τη συγκεκριμένη παράμετρο και υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta F_{\Delta A_i, \Delta B_j} = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^3 \vec{N}_A \cdot \frac{\vec{r}_i \times \vec{r}_{i+1}}{|\vec{r}_i| |\vec{r}_{i+1}|}$$

Όπου $\vec{r}_1$, $\vec{r}_2$ και $\vec{r}_3$ τα τρία διανυσματα που συνδεουν το κεντρο βαρους του ενος τριγωνου με τις κορυφές του άλλου. Το N_A είναι το καθετο διανυσμα του τριγωνου το οποιο εχει κατευθυνση:

- Προς το εσωτερικό του κτηρίου αν πρόκειται εσωτερική πλευρά επιφάνειας
- Προς το εξωτερικό του κτηρίου αν πρόκειται εξωτερική πλευρά επιφάνειας

Ο συνολικός συντελεστής που καθορίζει το τρόπο που βλέπει μια επιφάνεια κάποια άλλη βρίσκεται αθροίζοντας τα επιμέρους μεγέθη ως εξής:

$$F_{AB} = \sum_{i,j} I_{\Delta A_i \Delta B_j} \Delta F_{\Delta A_i \Delta B_j}$$

Όπου:

$I_{\Delta A_i \Delta B_j}$ Δείκτης σκίασης που παίρνει τιμές 0 ή 1 ανάλογα με το αν υπάρχει εμπόδιο μεταξύ δυο τριγώνων

Το θερμικό φορτίο που δέχεται ο κάθε κόμβος λόγω ακτινοβολίας από τους άλλους τοίχους υπολογίζεται από την συνάρτηση **Qint_LWR.mat** είναι το εξής:

$$Q_{intLWR,i} = \sum_{i,j} F_{i,j} * \varepsilon * \sigma * A_i * (T_i^4 - T_j^4)$$

Όπου:

$F_{i,j}$ Ο συντελεστής με τον οποίο μια επιφάνεια βλέπει μια άλλη

j Η κάθε επιφάνεια που μεταφέρει θερμότητα προς την επιφάνεια i.

3.3.13 Ηλιακά κέρδη

Ο υπολογισμός των ηλιακών κερδών(17), γίνεται μέσω της συνάρτησης **SOLAR_CALC.mat**. Σκοπός είναι να υπολογιστεί η ηλιακή ακτινοβολία μετρούμενη σε Watt που προσπίπτει στις επιφάνειες ενός κτηρίου. Ο υπολογισμός γίνεται μόνο μια φορά από το λογισμικό SRC αφού επηρεάζονται μόνο από την γεωμετρία και τον προσανατολισμό του κτηρίου, τα οποία παραμένουν αμετάβλητα.

Οι τρεις συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας που καθορίζονται είναι οι εξής:

1. Απευθείας ηλιακή ακτινοβολία
2. Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία
3. Ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία

Ο υπολογισμός του θερμικού φορτίου που προστίθεται σε κάθε επιφάνεια γίνεται αρχικά μέσω της συνάρτησης Qext_LWR. Αρχικά, υπολογίζονται πρώτα τρεις συντελεστές οι οποίοι αποτελούν το ποσοστό των παραπάνω συνιστωσών που προσπίπτει σε κάθε επιφάνεια. Έτσι έχουμε:

$$F_{gnd} = 0,5 * \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{180 * TL_{SU}}\right) \right]$$

$$F = 0,5 * \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{180 * TL_{SU}}\right) \right]$$

$$B = 0,5 * \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{180 * TL_{SU}}\right) \right]^2$$

$$F_{sky} = F * B$$

$$F_{air} = F * (1 - B)$$

Όπου:

TL_{SU} Η κλίση της εξωτερικής πλευράς της επιφάνειας σε σχέση με το έδαφος

Στη συνέχεια, τα επιμέρους θερμικά φορτία που προστίθεται σε κάθε εξωτερικό κόμβο λόγω διάχυτης, απευθείας και ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίζεται ως εξής:

$$Q_{LWR,air} = \sigma * \varepsilon * A * F_{air} * (T_{air}^4 - T_{su}^4)$$

$$Q_{LWR,sky} = \sigma * \varepsilon * A * F_{sky} * (T_{sky}^4 - T_{su}^4)$$

$$Q_{LWR,gnd} = \sigma * \varepsilon * A * F_{gnd} * (T_{gnd}^4 - T_{su}^4)$$

Και το συνολικό θερμικό φορτίο σε κάθε κόμβο του αντίστοιχου θερμο-ηλεκτρικού κυκλώματος είναι:

$$Q_{LWR} = Q_{LWR,sky} + Q_{LWR,air} + Q_{LWR,gnd}$$

3.3.14 Ροή αέρα από χαραμάδες και ρωγμές του κτηριακού κελύφους (Infiltration)

Η μοντελοποίηση της ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες που υπάρχουν στο κέλυφος του κτηρίου, πραγματοποιείται στο λογισμικό SRC μέσω της συνάρτησης **Qair_inf.mat** και μπορεί να γίνει μέσω δυο διαφορετικών μοντέλων. Για να μπορέσει να γίνει ο οποιοσδήποτε υπολογισμός, πρέπει αρχικά να έχει καθοριστεί μέσω του αντίστοιχου schedule, ο χρονικός προγραμματισμός και μια σταθερή τιμή εναλλαγών αέρα η οποία είναι η επιθυμητή σταθερή ροή μετρούμενη σε εναλλαγές αέρα ανά ώρα – ACH (air changew pera hour). Ο καθορισμός του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί, γίνεται με ανάλογη τροποποίηση της συνάρτησης.

Η πρώτη εξίσωση για τον υπολογισμό της ροής αέρα, βασίζεται στο μοντέλο της ASHRAE το οποίο χρησιμοποιείται και από το EnergyPlus και έχει περιγραφεί στην αντίστοιχη ενότητα. Η εξίσωση αυτή είναι:

$$V_{inf} = I_{design} * F_{sched} * [A + B * |T_{odb} - T_{zone}| + C * Windspeed + D * Windspeed^2]$$

Η δεύτερη εξίσωση συνυπολογίζει την διαφορά της πίεσης μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και του εσωτερικού χώρου των θερμικών ζωνών και είναι η εξής:

$$V_{inf} = 10 * AL * \sqrt{(C_s * |dT| + C_w * V_{wind}^2)}$$

Όπου:

AL (Effective Leakage Area): Είναι το εμβαδόν που αντιστοιχεί στο συνολικό εμβαδόν των ρωγμών, μικρών ανοιγμάτων κλπ από τις οποίες εισέρχεται αέρα και προκαλείται ροή, υπό διαφορά εξωτερικής και εσωτερικής πίεσης 4 Pascal.

C_s Ο συντελεστής διαφοράς θερμοκρασίας

C_w Ο συντελεστής ταχύτητας άνεμου

V_{wind} Η ταχύτητα του άνεμου ($\frac{m}{s}$)

Και οι συντελεστές A, B, C και D έχουν τις εξής τιμές, έτσι ώστε η ροή του αέρα να ισούται με την προκαθορισμένη τιμή που έχει δώσει ο χρήστης:

- A = 1
- B = 0 (K)
- C = 0 ($\frac{s}{m}$)
- D = 0 ($\frac{m^2}{s^2}$)

Ο υπολογισμός του θερμικού φορτίου που προστίθεται ή αφαιρείται λόγω της Ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους που υφίσταται το κτίριο, βασίζεται στη διαφορά την ενθαλπίας η οποία είναι η εξής:

$$dh = C_{p_{air}} * T_{air} - (C_{p_{da}} + C_{p_v} * H) * T$$

Όπου:

$C_{p_{air}}$ Η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα ($\frac{J}{kg \ K}$)

T_{air} Η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα (K)

$C_{p_{da}}$ Η ειδική θερμοχωρητικότητα του ξηρού αέρα ($\frac{J}{kg \ K}$)

C_{p_v} Η ειδική θερμοχωρητικότητα του υδρατμού ($\frac{J}{kg \ K}$)

H Η σχετική υγρασία της θερμικής ζώνης (%)

T Η θερμοκρασία του αέρα της θερμικής ζώνης (K)

Εν τέλει, το θερμικό φορτίο που προστίθεται ή αφαιρείται σε κάθε κόμβο λόγω ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους, υπολογίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$Q = \rho_{air} * V_{inf} * dh$$

Όπου:

ρ_{air} Η πυκνότητα του αέρα ($\frac{kg}{m^3}$)

V_{inf} Η ροή αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους, μετρούμενη σε $\frac{m^3}{s}$

dh Η διαφορά ενθαλπίας ($\frac{kJ}{kg}$)

3.3.15 Εξαερισμός

Ο εξαερισμός των θερμικών ζωνών μοντελοποιεί την ύπαρξη ενός ανεμιστήρα με συγκεκριμένη παροχή, ο οποίος διοχετεύει αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον στο εσωτερικό θερμικών ζωνών. Το θερμικό φορτίο που εναλλάσσεται στους κόμβους σε κάθε χρονικό βήμα, υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που υπολογίζεται η ροή αέρα από τις ρωγμές του κελύφους, με τη διαφορά ότι η παροχή αέρα στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι καθορισμένη μέσα από το αντίστοιχο χρονοδιάγραμμα (schedule) και δεν χρειάζεται ο υπολογισμός

της.

Αρχικά υπολογίζεται η διαφορά ενθαλπίας ως εξής:

$$dh = C_{p_{air}} * T_{air} - (C_{p_{da}} + C_{p_v} * H) * T$$

Όπου:

$C_{p_{air}}$ Η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα ($\frac{J}{kg \ K}$)

T_{air} Η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα (K)

$C_{p_{da}}$ Η ειδική θερμοχωρητικότητα του ξηρού αέρα ($\frac{J}{kg \ K}$)

C_{p_v} Η ειδική θερμοχωρητικότητα του υδρατμού ($\frac{J}{kg \ K}$)

H Η σχετική υγρασία της θερμικής ζώνης

T Η θερμοκρασία του αέρα της θερμικής ζώνης (K)

Στη συνέχεια το θερμικό φορτίο που προστίθεται ή αφαιρείται σε κάθε κόμβο, λόγω της ύπαρξης ανεμιστήρα υπολογίζεται ως εξής:

$$Q = \rho_{air} * V_{air} * dh$$

Όπου:

ρ_{air} Η πυκνότητα του αέρα ($\frac{kg}{m^3}$)

V_{air} Η ροή αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους, μετρούμενη σε $\frac{m^3}{s}$

dh Η διαφορά ενθαλπίας ($\frac{kJ}{kg}$)

3.3.16 Σύστημα HVAC

Το σύστημα HVAC στο λογισμικό SRC, μοντελοποιείται ως ένα σύστημα θέρμανσης - ψύξης το οποίο παρέχει θερμό ή ψυχρό αέρα σε μια θερμική ζώνη. Το σύστημα προσδιορίζεται για κάθε μια θερμική ζώνη και η ενεργοποίηση του πραγματοποιείται όταν η θερμοκρασία της ξεπεράσει κάποιο setpoint, δηλαδή μια προσδιορισμένη τιμή θερμοκρασίας. Ο καθορισμός της θερμοκρασίας του αέρα παροχής για θέρμανση ή ψύξη, τα setpoints ενεργοποίησης καθώς και οι ώρες της ημέρας κατά τις οποίες το κλιματιστικό μπορεί να ενεργοποιηθεί, καθορίζονται από τον χρήστη μέσω του αντιστοίχου χρονοδιαγράμματος (schedule).

Το σύστημα HVAC επηρεάζει το θερμικό φορτίο των κόμβων προσθέτοντας ή αφαιρώντας ένα συγκεκριμένο ποσό σε κάθε χρονικό βήμα. Ο υπολογισμός του θερμικού αυτού φορτίου γίνεται ως εξής:

Αρχικά υπολογίζεται η διαφορά ενθαλπίας:

$$dh = C_{p_{air}} * (T_{out} - T_{in})$$

Όπου:

$C_{p_{air}}$ Η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα ($\frac{J}{kg \ K}$)

T_{out} Η θερμοκρασία του αέρα παροχής του συστήματος HVAC (K)

T_{in} Η θερμοκρασία του αέρα της θερμικής ζώνης (K)

Στη συνέχεια, το θερμικό φορτίο που προστίθεται ή αφαιρείται σε κάθε κόμβο υπολογίζεται ως εξής:

$$Q = \rho_{air} * V_{air} * dh$$

Όπου:

V_{air} Η παροχή του συστήματος HVAC που έχει οριστεί για κάθε θερμική ζώνη, μετρούμενη σε $\frac{m^3}{s}$

dh Η διαφορά ενθαλπίας ($\frac{kJ}{kg}$)

ρ_{air} Η πυκνότητα του αέρα ($\frac{kg}{m^3}$)

3.3.17 Ιδανικό Σύστημα Θέρμανσης – Ψύξης

Ένα ιδανικό σύστημα θέρμανσης – ψύξης, έχει ως χαρακτηριστικό την δυνατότητα παροχής, θεωρητικά άπειρου θερμικού φορτίου. Επίσης, η απόδοση του είναι 100% και δεν έχει απώλειες κατά τη λειτουργία του. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, σχεδιάστηκε ένας αλγόριθμος πρόβλεψης – διόρθωσης ο οποίος χρησιμοποιείται από το ιδανικό σύστημα θέρμανσης – ψύξης έτσι ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία μιας θερμικής ζώνης εντός ενός συγκεκριμένου πεδίου τιμών.

Η υλοποίηση του αλγορίθμου βασίζεται στην εκτίμηση της μεταβολής της θερμοκρασίας της ζώνης από το χρονικό βήμα i στο χρονικό βήμα $i+1$. Επίσης, χρειάζεται να έχει καθοριστεί ένα πεδίο θερμοκρασιακών τιμών $[T_{min}, T_{max}]$. Η προσομοίωση εκτελείται από το βήμα i στο βήμα $i+1$ και αν η θερμοκρασία της ζώνης παραμείνει εντός του θερμοκρασιακού φάσματος που έχει οριστεί, τότε το ιδανικό σύστημα θέρμανσης – ψύξης δεν ενεργοποιείται. Στη περίπτωση που η θερμοκρασία T_{i+1} γίνει μεγαλύτερη από την T_{max} ή μικρότερη από την T_{min} , τότε θα πρέπει να αφαιρεθεί ή να προστεθεί αντίστοιχα, ένα συγκεκριμένο θερμικό φορτίο έτσι ώστε, η νέα θερμοκρασία της θερμικής ζώνης στο χρονικό βήμα $i+1$ να εξισωθεί με το πάνω ή κάτω άκρο του θερμοκρασιακού φάσματος που αντίστοιχα έχει ξεπεραστεί. Έτσι, θα χρειαστεί ένα θερμικό φορτίο το οποίο είναι:

$$Q_{load} = m * Cp_{air} * (T_{i+1} - T_{max}) \text{ αν } T_{i+1} > T_{max}$$

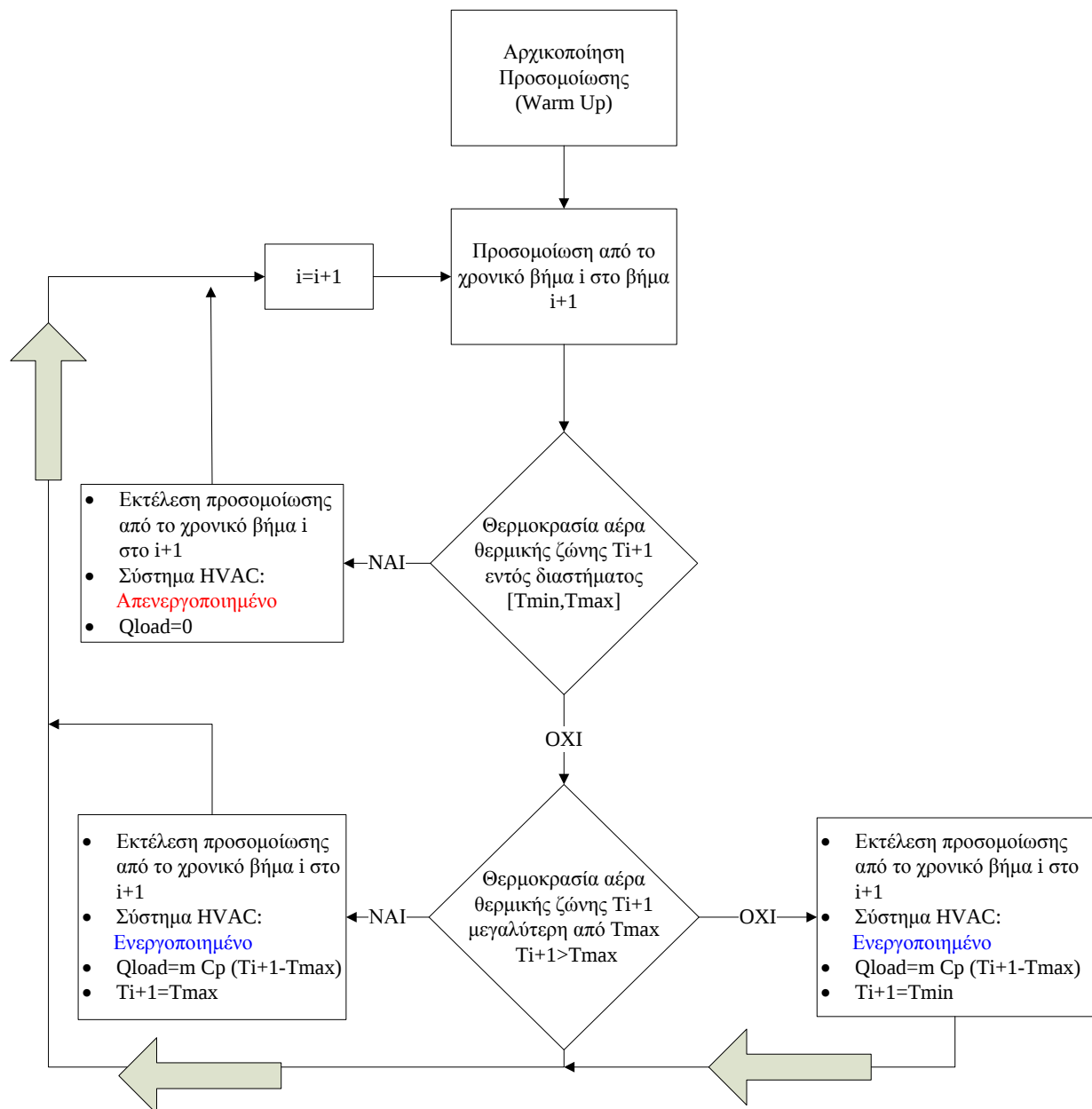
Και

$$Q_{load} = m * Cp_{air} * (T_{i+1} - T_{min}) \text{ αν } T_{i+1} < T_{min}$$

Όπου:

m Η μάζα του αέρα μέσα στη θερμική ζώνη (kg)

Cp_{air} : Η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα της θερμικής ζώνης ($\frac{J}{kg \cdot K}$)



Διάγραμμα ροής 1: Αλγόριθμος πρόβλεψης - διόρθωσης ιδανικού συστήματος HVAC

3.3.18 Εσωτερικά Κέρδη

Η ύπαρξη ανθρώπων, ηλεκτρικών συσκευών κα, μέσα σε ένα χώρο, έχει ως αποτέλεσμα την μεταφορά ενέργειας προς τον αέρα της θερμικής ζώνης καθώς και προς τις επιφάνειες της. Επίσης, ένα ποσοστό της θερμότητας, μεταφέρεται με τη μορφή ακτινοβολίας απευθείας προς τις επιφάνειες, ενώ το υπόλοιπο μέσω συναγωγής προς τον αέρα της ζώνης. Η μοντελοποίηση των εσωτερικών κερδών στο λογισμικό SRC έχει γίνει με τη χρήση ενός χρονοδιαγράμματος (schedule), στο οποίο ο χρήστης καθορίζει την ενέργεια που μεταφέρεται σε Watt καθώς και το ποσοστό αυτής που μεταδίδεται μέσω ακτινοβολίας στις επιφάνειες της θερμικής ζώνης.

3.4. Εκτέλεση Θερμικής Προσομοίωσης στο λογισμικό SRC

Η διαδικασία εκτέλεσης θερμικής προσομοίωσης στο λογισμικό SRC αποτελεί μια σχετικά εύκολη διαδικασία. Αρχικά, είναι απαραίτητη η σχεδίαση του κτηρίου που πρόκειται να προσομοιωθεί, σε ένα λογισμικό CAD το οποίο έχει τη δυνατότητα εξαγωγής αρχείων gbXML. Στη συνέχεια, γίνεται η εκτέλεση των παρακάτω συναρτήσεων στο MATLAB με την ακόλουθη σειρά:

xml_read.mat: Εισαγωγή αρχείου gbXML στο MATLAB

GEO.mat: Εισαγωγή γεωμετρίας κτηρίου

MAT.mat: Εισαγωγή θερμικών ιδιοτήτων των υλικών

F_CALC.mat: Υπολογισμός συντελεστών όψευς

SOLAR-CALC.mat: Υπολογισμός ηλιακών δεδομένων

BL_SCH.mat: Καθορισμός χρονοδιαγράμματος περσίδων

HV_SCH.mat: Καθορισμός χρονοδιαγράμματος και παραμέτρων συστήματος HVAC

IG_SCH.mat: Καθορισμός χρονοδιαγράμματος και παραμέτρων εσωτερικών κερδών

IV_SCH.mat: Καθορισμός χρονοδιαγράμματος και παραμέτρων ροής αέρα από χαραμάδες και ρωγμές του κτηριακού κελύφους και εξαερισμού

LD_SCH.mat: Καθορισμός χρονοδιαγράμματος και παραμέτρων ιδανικού συστήματος θέρμανσης - ψύξης

OP_SCH.mat: Καθορισμός χρονοδιαγράμματος για άνοιγμα παραθύρων

SRC.mat: Εκτέλεση υπολογισμών θερμικής προσομοίωσης

4. Η μέθοδος IEA BESTEST

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας και η συνεχής ανάπτυξη υπολογιστικών συστημάτων είχε ως αποτέλεσμα την εκμετάλλευσή τους για τη δημιουργία λογισμικών τα οποία έχουν τη δυνατότητα θερμικής προσομοίωσης κτηρίων.

Στην ανάπτυξη λογισμικών θερμικής προσομοίωσης, όπως το SRC που περιγράφηκε παραπάνω, ή τα EnergyPlus και TRNSYS τα οποία είναι διαθέσιμα, λόγω της πολυπλοκότητας των χρησιμοποιούμενων μοντέλων αλλά και της πληθώρας των μοντελοποιητικών παραδοχών που γίνεται, είναι αναμενόμενο να υπάρχουν αποκλίσεις στα παραγόμενα αποτελέσματα μεταξύ των διαφορετικών λογισμικών. Αρκετά συχνά, αλγοριθμικά ή σφάλματα μοντελοποίησης μπορούν να «μολύνουν» τα αποτελέσματα που εξάγονται από τέτοια λογισμικά. Είναι λοιπόν αναγκαία η ύπαρξη μιας μεθοδολογίας η οποία να επιτρέπει τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας ενός λογισμικού αλλά κυρίως τη συστηματική διάγνωση και εντοπισμό προβλημάτων σε περίπτωση αποκλίσεων.

Η μέθοδος IEA BESTEST (International Energy Asociation Building Energy Simulation TEST) αναπτύχθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (International Energy Agency, IEA). Σκοπός της ήταν η δημιουργία μιας σειράς από περιπτώσεις κτηρίων (cases) πάνω στα οποία μπορεί να γίνει αρχικά θερμική προσομοίωση από ένα λογισμικό και στη συνέχεια, αξιολόγηση του με βάση τα παραγόμενα αποτελέσματα και διάγνωση των παραμέτρων αυτών, οι οποίες προκαλούν αποκλίσεις. Οι περιπτώσεις αυτές, ξεκινούν αρχικά μοντελοποιώντας ένα εξαιρετικά απλό κτήριο μιας θερμικής ζώνης και εξελίσσονται, προσθέτοντας κάθε φορά παραμέτρους οι οποίες επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά του κτηρίου.

Η μέθοδος IEA BESTEST βρίσκεται συνεχώς σε εξέλιξη, ενώ πέρα από τη βασική σειρά περιπτώσεων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική, υπάρχουν σειρές περιπτώσεων για αξιολόγηση της μοντελοποίησης κτηρίων με πολλές θερμικές ζώνες, μοντελοποίησης συστημάτων HVAC κλπ.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, γίνεται αναλυτική περιγραφή της μεθόδου IEA BESTEST καθώς και ανάλυση των φαινομένων εκείνων που μοντελοποιούνται και επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά των κτηρίων. Επίσης, πραγματοποιείται περιγραφή των περιπτώσεων (cases) των κτηρίων που δοκιμάστηκαν κατά την αξιολόγηση των λογισμικών EnergyPlus και SRC.

4.1. Γενική περιγραφή των στοιχείων μοντελοποίησης της μεθόδου IEA BESTEST

Η μέθοδος IEA BESTEST αποτελείται από 40 περιπτώσεις θερμικής προσομοίωσης ενός βασικού κτηρίου του οποίου τα χαρακτηριστικά εναλλάσσονται κάθε φορά. Η βασική αρχική υπόθεση περιγράφει ένα ορθογώνιο κτήριο μιας θερμικής ζώνης, του οποίου οι επιφάνειες αποτελούνται από υλικά με προκαθορισμένες θερμικές ιδιότητες. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο σχήμα [4-7]. Ο εσωτερικός αέρινος όγκος του κτηρίου είναι $129,6 \text{ m}^3$. Στο νότιο τοίχο είναι τοποθετημένα δυο παράθυρα επιφάνειας το καθένα 6 m^2 . Η κάθε περίπτωση (case) είναι διαφορετική από τις άλλες αν και όλες αποτελούν παραλλαγή της βασικής αρχικής περίπτωσης. Οι διαφορές που εντοπίζονται μεταξύ των περιπτώσεων αφορούν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Τοποθέτηση των παράθυρων
- Υλικά που αποτελούν τις επιφάνειες του κτηρίου
- Στέγαστρο που προκαλεί σκίαση
- Χρονικός Προγραμματισμός συστήματος HVAC – Χρονοδιαγράμματα (Schedules)
- Θερμοστάτης
- Εσωτερικά κέρδη
- Ροή αέρα από ρωγμές και χαραμάδες στο κέλυφος
- Ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας επιφανειών
- Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας

Οι σειρές 600 και 900 αποτελούν τις περιπτώσεις κατά τις οποίες κρίνεται η εγκυρότητα των

αποτελεσμάτων ενός λογισμικού θερμικής προσομοίωσης πάνω σε κάποιες γενικευμένες περιπτώσεις κτηρίων που συνδυάζουν μεγάλο πλήθος φαινομένων τα οποία επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά του κτηρίου. Η επιτυχία ή αποτυχία ενός λογισμικού σε κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις αναδεικνύει την σωστή λειτουργία ή την ύπαρξη προβλήματος σε σχέση με μια συγκεκριμένη παράμετρο θερμικής προσομοίωσης.

Αυτές οι περιπτώσεις ελέγχουν τη δυνατότητα ενός λογισμικού να μοντελοποιεί συνδυασμένα παραμέτρους όπως παράθυρα με διαφορετικό προσανατολισμό, οριζόντιες και κάθετες επιφάνειες σκίασης, θερμοστάτες, εξαερισμό, μεταφορά θερμότητας από και προς το έδαφος και χώρους που δέχονται ηλιακή ακτινοβολία χωρίς η θερμοκρασία τους να ελέγχεται από κάποιο σύστημα HVAC.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των παραπάνω περιπτώσεων (cases) μπορεί να παρέχει κάποιες πληροφορίες όσον αφορά την ευαισθησία ενός λογισμικού σε μια παράμετρο που επηρεάζει τη θερμική προσομοίωση. Για παράδειγμα, η απόκλιση της περίπτωσης case600 με τη case610 οι οποίες είναι ίδιες με τη διαφορά ότι στη δεύτερη έχει προστεθεί ένα σκίαστρο πάνω από τα παράθυρα μπορεί να αναδείξει την ευαισθησία της προσομοίωσης ενός λογισμικού στην ύπαρξη επιφανειών σκίασης.

Οι διαγνωστικές περιπτώσεις 195 έως 320, 400 έως 440 και 800 με 810, επιχειρούν να εντοπίσουν συγκεκριμένες επιπτώσεις μεμονωμένων παραμέτρων ή αλγορίθμων, ενεργοποιώντας κάθε φορά μια συγκεκριμένη παράμετρο και έχοντας όλες τις υπόλοιπες ανενεργές ή συνδυάζοντας κάποιες από αυτές. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει θεμελιώδη προβλήματα σε βασικές αρχές λειτουργίας όπως η αγωγή θερμότητας σε τοίχους, η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή μεταξύ των τοίχων και του αέρα κλπ. Σκοπός είναι, σε περίπτωση αποτυχίας των σειρών 600 και 900, να διαγνώσουν τα αίτια που την προκάλεσαν, ελαχιστοποιώντας κάθε φορά, τον αριθμό των φαινομένων μετάδοσης θερμότητας τα οποία δημιουργούν σύγχυση στη διαδικασία διάγνωσης και εντοπισμού προβλημάτων. Πολλά λογισμικά αδυνατούν να προσομοιώσουν τις περιπτώσεις 195 έως 320 για το λόγο ότι δεν θα μπορούσαν να είναι πραγματικές.

4.2. Βασικοί κανόνες μοντελοποίησης

Για τη σωστή αξιολόγηση ενός λογισμικού θερμικής προσομοίωσης με τη μέθοδο IEA BESTEST, θα πρέπει να ακολουθούνται οι παρακάτω κανόνες:

- Η μοντελοποίηση για που γίνεται για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν αναλυτικότερη. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να χρησιμοποιείται ο μέγιστος αριθμός μοντελοποιητικών παραμέτρων.
- Οι μεταβλητές που επηρεάζουν την προσομοίωση και αλλάζουν δυναμικά, θα πρέπει να υπολογίζονται κατά τη διάρκεια της εφόσον το εκάστοτε λογισμικό έχει αυτή τη δυνατότητα. Για παράδειγμα, η μέθοδος IEA BESTEST αναφέρει συγκεκριμένες σταθερές τιμές για το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κάθε εσωτερικό τοίχο από τα παράθυρα. Παρ' όλα αυτά εάν ένα λογισμικό έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει δυναμικά αυτά τα ποσοστά τότε δε θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι σταθερές τιμές.
- Πρέπει να γίνεται αρχικοποίηση της προσομοίωσης (warming up). Δηλαδή, διαδικασία κατά την οποία γίνεται θερμική προσομοίωση για κάποιο αρχικό χρονικό διάστημα προκειμένου το κτήριο να προσαρμοστεί και να σταθεροποιηθεί σε μια λογική αρχική κατάσταση.
- Η σχεδίαση του κτιρίου στο γραφικό περιβάλλον σχεδίασης πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε τελικά ο εσωτερικός αέρινος όγκος να είναι $129,6 \text{ m}^3$. Αντίστοιχα, οι εσωτερικές αποστάσεις των τοίχων πρέπει να είναι 6m και 8m και η απόσταση πατώματος και ταβανιού 2,7m.
- Η μονάδα μέτρησης του χρόνου που χρησιμοποιείται είναι η ηλιακή ώρα. Επίσης, η πρώτη ώρα της προσομοίωσης (hour 1) περιγράφει το διάστημα από την 00:00 στην 00:59 πμ.
- Σε περίπτωση που σε ένα λογισμικό, δε μπορούν να προσδιοριστούν κάποιες παράμετροι τότε θα πρέπει είτε να αγνοηθούν είτε να προσδιοριστούν με προσεγγιστικές μεθόδους και με βάση τις τιμές που προτείνονται.

4.3. Γενική περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε

Κατά την παρούσα διπλωματική, οι περιπτώσεις κατά τις οποίες έγινε η προσομοίωση και αξιολόγηση των λογισμικών θερμικής προσομοίωσης περιλάμβανε αρχικά την περίπτωση 600. Ακλούθησε προσομοίωση των διαγνωστικών περιπτώσεων, αφού αρχικά παρατηρήθηκαν αποκλείσεις στη περίπτωση και έγινε προσπάθεια επίλυσης των αντίστοιχων προβλημάτων και διάγνωσης των παραμέτρων που τις προκαλούσαν. Επίσης, προσομοιώθηκαν οι περιπτώσεις (cases) 195 και 600 κατά τις οποίες το κτήριο δεν θερμαίνεται η ψύχεται από κάποιο σύστημα HVAC και η θερμοκρασία ζώνης του κτηρίου επηρεάζεται μόνο από τα φυσικά φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας και όχι από κάποιο μηχανικό σύστημα.

Μετά το πέρας της προσομοίωσης των παραπάνω περιπτώσεων συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα κυρίως μεταξύ του λογισμικού EenergyPlus και SRC και εξετάστηκε η διαφορά των αποτελεσμάτων μεταξύ συγκεκριμένων περιπτώσεων προκειμένου να αξιολογηθεί η ευαισθησία του κάθε λογισμικού σε μια παράμετρο που επηρεάζει την θερμική συμπεριφορά του κτηρίου.

Πρέπει να τονισθεί ότι δεν υπάρχει κάποιο διάστημα τιμών μέσα στο οποίο πρέπει να βρίσκεται το αποτέλεσμα μιας συγκεκριμένης προσομοίωσης προκειμένου να θεωρηθεί επιτυχής. Η επιτυχία ή όχι της κάθε περίπτωσης, επαφίεται στον χρήστη ο οποίος πρέπει να εκτιμήσει την επιθυμητή ακρίβεια.

Τα βασικά κριτήρια σύμφωνα με τα οποία έγινε η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι τα εξής:

- Μεγίστη και ελάχιστη τιμή θερμικών φορτίων για τη θέρμανση και ψύξη του κτηρίου, που έχει παρατηρηθεί σε παλαιότερες αξιολογήσεις άλλων λογισμικών
- Απόκλιση από την μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή σε περίπτωση που το αποτέλεσμα βρίσκεται εκτός αυτού του διαστήματος.
- Διαφορά τιμών ποικίλων μεταβλητών, όπως η θερμοκρασία ζώνης και η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε εξωτερικές επιφάνειες ανά τετραγωνικό μέτρο, μεταξύ των λογισμικών σε κάθε χρονικό βήμα.
- Ευαισθησία σε παραμέτρους που επηρεάζουν τη θερμική προσομοίωση.

4.4. Βασικά στοιχεία της μοντελοποίησης

4.4.1 Μετεωρολογικές συνθήκες και θερμική κατάσταση εδάφους

Για να γίνει οποιαδήποτε θερμική προσομοίωση πρέπει να γίνει χρήση μετεωρολογικών δεδομένων που αφορούν την περιοχή όπου βρίσκεται το κτήριο. Αυτά συνήθως υπάρχουν σε κάποιο αρχείο το οποίο περιέχει πληροφορίες που αφορούν καιρικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η βροχόπτωση, η θερμοκρασία εδάφους και η ηλιακή ακτινοβολία. Οι πλέον ευρέως διαδεδομένες μορφές είναι οι EPW, CSV και TMY. Τα περισσότερα λογισμικά θερμικής προσομοίωσης χρησιμοποιούν μια από αυτές τις μορφές αρχείων ενώ υπάρχει και η δυνατότητα εύκολης μετατροπής από τη μια μορφή στην άλλη με τη χρήση κατάλληλου μετατροπέα.

Τα δεδομένα είναι καταγεγραμμένα ανά χρονικό βήμα μιας ώρας, προκειμένου να είναι αντίστοιχα εφικτή η αξιοποίησή τους, αφού η διαδικασία της θερμικής προσομοίωσης εξελίσσεται σε διακριτά χρονικά βήματα. Βέβαια, εάν η εκτέλεση της θερμικής προσομοίωσης πραγματοποιείται με χρονικό βήμα μικρότερο της μιας ώρας, τότε ο υπολογισμός των καιρικών δεδομένων για τις χρονικές στιγμές που δεν δίνεται μπορεί να γίνει με γραμμική παρεμβολή.

Ο πίνακας που ακολουθεί, εμπεριέχει συνοπτικά πληροφορίες που αφορούν το αρχείο καιρού το οποίο χρησιμοποιείται κατά την εφαρμογή της μεθόδου IEA BESTEST.

Πίνακας 4-1 - Χαρακτηριστικά τοποθεσίας & καιρού κατά την εφαρμογή της μεθόδου IEA BESTEST

Περιγραφή καιρού	Ψυχροί χειμώνες / ζεστά ξέρα καλοκαίρια
Είδος Αρχείου Καιρού	TMY
Γεωγραφικό Πλάτος	39,8 βόρεια
Γεωγραφικό Μήκος	104,9 ανατολικά

Υψόμετρο	1609 m
Αντανάκλαση Εδάφους	0,2
Ζώνη Ώρας	7
Τοποθεσία Κτηρίου	Επίπεδη, χωρίς εμπόδια, τοποθετημένη ακριβώς στον μετρολογικό σταθμό
Μέση ταχύτητα ανέμου σε ένα Χρόνο	4,02 m/s
Μέγιστη ταχύτητα ανέμου σε ένα Χρόνο	14,89 m/s
Θερμοκρασία Εδάφους	10 °C
Μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος ξηρού βολβού	9,71 °C
Ελάχιστη θερμοκρασία ξηρού βολβού	-24,39 °C
Μέγιστη θερμοκρασία ξηρού βολβού	35,00 °C
Βαθμός Θέρμανσης Ημερών	3636,2 °C - days
Βαθμός Ψύξης Ημερών	487,1 °C - days
Μέσο σημείο δρόσου	-1,44 °C
Μέσο ποσοστό υγρασίας	0,0047
Συνολική ετήσια οριζόντια ακτινοβολία	1831,82 $\frac{kWh}{m^2}$
Συνολική ετήσια απευθείας κάθετη ηλιακή ακτινοβολία	2353,58 $\frac{kWh}{m^2}$
Συνολική ετήσια απευθείας οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία	1339,48 $\frac{kWh}{m^2}$
Συνολική ετήσια διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία	492,34 $\frac{kWh}{m^2}$

4.4.2 Ροή αέρα από χαραμάδες και ρωγμές του κτηριακού κελύφους (infiltration)

Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται ροή αέρα σε ένα κτήριο, από ρωγμές ή μικρές χαραμάδες που υπάρχουν στο κέλυφος του, λόγω της διαφοράς πίεσης του εξωτερικού περιβάλλοντος και του εσωτερικού χώρου. Τέτοιες ρωγμές ή χαραμάδες εντοπίζονται σε παράθυρα, σε σημεία μόνωσης και όπου αλλού δεν κλείνει πλήρως το κέλυφος του.

Η ροή αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους σε ένα κτήριο μπορεί να μετρηθεί με διάφορους τρόπους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δίνεται σαν το ποσοστό του αέρινου όγκου που ανανεώνεται σε μια ώρα και η μονάδα μέτρησης είναι ACH (air changes per hour) η οποία παραμένει σταθερή σε όλες τις περιπτώσεις.

Η περιοχή στην οποία βρίσκεται θεωρητικά το κτήριο, είναι σε υψόμετρο 1609 μέτρων. Κατά συνέπεια, η πυκνότητα του αέρα είναι περίπου 20% μικρότερη από ότι είναι στο επίπεδο της θάλασσας.

Πολλά λογισμικά λαμβάνουν υπόψη το υψόμετρο και μετατρέπουν αυτόματα την πυκνότητα του αέρα. Έτσι, η ροή αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους είναι η εξής:

Πίνακας 4-2 - Ροή αέρα από ρωγμές και μικρά ανοίγματα

Λογισμικά που λαμβάνουν υπόψη το υψόμετρο	0,5 ACH
Λογισμικά που δεν λαμβάνουν υπόψη το υψόμετρο	0,41 ACH

Η φυσική σημασία των παραπάνω τιμών είναι η εξής. Ανά μια ώρα, ο αέρινος όγκος θα έχει ανανεωθεί κατά 0,5 ή 0,41 φορές αντίστοιχα.

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας του αέρα σε συνάρτηση με το ύψος χρησιμοποιείται η εξής σχέση:

$$\rho_{elev} = \rho_{sealevel} * e^{a * elev}$$

Όπου:

ρ_{elev} Η πυκνότητα του αέρα στο συγκεκριμένο υψόμετρο ($\frac{kg}{m^3}$)

$\rho_{sealevel}$ Η πυκνότητα του αέρα στο επίπεδο της θάλασσας ($\frac{kg}{m^3}$)

a Σταθερά που ισούται με $-1,219755 \cdot 10^{-4}$ ανά m^{-1}

$elev$ Το υψόμετρο (m)

4.4.3 Εσωτερικά κέρδη (Internal gains)

Τα εσωτερικά κέρδη προέρχονται από πηγές θερμότητας οι οποίες δεν περιλαμβάνονται σε κάποιο σύστημα HVAC. Τέτοιες πηγές είναι τα φώτα, οι ηλεκτρικές συσκευές, οι άνθρωποι κ.λ.π. Μέρος της θερμότητας που παράγεται, μεταφέρεται απευθείας από τον αέρα της ζώνης λόγω συναγωγής ενώ το υπόλοιπο μεταδίδεται στους τοίχους σαν ακτινοβολία. Τέλος, θεωρούμε ότι ο αέρας της ζώνης είναι αρραίος και δεν απορροφά θερμότητα λόγω ακτινοβολίας.

Στα περιπτώσεις που υπάρχουν εσωτερικά κέρδη, η τιμή που λαμβάνεται είναι 200 Watt και είναι σταθερή. Το ποσοστό των εσωτερικών κερδών που απορροφάται από τους τοίχους με τη μορφή ακτινοβολίας είναι 60% και το υπόλοιπο 40% απορροφάται από τον αέρα της ζώνης μέσω συναγωγής.

4.4.4 Συντελεστές συναγωγής και ακτινοβολίας

Οι συντελεστές συναγωγής του αέρα εντός και εκτός του κτηρίου μεταβάλλονται δυναμικά και εξαρτώνται από παράγοντες που αφορούν τις ιδιότητες του αέρα, την κίνηση και την ταχύτητα του.

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και μιας εξωτερικής επιφάνειας μέσω συναγωγής μετράται από την παρακάτω σχέση:

$$Q = h_{conv} * A * (T_S - T_{env})$$

Όπου:

h_{conv} Ο συντελεστής συναγωγής $\frac{W}{m^2 K}$

A Το εμβαδόν της επιφάνειας (m^2)

T_S Η θερμοκρασία της εξωτερικής πλευράς του τοίχου (K)

T_{env} Η θερμοκρασία περιβάλλοντος (K)

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και μιας εξωτερικής επιφάνειας μέσω ακτινοβολίας μετράται από την παρακάτω σχέση:

$$Q = \varepsilon * A * (T_S^4 - T_{env}^4) =$$

$$Q = \varepsilon * \sigma * A * (T_S^2 + T_{env}^2) * (T_S + T_{env}) * (T_S - T_{env})$$

Όπου :

σ Η σταθερά Stefan – Boltzmann $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

ε Η ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας μιας επιφάνειας και $0 \leq \varepsilon \leq 1$

A Το εμβαδόν της επιφάνειας (m^2)

T_S Η θερμοκρασία της επιφάνειας ($^{\circ}C$)

T_{env} Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (°C)

Θέτοντας :

$$h_r = e * \sigma * (T_S^2 + T_{env}^2) * (T_S + T_{env})$$

Η σχέση της ακτινοβολίας γράφεται ως εξής:

$$Q = h_r * A * (T_S - T_{env})$$

Θέτοντας :

$$h_{comb} = h_{conv} + h_r$$

Ως το συνδυασμένο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας και συνδυάζοντας τις σχέσεις μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία έχουμε:

$$Q_{conv,rad} = h_{comb} * A * (T_S - T_{env})$$

Όπου:

$Q_{conv,rad}$ Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης θερμότητας από συναγωγή και ακτινοβολία
:

Σε περίπτωση που ένα λογισμικό μπορεί να υπολογίζει σε κάθε χρονικό βήμα τους συντελεστές συναγωγής και ακτινοβολίας με τη χρήση αλγορίθμου τότε θα πρέπει να αξιοποιείται αυτή η δυνατότητα. Σε διαφορετική περίπτωση οι συνδυασμένοι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας λαμβάνονται με βάση τους παρακάτω πίνακες. Οι πιο διαδεδομένοι αλγόριθμοι για τον υπολογισμό των παραπάνω συντελεστών είναι οι εξής(15):

- TARP
- Ceiling Diffuser
- Adaptive Convection Algorithm
- DOE-2
- MoWiTT

Πίνακας 4-3 - Συνδυασμένος συντελεστής συναγωγής & ακτινοβολίας εξωτερικών τοίχων

Υλικό	Ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας επιφάνειας 0,9	Ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας επιφάνειας 0,1
Τούβλο ή τραχύ πλαστικό	$29,3 \frac{W}{m^2 K}$	$25,2 \frac{W}{m^2 K}$
Γυαλί ή λεία επιφάνεια	$21,0 \frac{W}{m^2 K}$	$16,9 \frac{W}{m^2 K}$

Πίνακας 4-4 - Συνδυασμένος συντελεστής συναγωγής & ακτινοβολίας εσωτερικών τοίχων

Κατεύθυνση επιφάνειας και ροή θερμότητας	Ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας επιφάνειας, 0,9	Ικανότητα εκπομπής επιφάνειας, 0,1
Οριζόντια μετάδοση θερμότητας σε κάθετες επιφάνειες	$8,29 \frac{W}{m^2 K}$	$3,73 \frac{W}{m^2 K}$
Μετάδοση θερμότητας προς τα πάνω σε οριζόντιες επιφάνειες	$9,26 \frac{W}{m^2 K}$	$4,70 \frac{W}{m^2 K}$
Μετάδοση θερμότητας προς τα κάτω σε οριζόντιες επιφάνειες	$6,13 \frac{W}{m^2 K}$	$1,57 \frac{W}{m^2 K}$
Μετάδοση θερμότητας προς τα πάνω σε επιφάνειες με κλίση 45	$9,03 \frac{W}{m^2 K}$	$4,53 \frac{W}{m^2 K}$

Μετάδοση θερμότητας προς τα κάτω σε επιφάνειες με κλίση 45	$7,50 \frac{W}{m^2K}$	$2,94 \frac{W}{m^2K}$
--	-----------------------	-----------------------

Πίνακας 4-5 - Συντελεστής ακτινοβολίας

Επιφάνεια τοίχου	Ικανότητα εκπομπής 0,9	Ικανότητα εκπομπής 0,9
Εξωτερική	$5,13 \frac{W}{m^2K}$	$0,57 \frac{W}{m^2K}$
Εσωτερική	$0,84 \frac{W}{m^2K}$	$0,84 \frac{W}{m^2K}$

4.4.5 Διαφανές παράθυρο

Όλα τα λογισμικά, χρησιμοποιούν μια σειρά από μεταβλητές προκειμένου να καθορίσουν την διαπερατότητα, την αντανάκλαση και την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από ένα παράθυρο. Τέτοιες μεταβλητές είναι η διάθλαση του φωτός, το πάχος του υαλοπίνακα, ο αριθμός των υαλοπινάκων σε ένα παράθυρο, η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στον υαλοπίνακα κλπ.

Ακολουθεί πίνακας με τα βασικότερα χαρακτηριστικά των παραθύρων που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο αξιολόγησης καθώς και πίνακας με την διαπερατότητα σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης. Για γωνίες οι οποίες δεν αναφέρονται στον δεύτερο πίνακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί γραμμική παρεμβολή για τον υπολογισμό της αντίστοιχης τιμής της διαπερατότητας.

Πίνακας 4-6 - Ιδιότητες παραθύρου

Ιδιότητα	Τιμή
Συντελεστής διάθλασης	0,0196 ανά mm
Αριθμός υαλοπινάκων	2
Πάχος υαλοπίνακα	3,175 mm
Πάχος κενού με αέρα	13 mm
Δείκτης διάθλασης	1526
Απευθείας διαπερατότητα από ένα υαλοπίνακα στον αέρα	0,86156
Αγωγιμότητα γυαλιού	$1,96 \frac{W}{m K}$
U – value υαλοπίνακα	$333 \frac{W}{m^2K}$ ($R=0,003 \frac{m^2K}{W}$)
Συνδυασμένος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας κενού με αέρα	$21,00 \frac{W}{m^2K}$ ($R=0,4776 \frac{m^2K}{W}$)
Εξωτερικός συνδυασμένος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας (περιβάλλον – εξωτερικός τοίχος)	$8,29 \frac{W}{m^2K}$ ($R=0,1206 \frac{m^2K}{W}$)
Εσωτερικός συνδυασμένος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας (εσωτερικός τοίχος – εσωτερικός αέρινος όγκος)	$333 \frac{W}{m^2K}$ ($R=0,003 \frac{m^2K}{W}$)

Ιδιότητα	Τιμή
U – value από εξωτερικό περιβάλλον στο εσωτερικό της θερμικής ζώνης	$3 \frac{W}{m^2 K}$ ($R=0,333 \frac{m^2 K}{W}$)
Διαπερατότητα υπέρυθρης ακτινοβολίας υαλοπίνακα	0,84
Πυκνότητα γυαλιού	$2500 \frac{kg}{m^3}$
Ειδική θερμοχωρητικότητα γυαλιού	$750 \frac{J}{kg K}$
Εμπόδια όπως περσίδες, κολώνες κλπ	όχι
Συντελεστής σκίασης παραθύρου, για γωνία πρόσπτωσης 0	0,916
Συντελεστής απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας παραθύρου	0,787

Πίνακας 4-7 - Διαπερατότητα παραθύρου υπό συγκεκριμένες γωνίες

Γωνία πρόσπτωσης	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Διαπερατότητα	0,74745	0,74682	0,74465	0,73989	0,72983	0,70733	0,65233	0,51675	0,26301

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, όσο αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης των ακτινών του Ήλιου στο παράθυρο, τόσο μικραίνει η διαπερατότητα, δηλαδή το ποσοστό που περνάει μέσα και δεν ανακλάται. Αυτό συμβαίνει διότι όταν μια ακτίνα φωτός προσπίπτει σε μια διάφανη επιφάνεια υπό γωνία θ_1 , τότε ένα ποσο του φωτός θα διαπερασει την επιφάνεια και θα διαθλαστεί, δηλαδή να εξέλθει υπό διαφορετική γωνία θ_2 , ενώ το υπολοιπο ποσοστό του φωτός θα ανακλαστεί. Το ποσοστό ανάκλασης του φωτός μπορεί να υπολογιστεί. Αρχικά υπολογίζονται δυο ποσοστό ανάκλασης R_s και R_p τα οποία συσχετίζονται με την πόλωση του φωτός. Έτσι:

$$R_s = \left| \frac{n_1 * \cos \theta_i - n_2 * \cos \theta_t}{n_1 * \cos \theta_i + n_2 * \cos \theta_t} \right|^2$$

Και

$$R_p = \left| \frac{n_1 * \cos \theta_t - n_2 * \cos \theta_i}{n_1 * \cos \theta_t + n_2 * \cos \theta_i} \right|^2$$

Όπου:

n_1 Ο δείκτης διάθλασης του πρώτου υλικού

n_2 Ο δείκτης διάθλασης του δευτέρου υλικού

θ_t Η γωνία διάθλασης του φωτός (rad)

θ_i Η γωνία πρόσπτωσης του φωτός στην επιφάνεια (rad)

Το συνολικό ποσοστό ανάκλασης του φωτός είναι:

$$R = \frac{R_s + R_p}{2}$$

Ενώ το ποσοστό T που περνάει στην επιφάνεια είναι το εξής:

$$T = 1 - R$$

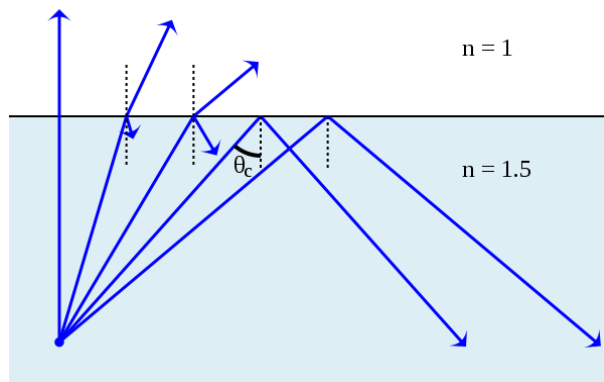
Επίσης, ακόμα και άμα μια ακτίνα φωτός πέσει κάθετα πάνω σε μια διάφανη επιφάνεια, τότε ένα ποσοστό της θα απορροφηθεί από αυτή. Έτσι, η διαπερατότητα ενός διάφανου υλικού περιγράφεται ως εξής:

$$T_{\lambda} = \frac{I}{I_0}$$

Όπου:

I : Η ένταση του φωτός όταν έχει εξέλθει από τη διάφανη επιφάνεια

I_0 Η ένταση του φωτός όταν εισέρχεται στην διάφανη επιφάνεια.



Σχήμα 4-1: Διάθλαση και ανάκλαση φωτός υπό διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης(3)

4.4.6 Επιφάνεια Σκίασης

Σε ορισμένες περιπτώσεις μοντελοποίησης, το κτήριο έχει επιφάνειες σκίασης στους εξωτερικούς τοίχους οι οποίοι έχουν παράθυρα. Έτσι, μπορεί να μετρηθεί και να αξιολογηθεί η ευαισθησία και η συμπεριφορά ενός λογισμικού στις συνθήκες σκίασης.

4.4.7 Κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας στις εσωτερικές επιφάνειες

Το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο εσωτερικό ενός κτηρίου και διανέμεται στις εσωτερικές του επιφάνειες είναι συνάρτηση της θέσης του ηλίου στον ουράνιο θόλο, της θέσης που είναι τοποθετημένο το κάθε παράθυρο και της ύπαρξης εμποδίων εντός του εσωτερικού του κάθε κτηρίου. Κατά την αξιολόγηση λογισμικών θερμικής προσομοίωσης με τη μέθοδο IEA BESTEST θεωρείται ότι δεν υπάρχουν εσωτερικά εμπόδια όπως έπιπλα κλπ.

Σε περίπτωση που ένα λογισμικό έχει τη δυνατότητα υπολογισμού αυτού του ποσοστού με τη χρήση αλγορίθμου τότε θα πρέπει να αξιοποιηθεί. Σε αντίθετη περίπτωση, πρέπει να θεωρηθεί ότι αρχικά όλη η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στο πάτωμα και στη συνέχεια διανέμεται στους υπολοίπους τοίχους σύμφωνα με τους παρακάτω πίνακες. Το ποσοστό που αναφέρεται είναι συνάρτηση της θέσης των παραθύρων και του συντελεστή απορρόφησης ακτινοβολίας μικρούς μήκους (solar absorption) η οποία συμβολίζεται με το ελληνικό α.

Πίνακας 4-8 - Ποσοστό πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε επιφάνεια

Επιφάνεια	Νότια παράθυρα – $\alpha=0,6$	Δυτικά & ανατολικά παράθυρα – $\alpha=0,6$	Νότια παράθυρα – $\alpha=0,9$	Δυτικά & ανατολικά παράθυρα – $\alpha=0,9$	Νότια παράθυρα – $\alpha=0,1$	Πρόσθετη θερμική ζώνη περίπτωσης 960
Πάτωμα	0,6420	0,6420	0,6510	0,6510	0,2440	0,60
Οροφή	0,1680	0,1680	0,1770	0,1770	0,1910	0,06

Επιφάνεια	Νότια παράθυρα – α=0,6	Δυτικά & ανατολικά παράθυρα – α=0,6	Νότια παράθυρα – α=0,9	Δυτικά & ανατολικά παράθυρα – α=0,9	Νότια παράθυρα – α=0,1	Πρόσθετη θερμική ζώνη περίπτωσης 960
Ανατολίτικος τοίχος	0,0380	0,0250	0,0410	0,0270	0,0570	0,02
Δυτικός Τοίχος	0,0380	0,0250	0,0410	0,0270	0,0570	0,02
Βόρειος Τοίχος	0,0530	0,05250	0,0560	0,0560	0,0820	0,2
Νότιος Τοίχος	0,0260	0,05250	0,0280	0,0560	0,0650	0,03
Ακτινοβολία που χάνεται από τα παράθυρα	0,0350	0,0350	0,0060	0,0060	0,3040	0,07

Οι παραπάνω κλασματικές τιμές έχουν προκύψει με βάση τις παρακάτω υποθέσεις:

- Ο αέρινος όγκος της ζώνης δεν απορροφά απευθείας ηλιακή ακτινοβολία.
- Όλη η ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται εντός του κτηρίου προσπίπτει αρχικά στο πάτωμα.
- Το ποσοστό της ακτινοβολίας που αρχικά προσπίπτει στο πάτωμα είναι ο συντελεστής απορρόφησης ακτινοβολίας μικρού μήκους του πατώματος.
- Το υπόλοιπο ποσοστό ακτινοβολίας που ανακλάται από το πάτωμα, κατανέμεται στις υπόλοιπες επιφάνειες ανάλογα με τον τρόπο που βλέπουν η μια την άλλη.
- Το ποσοστό απορρόφησης ακτινοβολίας από τις επιφάνειες εκτός του πατώματος είναι ο αντίστοιχος συντελεστής απορρόφησης ακτινοβολίας μικρού μήκους.
- Το υπόλοιπο ποσοστό ακτινοβολίας που ανακλάται από μια εσωτερική επιφάνεια, κατανέμεται στις υπόλοιπες ανάλογα με τον τρόπο που βλέπουν η μια την άλλη.

4.4.7.1 Το ηλιακό μονοπάτι

Ηλιακό μονοπάτι ονομάζεται η πορεία που ακολουθεί ο ήλιος στον ουράνιο θόλο. Το υψηλότερο σημείο που φθίνει ο ήλιος, είναι την ώρα του ηλιακού μεσημεριού. Για να περιγράψει η θέση του Ήλιου σε σχέση με ένα σημείο στη Γη, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν τέσσερις γωνίες(18):

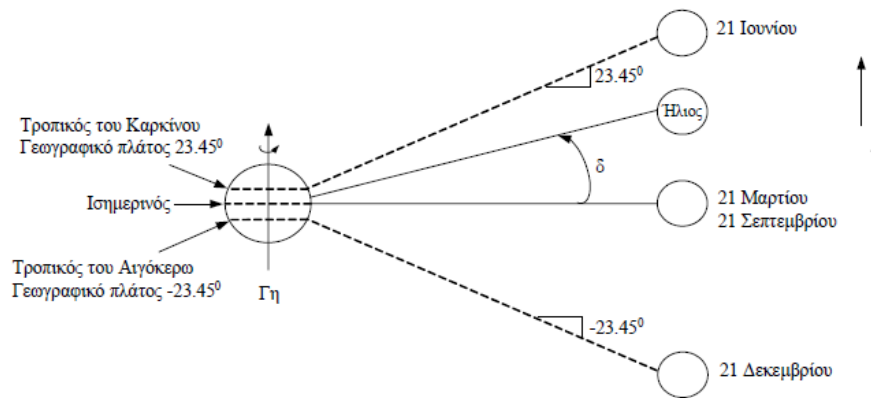
1. Η ηλιακή απόκλιση
2. Γωνία ύψους του Ήλιου
3. Γωνία ώρας
4. Γωνία αζιμούθιου

Η ηλιακή απόκλιση είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του επιπέδου του ισημερινού και της ευθείας γραμμής που ενώνει το κέντρο του ήλιου με το κέντρο της γης και η απόκλιση της μεταβάλλεται από -23.45° έως 23.45°. Έτσι η ηλιακή απόκλιση είναι:

$$\delta = 23,45 * \sin \left[\frac{360 * (n - 81)}{365} \right]$$

Όπου:

n Ο αριθμός της ημέρας του χρόνου



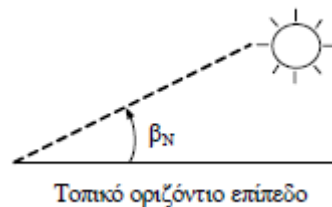
Σχήμα 4-2: Ηλιακή απόκλιση δ (18)

Η γωνία ύψους του Ήλιου υπολογίζεται ως εξής:

$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta$$

Όπου:

L Το γεωγραφικό πλάτος του σημείου (μοίρες)



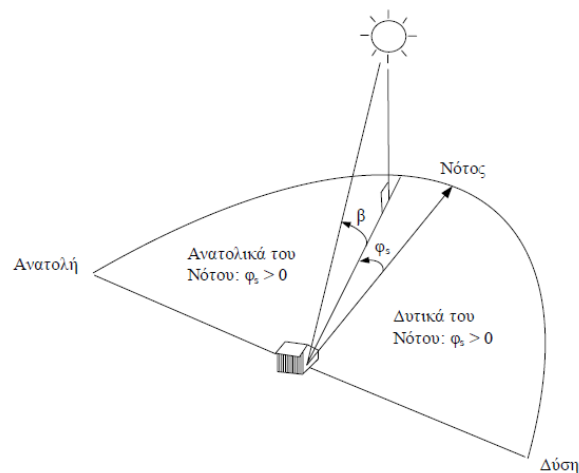
Σχήμα 4-3: Γωνία ύψους του ηλίου(18)

Η γωνία ώρας του Ήλιου είναι ο αριθμός των μοιρών που χρειάζονται για την περιστροφή του Ήλιου, μέχρι να φτάσει το ηλιακό μεσημέρι και ορίζεται ως εξής:

$$H = \left[\frac{15^\circ}{\text{ώρα}} \right] * (\text{αριθμός ωρών πριν το ηλιακό μεσημέρι})$$

Τέλος η γωνία αζιμούθιου του ηλίου είναι:

$$\sin \varphi_s = \frac{\cos \delta * \sin H}{\cos \beta_N}$$



Σχήμα 4-4: Γωνία αζιμούθιου(18)

4.4.8 Σύστημα θέρμανσης, ψύξης και εξαερισμού – HVAC

Χαρακτηριστικά του συστήματος HVAC:

- Το σύστημα HVAC επηρεάζει τη θερμοκρασία της ζώνης μόνο μέσω συναγωγής και καθόλου μέσω ακτινοβολίας.
- Ο θερμοστάτης μετράει τη θερμοκρασία μόνο του αέρα της ζώνης.
- Ο θερμοστάτης είναι τύπου ON/OFF
- Το σύστημα HVAC είναι ιδανικό, δηλαδή ο βαθμός απόδοσης του είναι 100%.
- Η λειτουργία του συστήματος HVAC δεν έχει καθόλου θερμικές απώλειες λόγω της λειτουργίας του μηχανολογικοί μέρους όπως πχ. τριβές που αναπτύσσονται λόγω της περιστροφής του ανεμιστήρα.
- Η δυνατότητα παροχής θερμικού φορτίου είναι θεωρητικά άπειρη (1 MWh)

4.4.9 Θερμοστάτης και Χρονικός Προγραμματισμός HVAC (schedule)

Ο θερμοστάτης είναι ένα σύστημα που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της θερμοκρασίας ενός χώρου. Ο τρόπος λειτουργίας του είναι ο εξής. Μετράει την θερμοκρασία του αέρα ενός χώρου και άμα αυτή είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από μια συγκεκριμένη τιμή, τότε ενεργοποιεί το σύστημα HVAC προκειμένου να τον ζεστάνει ή να τον ψύξει αντίστοιχα.

Ο χρονικός προγραμματισμός HVAC (schedule), αναφέρεται στην ενεργοποίηση του συστήματος HVAC συναρτήσει του χρόνου. Για παράδειγμα, ένας θερμοστάτης μπορεί να είναι προγραμματισμένος να ενεργοποιεί το σύστημα θέρμανσης αν η θερμοκρασία ενός χώρου πέσει κάτω από τους 18 °C. Παρ' όλα αυτά, άμα ο χρονικός προγραμματισμός του συστήματος HVAC είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε η θέρμανση του χώρου να γίνεται μόνο εργάσιμες μέρες της εβδομάδας, τότε άμα η θερμοκρασία του χώρου πέσει κάτω από τους 18 °C το σαββατοκύριακο τότε το σύστημα θέρμανσης δε θα ενεργοποιηθεί.

Τα ειδή των schedules που εφαρμόζονται στη μέθοδο BESTEST είναι α εξής:

20,20 – Bang Bang

- Θέρμανση = ON εάν θερμοκρασία < 20 °C
- Ψύξη = ON εάν θερμοκρασία > 20 °C

20,27 – Deadband

- Θέρμανση = ON εάν θερμοκρασία < 20 °C
- Ψύξη = ON εάν θερμοκρασία > 27 °C

Setback

- Θέρμανση = ON εάν θερμοκρασία < 10 °C, από 23:00 έως 07:00
- Θέρμανση = ON εάν θερμοκρασία < 20 °C, από 07:00 έως 23:00
- Ψύξη = ON εάν θερμοκρασία > 27 °C, από 00:00 έως 24:00

Venting – Εξαερισμός

- Ανεμιστήρας εξαερισμού = ON, από 18:00 έως 07:00
- Ανεμιστήρας αερισμού = OFF, από 07:00 έως 18:00
- Θέρμανση = OFF, από 00:00 έως 24:00
- Ψύξη = OFF, από 18:00 έως 07:00
- Ψύξη = ON εάν θερμοκρασία > 27 C, από 07:00 έως 18:00

Πίνακας 4-9 - Παροχή ανεμιστήρα

Δυνατότητα λογισμικού	$\frac{m^3}{s}$	Εναλλαγές αέρα ανά ώρα (ACH)
Λογισμικά που λαμβάνουν υπόψη το υψόμετρο	1703,16	13,14

Δυνατότητα λογισμικού	$\frac{m^3}{s}$	Εναλλαγές αέρα ανά ώρα (ACH)
Λογισμικά που δεν λαμβάνουν υπόψη το υψόμετρο	1400	10,80

4.4.10 Αποτελέσματα που συγκρίνονται

- Ετήσιο φορτίο θέρμανσης και ψύξης για όλες τις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται σύστημα HVAC (MWh)
- Μέγιστος ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (kW)
- Θερμοκρασία αέρα ζώνης ανά χρονικό βήμα
- Μεγίστη και ελάχιστη θερμοκρασία αέρα για τις περιπτώσεις που δεν χρησιμοποιείται σύστημα HVAC.
- Ακτινοβολία που προσπίπτει στους εξωτερικούς τοίχους.

4.4.11 Υλικά μικρής θερμικής αντίστασης – Diagnostic Cases & Cases 600-650

Πίνακας 4-10 - Εξωτερικοί τοίχοι

Υλικό	$k (\frac{W}{m K})$	Πάχος (m)	$U (\frac{W}{m^2 K})$	$R (\frac{m^2 K}{W})$	$\rho (\frac{kg}{m^3})$	$C_p (\frac{J}{kg K})$
Ξύλο	0,14	0,009	15,556	0,064	950,00	900,00
Στρώμα υαλοβάμβακα	0,04	0,066	0,606	1,650	12,00	840,00
Γυψοσανίδα	0,16	0,012	13,333	0,075	530,00	840,00

Πίνακας 4-11 - Πάτωμα

Υλικό	$k (\frac{W}{m K})$	Πάχος (m)	$U (\frac{W}{m^2 K})$	$R (\frac{m^2 K}{W})$	$\rho (\frac{kg}{m^3})$	$C_p (\frac{J}{kg K})$
Μόνωση	0,04	1,003	0,04	25,075	-	-
Ξύλινο πάτωμα	0,14	0,025	5,60	0,179	650,00	1200,00

Η μόνωση του πατώματος υπάρχει μόνο για να εμποδίσει τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ εδάφους και αέρα ζώνης. Δεν μπορεί να αποθηκεύσει καθόλου θερμότητα. Γι' αυτό η πυκνότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα δεν έχουν συγκεκριμένη τιμή. Πρέπει κατά την μοντελοποίηση και τον καθορισμό των θερμικών ιδιοτήτων να πάρουν τη μικρότερη δυνατή τιμή.

Πίνακας 4-12 - Οροφή

Υλικό	$k (\frac{W}{m K})$	Πάχος (m)	$U (\frac{W}{m^2 K})$	$R (\frac{m^2 K}{W})$	$\rho (\frac{kg}{m^3})$	$C_p (\frac{J}{kg K})$
Εξωτερικό υλικό οροφής	0,14	0,019	7,368	0,136	530,00	900,00
Στρώμα υαλοβάμβακα	0,04	0,1118	0,358	2,794	12,00	840,00

Υλικό	$k (\frac{W}{m K})$	Πάχος (m)	$U (\frac{W}{m^2 K})$	$R (\frac{m^2 K}{W})$	$\rho (\frac{kg}{m^3})$	$C_p (\frac{J}{kg K})$
Γυψοσανίδα	0,16	0,010	16,000	0,063	530,00	840,00

4.4.12 Υλικά μεγάλης θερμικής αντίστασης - Cases 900-960

Πίνακας 4-13 - Εξωτερικοί τοίχοι

Υλικό	$k (\frac{W}{m K})$	Πάχος (m)	$U (\frac{W}{m^2 K})$	$R (\frac{m^2 K}{W})$	$\rho (\frac{kg}{m^3})$	$C_p (\frac{J}{kg K})$
Ξύλο	0,14	0,0090	15,556	0,064	950,00	900,00
Αφρός μόνωσης	0,04	0,0615	0,651	1,537	10,00	1400,00
Τσιμέντο	0,51	0,0100	5,100	0,196	1400,00	1000,00

Πίνακας 4-14 - Πάτωμα

Υλικό	$k (\frac{W}{m K})$	Πάχος (m)	$U (\frac{W}{m^2 K})$	$R (\frac{m^2 K}{W})$	$\rho (\frac{kg}{m^3})$	$C_p (\frac{J}{kg K})$
Μόνωση	0,04	1,007	0,04	25,075	-	-
Τσιμέντο	1,13	0,080	14,125	0,071	1400,00	1000,00

Αντίστοιχα με την προηγούμενη ενότητα, η μόνωση του πατώματος υπάρχει μόνο για να περιορίσει τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ εδάφους και αέρα ζώνης. Δεν μπορεί να αποθηκεύσει καθόλου θερμότητα. Η πυκνότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα δεν έχουν συγκεκριμένη τιμή μιας και θεωρείται ότι δεν υπάρχει αποθήκευση θερμότητας από το έδαφος. Πρέπει κατά την μοντελοποίηση και τον καθορισμό των θερμικών ιδιοτήτων να πάρουν τη μικρότερη δυνατή τιμή.

Πίνακας 4-15 - Οροφή

Υλικό	$k (\frac{W}{m K})$	Πάχος (m)	$U (\frac{W}{m^2 K})$	$R (\frac{m^2 K}{W})$	$\rho (\frac{kg}{m^3})$	$C_p (\frac{J}{kg K})$
Εξωτερικό υλικό οροφής	0,14	0,019	7,368	0,136	530,00	900,00
Υαλοβάμβακας	0,04	0,1118	0,358	2,794	12,00	840,00
Γυψοσανίδα	0,16	0,010	16,000	0,063	530,00	840,00

4.4.13 Τοίχος υψηλής θερμικής αγωγιμότητας

Πίνακας 4-16 - Υλικά τοίχου υψηλής θερμικής αγωγιμότητας

Υλικό	$k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	Πάχος (m)	$U \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$	$R \left(\frac{m^2 \cdot K}{W} \right)$	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$C_p \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$
Εξωτερικό υλικό	1,06	3,175	333	0,003	2500	750
Αέρας	0,025	13	1,92	0,52	0,987	1,0035
Εσωτερικό υλικό	1,06	3,175	333	0,003	2500	750

4.5. Αναπαράσταση και περιγραφή των περιπτώσεων (cases)

Στο συγκεκριμένο γίνεται συνοπτική περιγραφή των πιο βασικών περιπτώσεων κτηρίων που προσομοιώνονται κατά τη μέθοδο IEA BESTEST, καθώς και μια σχηματική απεικόνιση των παραλλαγών που υφίσταται το βασικό κτήριο. Αυτές οι περιπτώσεις είναι οι Case 195, Case 200, Case600 και Case950.

4.5.1 Διαγνωστικές Περιπτώσεις

4.5.1.1 Case 195

Η Case 195 είναι η πρώτη διαγνωστική περίπτωση που προσομοιώνεται σε περίπτωση που τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά κατά την προσομοίωση της Case 600.

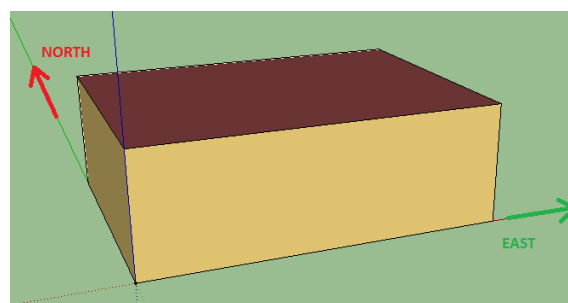
Πρόκειται για ένα κτήριο το οποίο δεν περιέχει καθόλου ανοίγματα. Η ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας και ο συντελεστής απορρόφησης ακτινοβολίας μικρού μήκους είναι 0,1, θεωρώντας έτσι ότι το κτήριο επηρεάζεται στον ελάχιστο βαθμό από την ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται.

Δεν υπάρχουν εσωτερικά κέρδη ενώ η ροή αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους ναί 0 ACH που σημαίνει πρακτικά ότι ο αέρινος όγκος είναι αμετάβλητος και το αρχικό ποσοστό υγρασίας παραμένει σταθερό εντός του κτηρίου καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Η δομή των επιφανειών του κτηρίου είναι σύμφωνα με τα υλικά μικρής θερμικής αντίστασης που έχουν αναφερθεί στην προηγούμενη ενότητα.

Το σύστημα HVAC θεωρείται ιδανικό. Ψύχει το χώρο σε περίπτωση που η θερμοκρασία του αέρα ξεπεράσει τους 20 C και αντίστοιχα τον θερμαίνει, αν η θερμοκρασία πέσει κάτω από 20 C.

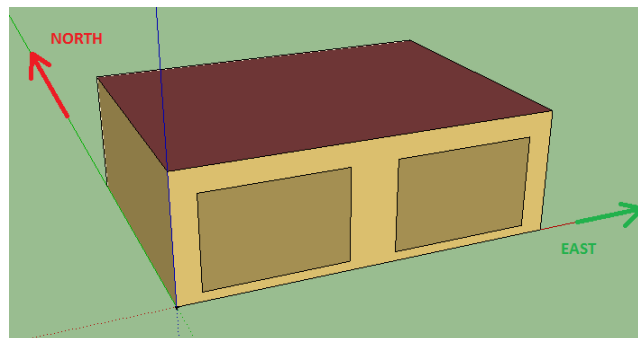
Αποτυχία στη συγκεκριμένη περίπτωση σημαίνει ότι υπάρχει βασικό πρόβλημα στη μετάδοση θερμότητας του κτιρίου μέσω αγωγής.



Σχήμα 4-5: Case 195

4.5.1.2 Case 200

Η περίπτωση Case 200 είναι πανομοιότυπη με την Case 195, με τη διαφορά ότι στο νότιο τοίχο υπάρχουν δυο επιφάνειες που ο τοίχος τους είναι μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας.

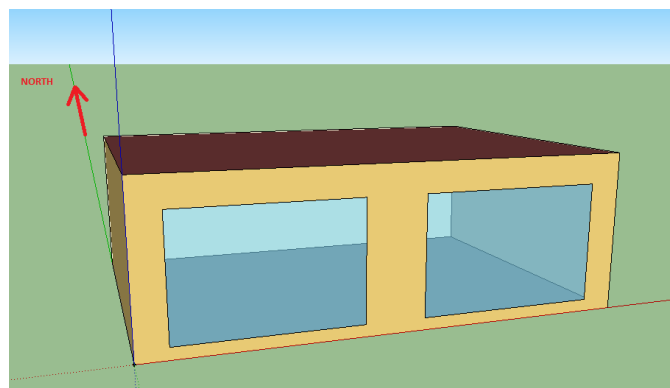


Σχήμα 4-6: Case 200

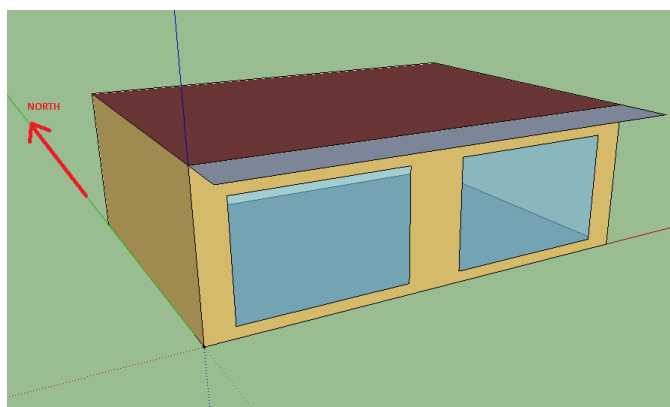
4.5.2 Γενικευμένες περιπτώσεις

4.5.2.1 Case 600

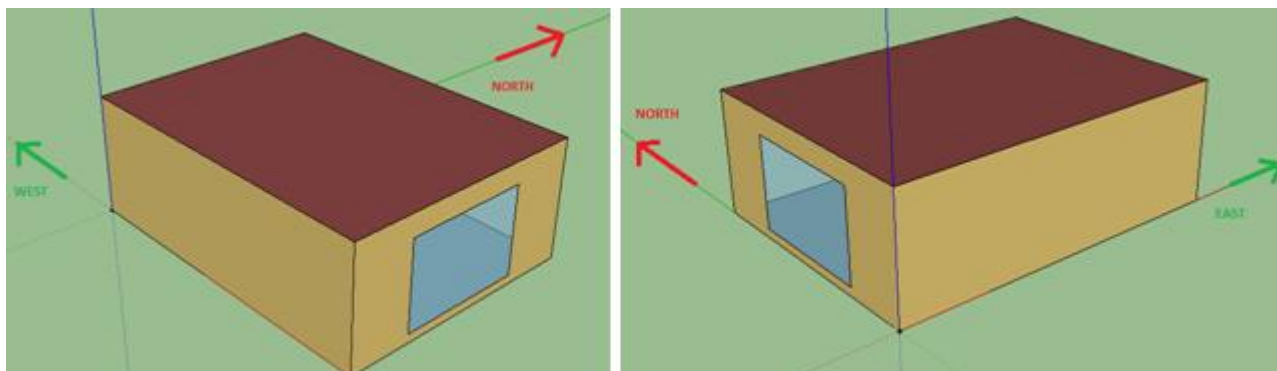
Η Case 600 αποτελεί την πιο απλή και αρχική περίπτωση κτηρίου που αξιολογείται πέραν των διαγνωστικών περιπτώσεων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ελέγχεται η δυνατότητα ενός λογισμικού να μοντελοποιεί σωστά όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη θερμοκρασία ενός κτηρίου και με βάση αυτές να προσομοιώνει τη θερμική συμπεριφορά του κτηρίου. Αποτυχία στη συγκεκριμένη περίπτωση δείχνει ότι το λογισμικό αντιμετωπίζει βασικό πρόβλημα στη προσομοίωση της μετάδοσης θερμότητας. Ο χρονικός προγραμματισμός του συστήματος HVAC είναι 20,27 – Deadband. Η δομή των επιφανειών του κτηρίου είναι σύμφωνα με τα υλικά μικρής θερμικής αντίστασης που έχουν αναφερθεί στην προηγούμενη ενότητα.



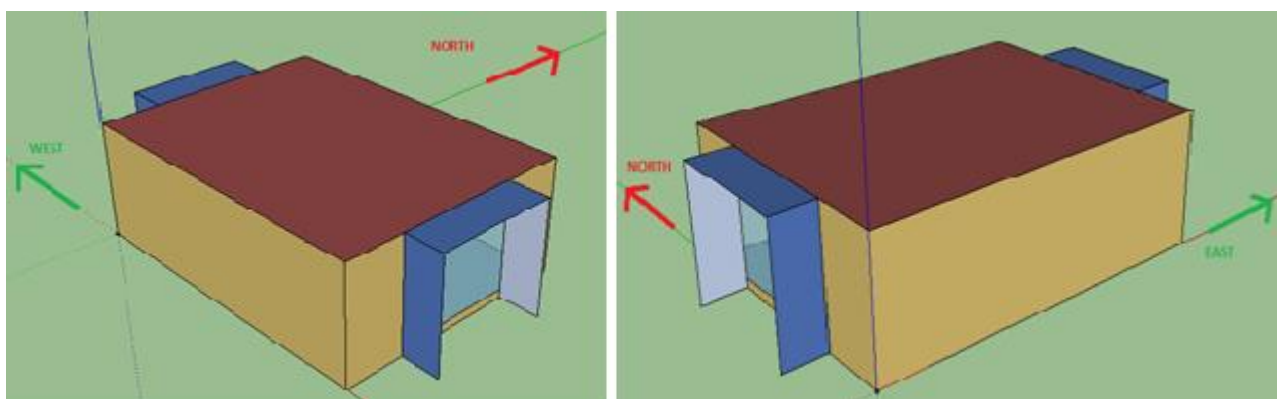
Σχήμα 4-7: Case 600



Σχήμα 4-8: Case 610



Σχήμα 4-9: Case620



Σχήμα 4-10: Case630

4.5.3 Case 960

Η case 960 είναι η μοναδική περίπτωση κτηρίου δυο θερμικών ζωνών που εξετάζεται μέσω της μεθόδου IEA BESTEST. Το κτήριο αποτελείται από δυο θερμικές ζώνες που χωρίζονται μεταξύ τους μέσω ενός κοινού τοίχου με συγκεκριμένα υλικά και θερμικές ιδιότητες, ενώ δεν υπάρχει μεταφορά μάζας με κάποιο τρόπο από τη μια ζώνη στη άλλη.

Η μεγάλη θερμική ζώνη (back zone) έχει εσωτερικό αέρινο όγκο $129,6 \text{ m}^3$ και τα υλικά των επιφανειών του πέραν του κοινού τοίχου είναι τα υλικά μικρής θερμικής αντίστασης που έχουν οριστεί στην προηγούμενη ενότητα. Επίσης, το συγκεκριμένο μέρος του κτηρίου δεν έχει καθόλου παράθυρα. Ο προγραμματισμός του συστήματος HVAC είναι 20,27 – Dead band.

Η μικρότερη θερμική ζώνη (sun zone) έχει εσωτερικό αέρινο όγκο $43,2 \text{ m}^3$ και τα υλικά των επιφανειών πέραν του κοινού τοίχου είναι τα υλικά μεγάλης θερμικής αντίστασης που έχουν οριστεί στην προηγούμενη ενότητα. Ο νότιος τοίχος της συγκεκριμένης ζώνης έχει συμμετρικά τοποθετημένα δυο παράθυρα. Επίσης, έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

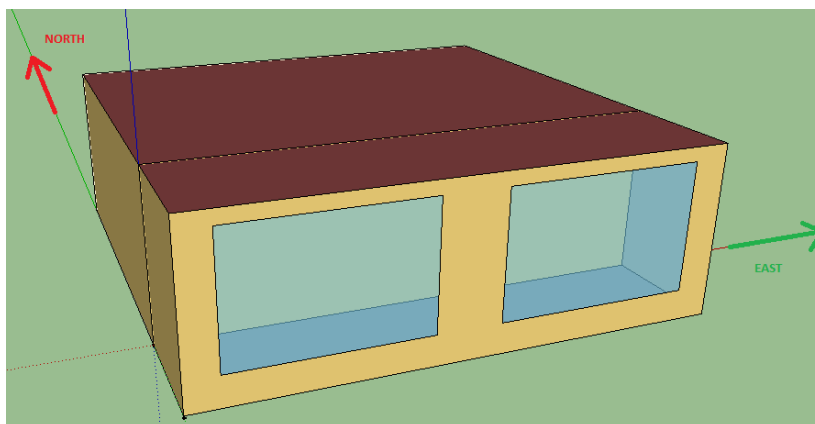
- Η ροή αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους είναι 0,5 ACH ή 0,41 ACH αντίστοιχα εάν το λογισμικό προσαρμόζει αυτόματα την πυκνότητα του αέρα λόγω υψομέτρου.
- Δεν υπάρχουν εσωτερικά κέρδη
- Η ζώνη δεν έχει κάποιο σύστημα HVAC που να προσδίδει ή να αφαιρεί θερμικό φορτίο στον αέρα της.

Πίνακας 4-17 - Θερμικά χαρακτηριστικά κοινού τοίχου

Υλικό	$k(\frac{W}{K*m})$	Πάχος (mm)	$U(\frac{W}{K*m^2})$	$R(\frac{K*m^2}{W})$	$\rho(\frac{kg}{m^3})$	α
0.510	0,20	2,55	0,392	1400	1000	0,6

Σε περίπτωση που ένα λογισμικό δεν έχει δυνατότητα προσδιορισμού του ποσοστού ακτινοβολίας που προσπίπτει στην κάθε επιφάνεια της μικρής ζώνης, τα αντίστοιχα ποσοστά είναι τα εξής:

- 60% απορροφάται από το πάτωμα
- 20% απορροφάται από τον κοινό τοίχο
- 7% χάνεται από το παράθυρο
- 13% μοιράζεται ισόποσα στην οροφή, τον ανατολικό και το δυτικό τοίχο



Σχήμα 4-11: Case 960

4.6. Πινάκες και διαγράμματα περιγραφής μεθόδου IEA BESTEST

Ακολουθούν οι πίνακες και τα διαγράμματα τα οποία περιγράφουν τη μέθοδο IEA BESEST. Οι πίνακες εμπεριέχουν όλα τα χαρακτηριστικά που αφορούν τις εκάστου περιπτώσεις προσομοίωσης. Τα διαγράμματα ροής περιγράφουν τη σειρά εφαρμογής της διαδικασίας ενώ ταυτόχρονα εντοπίζουν τις παραμέτρους οι οποίες είναι υπεύθυνες για την πιθανή εμφάνιση αποκλίσεων.

Σχήμα 4-12: Πίνακας Χρονοδιαγράμματος, τοιχοποιίας, εσωτερικών κερδών και ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες - Διαγνωστικές περιπτώσεις

Περίπτωση (Case)	Χρονοδιάγραμμα Συστήματος HVAC (schedule)	Τοιχοποιία	Εσωτερικά κέρδη	Ροή αέρα από ρωγμές του κελύφους
<i>Case 195</i>	20,20 – Bang Bang	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0
<i>Case 200</i>	20,20 – Bang Bang	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0
<i>Case 210</i>	20,20 – Bang Bang	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0
<i>Case 215</i>	20,20 – Bang Bang	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0
<i>Case 220</i>	20,20 – Bang Bang	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0
<i>Case 230</i>	20,20 – Bang Bang	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	1
<i>Case 240</i>	20,20 – Bang Bang	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0
<i>Case 250</i>	20,20 – Bang Bang	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0
<i>Case 270</i>	20,20 – Bang Bang	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0
<i>Case 280</i>	20,20 – Bang Bang	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0
<i>Case 290</i>	20,20 – Bang Bang	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0
<i>Case 300</i>	20,20 – Bang Bang	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0
<i>Case 310</i>	20,20 – Bang Bang	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0
<i>Case 320</i>	20,27 – Deadband	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0

Πίνακας 4-18: Πίνακας απορρόφησης και εκπομπής ακτινοβολίας μικρού και μεγάλου μήκους - Διαγνωστικές περιπτώσεις

Περίπτωση (Case)	Ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας εσωτερικής επιφάνειας	Ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας εξωτερικής επιφάνειας	Συντελεστής απορρόφησης ακτινοβολίας μικρού μήκους, εσωτερικών επιφανειών	Συντελεστής απορρόφησης ακτινοβολίας μικρού μήκους, εξωτερικών επιφανειών
<i>Case 195</i>	0,1	0,1	Δεν υφίσταται	0,1
<i>Case 200</i>	0,1	0,9	Δεν υφίσταται	0,1
<i>Case 210</i>	0,9	0,1	Δεν υφίσταται	0,1
<i>Case 215</i>	0,9	0,9	Δεν υφίσταται	0,1
<i>Case 220</i>	0,9	0,9	Δεν υφίσταται	0,1
<i>Case 230</i>	0,9	0,9	Δεν υφίσταται	0,1
<i>Case 240</i>	0,9	0,9	Δεν υφίσταται	0,1
<i>Case 250</i>	0,9	0,9	Δεν υφίσταται	0,9
<i>Case 270</i>	0,9	0,9	0,9	0,1
<i>Case 280</i>	0,9	0,9	0,1	0,1
<i>Case 290</i>	0,9	0,9	0,9	0,1
<i>Case 300</i>	0,9	0,9	0,9	0,1
<i>Case 310</i>	0,9	0,9	0,9	0,1
<i>Case 320</i>	0,9	0,9	0,9	0,1

Πίνακας 4-19:Πληροφορίες παραθύρων - Διαγνωστικές περιπτώσεις

Περίπτωση (Case)	Συνολικό εμβαδόν παραθύρων σε κάθε τοίχο m^2	Προσανατολισμός παραθύρου	Επιφάνεια σκίασης
<i>Case 195</i>	0	Δεν υφίσταται	Δεν υφίσταται
<i>Case 200</i>	0	Δεν υφίσταται	Δεν υφίσταται
<i>Case 210</i>	0	Δεν υφίσταται	Δεν υφίσταται
<i>Case 215</i>	0	Δεν υφίσταται	Δεν υφίσταται
<i>Case 220</i>	0	Δεν υφίσταται	Δεν υφίσταται
<i>Case 230</i>	0	Δεν υφίσταται	Δεν υφίσταται
<i>Case 240</i>	0	Δεν υφίσταται	Δεν υφίσταται
<i>Case 250</i>	0	Δεν υφίσταται	Δεν υφίσταται
<i>Case 270</i>	12	Νότιος	Δεν υφίσταται
<i>Case 280</i>	12	Νότιος	Δεν υφίσταται
<i>Case 290</i>	12	Νότιος	1 οριζόντια
<i>Case 300</i>	6 στον Δυτικό,6 στον Ανατολικό	Ανατολικός και Δυτικός	Δεν υφίσταται
<i>Case 310</i>	6 στον Δυτικό,6 στον Ανατολικό		1 οριζόντια και κάθετη
<i>Case 320</i>	12	Νότιος	Δεν υφίσταται

Πίνακας 4-20: Πίνακας Χρονοδιαγράμματος, τοιχοποιίας, εσωτερικών κερδών και ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες - Γενικευμένες περιπτώσεις (Case 395 - Case 650)

Περίπτωση (Case)	Χρονοδιάγραμμα Συστήματος HVAC	Τοιχοποιία	Εσωτερικά κέρδη	Ροή αέρα από ρωγμές του κελύφους
<i>Case 395</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0
<i>Case 400</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0
<i>Case 410</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0
<i>Case 420</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	0	0,5
<i>Case 430</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5
<i>Case 440</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5
<i>Case 600</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5
<i>Case 610</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5
<i>Case 620</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5
<i>Case 630</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5
<i>Case 640</i>	Setback	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5
<i>Case 650</i>	Ψύξη – 27 / Εξαερισμός	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5

Πίνακας 4-21:Πληροφορίες απορρόφησης και εκπομπής ακτινοβολίας μικρού και μεγάλου μήκους - Γενικευμένες περιπτώσεις (Case 395 - Case 650)

Περίπτωση (Case)	Ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας εσωτερικής επιφάνειας	Ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας εξωτερικής επιφάνειας	Συντελεστής απορρόφησης ακτινοβολίας μικρού μήκους, εσωτερικών επιφανειών	Συντελεστής απορρόφησης ακτινοβολίας μικρού μήκους, εξωτερικών επιφανειών
<i>Case395</i>	0,9	0,9	Δεν υφίσταται	0,1
<i>Case 400</i>	0,9	0,9	Δεν υφίσταται	0,1
<i>Case 410</i>	0,9	0,9	Δεν υφίσταται	0,1
<i>Case 420</i>	0,9	0,9	Δεν υφίσταται	0,1
<i>Case 430</i>	0,9	0,9	Δεν υφίσταται	0,6
<i>Case 440</i>	0,9	0,9	0,1	0,6
<i>Case 600</i>	0,9	0,9	0,6	0,6
<i>Case 610</i>	0,9	0,9	0,6	0,6
<i>Case 620</i>	0,9	0,9	0,6	0,6
<i>Case 630</i>	0,9	0,9	0,6	0,6
<i>Case 640</i>	0,9	0,9	0,6	0,6
<i>Case 650</i>	0,9	0,9	0,6	0,6

Πίνακας 4-22: Πληροφορίες παραθύρων - Γενικευμένες περιπτώσεις (Case395 - Case650)

Περίπτωση (Case)	Συνολικό εμβαδόν παραθύρων σε κάθε τοιίχο m^2	Προσανατολισμός παράθυρου	Επιφάνεια σκίασης
<i>Case395</i>	0	Νότιος	Δεν υφίσταται
<i>Case 400</i>	0	Νότιος	Δεν υφίσταται
<i>Case 410</i>	0	Νότιος	Δεν υφίσταται
<i>Case 420</i>	0	Νότιος	Δεν υφίσταται
<i>Case 430</i>	0	Νότιος	Δεν υφίσταται
<i>Case 440</i>	12	Νότιος	Δεν υφίσταται
<i>Case 600</i>	12	Νότιος	Δεν υφίσταται
<i>Case 610</i>	12	Νότιος	Οριζόντια κατά μήκος του νότιου τοίχου
<i>Case 620</i>	6 στον Δυτικό, 6 στον Ανατολικό	Νότιος	Δεν υφίσταται
<i>Case 630</i>	6 στον Δυτικό, 6 στον Ανατολικό	Δυτικός και ανατολικός	Οριζόντια & κάθετη στο παράθυρο του δυτικού και ανατολικού τοίχου,
<i>Case 640</i>	12	Δυτικός και ανατολικός	Δεν υφίσταται
<i>Case 650</i>	12	Νότιος	Δεν υφίσταται

Πίνακας 4-23:Πληροφορίες χρονοδιαγράμματος, τοιχοποιίας, εσωτερικών κερδών και ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες - Γενικευμένες περιπτώσεις (Case 800 - Case 950)

Περίπτωση (Case)	Χρονοδιάγραμμα Συστήματος HVAC	Τοιχοποιία	Εσωτερικά κέρδη	Ροη αέρα από ρωγμές του κελύφους
<i>Case 800</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5
<i>Case 810</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5
<i>Case 900</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5
<i>Case 910</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5
<i>Case 920</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5
<i>Case 930</i>	20,27 – Dead band	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5
<i>Case 940</i>	Setback	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5
<i>Case 950</i>	Ψύξη – 27 / Εξαερισμός	Χαμηλής θερμικής αντίστασης	200	0,5

Πίνακας 4-24:Πληροφορίες απορρόφησης και εκπομπής ακτινοβολίας μικρού και μεγάλου μήκους - Γενικευμένες περιπτώσεις (Case 800 - Case 950)

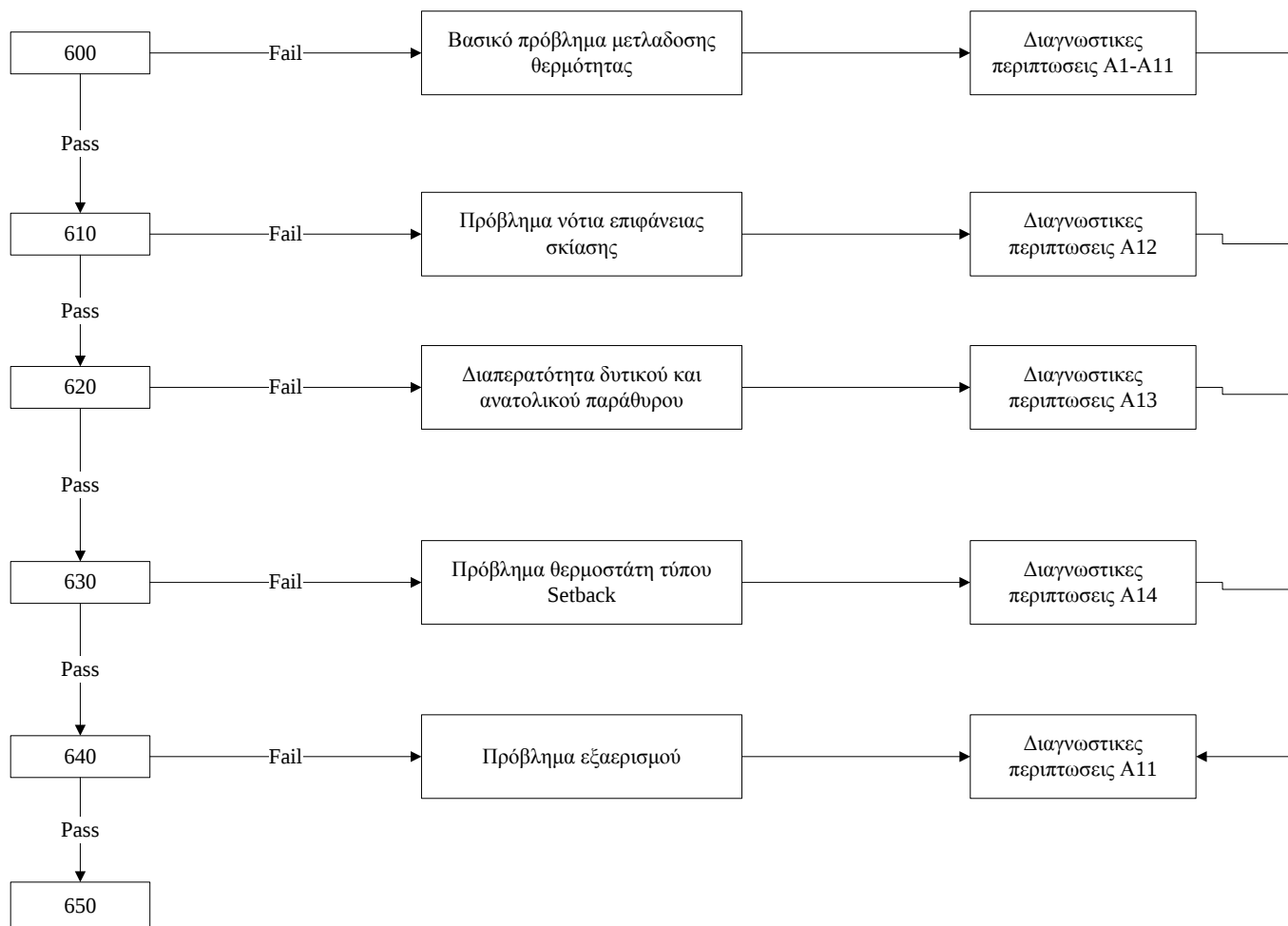
Περίπτωση (Case)	Ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας εσωτερικής επιφάνειας	Ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας εξωτερικής επιφάνειας	Συντελεστής απορρόφησης ακτινοβολίας μικρού μήκους, εσωτερικών επιφανειών	Συντελεστής απορρόφησης ακτινοβολίας μικρού μήκους, εξωτερικών επιφανειών
<i>Case 800</i>	0,9	0,9	Δεν υφίσταται	0,6
<i>Case 810</i>	0,9	0,9	0,1	0,6
<i>Case 900</i>	0,9	0,9	0,6	0,6
<i>Case 910</i>	0,9	0,9	0,6	0,6
<i>Case 920</i>	0,9	0,9	0,6	0,6
<i>Case 930</i>	0,9	0,9	0,6	0,6
<i>Case 940</i>	0,9	0,9	0,6	0,6
<i>Case 950</i>	0,9	0,9	0,6	0,6

Πίνακας 4-25:Πληροφορίες παραθύρων- Γενικευμένες περιπτώσεις (Case 800 - Case 950)

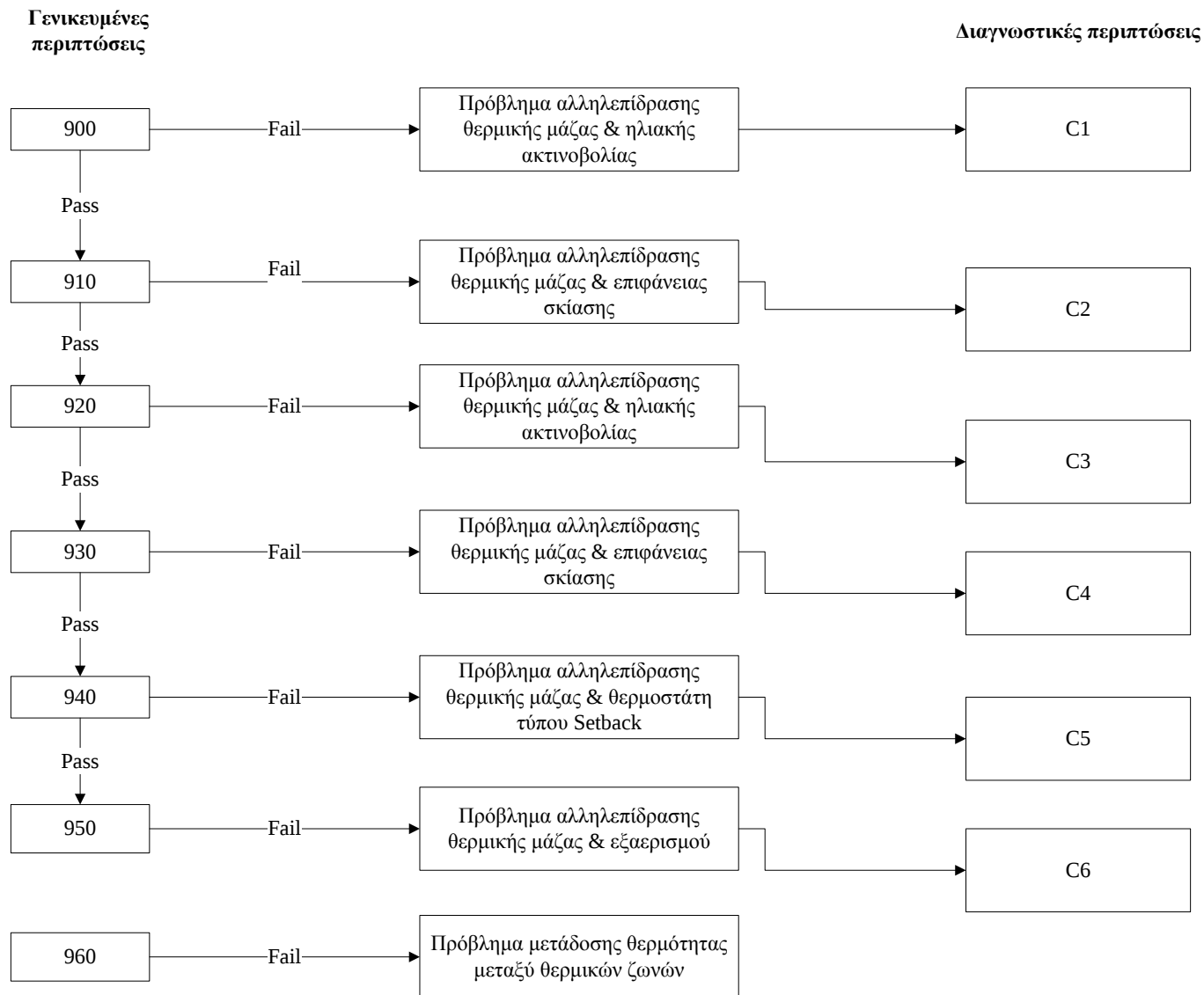
Περίπτωση (Case)	Συνολικό εμβαδών παραθύρων σε κάθε τοίχο m^2	Προσανατολισμός παράθυρου	Επιφάνεια σκίασης
<i>Case 800</i>	0	Νότιος	Δεν υφίσταται
<i>Case 810</i>	12	Νότιος	Δεν υφίσταται
<i>Case 900</i>	12	Νότιος	Δεν υφίσταται
<i>Case 910</i>	12	Νότιος	Οριζόντια κατά μήκος του νότιου τοίχου
<i>Case 920</i>	12	Νότιος	Δεν υφίσταται
<i>Case 930</i>	6 στον Δυτικό, 6 στον Ανατολικό	Δυτικός και ανατολικός	Οριζόντια και κάθετη στο παράθυρο του δυτικού και ανατολικού τοίχου,
<i>Case 940</i>	6 στον Δυτικό, 6 στον Ανατολικό	Δυτικός και ανατολικός	Δεν υφίσταται
<i>Case 950</i>	12	Νότιος	Δεν υφίσταται

**Γενικευμένες
περιπτώσεις**

Διαγνωστικές περιπτώσεις

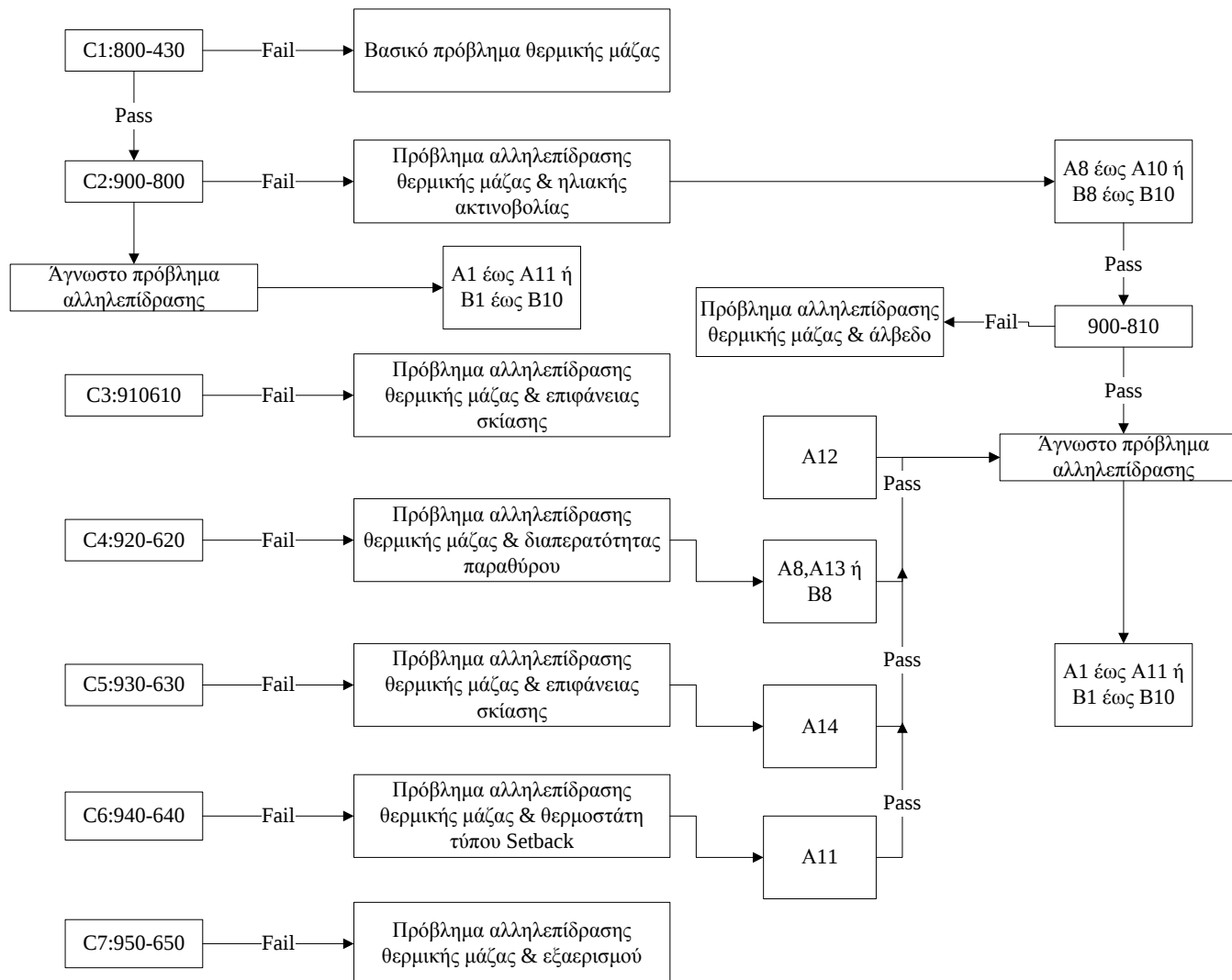


Διάγραμμα ροής 2: Case600 - Case650

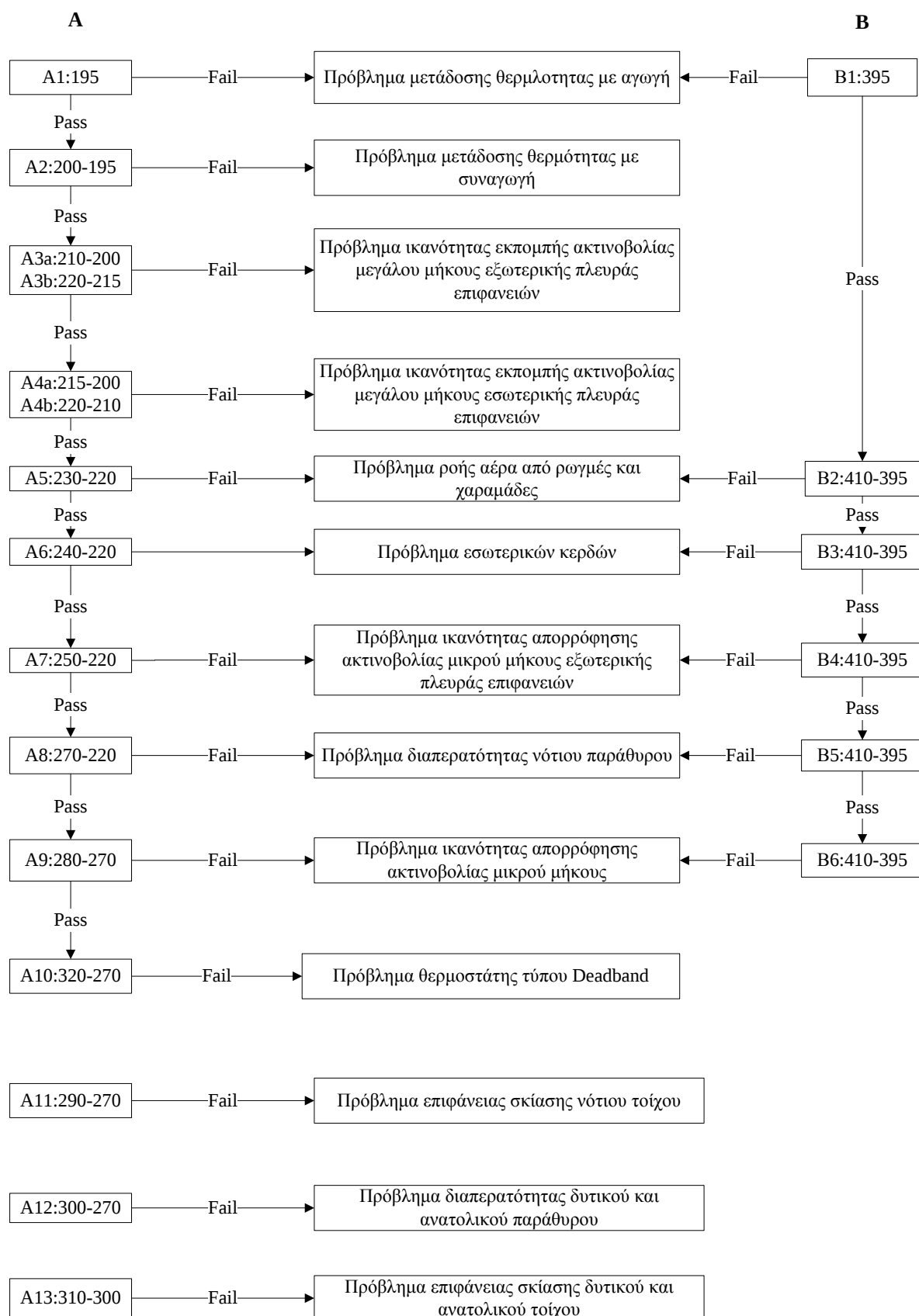


Διάγραμμα ροής 3:Case 900 - Cas 950

C



Διάγραμμα ροής 4:Διαγνωστικές περιπτώσεις C



Διάγραμμα ροής 5: Διαγνωστικές περιπτώσεις A,B

5. Το λογισμικό EnergyPlus

Το EnergyPlus είναι ένα λογισμικό θερμικής προσομοίωσης το οποίο αναπτύχθηκε υπό το υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α. Αποτελεί την συνδυαστική εξέλιξη των λογισμικών DOE-2 και BLAST τα οποία έχει και πρακτικά αντικαταστήσει. Έχει τη δυνατότητα πρόβλεψης της θερμικής συμπεριφοράς ενός κτηρίου η οποία γίνεται συναρτήσει ενός αρχείου καιρού, το οποίο προσδιορίζει τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον, σε κάθε ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα. Τα αρχεία εισόδου ονομάζονται IDF και πρόκειται ουσιαστικά για αρχεία TXT τα οποία περιέχουν κωδικοποιημένα, όλη την απαραίτητη πληροφορία που χρειάζεται, προκειμένου να γίνει θερμική προσομοίωση ενός συγκεκριμένου κτηρίου. Επίσης, χαρακτηρίζεται από το ευρύ φάσμα θερμικών παραμέτρων που μπορούν να μοντελοποιηθούν ενώ είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το χρήστη.

Η συνεχής εξέλιξη και αξιοπιστία που το χαρακτηρίζει ήταν οι παράγοντες που οδήγησαν στην απόφαση έτσι ώστε να αποτελέσει το κύριο μέτρο σύγκρισης για το λογισμικό SRC κατά την εφαρμογή της μεθόδου IEA BESTEST. Επίσης, αποτέλεσε το ένα από τα δυο λογισμικά που επιλέχθηκαν, προκειμένου να γίνει μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς διαφορετικών κτηρίων και των μοντέλων στα οποία βασίζεται. Κατά συνέπεια, η σειρά και ο τρόπος μοντελοποίησης της μεθόδου IEA BESTEST που πραγματοποιήθηκε στο EnergyPlus, έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική και αξιόπιστη, η σύγκριση με το SRC.

Ακολουθεί αναφορά και περιγραφή του συνόλου των παραμέτρων που καθορίστηκαν στο EnergyPlus προκειμένου να αξιολογηθεί και να συγκριθεί με τα υπόλοιπα λογισμικά. Οι παράμετροι που ακολουθούν περιγράφουν πλήρως το κτήριο της γενικευμένης περίπτωσης Csa6 600 η οποία είναι η περίπτωση από την οποία γίνεται η εκκίνηση της εφαρμογής της μεθόδου IEA BESTEST. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου στην παρούσα διπλωματική, η πιο σύνθετη περίπτωση που εφαρμόστηκε είναι αυτή που περιγράφεται παρακάτω. Όλες οι υπόλοιπες περιπτώσεις (Case 195, 200, 210, 215, 200) είναι απλούστερες περιπτώσεις και στην ουσία χρησιμοποιούν μέρος των παραμέτρων από αυτές που αναφέρονται παρακάτω.

5.1. Σχεδίαση των κτηρίων

Οι επιφάνειες από τις οποίες αποτελείται ένα κτήριο, αναπαριστώνται στο EnergyPlus ως ένα σύνολο καρτεσιανών σημείων τα οποία προσδιορίζουν τις κορυφές αυτών στον τρισδιάστατο χώρο. Ο προσδιορισμός των σημείων αυτών με μη γραφικές μεθόδους όπως η απευθείας καταγραφή των συντεταγμένων των καρτεσιανών σημείων είναι αφενός δύσκολη διαδικασία και απαιτεί πολύ χρόνο και αφετέρου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τον λανθασμένο προσδιορισμό της γεωμετρίας του κτηρίου. Για την αποφυγή τέτοιων διαδικασιών και σφαλμάτων, το κτήριο που πρόκειται να προσομοιωθεί, σχεδιάζεται γραφικά στο λογισμικό Google SketchUp. Στη συνέχεια, με τη χρήση ενός plugin στο Google SketchUp που ονομάζεται Open Studio εξάγεται ένα αρχείο IDF το οποίο εμπεριέχει πληροφορίες που αφορούν κατά κύριο λόγο τις γεωμετρικές πληροφορίες του κτηρίου και μπορεί να επεξεργαστεί περαιτέρω μέσω του EnergyPlus για την προσθήκη πληροφοριών που αφορούν τη θερμική προσομοίωση, τη λειτουργία των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας, καθώς και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κτηρίου.

5.2. Γενικές παράμετροι κτηρίου - Building

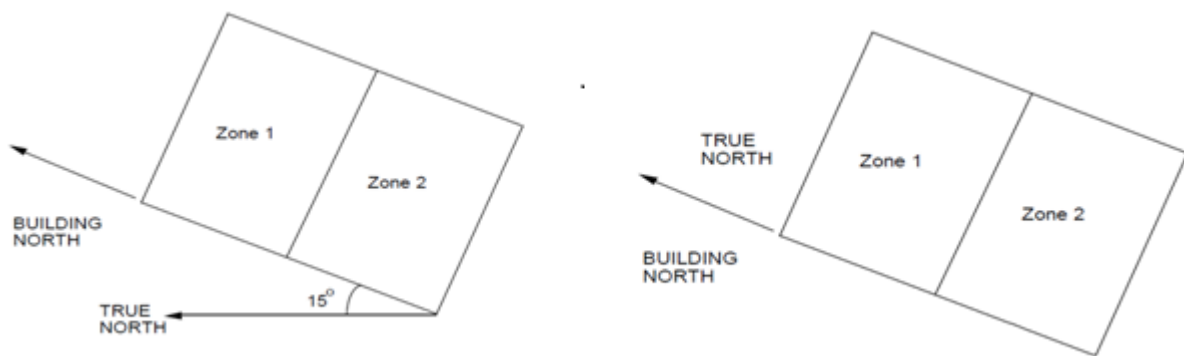
Στο συγκεκριμένο πεδίο γίνεται προσδιορισμός κάποιων γενικών παραμέτρων που αφορούν συνολικά το κτήριο το οποίο πρόκειται να προσομοιωθεί. Αυτές είναι:

Field	Units	Obj1
Name		BESTEST Case 195
North Axis	deg	0
Terrain		Country
Loads Convergence Tolerance Value		0,5
Temperature Convergence Tolerance Value	deltaC	0,5
Solar Distribution		FullInteriorAndExterior
Maximum Number of Warmup Days		
Minimum Number of Warmup Days		6

Σχήμα 5-1:EnergyPlus - Building

5.2.1 North Axis

Ο βόρειος άξονας του σπιτιού καθορίζεται σε συνάρτηση με τον πραγματικό βορά. Η τιμή 0 που έχει δοθεί σημαίνει ότι υπάρχει ταύτιση του βόρειου άξονα του κτηρίου με τον πραγματικό βορά. Για τον καθορισμό του προσανατολισμού δίνεται μια γωνία σε σχέση με τον αληθή Βορρά. Θετική φορά θεωρείται η φορά του ρολογιού.



Σχήμα 5-2:και ταύτιση βόρειου άξονα κτηρίου με τον αληθή Βορρά

5.2.2 Terrain

Είναι ο προσδιορισμός του χαρακτηριστικού του εδάφους. Στη μοντελοποίηση παραμετροποιήθηκε ως 'country', θέτοντας έτσι το κτήριο σε περιβάλλον εξοχής και προσδίδοντας του χαρακτηριστικά επίπεδου εδάφους.

5.2.3 Loads Tolerance Coverage Value

Πρόκειται για το κριτήριο σύγκλισης σύμφωνα με το οποίο τα υπολογιζόμενα θερμικά φορτία πρέπει να συμφωνούν κατά τη διαδικασία αρχικοποίησης (warming up) της προσομοίωσης προκειμένου να θεωρηθεί ότι υπάρχει σύγκλιση. Στο EnergyPlus, υπάρχουν τέσσερα κριτήρια σύγκλισης. Δυο που συσχετίζονται με τη θερμοκρασία και δυο που συσχετίζονται με το θερμικό φορτίο. Τα κριτήρια που συσχετίζονται με το θερμικό φορτίο είναι:

$$\frac{q_h - q_{h,prev}}{q_h} < q_{tol}$$

$$\frac{q_c - q_{c,prev}}{q_c} < q_{tol}$$

Όπου:

- q_h Το νέο θερμικό φορτίο θέρμανσης
- $q_{h,prev}$ Το θερμικό φορτίο θέρμανσης στο ακριβώς προηγούμενο βήμα της προσομοίωσης
- q_c Το νέο θερμικό φορτίο ψύξης
- $q_{c,prev}$ Το θερμικό φορτίο ψύξης στο ακριβώς προηγούμενο βήμα της προσομοίωσης
- q_{tol} Η τιμή ικανοποίησης του κριτηρίου σύγκλισης

Η έννοια της σύγκλισης είναι η εξής. Κατά τον υπολογισμό του νέου φορτίου ή της νέας θερμοκρασίας από το βήμα i στο βήμα $i+1$ της αρχικοποίησης, ελέγχεται η ικανοποίηση του κριτηρίου σύγκλισης. Αν η συνθήκη ικανοποιείται, τότε θεωρείται ότι επιτυγχάνεται σύγκλιση και η προσομοίωση συνεχίζει για τον υπολογισμό στο βήμα $i+2$ κάνοντας νέα σύγκριση κοκ. Στην περίπτωση που το κριτήριο δεν ικανοποιείται, γίνεται επανυπολογισμός του μεγέθους. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης, μειώνοντας αντίστοιχα κάθε φορά το βήμα της προσομοίωσης στο συγκεκριμένο διάστημα. Όπως είναι αναμενόμενο, όσο πιο μικρό είναι το κριτήριο σύγκλισης, τόσο πιο αναλυτικό είναι το μοντέλο της προσομοίωσης αλλά αυξάνεται ταυτόχρονα και ο αντίστοιχος χρόνος. Η τιμή που επιλέχτηκε είναι 0,5 για το λόγο ότι η αντίστοιχη τιμή στο λογισμικό SRC είναι επίσης 0,5.

5.2.4 Temperature Convergence Tolerance Value

Πρόκειται για το κριτήριο σύγκλισης σύμφωνα με το οποίο οι υπολογιζόμενες θερμοκρασίες πρέπει να συμφωνούν κατά τι διαδικασία της προσομοίωσης προκειμένου να θεωρηθεί ότι υπάρχει σύγκλιση. Η προκαθορισμένη τιμή είναι 0,5. Η τιμή που επιλέχτηκε είναι 0,5 προκειμένου να υπάρχει δυνατότητα σωστής σύγκρισης μεταξύ του SRC και το EnergyPlus. Τα αντίστοιχα κριτήρια σύγκλισης που αφορούν τη θερμοκρασία είναι:

$$T_{max,prv} - T_{max} < T_{tol}$$

$$T_{min,prv} - T_{min} < T_{tol}$$

Όπου:

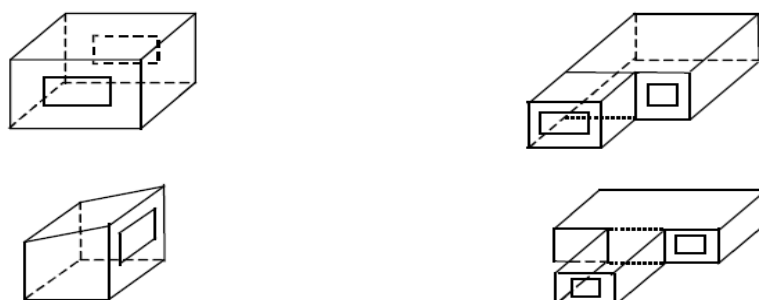
T_{max}	Η νέα μέγιστη θερμοκρασία του αέρα της θερμικής ζώνης
$T_{max,prev}$	Η μέγιστη θερμοκρασία του αέρα της θερμικής ζώνης στο ακριβώς προηγούμενο βήμα της προσομοίωσης
T_{min}	Η νέα ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα της θερμικής ζώνης
$T_{min,prv}$	Η ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα της θερμικής ζώνης στο ακριβώς προηγούμενο βήμα της προσομοίωσης
T_{tol}	Η τιμή ικανοποίησης του κριτηρίου σύγκλισης της θερμοκρασίας

5.2.5 Solar Distribution: Full Interior and Exterior

Πρόκειται για τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζει η κατανομή της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στις επιφάνειες, τη θερμική συμπεριφορά του κτηρίου. Η σκίαση από προεξοχές, επιφάνειες σκίασης άλλα και από πλαίσια παραθύρων και πορτών λαμβάνεται υπόψη. Επίσης, η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στις εσωτερικές επιφάνειες μέσω ανοιγμάτων όπως παράθυρα, υπολογίζεται ως εξής. Οι ηλιακές ακτίνες που εισέρχονται στο εσωτερικό ενός χώρου προβάλλονται αντίστοιχα σε κάθε μια επιφάνεια, ενώ ταυτόχρονα επηρεάζονται από τις επιφάνειες σκίασης που υπάρχουν. Ταυτόχρονα, στην περίπτωση ύπαρξης παράθυρου, συνυπολογίζεται το ποσό της ακτινοβολίας που απορροφάται από το παράθυρο, το ποσό που εξέρχεται στο εξωτερικό περιβάλλον δια αυτού και το ποσό που επιστρέφει λόγω ανάκλασης στην θερμική ζώνη.

Πρέπει να τονιστεί ότι προκειμένου να παραμετροποιηθεί κατά τον συγκεκριμένο τρόπο η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας πρέπει το κτήριο να είναι κυρτό.

Κυρτό κτήριο ονομάζεται αυτό στο οποίο, κάθε ευθεία γραμμή που το διαπερνά, τέμνει το πολύ δυο επιφάνειες του.



Σχήμα 5-3: Κυρτά & μη κυρτά κτήρια [15]

5.2.6 Minimum Number of Warm Up Days: 6

Πρόκειται για τον ελάχιστο αριθμό ημερών που καθορίζεται ότι πρέπει να διαρκέσει η διαδικασία αρχικοποίησης της προσομοίωσης. Η διαδικασία αρχικοποίησης πρόκειται ουσιαστικά για την διαδικασία κατά την οποία γίνεται θερμική προσομοίωση για κάποιο αρχικό χρονικό διάστημα προκειμένου το κτήριο να προσαρμοστεί και να σταθεροποιηθεί σε μια αρχική κατάσταση με βάση τα κριτήρια σύγκλισης.

Ο αριθμός των 6 ημερών είναι ο ελάχιστος που έχει προσδιοριστεί προκειμένου να επιτυγχάνεται σύγκλιση. Αύξηση του αριθμού ημερών αυξάνει σημαντικά τον συνολικό χρόνο προσομοίωσης ειδικά σε περιπτώσεις γεωμετρικά πολύπλοκων κτηρίων ή κτηρίων με πολλές θερμικές ζώνες.

5.3. Υπολογισμός Ηλιακών Δεδομένων - Shadow Calculation

Field	Units	Obj1
Calculation Frequency		10
Maximum Figures in Shadow Overlap Calculations		
Polygon Clipping Algorithm		
Sky Diffuse Modeling Algorithm		

Σχήμα 5-4:EnergyPlus - Shadow Calculation

Η θέση του ηλίου σε συνδυασμό με τις επιφάνειες σκίασης, καθορίζουν το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες του κτηρίου. Κατά συνέπεια παίζουν πολύ μεγάλη σημασία στη θερμική συμπεριφορά του κτηρίου και στο θερμικό φορτίο που θα χρειαστεί προκειμένου να επιτευχθεί θέρμανση ή ψύξη του. Ο υπολογισμός της θέσης του ηλίου πραγματοποιείται ανά μια περίοδο ημερών. Το ηλιακό μονοπάτι, δηλαδή η πορεία που ακολουθεί ο ήλιος στον ηλιακό θόλο είναι μεταβλητό. Η μεταβολή που μπορεί να προκαλέσει διαφορές στη σκίαση του κτηρίου λόγω της θέσης του ηλίου παρατηρείται ανά 20 ημέρες. Όσο πιο μικρό είναι το χρονικό διάστημα, τόσο πιο μικρές διαφορές παρατηρούνται στο ηλιακό μονοπάτι.

Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό του ηλιακού μονοπατιού, δίνει τη δυνατότητα εξοικονόμησης υπολογιστικού φόρτου στα λογισμικά θερμικής προσομοίωσης αφού δεν είναι αναγκαίος ο συνεχής υπολογισμός του. Παρ' όλα αυτά, ο αριθμός των ημερών για συνυπολογισμό του δεν πρέπει να ξεπερνάει τις 20 προκειμένου να μην παρατηρούνται ουσιαστικές αποκλίσεις στην προσομοίωση.

5.3.1 Calculation Frequency: 10

Πρόκειται για τη συχνότητα σύμφωνα με την οποία καθορίζεται το ηλιακό μονοπάτι ηλίου και ο υπολογισμός της σκίασης στο κτήριο. Μείωση της συχνότητας υπολογισμού κάνει το μοντέλο πιο αναλυτικό αλλά αυξάνει τον χρόνο της προσομοίωσης. Αντίστοιχα, μείωση της συχνότητας υπολογισμού, μειώνει το χρόνο της προσομοίωσης αλλά κάνει το μοντέλο λιγότερο αναλυτικό. Κατά τη μοντελοποίηση που πραγματοποιήθηκε, η τιμή της συχνότητας τέθηκε ανά 10 ημέρες, για το λόγο ότι είναι η τιμή η οποία είναι έγιναν και οι προσομοιώσεις στο SRC.

5.4. Συντελεστής Συναγωγής - Surface Convection Algorithm: Inside,Outside

Πρόκειται για το μοντέλο σύμφωνα με το οποίο γίνεται ο υπολογισμός της μετάδοσης θερμότητας μέσω συναγωγής στις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες του κτηρίου. Ο λόγος που επιλέχτηκε ο αλγόριθμος TARP είναι διότι αφενός, οι αντίστοιχοι υπολογισμοί του λογισμικού SRC γίνονται με βάση το συγκεκριμένο μοντέλο και αφετέρου αποτελεί το πιο ακριβές μοντέλο με βάση το οποίο προσδιορίζεται ο συντελεστής συναγωγής.

5.5. Μεταφορά Θερμότητας και Υγρασίας - Heat Balance Algorithm

Το συγκεκριμένο πεδίο επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει τον αλγόριθμο που καθορίζει τη μετάδοση θερμότητας και της υγρασίας στην κατασκευή του κτηρίου.

5.5.1 Algorithm: Conduction Transfer Function

Στο συγκεκριμένο αλγόριθμο δε λαμβάνεται υπόψη η αποθήκευση ή την διάδοση υγρασίας στα στοιχεία της κατασκευής του κτηρίου.

5.5.2 Surface Temperature Upper Limit: 200

Η συγκεκριμένη παράμετρος καθορίζει ένα μέγιστο επιτρεπτό όριο για τη θερμοκρασία που μπορεί να έχει μια επιφάνεια. Η προκαθορισμένη τιμή είναι 200 C και μεταβάλλεται σε περίπτωση ένδειξης υψηλής τιμής λάθους η οποία δεν μπορεί να διορθωθεί με διαφορετικό τρόπο.

5.6. Χρονικό Βήμα - Timestep

Στο συγκεκριμένο πεδίο καθορίζεται το χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Ο ορισμός του καθορίζει πόσα χρονικά βήματα υπάρχουν μέσα σε μια ώρα. Η αύξηση του χρονικού βήματος αυξάνει το συνολικό χρόνο της προσομοίωσης αλλά κάνει ταυτόχρονα το μοντέλο πιο αναλυτικό. Το χρονικό βήμα στο SRC είναι 6. Γι' αυτό, επιλέχτηκε και η αντίστοιχη τιμή για το EnergyPlus, προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων σε κάθε βήμα.

Field	Units	Obj1
Number of Timesteps per Hour		6

Σχήμα 5-5:EnergyPlus - Timestep

5.7. Περιοχή - Site: Location

Πρόκειται για το πεδίο όπου προσδιορίζονται πληροφορίες που αφορούν την τοποθεσία του κτηρίου. Οι συγκεκριμένες πληροφορίες αξιοποιούνται είτε για την προσαρμογή των θερμικών ιδιοτήτων των παραμέτρων όπως ο αέρας στο συγκεκριμένο υψόμετρο, είτε για τον καθορισμό της πορείας που ακολουθεί ο ήλιος.

Field	Units	Obj1
Name		DENVER
Latitude	deg	39,8
Longitude	deg	-104,9
Time Zone	hr	-7
Elevation	m	1611

Σχήμα 5-6:EnergyPlus - Site:Location

5.8. Χρονική Περίοδος Προσομοίωσης - Run Period

Πρόκειται για το πεδίο στο οποίο καθορίζεται η ακριβής ημερομηνία έναρξης και λήξης της προσομοίωσης. Για το λόγο ότι το SRC καθορίζει τη βροχή με βάση το αρχείο καιρού, τέθηκε αντίστοιχα το EnergyPlus να υπολογίσει με αντίστοιχο τη βροχόπτωση.

Field	Units	Obj1
Name		
Begin Month		1
Begin Day of Month		1
End Month		12
End Day of Month		31
Day of Week for Start Day		
Use Weather File Holidays and Special Days		
Use Weather File Daylight Saving Period		
Apply Weekend Holiday Rule		
Use Weather File Rain Indicators		Yes
Use Weather File Snow Indicators		
Number of Times Runperiod to be Repeated		
Increment Day of Week on repeat		
Start Year		

Σχήμα 5-7:EnergyPlus - RunPeriod

5.9. Θερμοκρασία Εδάφους - Site Ground Temperature: Building Surface

Η θερμοκρασία που έχει το έδαφος θεωρείται ότι είναι σταθερή και έτσι οι τιμές που λαμβάνει αφορούν αντίστοιχα τους δώδεκα μήνες του χρόνου. Η συγκεκριμένη μεταβλητή έχει νόημα από τη στιγμή που το κτηρίου δεν ανταλλάσσει θερμοκρασία μόνο με το εξωτερικό περιβάλλον αλλά και με το έδαφος μέσω αγωγής. Ο προσδιορισμός τους γίνεται μέσω της συγκεκριμένης παραμέτρου.

Field	Units	Obj1
January Ground Temperature	C	10
February Ground Temperature	C	10
March Ground Temperature	C	10
April Ground Temperature	C	10
May Ground Temperature	C	10
June Ground Temperature	C	10
July Ground Temperature	C	10
August Ground Temperature	C	10
September Ground Temperature	C	10
October Ground Temperature	C	10
November Ground Temperature	C	10
December Ground Temperature	C	10

Σχήμα 5-8:EnergyPlus - SiteGroundTemperature:Building Surface

5.10. Χρονικός Προγραμματισμός - Schedule: Compact

Το συγκεκριμένο πεδίο αφορά τον χρονικό προγραμματισμό διάφορων παραμέτρων που καθορίζονται στη συνέχεια, όπως η ροή από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους τα εσωτερικά κέρδη και το σύστημα HVAC. Πιο αναλυτικά, με βάση το schedule, καθορίζεται ποιες ώρες και ημέρες του χρόνου ενεργοποιείται μια παράμετρος και σε ποιο ποσοστό. Η μοντελοποίηση γίνεται ως εξής:

1. Προσδιορίζεται ο τύπος του χρονοδιαγράμματος (schedule).
2. Προσδιορίζεται μέχρι ποια ημερομηνία ισχύει και ποιες ημέρες και ώρες ενεργοποιείται.
3. Προσδιορίζεται το ποσοστό ενεργοποίησης. Δηλαδή, για μια παράμετρο η οποία καθορίζεται με βάση των αντίστοιχο χρονικό προγραμματισμό, η προκαθορισμένη της τιμή, πολλαπλασιάζεται με το ποσοστό ενεργοποίησης. Για παράδειγμα, εάν η προκαθορισμένη τιμή για τα χρονικά κέρδη είναι 200 Watt και το ποσοστό ενεργοποίησης είναι 0,5 στο αντίστοιχο χρονικό σημείο, τότε τα εσωτερικά σε αυτό το χρονικό σημείο θα είναι $200 \cdot 0,5 = 100$ Watt.
4. Η εφαρμογή της μεθόδου BESTEST, περιέχει μια μεγάλη ποικιλία από χρονοδιαγράμματα

(schedules). Έτσι, για κάθε περίπτωση της μεθόδου, φτιάχτηκε ένα schedule το οποίο αφορά την αντίστοιχη περίπτωση.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Always_Off	Always_On
Schedule Type Limits Name		On/Off	On/Off
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31
Field 2	varies	For: AllDays	For: AllDays
Field 3	varies	Until: 24:00	Until: 24:00
Field 4	varies	0	1

Σχήμα 5-9:EnergyPlus - Schedule:Compact

5.11. Υλικά - Material

Πρόκειται για το πεδίο στο οποίο προσδιορίζονται οι θερμικές ιδιότητες των υλικών της κατασκευής του κτηρίου. Αυτά είναι:

- Τραχύτητα
- Πάχος
- Θερμική Αγωγιμότητα
- Πυκνότητα
- Ειδική θερμοχωρητικότητα
- Θερμική απορροφητικότητα (thermal absorptance): Πρόκειται για το συντελεστή απορρόφησης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους. Όταν το υλικό δέχεται η εκπέμπει αντίστοιχη ακτινοβολία, ο συγκεκριμένος συντελεστής ισούται με την ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας (ϵ).
- Ηλιακή απορροφητικότητα (solar absorptance): Πρόκειται για το ποσοστό της ακτινοβολίας μικρού μήκους που θα απορροφηθεί από το υλικό.
- Ορατή απορροφητικότητα (visible absorptance): Πρόκειται για το ποσοστό της ακτινοβολίας του ορατού φάσματος θα απορροφηθεί από το υλικό.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		Plasterboard 10mm	Fiberglass Quilt 111	Roof Deck	Timber Flooring 25mm	Plasterboard 12mm	Fiberglass Quilt 66mm	Wood Siding 9mm
Roughness		Rough	Rough	Rough	Rough	Rough	Rough	Rough
Thickness	m	0,01	0,1118	0,019	0,025	0,012	0,066	0,009
Conductivity	W/m-K	0,16	0,04	0,14	0,14	0,16	0,04	0,14
Density	kg/m3	950	12	530	650	950	12	530
Specific Heat	J/kg-K	840	840	900	1200	840	840	900
Thermal Absorptance		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Solar Absorptance		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Visible Absorptance		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

Σχήμα 5-10:EnergyPlus - Material

5.12. Υλικά Παραθύρων - Window Material: Glazing

Αντίστοιχα, στο συγκεκριμένο πεδίο προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά του υαλοπίνακα που χρησιμοποιείται στα παράθυρα. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι το πάχος, η ικανότητα μετάδοσης και ανάκλασης ακτινοβολίας και η θερμική αγωγιμότητα.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		OS:SubSurface 2	OS:SubSurface 1
Surface Type		Window	Window
Construction Name		Window Construction	Window Constructio
Building Surface Name		OS:Surface 5	OS:Surface 5
Outside Boundary Condition Object			
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate
Shading Control Name			
Frame and Divider Name			
Multiplier		1	1
Number of Vertices		autocalculate	autocalculate
Vertex 1 X-coordinate	m	4,5	0,5
Vertex 1 Y-coordinate	m	0	0
Vertex 1 Z-coordinate	m	2,2	2,2
Vertex 2 X-coordinate	m	4,5	0,5
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	0
Vertex 2 Z-coordinate	m	0,2	0,2
Vertex 3 X-coordinate	m	7,5	3,5
Vertex 3 Y-coordinate	m	0	0
Vertex 3 Z-coordinate	m	0,2	0,2
Vertex 4 X-coordinate	m	7,5	3,5
Vertex 4 Y-coordinate	m	0	0
Vertex 4 Z-coordinate	m	2,2	2,2

Σχήμα 5-11:EnergyPlus - Window Material:Glazing

5.13. Δομή Επιφανειών - Construction

Στο συγκεκριμένο πεδίο προσδιορίζονται τα είδη επιφανειών που υπάρχουν στο κτήριο. Δηλαδή, τα είδη των τοίχων ανάλογα με τα υλικά που περιέχουν και με ποια σειρά είναι διατεταγμένα. Στη συνέχεια, η κάθε επιφάνεια θα πρέπει να έχει προσδιορισμένο το είδος του τοίχου από το οποίο αποτελείται προκειμένου να είναι εφικτή η προσομοίωση.

Επίσης, η σειρά των υλικών που είναι καταγεγραμμένα σε κάθε αντικείμενο της παραμέτρου construction, αντιστοιχεί στη σειρά που είναι τοποθετημένα από έξω προς τα μέσα.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Floor Construction	Window Construction	Wall Construction	Roof Construction
Outside Layer		Insulation Floor	BESTEST Clear 1/8in	Wood Siding 9mm	Roof Deck
Layer 2		Timber Flooring 25mm	BESTEST AIRGAP 1/2IN	Fiberglass Quilt 66mm	Fiberglass Quilt 111
Layer 3			BESTEST Clear 1/8in	Plasterboard 12mm	Plasterboard 10mm

Σχήμα 5-12:EnergyPlus - Construction

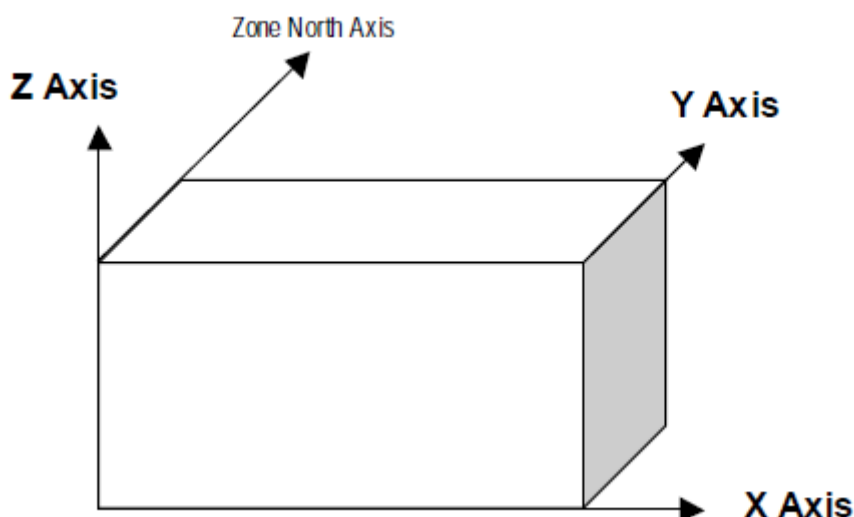
5.14. Κανόνες Γεωμετρίας - Global Geometry Rules

Στο συγκεκριμένο πεδίο καθορίζονται κάποιοι γενικοί κανόνες σε σχέση με τον καθορισμό των κορυφών μιας επιφάνειας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι επιφάνειες στο EnergyPlus όπως και στα περισσότερα λογισμικά θερμικής προσομοίωσης προσδιορίζονται σαν ένα σύνολο καρτεσιανών σημείων στον τρισδιάστατο χώρο.

Προκειμένου να είναι εφικτοί οι υπολογισμοί της σκίασης ενός κτηρίου και να γίνουν με τον ίδιο τρόπο για όλες τις επιφάνειες, πρέπει να είναι καθορισμένη η αρχική κορυφή μιας επιφάνειας καθώς και η σειρά με την οποία αναφέρονται τα καρτεσιανά σημεία της κοιτάζοντας την από την εξωτερική όψη της θερμικής ζώνης στην οποία ανήκουν.

Field	Units	Obj1
Starting Vertex Position		UpperLeftCorner
Vertex Entry Direction		Counterclockwise
Coordinate System		Relative
Daylighting Reference Point Coordinate System		
Rectangular Surface Coordinate System		

Σχήμα 5-13:EnergyPlus - GlobalGeometryRules



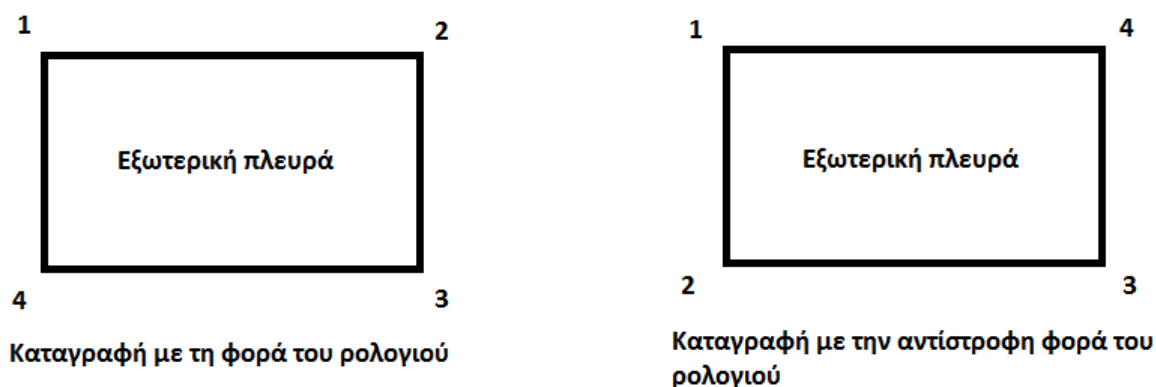
Σχήμα 5-14:EnergyPlus - Σύστημα συντεταγμένων

5.14.1 Starting Vertex Position: Upper Left Corner

Εδώ καθορίζεται η κορυφή της επιφάνειας η οποία θεωρείται ως αρχική, κατά την διαδικασία προσδιορισμού της στον τρισδιάστατο χώρο. Δηλαδή, το πρώτο καρτεσιανό σημείο της επιφάνειας θεωρείται ότι είναι η πάνω αριστερή γωνία της. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες επιφάνειες ενός κτηρίου αποτελούνται από 4 καρτεσιανά σημεία και κατά συνέπεια είναι εύκολος ο χαρακτηρισμός τους ως πάνω – κάτω ή αριστερή δεξιά γωνία.

5.14.2 Vertex Entry Direction: Counterclock Wise

Η σειρά αναφοράς των κορυφών μιας επιφάνειας κοιτώντας την εξωτερικά και έχοντας καθορίσει το αρχικό της σημείο μπορεί να γίνει με δυο τρόπους. Είτε καταγράφοντας τα σημεία ένα προς ένα σύμφωνα με τη φορά του ρολογιού, είτε με την αντίστροφη φορά του ρολογιού.



Σχήμα 5-15:Καταγραφή κορυφών επιφάνειας

5.14.3 Coordinate System: Relative

Όπως προαναφέρθηκε, η θέση των επιφανειών προσδιορίζεται με βάση κάποια καρτεσιανά σημεία στον τρισδιάστατο χώρο τα οποία όμως με τη σειρά τους πρέπει να είναι καθορισμένα με βάση κάποιο σύστημα συντεταγμένων.

Το σχετικό (relative) σύστημα συντεταγμένων προσδιορίζει τα καρτεσιανά σημεία σε σχέση με τον βόρειο άξονα του κτηρίου και της θερμικής ζώνης καθώς και με το αρχικό σημείο της θερμικής ζώνης.

Το παγκόσμιο (world) σύστημα συντεταγμένων προσδιορίζει όλα τα καρτεσιανά σημεία σε σχέση με ένα αρχικό σημείο (0,0,0) το οποίο θεωρείται και αρχικό σημείο όλων των θερμικών ζωνών.

5.15. Θερμική Ζώνη - Zone

Πρόκειται για το πεδίο όπου καθορίζονται συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της κάθε θερμικής ζώνης όπως το αρχικό της σημείο, η γωνία του βορείου άξονα της ζώνης σε σχέση με τον βόρειο άξονα του κτηρίου, το ύψος της οροφής και ο όγκος της.

Field	Units	Obj1
Name		OS:ThermaZone 1
Direction of Relative North	deg	0
X Origin	m	0
Y Origin	m	0
Z Origin	m	0
Type		1
Multiplier		1
Ceiling Height	m	2,7
Volume	m3	129,6

Σχήμα 5-16:EnergyPlus - Zone

5.16. Επιφάνειες Κτηρίου - Building Surface: Detailed

Πρόκειται για το πεδίο το οποίο περιέχει τις πληροφορίες για κάθε επιφάνεια του κτηρίου. Αυτές είναι:

- Είδος επιφάνειας όπως τοίχος, πάτωμα, οροφή κλπ
- Θερμική ζώνη που ανήκουν
- Είδος κατασκευής (construction) της επιφάνειας
- Οριακή συνθήκη εξωτερικής πλευράς επιφάνειας:
- Για εξωτερικές επιφάνειες όπως εξωτερικούς τοίχους είναι το εξωτερικό περιβάλλον
- Για εσωτερικές επιφάνειες όπως εσωτερικούς τοίχους είναι κάποια άλλη επιφάνεια ή κάποια θερμική ζώνη
- Έκθεση της εξωτερικής πλευράς της επιφάνειας στον ήλιο
- Έκθεση της εξωτερικής πλευράς της επιφάνειας στον άνεμο
- Καρτεσιανά σημεία τα οποία περιγράφουν τις κορυφές της κάθε επιφάνειας

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		OS:Surface 1	OS:Surface 6	OS:Surface 2	OS:Surface 5	OS:Surface 4	OS:Surface 3
Surface Type		Floor	Wall	Wall	Wall	Wall	Roof
Construction Name		Floor Construction	Wall Construction	Wall Construction	Wall Construction	Wall Construction	Roof Construction
Zone Name		OS:ThermalZone 1	OS:ThermalZone 1	OS:ThermalZone 1	OS:ThermalZone 1	OS:ThermalZone 1	OS:ThermalZone 1
Outside Boundary Condition		Surface	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors
Outside Boundary Condition Object		OS:Surface 1					
Sun Exposure		NoSun	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed
Wind Exposure		NoWind	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed
View Factor to Ground							
Number of Vertices							
Vertex 1 X-coordinate	m	8	8	0	0	8	8
Vertex 1 Y-coordinate	m	6	6	6	0	0	0
Vertex 1 Z-coordinate	m	0	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Vertex 2 X-coordinate	m	8	8	0	0	8	8
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	6	6	0	0	6
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0	2,7
Vertex 3 X-coordinate	m	0	0	0	8	8	0
Vertex 3 Y-coordinate	m	0	6	0	0	6	6
Vertex 3 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0	2,7
Vertex 4 X-coordinate	m	0	0	0	8	8	0
Vertex 4 Y-coordinate	m	6	6	0	0	6	0
Vertex 4 Z-coordinate	m	0	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7

Σχήμα 5-17:EnergyPlus - BuildingSurface:Detailed

5.17. Παράθυρα Κτηρίου - Fenestration Surface: Detailed

Με αντίστοιχο τρόπο που ορίζονται οι επιφάνειες του κτηρίου, ορίζονται και τα ανοίγματα του όπως παράθυρα πόρτες κλπ. Στο συγκεκριμένο πεδίο υπάρχουν πρόσθετες πληροφορίες όπως:

- Επιφάνεια στην οποία ανήκουν
- Πολλαπλασιαστής (multiplier): Η συγκεκριμένη παράμετρος περιγράφει τον αριθμό ίδιων ανοιγμάτων που είναι τοποθετημένα στη σειρά σε μια επιφάνεια. Χρησιμοποιείται προκειμένου να εξοικονομηθεί υπολογιστική ισχύς και να μειωθεί ο συνολικός αριθμός αντικειμένων στο συγκεκριμένο πεδίο προσδίδοντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα να προσομοιωθούν οι θερμικές επιπτώσεις που θα είχαν πολλαπλά ίδια ανοίγματα στη σειρά.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		OS:SubSurface 2	OS:SubSurface 1
Surface Type		Window	Window
Construction Name		Window Construction	Window Constructic
Building Surface Name		OS:Surface 5	OS:Surface 5
Outside Boundary Condition Object			
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate
Shading Control Name			
Frame and Divider Name			
Multiplier		1	1
Number of Vertices		autocalculate	autocalculate
Vertex 1 X-coordinate	m	4,5	0,5
Vertex 1 Y-coordinate	m	0	0
Vertex 1 Z-coordinate	m	2,2	2,2
Vertex 2 X-coordinate	m	4,5	0,5
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	0
Vertex 2 Z-coordinate	m	0,2	0,2
Vertex 3 X-coordinate	m	7,5	3,5
Vertex 3 Y-coordinate	m	0	0
Vertex 3 Z-coordinate	m	0,2	0,2
Vertex 4 X-coordinate	m	7,5	3,5
Vertex 4 Y-coordinate	m	0	0
Vertex 4 Z-coordinate	m	2,2	2,2

Σχήμα 5-18:EnergyPlus - FenestrationSurface:Detailed

5.18. Επιφάνεια Σκίασης – Shading:Zone:Detailed

Η μοντελοποίηση μιας επιφάνειας σκίασης μπορεί να γίνει με τρία διαφορετικά αντικείμενα:

- Shading: Fin
- Shading: Overhang
- Shading: Zone: Detailed

Οι δυο πρώτες επιλογές δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να μοντελοποιήσει επιφάνειες σκίασης ενός ανοίγματος του κτηρίου όπως παράθυρα, πόρτες κλπ.

Αντίθετα, το αντικείμενο Shading:Zone :Detailed μοντελοποιεί μια επιφάνεια σκίασης με βάση μια δομική επιφάνεια όπως οι τοίχοι. Το συγκεκριμένο αντικείμενο επιλέχθηκε για το λόγο ότι οι επιφάνειες σκίασης οι οποίες περιγράφονται στη μέθοδο BESTEST δεν περιορίζονται γεωμετρικά στα παράθυρα των κτηρίων αλλά σκιάζουν ολόκληρο τον τοίχο στον οποίο ανήκουν.

Field	Units	Obj1
Name		OS:ShadingSurface1
Base Surface Name		OS:Surface 5
Transmittance Schedule Name		
Number of Vertices		autocalculate
Vertex 1 X-coordinate	m	8
Vertex 1 Y-coordinate	m	0
Vertex 1 Z-coordinate	m	2,7
Vertex 2 X-coordinate	m	8
Vertex 2 Y-coordinate	m	-1,00829326E+00
Vertex 2 Z-coordinate	m	2,7
Vertex 3 X-coordinate	m	0
Vertex 3 Y-coordinate	m	-1,00829326E+00
Vertex 3 Z-coordinate	m	2,7
Vertex 4 X-coordinate	m	0
Vertex 4 Y-coordinate	m	0
Vertex 4 Z-coordinate	m	2,7

Σχήμα 5-19:Shading:Zone:Detailed

5.19. Εσωτερικά Κέρδη - Other Equipment

Η συγκεκριμένη παράμετρος χρησιμοποιήθηκε έτσι ώστε να μοντελοποιηθούν τα εσωτερικά κέρδη από ηλεκτρικές συσκευές, ανθρώπους κλπ. Έχει καθοριστεί το ποσοστό της θερμότητας το οποίο απορροφάται απευθείας από τις εσωτερικές επιφάνειες των τοίχων, η θερμική ζώνη που αφορά το συγκεκριμένο αντικείμενο, η μηδενική απώλεια θερμότητας καθώς και ότι η υγρασία του αέρα της ζώνης και του κτηρίου δεν επηρεάζονται από τα εσωτερικά κέρδη. Επίσης ο χρονικός προγραμματισμός που έχει χρησιμοποιηθεί (schedule – Always_On) θέτει σταθερά ενεργοποιημένα τα εσωτερικά κέρδη καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Ο λόγος που επιλέχτηκε το συγκεκριμένο αντικείμενο είναι διότι εμπεριέχει πλήρως την περιγραφή της μοντελοποίησης κατά τη μέθοδο BESTEST. Η μοντελοποίηση των εσωτερικών κερδών, μπορεί να γίνει και με άλλα αντικείμενα τα οποία δίνουν τη δυνατότητα για προσδιορισμό μεγαλύτερης ποσότητας πληροφορίας. Για παράδειγμα, στο αντικείμενο People μπορεί να οριστεί ο αριθμός των ανθρώπων σε ένα χώρο καθώς και ο ρυθμός παράγωγής τους διοξειδίου του άνθρακα. Τα αντικείμενα αυτά είναι:

- People
- Lights
- Gas Equipment
- Hot Water Equipment
- Steam Equipment

- Electrical Equipment

Field	Units	Obj1
Name		BESTEST INTERNAL GAINS
Zone Name		OS:ThermalZone 1
Schedule Name		Always_On
Design Level Calculation Method		EquipmentLevel
Design Level	W	200
Watts per Zone Floor Area	W/m2	
Watts per Person	W/person	
Fraction Latent		0
Fraction Radiant		0,6
Fraction Lost		0

Σχήμα 5-20:EnergyPlus - OtherEquipment

5.20. Ροή Αέρα Από Ρωγμές και Χαραμάδες - ZoneInfiltration: Design Flow Rate

Αντίστοιχα με τα εσωτερικά κέρδη, η συγκεκριμένη παράμετρος χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να μοντελοποιηθεί η ροή αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους που υφίσταται στο κτήριο.

Για την επαρκή μοντελοποίηση της ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους, προσδιοριστική η θερμική ζώνη την οποία άφορα, ο χρονικός προγραμματισμός σύμφωνα με τον οποίο είναι συνεχόμενη καθώς και ο τρόπος μέτρησης της ροής του αέρα.

Field	Units	Obj1
Name		BESTEST INFILTRATION
Zone or ZoneList Name		OS:ThermalZone 1
Schedule Name		Always_On
Design Flow Rate Calculation Method		AirChanges/Hour
Design Flow Rate	m3/s	
Flow per Zone Floor Area	m3/s-m2	
Flow per Exterior Surface Area	m3/s-m2	
Air Changes per Hour	1/hr	0,5
Constant Term Coefficient		1
Temperature Term Coefficient		0
Velocity Term Coefficient		0
Velocity Squared Term Coefficient		0

Σχήμα 5-21:EnergyPlus - ZoneInfiltration:DesignFlowRate

Η μοντελοποίηση της ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους στο EnergyPlus γίνεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση(15):

$$Infiltration = I_{design} * F_{sched} * [A + B * |T_{odb} - T_{zone}| + C * Windspeed + D * Windspeed^2]$$

Όπου:

- I_{design} η προκαθορισμένη τιμή της ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους που μεταβάλλεται ανάλογα με τους παρακάτω συντελεστές και δίνει την τελική τιμή
- F_{sched} ο χρονικός προγραμματισμός της ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους
- T_{odb} η εξωτερική θερμοκρασία ξηρού βολβού
- T_{zone} η θερμοκρασία της ζώνης
- A,B,C,D συντελεστές ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους

Οι τιμές των συντελεστών ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους αποτελούν αντικείμενο συζήτησης και στα διάφορα λογισμικά θερμικής προσομοίωσης οι προκαθορισμένες τιμές τους διαφέρουν. Έτσι έχουμε:

Energy Plus:

- A = 1
- B = 0 (K)

- $C = 0 \left(\frac{s}{m}\right)$
- $D = 0 \left(\frac{s^2}{m^2}\right)$

Οι συγκεκριμένοι συντελεστές όπως είναι αυτονόητο θέτουν την προκαθορισμένη τιμή της ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους ως την τελική τιμή η οποία είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τη διάφορα της εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας ή την ταχύτητα του ανέμου.

BLAST:

- $A = 0,606$
- $B = 0,03636 (K)$
- $C = 0,1177 \left(\frac{s}{m}\right)$
- $D = 0 \left(\frac{s^2}{m^2}\right)$

Υποθέτοντας ότι η διαφορά θερμοκρασίας ζώνης και εξωτερικής θερμοκρασίας ξηρού βολβού είναι 0, και η ταχύτητα ανέμου 3,75 m/s, συνθήκες που συμβαίνουν περισσότερο τους καλοκαιρινούς μήνες, η ροή αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους ισούται με την προκαθορισμένη τιμή.

DOE-2

- $A = 0$
- $B = 0 (K)$
- $C = 0 \left(\frac{s}{m}\right)$
- $D = 0,224 \left(\frac{s^2}{m^2}\right)$

Αντίστοιχα, υποθέτοντας ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι 47 m/s, η ροή αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους ισούται με την προκαθορισμένη τιμή.

Η εκάστοτε τιμές των συντελεστών αυτών έχουν προσδιοριστεί με βάση τα εγχειρίδια της ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning)(9).

Η χρήση της ταχύτητας του ανέμου και της εξωτερικής θερμοκρασίας στην εξίσωση της ροής αέρα από ρωγμές και χαραμάδες του κτηριακού κελύφους γίνεται προκειμένου να μοντελοποιηθεί η επίπτωση που έχει το ύψος της ζώνης σε σχέση με το επίπεδο του εδάφους.

5.21. Ιδανικό Σύστημα HVAC

5.21.1 HVAC Template: Thermostat

Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας μέσω ενός ιδανικού συστήματος, αρχικά ορίστηκε ένας θερμοστάτης σύμφωνα με τον οποίο ενεργοποιείται το ιδανικό σύστημα HVAC. Ο ορισμός του συγκεκριμένου αντικειμένου μπορεί να γίνει είτε ορίζοντας δυο θερμοκρασίες οι οποίες αποτελούν το εύρος το οποίο άμα ξεπεράσει η θερμοκρασία της ζώνης το σύστημα ενεργοποιείται ανεξάρτητα από κάποιο schedule, είτε ορίζοντας ένα schedule το οποίο περιγράφει ουσιαστικά πολλαπλούς θερμοστάτες των οποίων το αντίστοιχο θερμοκρασιακό εύρος ισχύει για συγκεκριμένες ώρες και ημέρες.

Field	Units	Obj1
Name		BESTEST THERMOSTAT
Heating Setpoint Schedule Name		
Constant Heating Setpoint	C	20
Cooling Setpoint Schedule Name		
Constant Cooling Setpoint	C	27

Σχήμα 5-22::EnergyPlus - HVACTemplate:Thermostat

5.21.2 HVAC Template: Zone: Ideal Loads Air System

Αφότου οριστικέ ο θερμοστάτης, στη συνεχεία οριστικέ με το αντίστοιχο αντικείμενο ένα ιδανικό σύστημα το οποίο επηρεάζει τη θερμοκρασία της ζώνης μόνο μέσω συναγωγής και δεν καταναλώνει καθόλου ενέργεια.

Field	Units	Obj1
Zone Name		OS:ThermaZone 1
Template Thermostat Name		BESTEST THERMOSTAT

Σχήμα 5-23:EnergyPlus - HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem

6. Αποτελέσματα Πειραμάτων

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο αφορά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της μεθόδου IEA BESTEST, στα λογισμικά SRC και EnergyPlus. Επίσης, περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα που είχαν προκύψει από παλαιότερες αξιολογήσεις των παρακάτω λογισμικών:

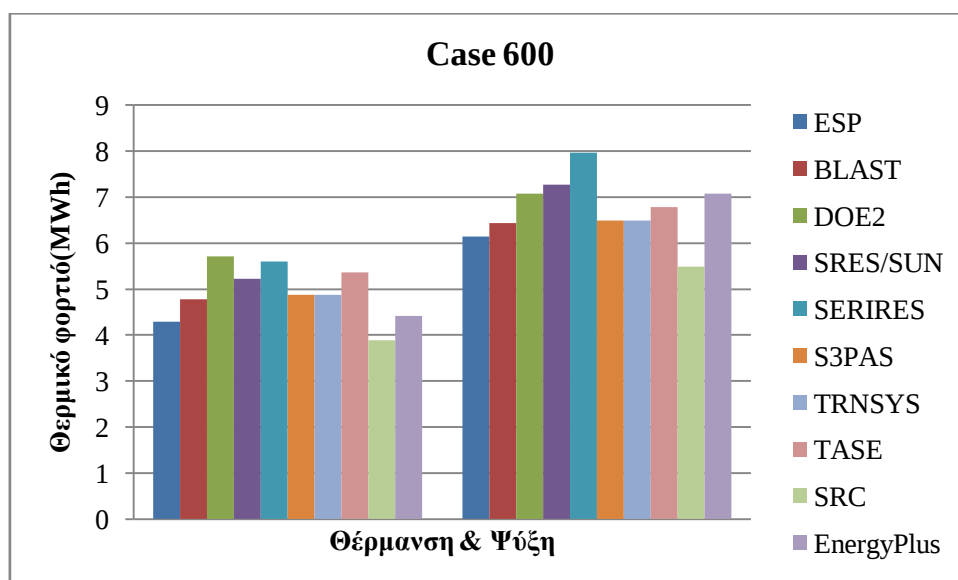
- ESP
- BLAST
- DOE-2
- SRES/SUN
- SERISES
- S3PAS
- TRNSYS
- TASE

Τα αποτελέσματα από τα παραπάνω λογισμικά, υπάρχουν σαν βάση σύγκρισης και διατίθενται από το αρχείο που παρέχει η μέθοδος IEA BESTEST μαζί με το αρχείο καιρού. Παρόλα αυτά, δεν αποτέλεσαν το βασικό μέτρο σύγκρισης καθώς οι εκδόσεις στις οποίες αναφέρονται μετρούν πάνω από μια δεκαετία. Κατά συνέπεια, το κύριο μέτρο σύγκρισης ήταν τα αποτελέσματα του EnergyPlus (v 7.1.0). Αρχικά, προσομοιώθηκε η πρώτη περίπτωση κτηρίου Case 600. Όμως, τα αποτελέσματα του λογισμικού SRC παρουσίασαν αποκλίσεις από τα αντίστοιχα του EnergyPlus. Έτσι, ακλούθησε η προσομοίωση των διαγνωστικών περιπτώσεων για τον εντοπισμό των εκάστοτε αδυναμιών του. Σύμφωνα με τη μέθοδο IEA BESTEST, στις διαγνωστικές περιπτώσεις πέραν της βασικής, η σύγκριση που γίνεται δεν είναι πάνω στα αποτελέσματα της έκαστου προσομοίωσης αλλά στην διαφορά που του θερμικού φορτίου που παρουσιάζεται από τη μια περίπτωση στην άλλη. Για παράδειγμα, κατά την περίπτωση κτηρίου Case 200 δεν συγκρίνονται τα αποτελέσματα του έκαστου λογισμικού αλλά η διαφορά που παρουσιάζουν μεταξύ της Case 195 και της Case 200. Επίσης, κατά τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής τα αποτελέσματα του λογισμικού παρέμειναν σε επίπεδα τα όποια δείχνουν ότι χρειάζεται βελτίωση του λογισμικού, προκειμένου να θεωρηθούν επιτυχίες η διαγνωστικές περιπτώσεις και να προχωρήσει ο έλεγχος στις υπόλοιπες. Έτσι, οι περιπτώσεις που προσομοιώθηκαν είναι οι εξής όπου στην παρένθεση αναφέρεται εν συντομία η περιγραφή της περίπτωσης ή η παράμετρος που ενεργοποιείται κάθε φορά:

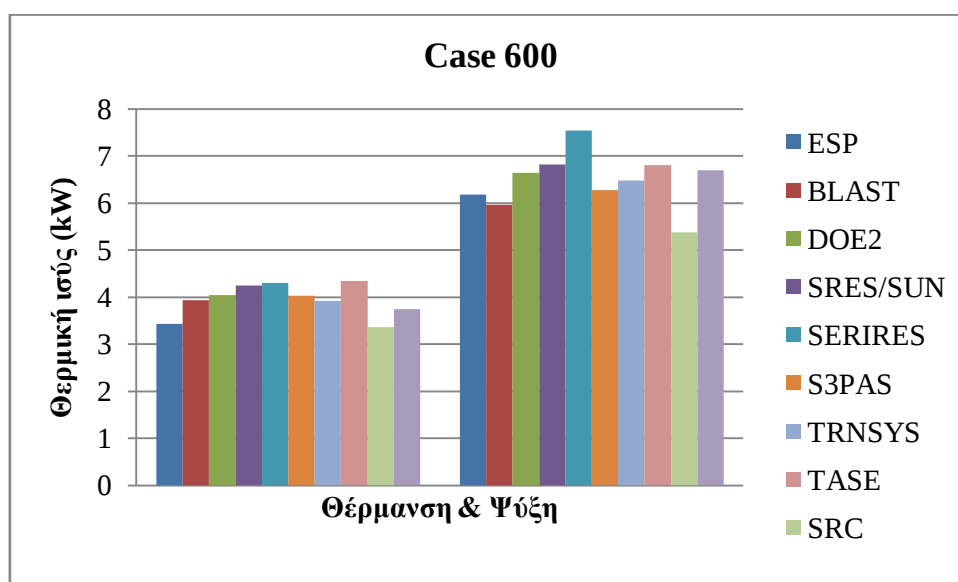
1. Case 600 (Γενικευμένη αρχική περίπτωση)
2. Case 195 (Μετάδοση θερμότητας με αγωγή – Διαγνωστική περίπτωση)
3. Case 200 (Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή – Διαγνωστική περίπτωση)
4. Case 210 (Ακτινοβολία μεγάλου μήκους εξωτερικής πλευράς επιφανειών – Διαγνωστική περίπτωση)
5. Case 215 (Ακτινοβολία μεγάλου μήκους εσωτερικής πλευράς επιφανειών – Διαγνωστική περίπτωση)
6. Case 220 (Ακτινοβολία μεγάλου μήκους εσωτερικών και εξωτερικών πλευρών επιφανειών – Διαγνωστική περίπτωση)

6.1. Αρχική γενικευμένη περίπτωση - Case 600

Στην πρώτη περίπτωση Case 600 που προσομοιώθηκε, παρατηρήθηκε μια σημαντική διαφορά μεταξύ του λογισμικού SRC και του EnergyPlus, καθώς και όλων των υπολοίπων, όπως φαίνεται και από τους παραπάνω πίνακες. Για να διερευνηθεί περαιτέρω η περίπτωση, έγινε προσομοίωση της στα δυο λογισμικά, χωρίς το κτήριο να θερμαίνεται και να ψύχεται από κάποιο σύστημα HVAC. Έτσι, συγκρίθηκε η θερμοκρασία των θερμικών ζωνών, η πρόσπτωση ακτινοβολίας σε κάθε εξωτερικό τοίχο καθώς και το ποσοστό υγρασίας του αέρα της θερμικής ζώνης. Έτσι υπήρξαν τα παρακάτω αποτελέσματα.



Σχήμα 6-1: Ετήσια θερμικά φορτία – Case 600



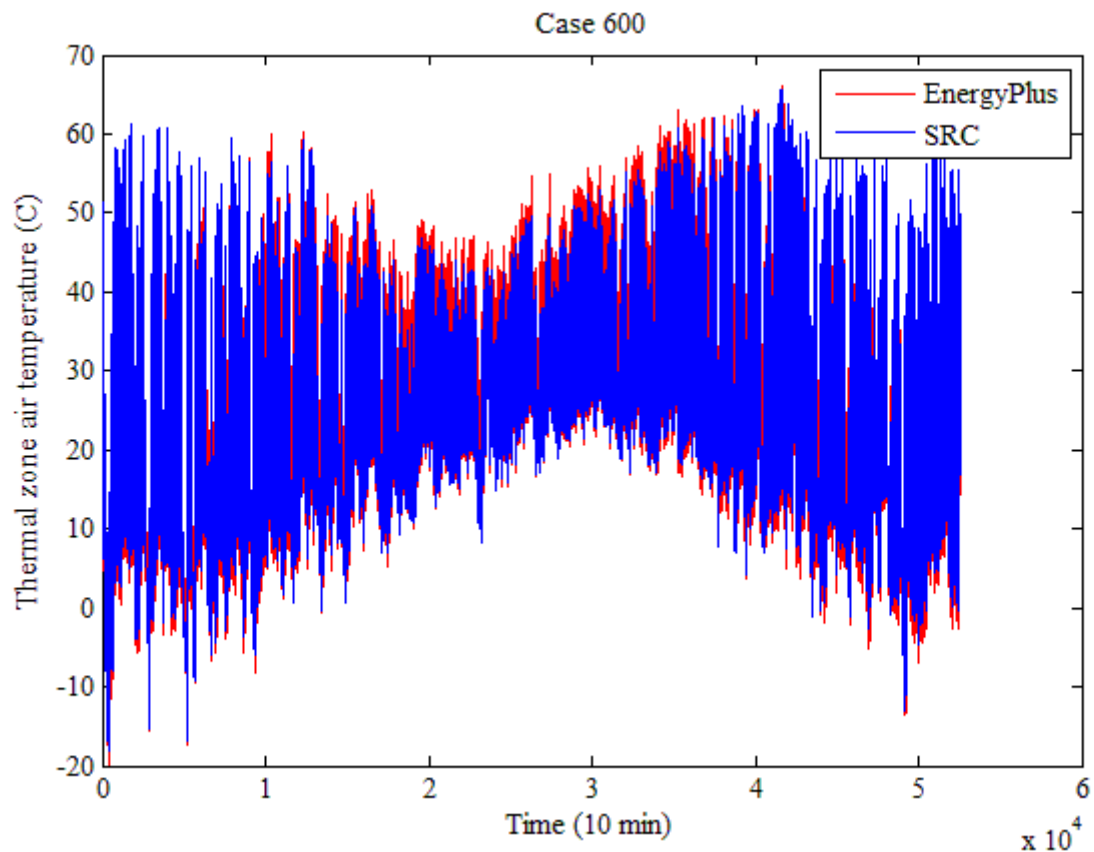
Σχήμα 6-2: Μέγιστη θερμική ισχύς - Case 600

Πίνακας 6-1: Διαφορές θερμικών φορτίων SRC & EnergyPlus - Case 600

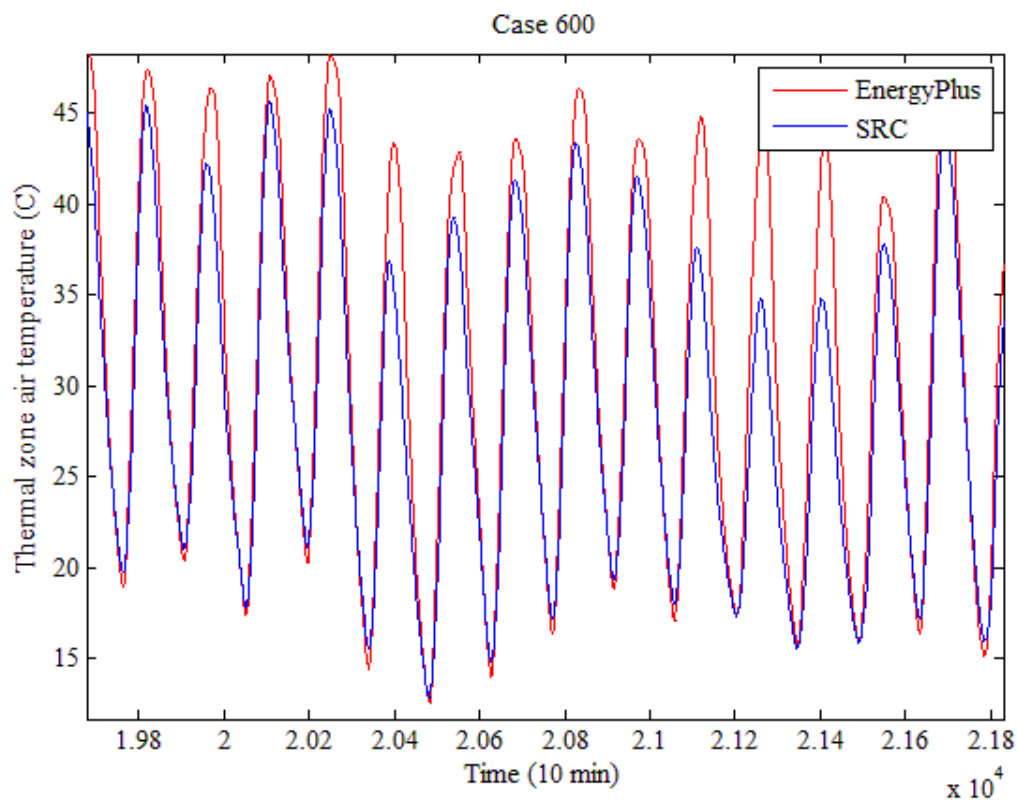
	Ετήσιο φορτίο θέρμανσης (MWh)	Ετήσιο φορτίο ψύξης (MWh)	Μέγιστο φορτίο θέρμανσης (kW)	Μέγιστο φορτίο θέρμανσης (kW)
Ποσοστιαία Διαφορά	-12%	-22,6	-10,4	-20,9
Διαφορά	0,53	-1,6	-0,39	-1,4

Όπως φαίνεται, υπάρχει διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του αέρα της θερμικής ζώνης στα δυο λογισμικά. Η διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών, αυξάνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και κορυφώνεται τις μεσημεριανές ώρες, ενώ παρατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Η μέγιστη τιμή της είναι 12,25°C. Το αποτέλεσμα αυτό οδήγησε στην απόφαση ότι διαδικασία των προσομοιώσεων θα έπρεπε να προσχωρήσει με τις διαγνωστικές, έτσι ώστε να εξετάσει η συμπεριφορά του κτηρίου υπό συγκεκριμένα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας. Στο συγκεκριμένο στάδιο, θα ήταν ανώφελο να επιχειρήσει κανείς τον

εντοπισμό των παραμέτρων που δημιουργούν αυτές τις αποκλίσεις για το λόγο ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση κτηρίου συνδυάζεται μια πληθώρα μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας και κατά συνέπεια η θερμική συμπεριφορά του κτηρίου επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες.

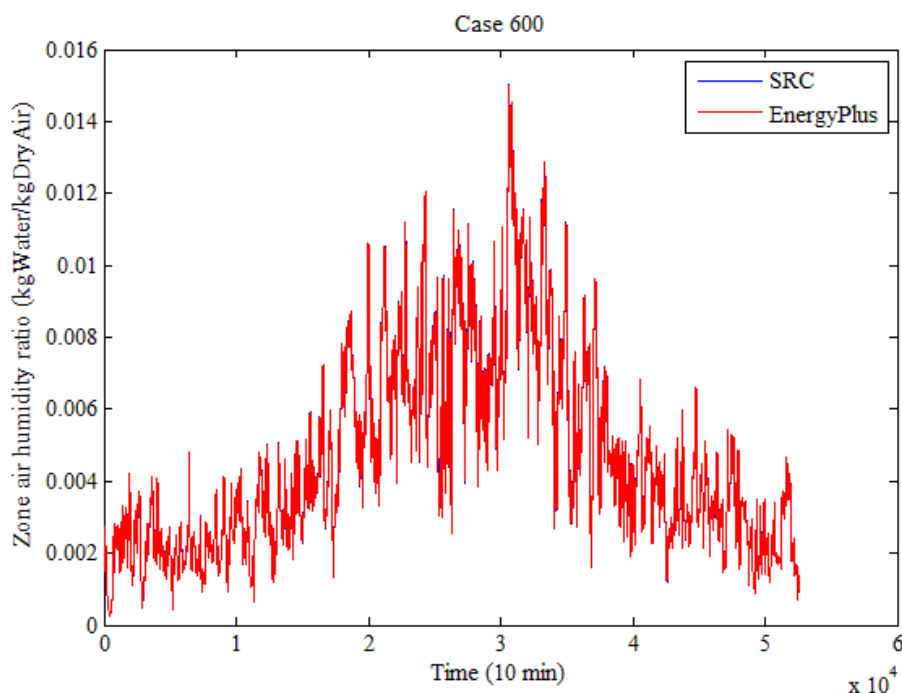


Σχήμα 6-3:Θερμοκρασία αέρα θερμικής ζώνης θερμικής ζώνης χωρίς σύστημα HVAC - Case 600



Σχήμα 6-4:Στηγμιότυπο θερμοκρασίας αέρα θερμικής ζώνης χωρίς σύστημα HVAC - Case 600

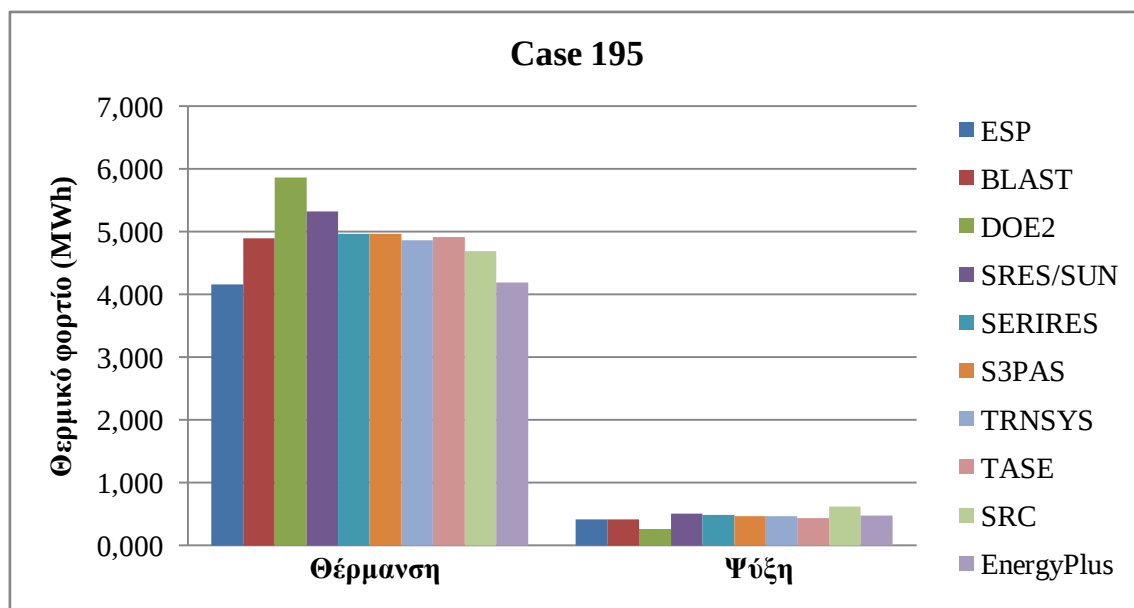
Το ποσοστό της υγρασίας του αέρα της θερμικής ζώνης ταυτίζεται για τα δυο λογισμικά. Πρέπει να τονισθεί ότι και στα δυο, εξάγεται με βάση τα ψυχομετρικά διαγράμματα της ASHRAE.



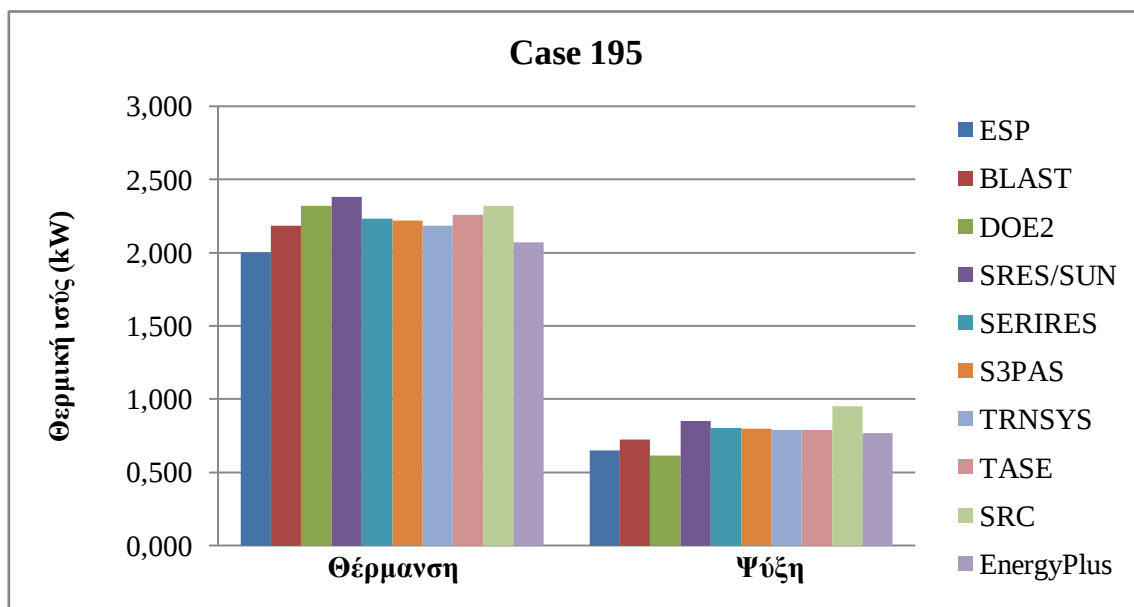
Σχήμα 6-5: Ποσοστό υγρασίας στον αέρα της θερμικής ζώνης

6.2. Μετάδοση θερμότητας με αγωγή - Case195

Η πρώτη διαγνωστική περίπτωση είναι η Case 195. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ελέγχεται εάν το λογισμικό θερμικής προσομοίωσης παρουσιάζει πρόβλημα στη μετάδοση θερμότητας με αγωγή. Το κτήριο δεν επηρεάζεται από την ηλιακή ακτινοβολία αφού η ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας και ο συντελεστής απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών είναι 0,1. Επίσης, λόγω του γεγονότος ότι δεν υπάρχει ροή αέρα από ρωγμές του κελύφους και χαραμάδες, δεν υπάρχει μεταφορά υγρασίας η οποία θα μπορούσε να επηρεάσει τη θερμοκρασία της θερμικής ζώνης. Έτσι, οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται πιθανώς να οφείλονται στο μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιεί το εκάστοτε λογισμικό. Κατά τη συγκεκριμένη περίπτωση πραγματοποιήθηκε και θερμική προσομοίωση χωρίς η θερμοκρασία του κτηρίου να ελέγχεται από κάποιο σύστημα HVAC. Έτσι, η μέγιστη διαφορά είναι 2,06 °C ενώ το σημείο της ημέρας που παρατηρείται η αύξηση της είναι το μεσημέρι. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι η διαφορά αυτή μικραίνει τους χειμερινούς μήνες και αυξάνεται τους καλοκαιρινούς. Το γεγονός ότι η θερμοκρασία του αέρα της ζώνης στο SRC είναι σταθερά υψηλότερη κατά την κορύφωση της σε σχέση με το EnergyPlus, δείχνει ότι ενδεχομένως να υπάρχει και διαφορά στο τρόπο αποθήκευσης της ενέργειας στους τοίχους ή στον αέρα. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται ότι το SRC αποθηκεύει μεγαλύτερο ποσό ενέργειας με αποτέλεσμα να είναι και μεγαλύτερη η θερμοκρασία του αέρα της θερμικής ζώνης.



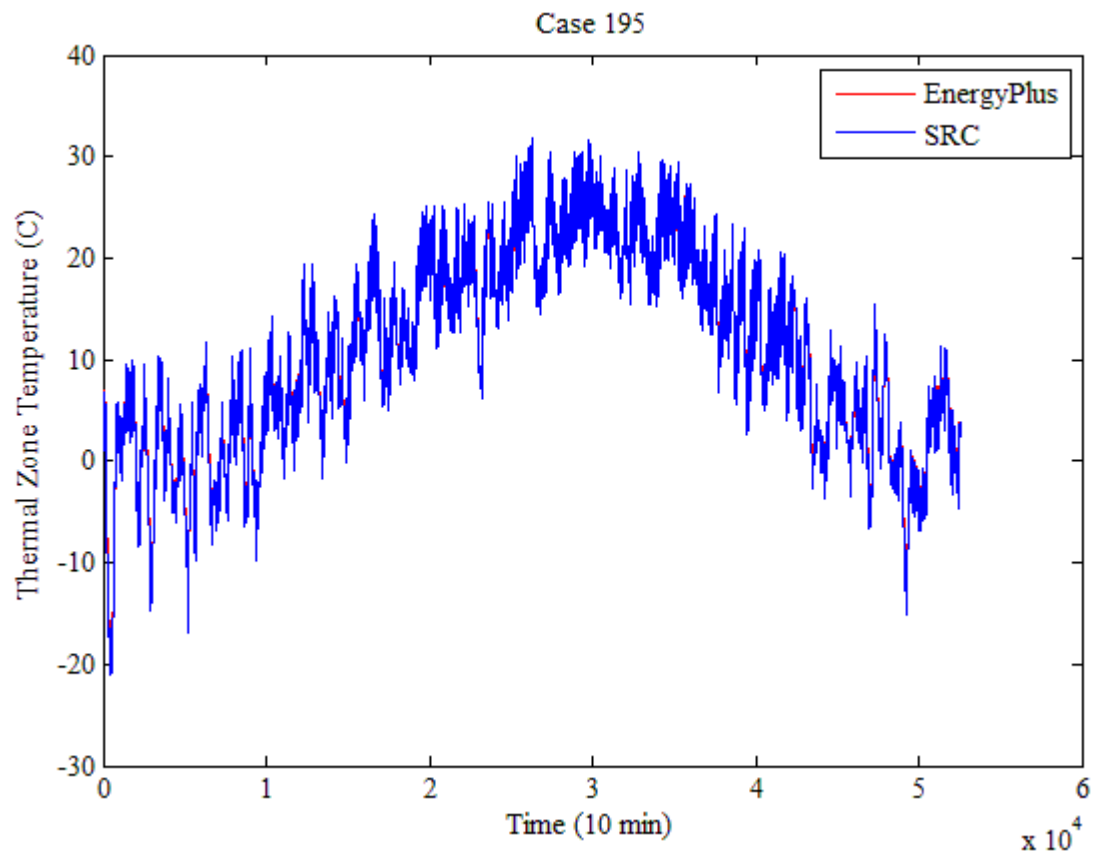
Σχήμα 6-6: Ετήσια θερμικά φορτία - Case 195



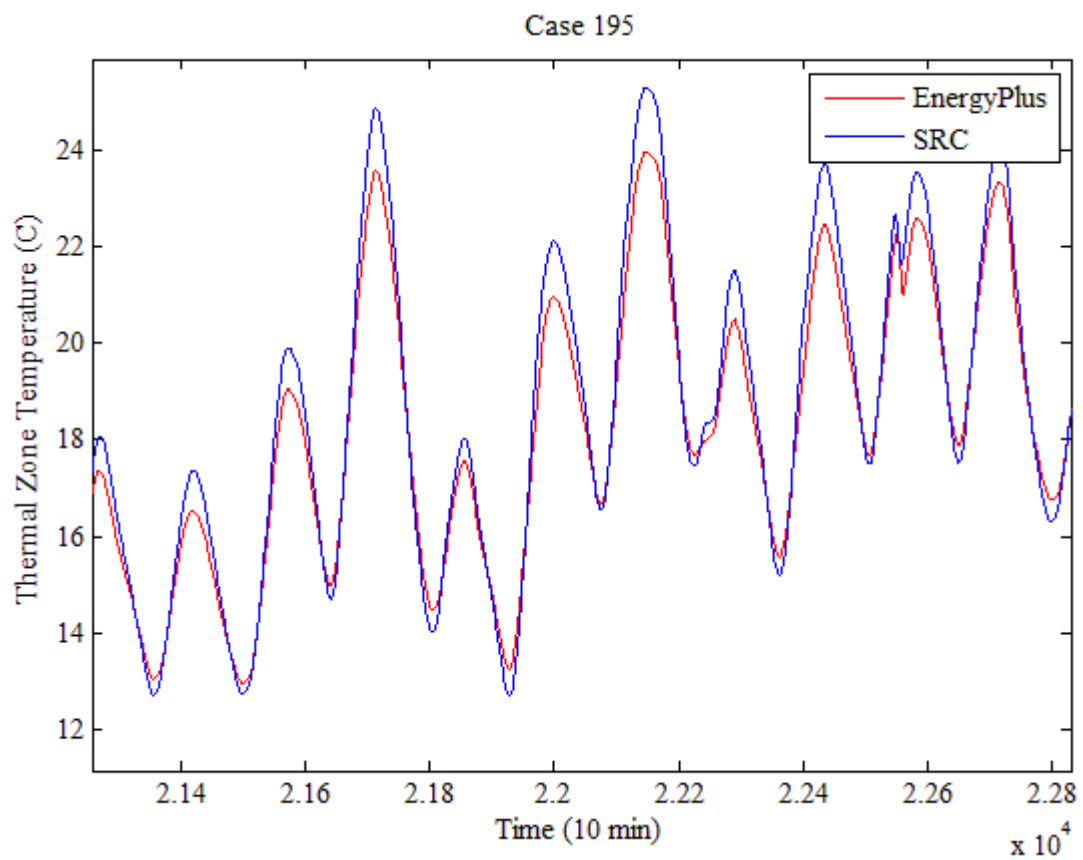
Σχήμα 6-7: Μέγιστη θερμική ισχύς - Case 195

Πίνακας 6-2: Διαφορές θερμικών φορτίων SRC & EnergyPlus - Case 195

	Ετήσιο φορτίο θέρμανσης (MWh)	Ετήσιο φορτίο ψύξης (MWh)	Μέγιστο φορτίο θέρμανσης (kW)	Μέγιστο φορτίο θέρμανσης (kW)
Ποσοστιαία Διαφορά	11,93%	31,91%	12,07%	23%
Διαφορά	0,5	0,15	0,25	0,18



Σχήμα 6-8:Θερμοκρασία αέρα θερμικής ζώνης χωρίς σύστημα HVAC - Case 195



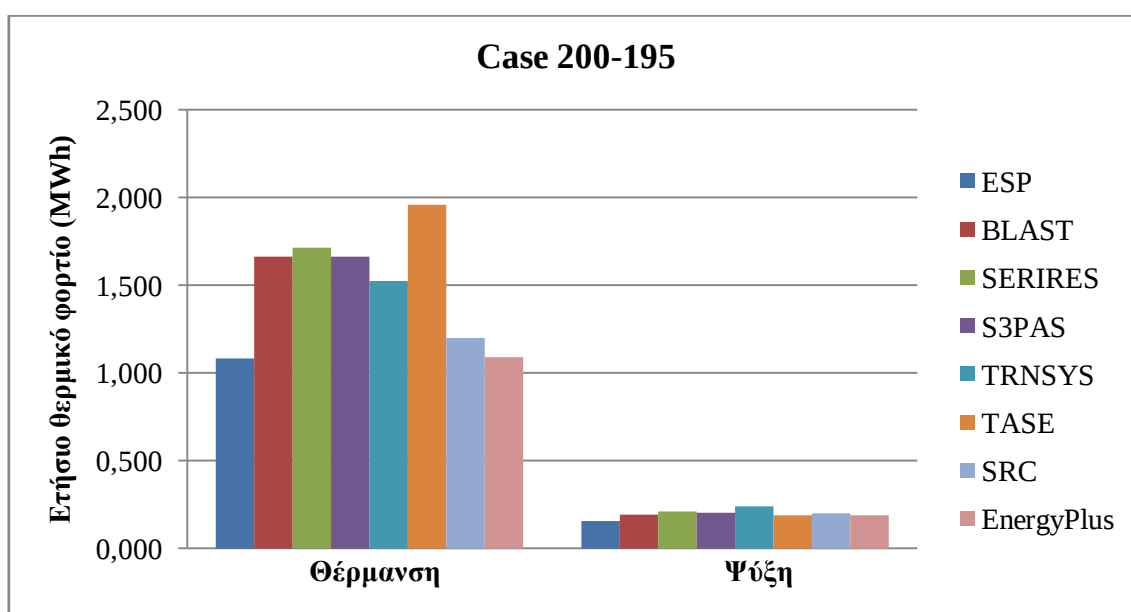
Σχήμα 6-9:Στιγμιότυπο θερμοκρασίας αέρα θερμικής ζώνης χωρίς σύστημα HVAC - Case 195

6.3. Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή - Case 200-195

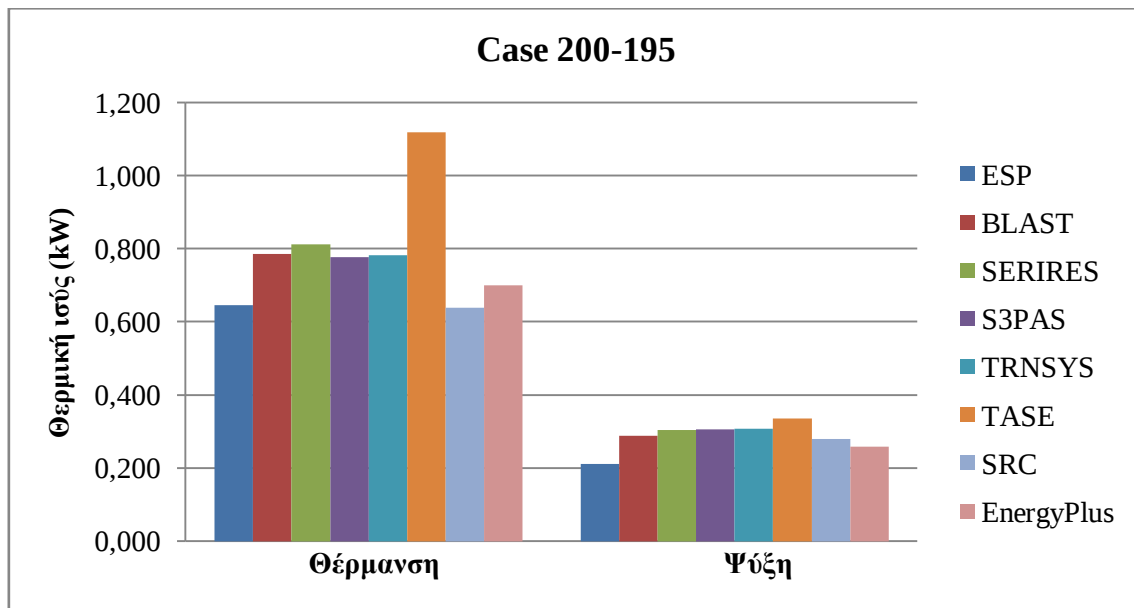
Η συγκεκριμένη περίπτωση αφορά τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή. Όπως αντικατοπτρίζουν τα παρακάτω διαγράμματα, δεν παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές μεταξύ του SRC και του EnergyPlus. Το γεγονός αυτό οφείλεται ότι και τα δυο λογισμικά χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο TARP προκειμένου να υπολογιζόσουν τον συντελεστή συναγωγής εντός και εκτός του κτηρίου. Η διαφορά που εμφανίζεται οφείλεται σε ένα μέρος στην μετάδοση θερμότητας με αγωγή η οποία παρατηρήθηκε στην περίπτωση Case 195. Κατά συνέπεια μπορεί να θεωρηθεί ότι το λογισμικό SRC προσομοιώνει σωστά τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή.

Πίνακας 6-3:φορτίων SRC & EnergyPlus - Case 200

	Ετήσιο φορτίο θέρμανσης (MWh)	Ετήσιο φορτίο ψύξης (MWh)	Μέγιστο φορτίο θέρμανσης (kW)	Μέγιστο φορτίο θέρμανσης (kW)
Ποσοστιαία Διαφορά	12,12%	18,18%	6,88%	16,66%
Διαφορά	0,64	0,12	0,19	0,17



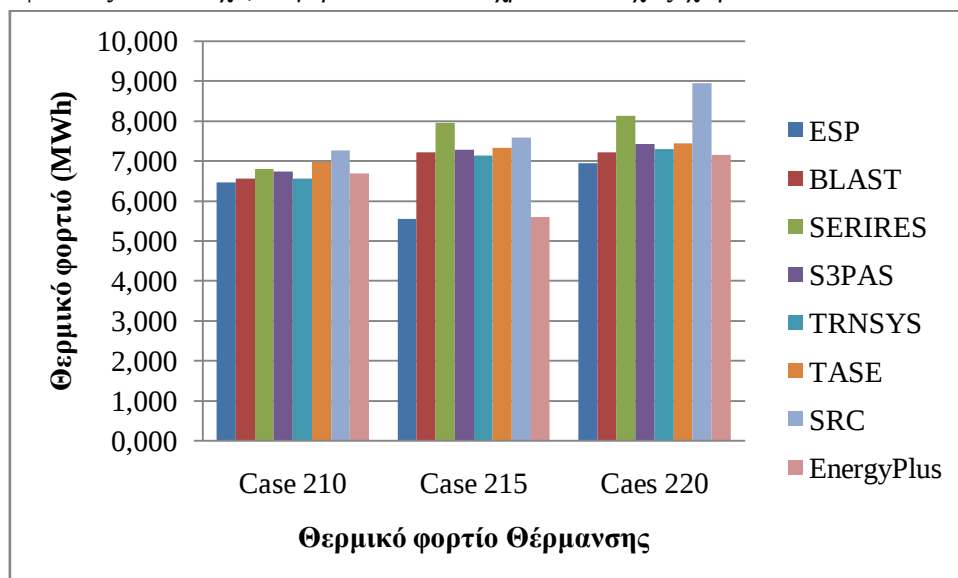
Σχήμα 6-10:Διαφορά ετήσιων θερμικών φορτίων - Case 200-195



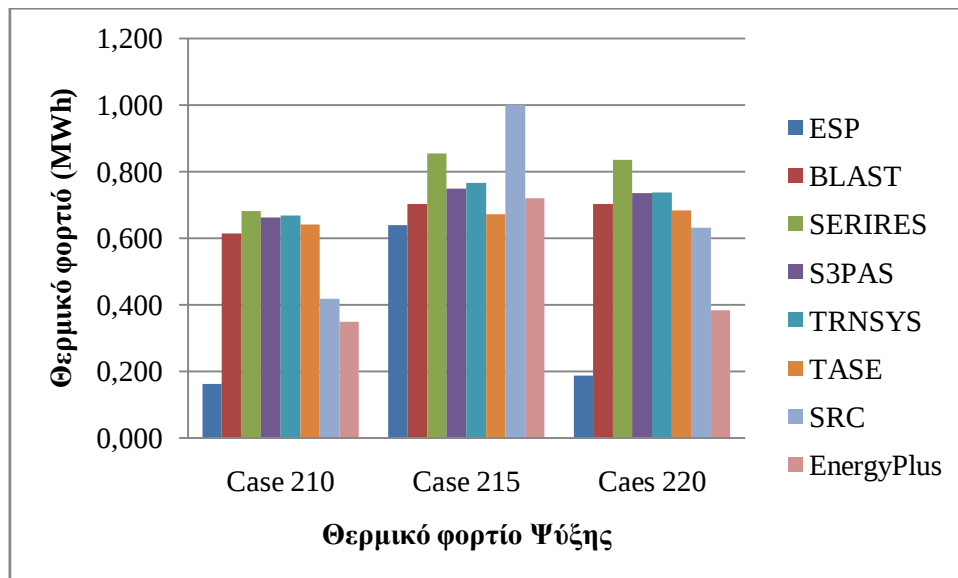
Σχήμα 6-11: Διαφορά μέγιστης θερμικής ισχύος - Case 200-195

6.4. Ικανότητα εκπομπής και απορρόφησης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους επιφανειών

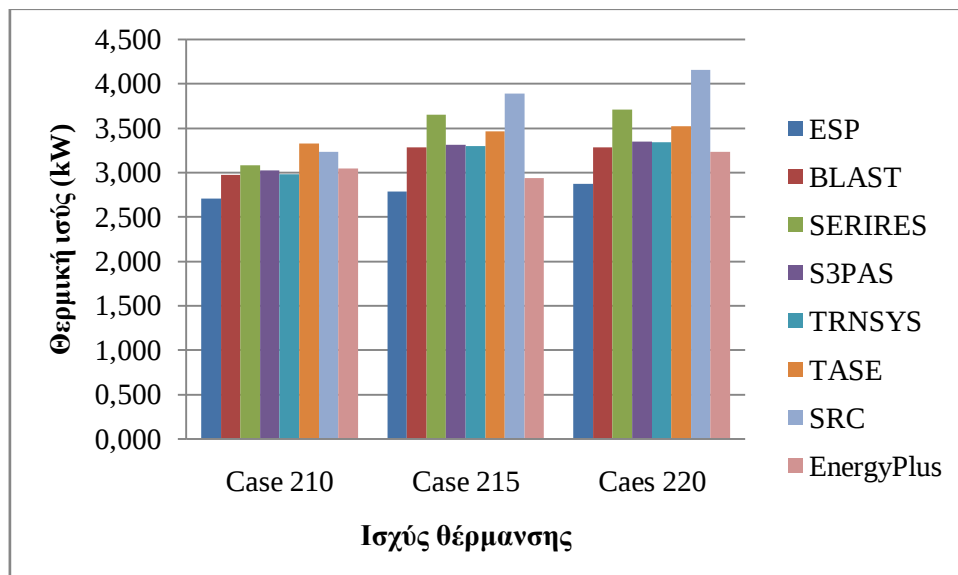
Οι περιπτώσεις κτηρίων Case 210, Case 215 και Case 220 αποσκοπούν στον έλεγχο της ικανότητας ενός λογισμικού να μοντελοποιεί την μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία. Στην περίπτωση Case 210, η ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας της εξωτερικής πλευράς των τοίχων είναι 0,9 ενώ της εσωτερικής 0,1. Στην περίπτωση Case 215, η ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας της εξωτερικής πλευράς των τοίχων είναι 0,1 και της εσωτερικής πλευράς 0,1. Στην περίπτωση Case 220, η ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας και της εξωτερικής και της εσωτερικής πλευράς των τοίχων είναι 0,9. Πρέπει να τονισθεί ότι οι συνδυασμοί Case 210-200 & Case 220-215 για την εξωτερική πλευρά και Case 215-200 & Case 220-210 για την εσωτερική πλευρά της επιφάνειας αντίστοιχα, συγκρίνονται ταυτόχρονα και όχι ξεχωριστά.



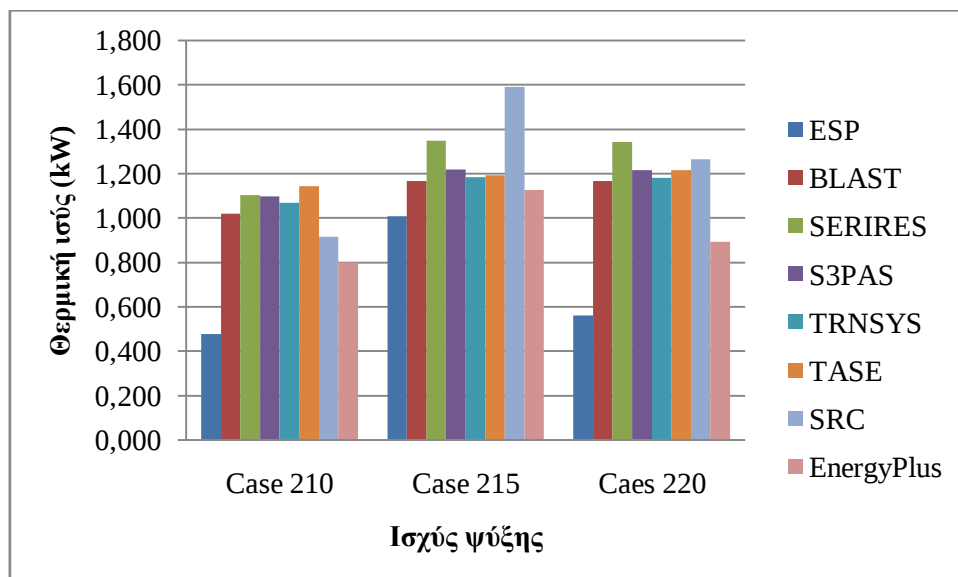
Σχήμα 6-12: Ετήσιο θερμικό φορτίο θέρμανσης Case 210, Case 215, Case 220



Σχήμα 6-13: Ετήσιο θερμικό φορτίο ψύξης Case 210, Case215,Case220



Σχήμα 6-14: Μέγιστη θερμική ισχύς θέρμανσης Case 210, Case215,Case220



Σχήμα 6-15:: Μέγιστη θερμική ισχύς ψύξης Case 210, Case215,Case220

Πίνακας 6-4:Διαφορές θερμικών φορτίων SRC & EnergyPlus - Case 210

	Ετήσιο φορτίο θέρμανσης (MWh)	Ετήσιο φορτίο ψύξης (MWh)	Μέγιστο φορτίο θέρμανσης (kW)	Μέγιστο φορτίο θέρμανσης (kW)
Ποσοστιαία Διαφορά	6,84%	19,88%	6,25%	23%
Διαφορά	0,59	0,069	0,19	0,115

Πίνακας 6-5: Διαφορές θερμικών φορτίων SRC & EnergyPlus - Case 215

	Ετήσιο φορτίο θέρμανσης (MWh)	Ετήσιο φορτίο ψύξης (MWh)	Μέγιστο φορτίο θέρμανσης (kW)	Μέγιστο φορτίο θέρμανσης (kW)
Ποσοστιαία Διαφορά	35,35%	31,91%	32,42%	41,96%
Διαφορά	1,98	0,281	0,95	0,47

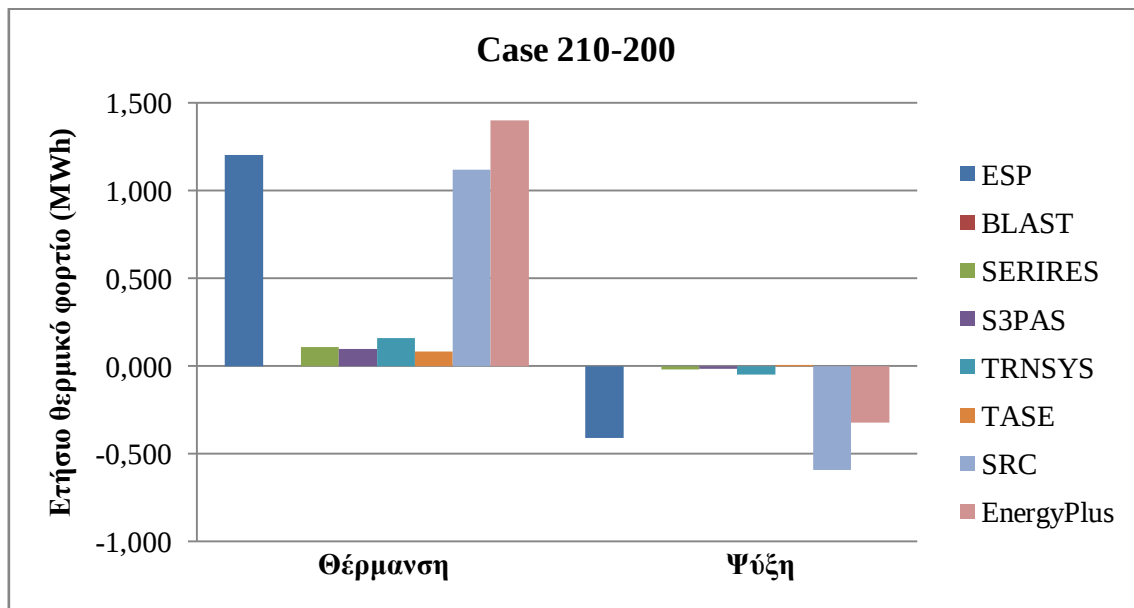
Πίνακας 6-6: Διαφορές θερμικών φορτίων SRC & EnergyPlus - Case 220

	Ετήσιο φορτίο θέρμανσης (MWh)	Ετήσιο φορτίο ψύξης (MWh)	Μέγιστο φορτίο θέρμανσης (kW)	Μέγιστο φορτίο θέρμανσης (kW)
Ποσοστιαία Διαφορά	25,21%	64,92%	28,48%	41,57%
Διαφορά	1,8	0,248	0,92	0,37

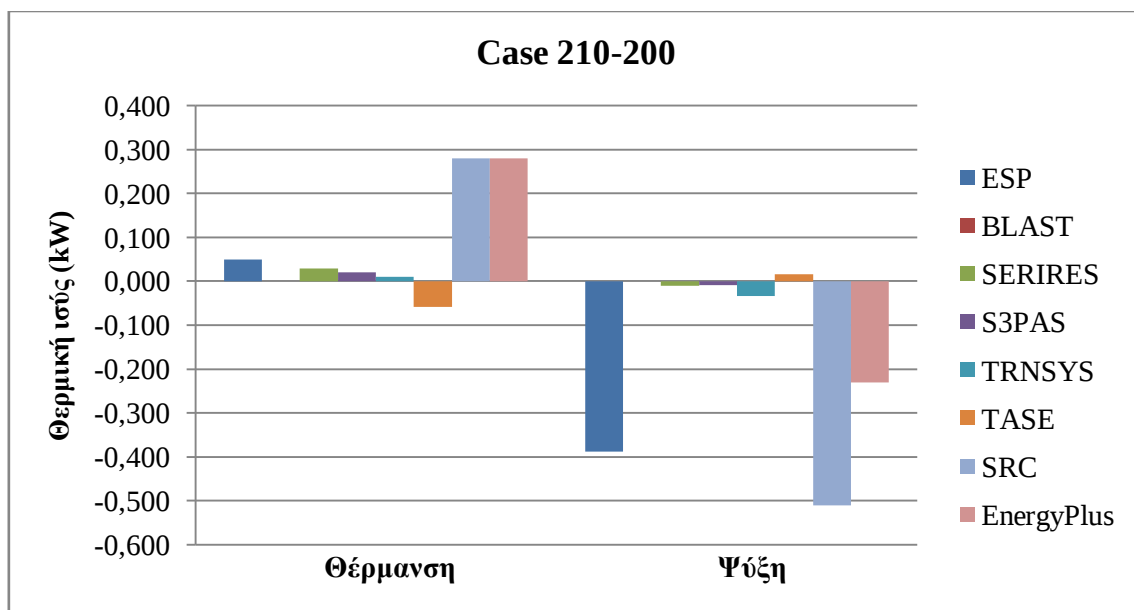
6.5.1 Έλεγχος ικανότητας εκπομπής ακτινοβολίας εξωτερικών τοίχων

Συμφώνα με τα παρακάτω σχήματα, μπορεί βγει το συμπέρασμα ότι η ακτινοβολία στο λογισμικό SRC έχει πολύ μεγαλύτερη επίδραση απ' ότι στο EnergyPlus. Υποθέτοντας ότι η μετάδοση θερμότητας με αγωγή και συναγωγή μοντελοποιούνται σωστά, και ότι οι διαφορές που εντοπίζονται υπάρχουν λόγο διαφορετικού μοντέλου, βλέπουμε ότι στις περιπτώσεις Case 210-200 και Case 220-215 του SRC απαιτείται λιγότερη θέρμανση το χειμώνα και περισσότερη ψύξη το καλοκαίρι σε σχέση με το EnergyPlus. Επίσης, όπως είναι λογικό, η θέρμανση πραγματοποιείται τους χειμερινούς μήνες ενώ η ψύξη του κτηρίου τους καλοκαιρινούς. Έτσι, η διαφορά αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί με την μεγαλύτερη επίδραση της ηλιακής ακτινοβολία. Δηλαδή, άμα το SRC επηρεάζεται παραπάνω από την ηλιακή ακτινοβολία, αυτό έχει ως αποτέλεσμα το χειμώνα να χρειάζεται λιγότερη θέρμανση το κτήριο και το καλοκαίρι περισσότερη ψύξη, αφού προστίθεται πάντα μεγαλύτερο θερμικό φορτίο. Η διαφορά αυτή θα μπορούσε να εξηγηθεί με την απόκλιση που παρουσιάζεται πιο κάτω στην πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας. Στο SRC, προσπίπτει στους περισσότερους τοίχους συγκριτικά αυξημένη ακτινοβολία σε σχέση με το EnergyPlus. Το γεγονός ότι το EnergyPlus παρουσιάζει αποκλείσεις με τα υπόλοιπα λογισμικά θερμικής προσομοίωσης δεν αναδεικνύει σφάλμα το ιδίου αλλά αδυναμία μοντελοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας από τις παλαιότερες εκδόσεις αυτών.

6.5.1.1 Case 210-200

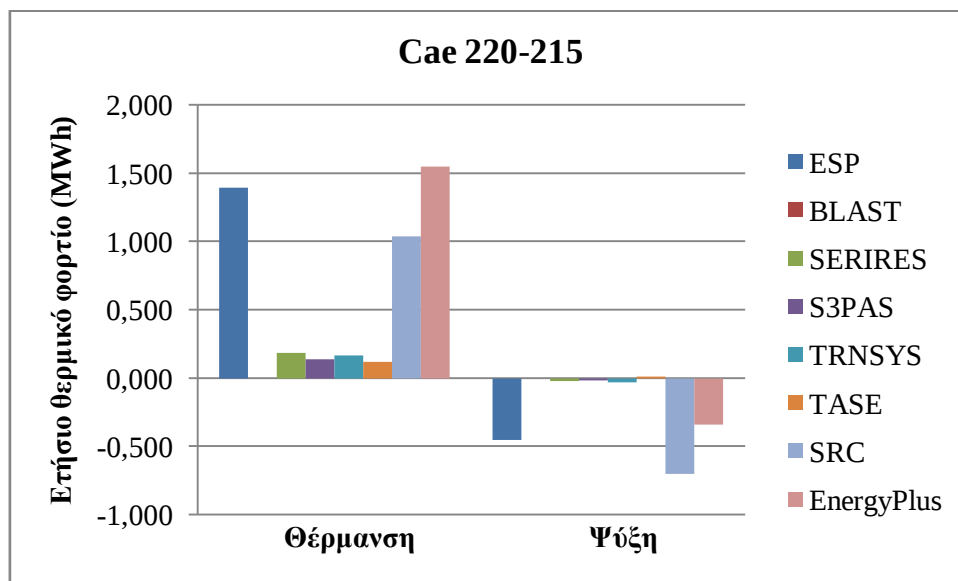


Σχήμα 6-16: Διαφορά ετήσιων θερμικών φορτίων - Case 210-200

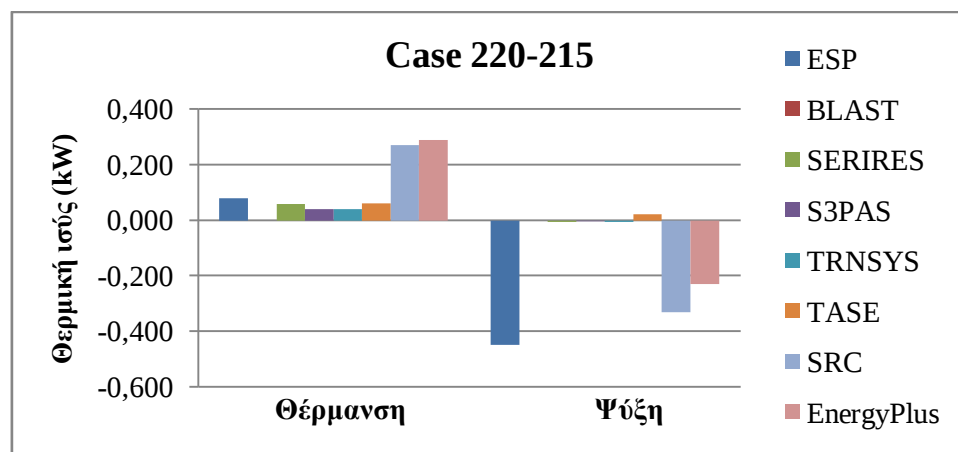


Σχήμα 6-17: Διαφορά μέγιστης θερμικής ισχύος - Case 210-200

6.5.1.2 Case 220-215



Σχήμα 6-18: Διαφορά ετήσιων φορτίων - Case 220-215



Σχήμα 6-19: Διαφορά μέγιστης θερμικής ισχύος - Case 220-215

6.5.1.3 Προσπίπτουσα ακτινοβολία στους τοίχους

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσάπτει σε ένα κτήριο είναι ένας από τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία του. Πρέπει να τονισθεί ότι από τη στιγμή που η γεωμετρία του κτηρίου και ο προσανατολισμός του δεν αλλάζουν στις υπόλοιπες περιπτώσεις, δεν υπάρχει λόγος επαναυπολογισμού του συγκεκριμένου μεγέθους αφού παραμένει σταθερό. Όπως φαίνεται και από τα παρακάτω σχήματα, η ακτινοβολία που προσπίπτει στους τοίχους του κτηρίου διαφέρει κατά τη διάρκεια του χρόνου. Πιο συγκεκριμένα:

Δυτικός τοίχος: Παρατηρείται ότι στο SRC η ακτινοβολία που προσπίπτει είναι κατά τη διάρκεια του χρόνου, περίπου $100 \frac{W}{m^2}$ μεγαλύτερη απ' ό,τι στο EnergyPlus.

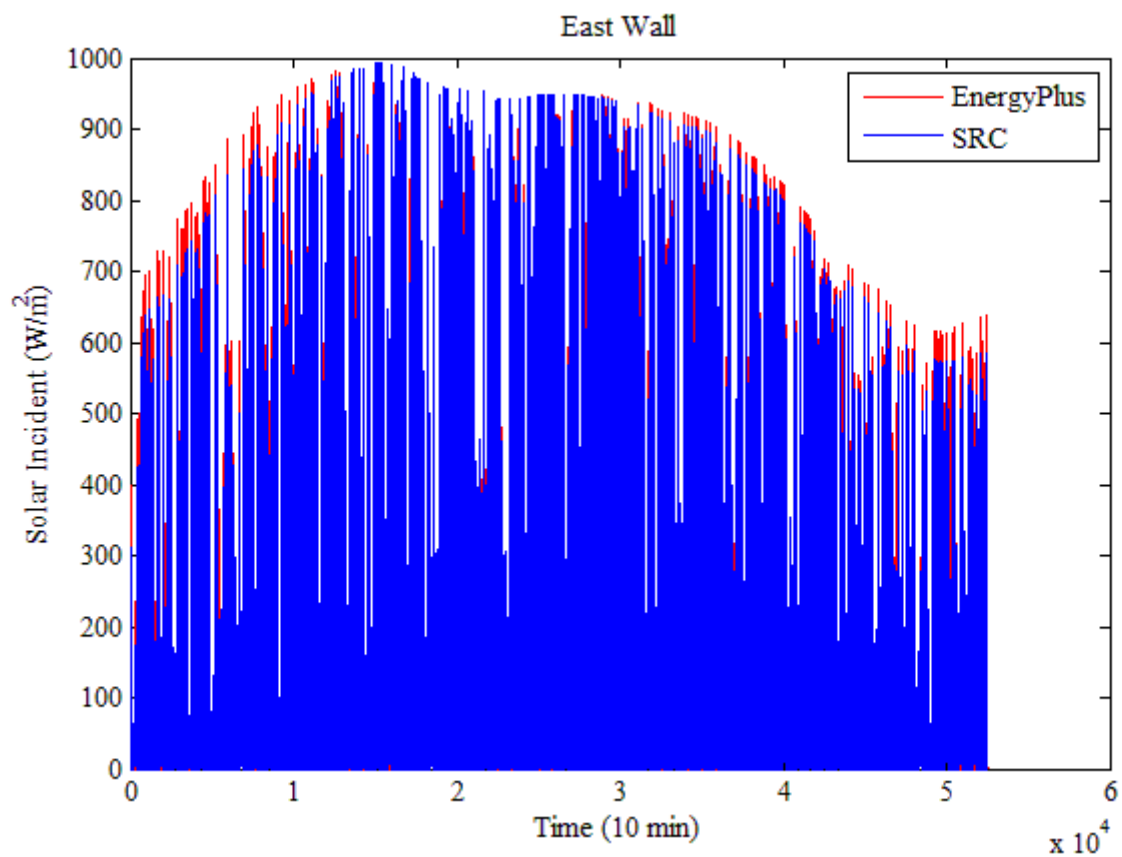
Νότιος τοίχος: Το SRC και το EnergyPlus, παρουσιάζουν την ίδια προσπίπτουσα ακτινοβολία κατά τη διάρκεια του χρόνου

Οροφή: Στο SRC παρατηρείται μια συνεχής διαφορά $50 \frac{W}{m^2}$ μεγαλύτερης προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

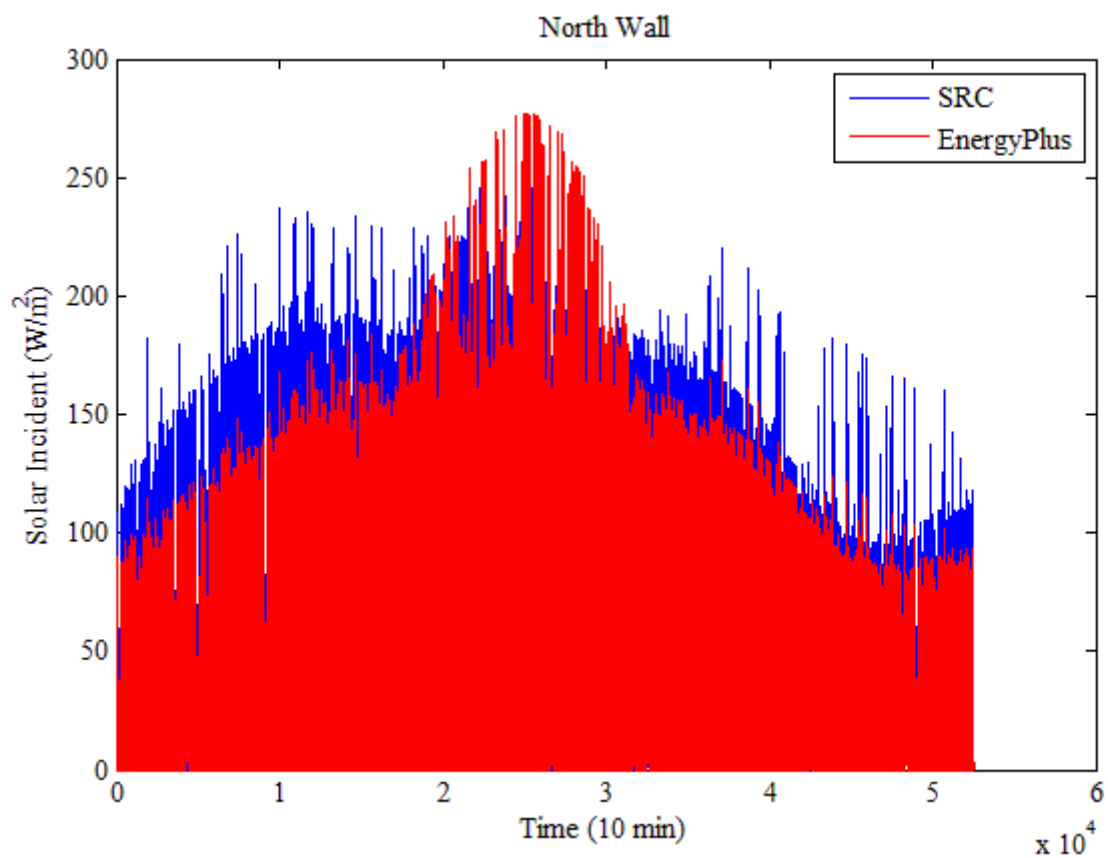
Βόρειος τοίχος: Στο βόρειο τοίχο, παρατηρείται ότι μεταξύ Απριλίου και Ιουλίου, το EnergyPlus εμφανίζει περίπου $50 \frac{W}{m^2}$ περισσότερη προσπίπτουσα ακτινοβολία. Παρόλα αυτά, τον υπόλοιπο χρόνο το SRC εμφανίζει $100 \frac{W}{m^2}$ περισσότερη προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Ανατολικός τοίχος: Αντίθετα με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, το EnergyPlus παρουσιάζει σταθερά, $100 \frac{W}{m^2}$

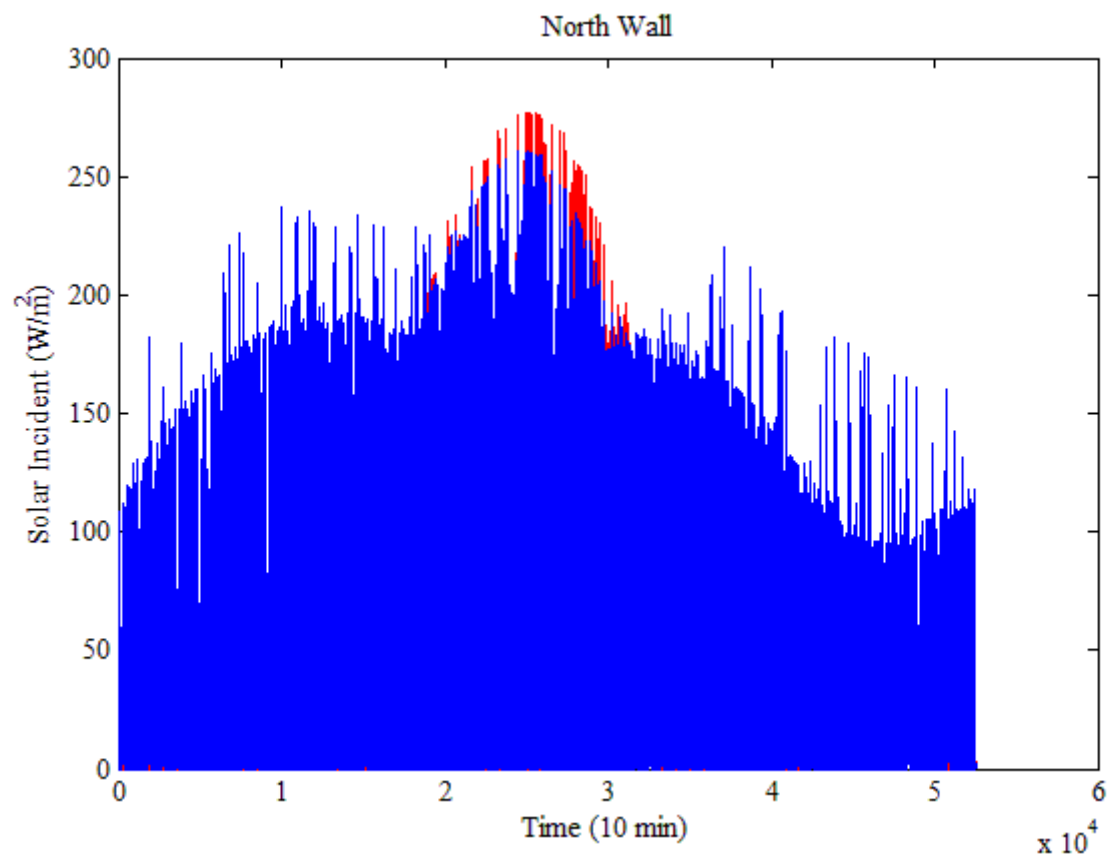
περισσότερη προσπίπτουσα ακτινοβολία σε σχέση με το SRC.



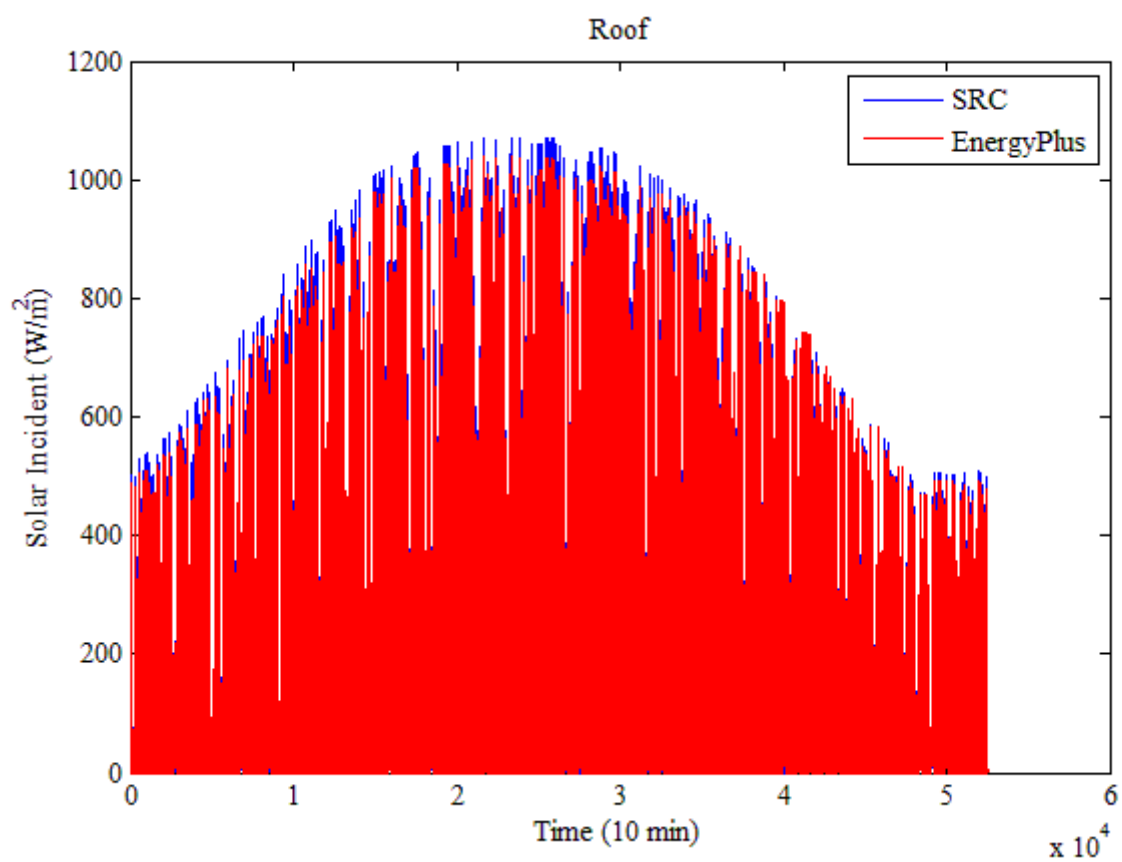
Σχήμα 6-20: Προσπίπτουσα ακτινοβολία στον ανατολικό τοίχο



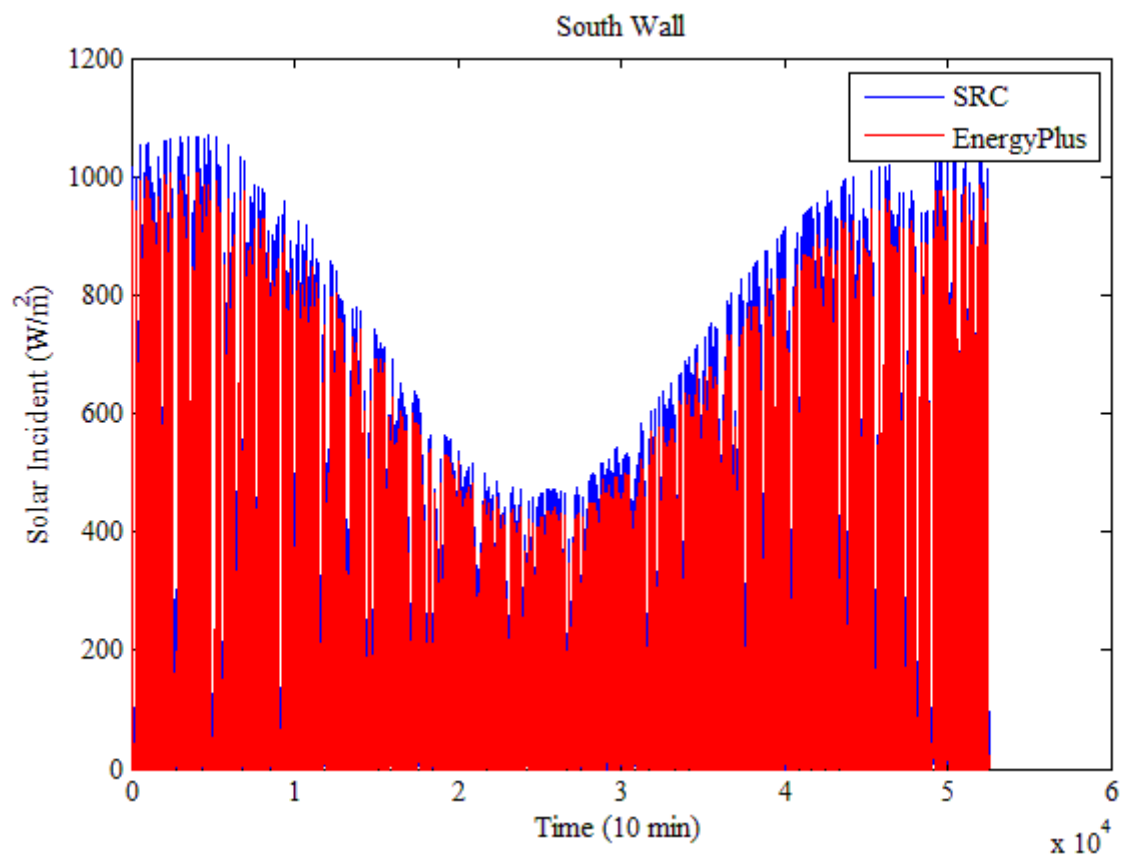
Σχήμα 6-21: Προσπίπτουσα ακτινοβολία στον βόρειο τοίχο



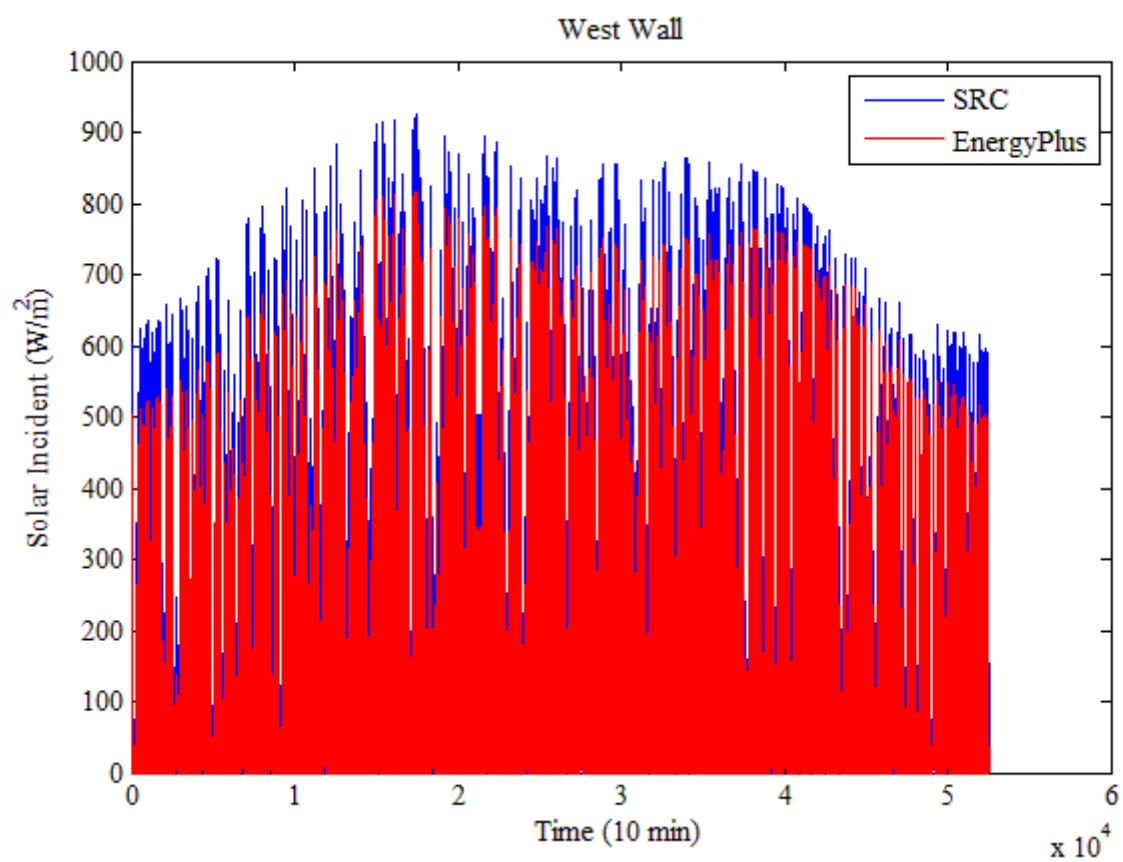
Σχήμα 6-22: Προσπίπτουσα ακτινοβολία στον βόρειο τοίχο



Σχήμα 6-23: Προσπίπτουσα ακτινοβολία στην οροφή



Σχήμα 6-24: Προσπίπτουσα ακτινοβολία στον νότιο τοίχο

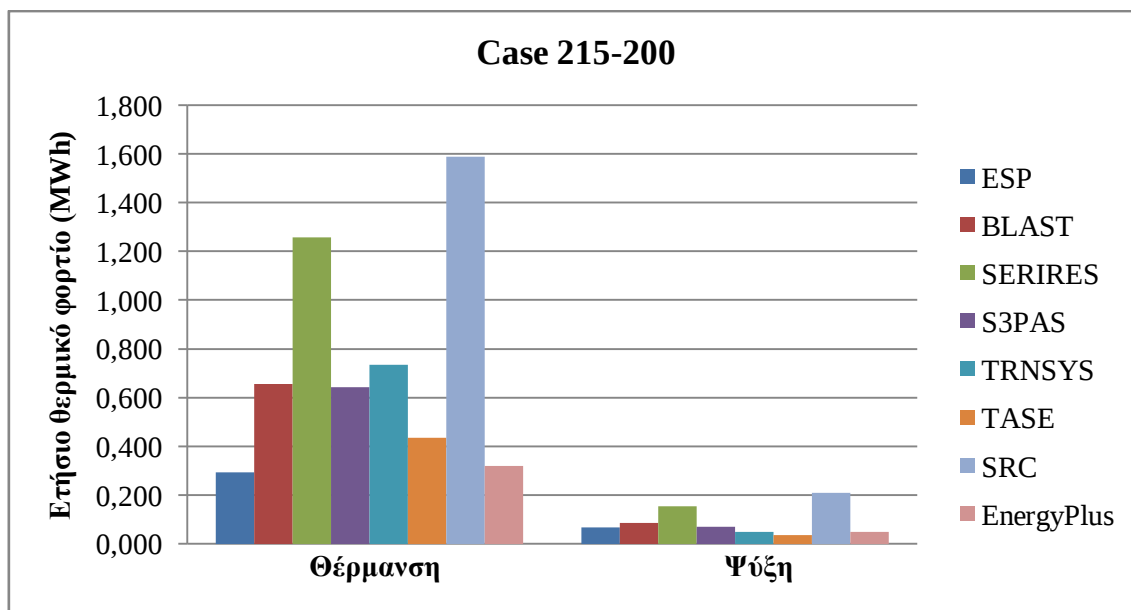


Σχήμα 6-25: Προσπίπτουσα ακτινοβολία στον δυτικό

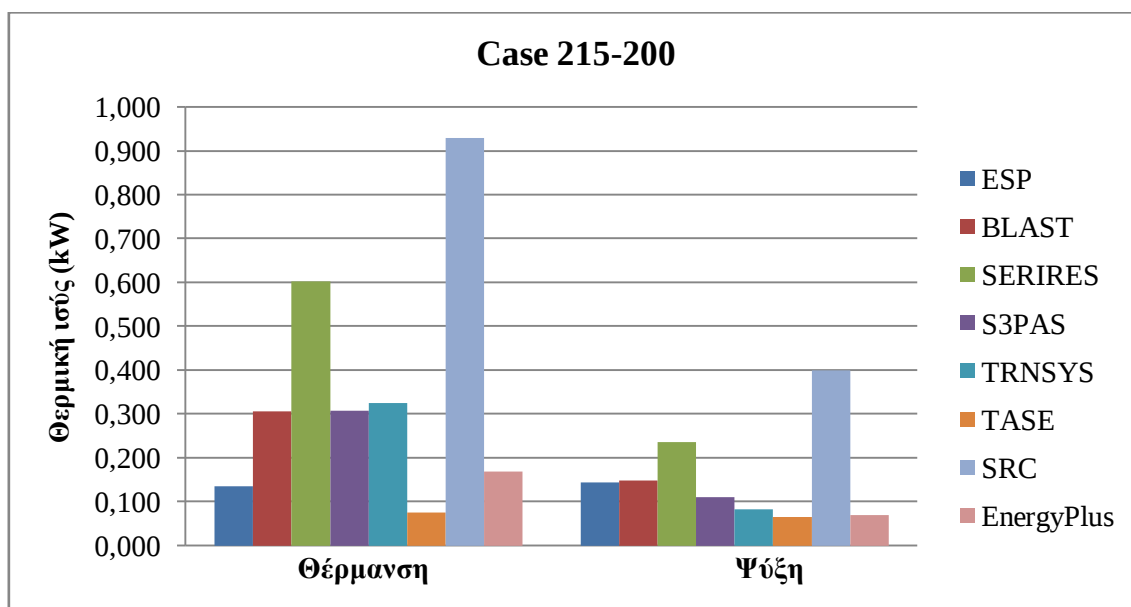
6.5.2 Ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας εσωτερικών επιφανειών

Στις συγκεκριμένες περιπτώσεις, ελέγχεται η επίδραση της εκπομπής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους των εσωτερικών επιφανειών στη θερμική συμπεριφορά του κτηρίου. Σύμφωνα με τα παρακάτω αποτελέσματα, παρουσιάζεται μια σημαντική απόκλιση μεταξύ του SRC και του EnergyPlus. Αφενός χρειάζεται να παράγει πολύ μεγάλη ενέργεια θέρμανσης τους χειμερινούς μήνες και αφετέρου χρειάζεται μεγαλύτερο θερμικό φορτίο ψύξης το καλοκαίρι. Εδώ, εντοπίζεται μια αδυναμία που συσχετίζεται με την ανταλλαγή ακτινοβολίας μεταξύ των εσωτερικών επιφανειών. Όπως είναι προφανές, η επίδραση της ακτινοβολίας εσωτερικά του κτηρίου παρουσιάζει σημαντικές ελλείψεις αφού αδυνατεί να επιδράσει στη θερμική συμπεριφορά του κτηρίου και αυτό το κενό καλύπτεται από το ιδανικό σύστημα θέρμανσης – ψύξης.

6.5.2.1 Case 215-200

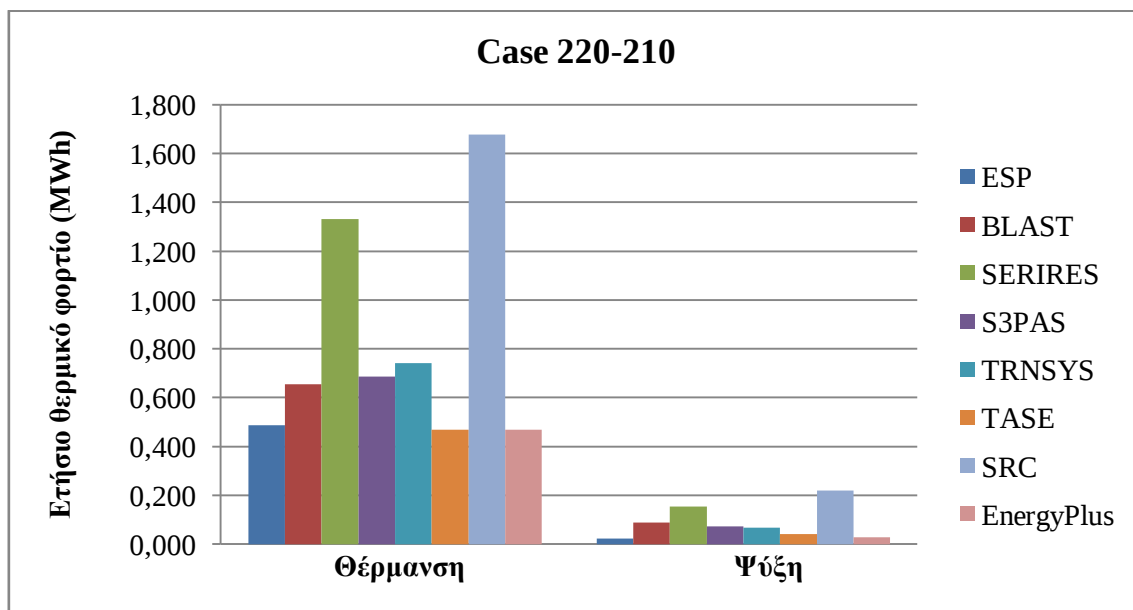


Σχήμα 6-26: Διαφορά ετήσιων θερμικών φορτίων - Case 215-200

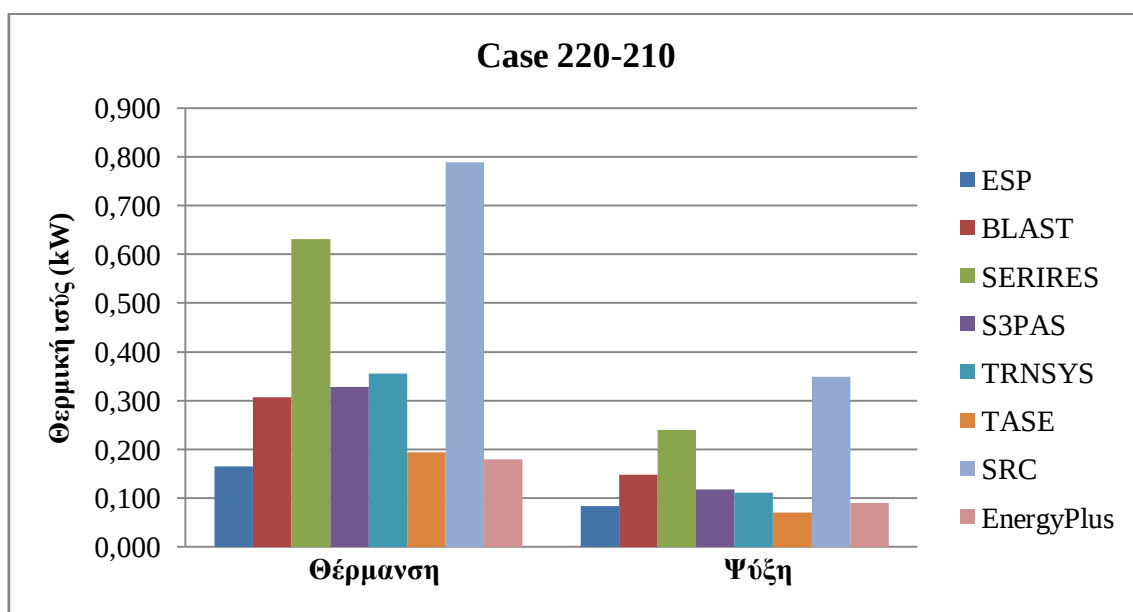


Σχήμα 6-27: Διαφορά μέγιστης θερμικής ισχύος - Case 215-200

6.5.2.2 Case 220-210



Σχήμα 6-28: Διαφορά ετήσιων θερμικών φορτίων - Case 220-210



Σχήμα 6-29: Διαφορά μέγιστης θερμικής ισχύος - Case 220-210

6.5. Σύνοψη πειραματικών αποτελεσμάτων

Αρχικά, έγινε η προσομοίωση της πρώτης βασικής περίπτωσης Case 600 κατά την οποία παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ του SRC και του EnergyPlus, τόσο στη θερμοκρασία της ζώνης όταν δεν ελέγχεται από κάποιο σύστημα HVAC, όσο και στο απαιτούμενο θερμικό φορτίο θέρμανσης και ψύξης. Έτσι, η αξιολόγηση του SRC προχώρησε με την προσομοίωση των διαγνωστικών περιπτώσεων, για τον εντοπισμό των παραμέτρων που προκαλούν αποκλίσεις. Στην πρώτη διαγνωστική περίπτωση Case 195, το λογισμικό SRC παρουσιάζει μια απόκλιση στη μετάδοση θερμότητας με αγωγή σε σχέση με το EnergyPlus. Η απόκλιση αυτή είτε μπορεί να οφείλεται στα διαφορετικά μοντέλα είτε αποτελεί αδυναμία του SRC. Υποθέτοντας ότι οφείλεται στα διαφορετικά μοντέλα, έγινε έλεγχος της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή μέσω της περίπτωσης Case 200, όπου διαπιστώθηκε ότι οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές. Κατά συνέπεια, το συγκεκριμένο πείραμα θεωρήθηκε επιτυχές. Στη συνέχεια, δοκιμάστηκε η επίδραση της ακτινοβολίας

μεγάλου μήκους στις εξωτερικές πλευρές των επιφανειών, η οποία φανέρωσε μεγάλη επίδραση στο SRC. Το γεγονός αυτό είναι λογικό, λόγω της αυξημένης ακτινοβολίας που προσπίπτει στους τοίχους του κτηρίου στο SRC σε σχέση με το EnergyPlus. Τέλος, στον έλεγχο της επίδρασης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους στις εσωτερικές πλευρές των επιφανειών, παρατηρήθηκαν μεγάλες αποκλίσεις οι οποίες δείχνουν λανθασμένη μοντελοποίηση του φαινομένου. Όπως είναι φανερό, η περαιτέρω αξιολόγηση θα ήταν λάθος να προχωρήσει χωρίς να διορθωθούν οι τόσο μεγάλες αποκλίσεις που οφείλονται στην ακτινοβολία μεγάλου μήκους. Έτσι, για την περαιτέρω εξέλιξη και βελτίωση του EnergyPlus, προτείνεται η βελτίωση του τρόπου με τον οποίο επιδρά η ακτινοβολία μεγάλου μήκους στο κτήριο, καθώς και η τροποποίηση του ηλιακού μοντέλου έτσι ώστε να μην παρατηρούνται αποκλίσεις στην προσπίπτουσα ακτινοβολία στο κτήριο.

Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική ήταν μια ευκαιρία για εκ βάθους μελέτη των μηχανισμών μετάδοσης θερμότητας και των τρόπων που επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά ενός κτηρίου. Επίσης, έγινε προσπάθεια για κατανόηση των μεθόδων και των μοντέλων που μπορούν να προσομοιωθούν με τη χρήση H/Y για την διεξαγωγή συνθετών υπολογισμών, ενώ έγιναν εμφανή τα προβλήματα και οι δυσκολίες που μπορούν να παρουσιαστούν. Συνάμα, μελετήθηκε το πρόβλημα της σχεδίασης κτηρίων σε λογισμικά CAD καθώς και οι πολλαπλές παράμετροι οι οποίες καθορίζουν το αποτέλεσμα της.

Το λογισμικό SRC είναι μια πολλά υποσχόμενη προσπάθεια για την διεύρυνση της διαλειτουργικότητας στον χώρο της θερμικής προσομοίωσης καθώς και ενός λογισμικού το οποίο μπορεί να αποτελέσει στο μέλλον ένα ισχυρό εργαλείο θερμικής προσομοίωσης το οποίο θα επιτρέπει την δόκιμη διαφορετικών μαθηματικών μοντέλων. Βρίσκεται σε μια διαδικασία συνεχούς εξέλιξης και βελτίωσης ενώ μετρά λίγους μήνες ζωής. Τα αποτελέσματα τα οποία παράγει είναι ενθαρρυντικά παρά τις διαφορές του με το EnergyPlus, ενώ η ανάπτυξη του έχει βασιστεί στις προσπάθειες μιας μικρής ερευνητικής ομάδας. Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται κατά την εφαρμογή της μεθόδου IEA BESTEST μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για την περαιτέρω ανάπτυξη του μοντέλου έτσι ώστε στο μέλλον να αποτελέσει ένα διαδεδομένο. Επίσης, η προσθήκη της δυνατότητας του να δέχεται αρχεία IFC τα οποία κερδίζουν συνεχώς έδαφος στον τομέα της μοντελοποίησης κτηρίων θα μετατρέψει το SRC σε ένα χρήσιμο και ευρέως αξιοποιήσιμο εργαλείο για τη θερμική προσομοίωση κτηρίων.

Βιβλιογραφία

1. PEBBLE Project. *Ιστοσελίδα του προγράμματος PEBBLE*. [Ηλεκτρονικό] <http://www.pebble-fp7.eu/>.
2. **Crawley, Drury B, και συν.** Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*. 2001, σσ. 33(4):319–331.
3. Wikipedia. [Ηλεκτρονικό] http://en.wikipedia.org/wiki/Green_Building_XML.
4. **Judkoff, R και Neymark, J.** *International Energy Agency Building Buildin Energy Test (BESTEST) and Diagnostic Method*. s.l. : NREL.
5. **ASHRAE Standar 140-2001.** *ASHRAE Standar Method of Test for The Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*. s.l. : ASHRAE.
6. **Taesler, Roger.** Climate and Building Energy Management. *Energy and Buildings*. 1990, σσ. 599-608.
7. **Boyer, H, και συν.** Thermal Building Simulation and Computer Generation of Nodal Models. *Building and Enviroment*. 1995, σσ. 207-214.
8. *Building Thermal Performance Analysis By Using MATLAB/SIMULINK*. **Mendes, Nathan, Oliveira, Gustavo και de Araujo, Humberto**. Rio de Janeiro : s.n., 2001. Seventh International IBPSA Conference.
9. **ASHRAE.** *Handbook of Funfamentals*. s.l. : ASHRAE, 2009.
10. **Incropera, Frank, και συν.** *Fundamentals of Heat Transfer*. s.l. : Wiley.
11. **Exizidou, Parthena.** *Simulation-based energy auditing*. Chania : s.n., 2012.
12. **Neymark, Joel και Judkoff, Ron.** A Comparative Validation Based Certification Test For Home Energy Rating System Software.
13. *EnergyPlus Input Output Reference - The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input*. s.l. : U.S. Department of Energy - EERE, 2011.
14. MATLAB CENTRAL - xml_io_tools. [Ηλεκτρονικό] MATHWORKS. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12907-xmliotools>.
15. *EnergyPlus Engineering Reference - The Reference to EnergyPlus Calculations*. s.l. : U.S. Department of Energy - EERE, 2011.
16. **Baum, Daniel, Rushmeier, Holly και Winget, James.** Improving Radiosity Solutions Through the Use of Analytically Determined Form-Factors. *Computer Graphics*. Ιούλιος 1989, σσ. 325-334.
17. **Αιλής, Γεώργιος.** *SRC - A gbxml-based hydro-thermal building simulation program*. Χανιά : s.n., 2012.
18. **Γεωργιάκης, Παύλος.** *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*. Χανιά : s.n., 2006.
19. gbXML. [Ηλεκτρονικό] <http://www.gbxml.org/>.
20. building SMART - International home of openBIM. [Ηλεκτρονικό] buildingSMART International. <http://www.buildingsmart.com/>.
21. google. [Ηλεκτρονικό] www.google.gr.