

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ



Διπλωματική Εργασία

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
ΗΛΙΑΚΑ ΥΠΟΒΟΗΘΟΥΜΕΝΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

Κουμής Γεώργιος

Επιβλέπων Καθηγητής: Χρήστος Τζιβανίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2019

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η μεγάλη κατανάλωση ορυκτών καύσιμων για τη παραγωγή ενέργειας οδήγησε σε υπερβολικές εκπομπές ρύπων που ευθύνονται για τα περιβαλλοντικά προβλήματα όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αποτέλεσμα, ήταν η λήψη μέτρων για τον περιορισμό αυτών των προβλημάτων και η μεγάλη ανάπτυξη των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως τα συστήματα ηλιακής ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια είναι μια εξελισσόμενη τεχνολογία, φιλική στο περιβάλλον που αξιοποιείται σε πολλές εφαρμογές όπως για τη θέρμανση χώρων ή την παραγωγή ηλεκτρισμού. Όσον αφορά τα συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού, η αντλία θερμότητας είναι από τα πιο συμφέρουσα συστήματα με υψηλή απόδοση, η οποία μπορεί να συνδυαστεί και με τα ηλιακά συστήματα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αξιοποίηση της ηλιακής θερμικής ενέργειας σε ένα σύστημα αντλίας θερμότητας, για τη θέρμανσή εσωτερικού χώρου ενός κτιρίου 100 m² στην περιοχή της Αθήνας για τη χρονική περίοδο από Νοέμβριο μέχρι και Απρίλιο. Με τη βοήθεια επίπεδων ηλιακών συλλεκτών και ενός δοχείου αποθήκευσης νερού γίνεται εκμετάλλευση της θερμότητας από τη ηλιακή ενέργεια μέσω του νερού, το οποίο τροφοδοτεί μια αντλία θερμότητας νερού-αέρα που αποσκοπεί στη ικανοποίηση των θερμικών αναγκών του κτιρίου. Βάσει των απαιτήσεων θέρμανσης, σκοπός είναι η μελέτη και η κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων της εγκατάστασης για τη ελαχιστοποίηση του κόστους της και παράλληλα η ενεργειακή απόδοση της αντλίας θερμότητας να είναι υψηλή. Η λειτουργία της εγκατάστασης προσομοιώθηκε για τρεις περιπτώσεις κτιρίων ανάλογα με τις θερμικές τους ανάγκες. Επιπλέον, έγινε οικονομική αξιολόγηση της εγκατάστασης της ηλιακά υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας, η οποία συγκρίθηκε και ενεργειακά με μια αντλία θερμότητας αέρα-αέρα.

Η εργασία αποτελείται από οκτώ κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ενεργειακή κατάσταση που επικρατεί στη σημερινή εποχή και η κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια. Στο δεύτερο κεφάλαιο εξηγούνται βασικές έννοιες σχετικά με τη θέρμανση και τον κλιματισμό των κτιρίων. Στη συνέχεια, γίνεται αναλυτική περιγραφή για το τρόπο λειτουργίας των αντλιών θερμότητας, παρουσιάζονται οι τύποι αντλιών θερμότητας καθώς και οι εφαρμογές τους σε διάφορες εγκαταστάσεις. Το τρίτο κεφάλαιο αφορά τη ηλιακή ενέργεια, τους τρόπους εκμετάλλευσης της, αναφέρονται χρήσιμες σχέσεις για την αξιοποίηση της και περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας των διάφορων ηλιακών συλλεκτών. Στα επόμενα κεφάλαια, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο προσομοιώθηκε η εγκατάσταση της ηλιακά υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας στο πρόγραμμα TRNSYS και πως επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση του προβλήματος που τέθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος GenOpt. Παράλληλα, περιγράφονται και κάποιες μέθοδοι βελτιστοποίησης. Στο έβδομο κεφάλαιο καταγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και οι παρουσιάζονται οι επιλογές των παραμέτρων που έγιναν για τη βελτιστοποίηση του συστήματος. Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται χρήσιμα συμπεράσματα που προέκυψαν και προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα.

Abstract

Over the last years, the high consumption of fossil fuels for energy production emits excessive amount of carbon dioxide (CO₂) which causes many environmental problems like the greenhouse effect. As a result, many governments take effective measures to tackle this problem and promote the development of renewable energy systems, like solar energy systems. Solar energy is a constantly evolving technology, it has a positive effect on the environment and it can be used in several applications like space heating or generating electricity. With regard to space heating and air conditioning systems, heat pump is highly efficient technology which can be combined with solar systems.

This diploma thesis addresses the use of solar energy in a heat pump that provides space heating in a building 100 m² during the months November-April. Using flat plate collectors (FPC) and a storage tank of water, the heat from the solar energy is provided to the water, which is used by a water-air heat pump in order to satisfying the thermal comfort requirements of a building. Depending on the building heating demands, the aim is the analysis and the appropriate selection of the system parameters in order to minimize the total cost and at the same time to have a high energy efficiency heat pump. The cost and the energy efficiency of the system was compared between three different types of building, depending on their heating demand. In addition, the solar assisted heat pump is compared to the conventional air source heat pump in terms of the total cost and the total consumption of electric energy.

This thesis is structured with eight chapters. The first chapter presents the world energy situation in nowadays and the energy consumption in buildings. In the second chapter, is explained basic principles of space heating and air conditioning. In addition, an analytical description is given about the operation of heat pump, the types of heat pump and their various industry applications. The third chapter is about the solar energy, presents the ways of exploitation of solar energy and it describes the operation of various types of solar collectors. The next chapters explain how the system of solar assisted heat pump was simulated in TRNSYS program and how the optimization problem was solved with GenOpt program. Moreover, these chapters describe and explain the optimization methods that are used. The seventh chapter presents the results of simulation and the results of the optimization problem that we had set. Finally, the last chapter of the paper presents useful conclusions of the project and proposed topics for future research.

Ευχαριστίες

Με τη παρούσα προπτυχιακή διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής ήταν αποτέλεσμα της προσπάθειας αλλά και της συνεργασίας μου με διάφορα άτομα που η συμβολή τους ήταν καταλυτική.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέπων καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Χρήστο Τζιβανίδη για τη εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Ο επαγγελματισμός και οι γνώσεις του ήταν μια συνεχής πηγή στήριξης και έμπνευσης για μένα. Μέσα από τη συνεργασία μας ανέπτυξα τις γνώσεις μου και μου δίδαξε πως να σκέφτομαι σαν μηχανικός.

Επίσης, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Δρ. Ε. Μπέλλο για τη συνεχή καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου παρείχε σε σημαντικά ζητήματα της εργασίας μου. Με τη επιστημονική του κατάρτιση ήταν πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει σε ότι δυσκολία αντιμετώπιζα στη διπλωματική μου και βρίσκοντας πάντα λύση στα προβλήματα μου. Τα σχόλια και οι παρατηρήσεις του ήταν σημαντικές για την ολοκλήρωση της εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου και τους φίλους μου που βρίσκονταν πάντα στο πλάι μου όλα αυτά τα χρόνια της ακαδημαϊκής μου πορείας. Στάθηκαν δίπλα μου στις δύσκολες στιγμές, δείχνοντας υπομονή και κατανόηση, στηρίζοντας κάθε επιλογή μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract.....	ii
Ευχαριστίες	iii
Ονοματολογία.....	ix
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Η κατανάλωση ενέργειας στη σημερινή εποχή	1
1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	3
1.3 Ενέργεια και κτίρια	4
Βιβλιογραφία 1 ^{ου} κεφαλαίου	6
2. Θέρμανση-Κλιματισμός κτιρίων και Αντλία Θερμότητας.....	7
2.1 Βασικές έννοιες θέρμανσης και κλιματισμού.....	7
2.2 Θερμική συμπεριφορά κτιρίου	9
2.3 Αντλία θερμότητας.....	13
2.3.1 Αρχή λειτουργίας της αντλίας θερμότητας	13
2.3.2 Περιγραφή του θερμοδυναμικού κύκλου της αντλίας θερμότητας.....	14
2.3.3 Κύκλος Carnot και αντλία θερμότητας.....	16
2.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αντλίας θερμότητας	18
2.3.5 Τύποι αντλίας θερμότητας	19
2.3.6 Ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας.....	21
Βιβλιογραφία 2 ^{ου} κεφαλαίου	22
3. Ηλιακή ενέργεια	23
3.1 Εισαγωγή	23
3.2 Χρήση της ηλιακής ενέργειας.....	24
3.2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλιακής ενέργειας.....	24
3.2.2 Τρόποι εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας	25
3.3 Ηλιακή ακτινοβολία.....	25
3.3.1 Ηλιακή ακτινοβολία εντός και εκτός ατμόσφαιρας	25
3.3.2 Ηλιακή Γεωμετρία- Χρήσιμες σχέσεις	27

3.3.3 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο	29
3.4 Τύποι ηλιακών συλλεκτών	30
3.4.1 Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης	31
3.4.2 Συγκεντρωτικός ηλιακός συλλέκτης	36
3.4.3 Ηλιακός συλλέκτης κενού	39
Βιβλιογραφία 3 ^{ου} κεφαλαίου	40
4. Πρόγραμμα προσομοίωσης Trnsys	41
4.1 Εισαγωγή στο πρόγραμμα Trnsys	41
4.2 Προσομοίωση της Η.Υ.Α.Θ. στο πρόγραμμα προσομοίωσης TRNSYS.....	42
4.2.1 Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών του κτιρίου	42
4.2.2 Επεξεργασία του κτιρίου μέσω του προγράμματος TRNBuild.....	43
4.2.3 Προσομοίωσης της εγκατάστασης στο Simulation Studio του Trnsys.....	47
4.3 Προσομοίωση αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα στο πρόγραμμα Trnsys	68
5. Βελτιστοποίηση σε κτίρια και πρόγραμμα βελτιστοποίησης GenOpt	69
5.1 Χρήσιμες έννοιες για προβλήματα βελτιστοποίησης.....	69
5.2 Περιγραφή μεθόδων βελτιστοποίησης σε προβλήματα προσομοίωσης κτιρίων	69
5.3 Επιλογή κατάλληλης μεθόδου βελτιστοποίησης.....	71
5.4 Επιλογή κατάλληλων μεταβλητών σχεδίασης	71
5.5 Πρόγραμμα βελτιστοποίησης GenOpt.....	72
5.6 Λειτουργία προγράμματος TRNOpt	73
Βιβλιογραφία 5 ^{ου} κεφαλαίου	74
6. Βελτιστοποίηση του συστήματος μέσω των προγραμμάτων TRNSYS και GenOpt	75
6.1 Ελαχιστοποίηση του κόστους της εγκατάστασης	75
6.2 Προσαρμογή του κυκλώματος της εγκατάστασης στο Trnsys με σκοπό να γίνει η χρήση του προγράμματος GenOpt μέσω του στοιχείου TRNOpt	76
6.3 Χρήση του προγράμματος βελτιστοποίησης GenOpt μέσω του στοιχείου TRNOpt	84
Βιβλιογραφία 6 ^{ου} κεφαλαίου	100
7. Αποτελέσματα	101
7.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο πρόγραμμα Trnsys.....	101
7.2 Αποτελέσματα ενεργειακής απόδοσης και συνολικού κόστους της εγκατάστασης	105
7.3 Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους με τη χρήση του προγράμματος GenOpt	107

7.4 Αποτελέσματα παραμετρικής μελέτης για ελαχιστοποίηση του κόστους.....	120
7.5 Βελτιστοποίηση συστήματος μεταβάλλοντας άλλες παραμέτρους της εγκατάστασης	121
7.6 Βελτιστοποίηση του συστήματος με στόχο υψηλή ενεργειακή απόδοση και χαμηλό κόστος.....	123
7.7 Προσομοίωση Η.Υ.Α.Θ για 3 διαφορετικές περιπτώσεις σε κτιρίων	127
7.8 Σύγκριση Η.Υ.Α.Θ με αντλία θερμότητας αέρα-αέρα.....	133
8. Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα	136
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	140
Ρυθμίσεις για τη ομαλή λειτουργία μεταξύ Trnsys και GenOpt.....	140
Βιβλιογραφία παραρτήματος	142

Ονοματολογία

Μεγέθη

A: Επιφάνειας συναλλαγής [m^2]

A_a : η επιφάνεια που εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία στο συγκεντρωτικό συλλέκτη [m^2]

A_r : η επιφάνεια του δέκτη που απορροφά τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία [m^2]

A_c : Επιφάνεια επίπεδου συλλέκτη [m^2]

C: Λόγος Συγκέντρωσης [-]

d: πάχος [m]

F_R : Παράγων θερμικής απολαβής συλλέκτη [-]

G: στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία [W/m^2]

G_{sc} : ηλιακή σταθερά [W/m^2]

h: συντελεστής συναγωγιμότητας [W/m^2K]

k: συντελεστής ειδικής αγωγιμότητας [$W/m K$]

L: πάχος [m]

\dot{m} : παροχή μάζας [kg/hr]

n: Αύξων αριθμός ημέρας [-]

P: Ισχύς [Watt]

Q: Θερμότητα [Joule]

Q_u : ωφέλιμη θερμική ισχύς [Watt]

R: συντελεστής αναγωγής κόστους [-]

S: Εντροπία [$kg m^2 s^{-2} K^{-1}$]

T: Θερμοκρασία [$^{\circ}C$]

TC: Συνολικό Κόστος-Total Cost [€]

U: ο συντελεστής θερμοπερατότητας [W / m^2K]

U_L : ο συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών συλλέκτη [$W/m^2 K$]

V: όγκος [m^3]

W: έργο [Joule]

Ελληνικά σύμβολα

β : Κλίση των συλλεκτών [$^{\circ}$]

γ : Αζιμούθιο επιφάνειας [$^{\circ}$]

γ_s : Αζιμούθιο ήλιου [$^{\circ}$]

δ : Ηλιακή απόκλιση [$^{\circ}$]

ϵ : συντελεστής εκπομπής του σώματος [-]

η : Βαθμός απόδοσης [%]

θ: γωνιά πρόσπτωσης [°]
θ_z: Γωνία ζενίθ [°]
ρ: Πυκνότητα [kg/m³]
σ: σταθερά Stefan-Boltzmann[W/m² K⁴]
τα: Γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας [-]
φ: Γεωγραφικό πλάτος [°]
ω: Ωριαία γωνία [° /min]

Δείκτες

α: περιβάλλον
b: άμεση ηλιακή ακτινοβολία
c: ψυχρό
d: διάχυτος ηλιακή ακτινοβολία
el: ηλεκτρικό
h: ζεστό
H: ψηλό (High)
in: μέσα
L: χαμηλό (Low)
m: μέση
n: κάθετο επίπεδο
o: εκτός ατμόσφαιρας
opt: βέλτιστο
out: έξω
s: επιφάνεια
T: κεκλιμένο επίπεδο

Ακρωνύμια

ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Η.Υ.Α.Θ. : Ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας
COP: Συντελεστής συμπεριφοράς (Coefficient of performance)
COP_{th}: Θεωρητικός Συντελεστής συμπεριφοράς
FPC: Επίπεδος συλλέκτης (Flat Plate Collector)
E.E.R: Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy Efficiency Ratio)
PSO: Μέθοδος Βελτιστοποίησης με σμήνος σωματιδίων (Particle Swarm Optimization)
SCOP: Ηλιακός Συντελεστής συμπεριφοράς (Solar Coefficient of Performance)

1.Εισαγωγή

1.1 Η κατανάλωση ενέργειας στη σημερινή εποχή

Η ενέργεια επηρεάζει κάθε πτυχή της ζωής μας. Τις τελευταίες δεκαετίες, η συνεχώς αυξανόμενη οικονομική ανάπτυξη και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου οδήγησαν σε μια αύξηση των ενεργειακών μας αναγκών χωρίς όμως να μπορέσουμε να τις διαχειριστούμε σωστά.

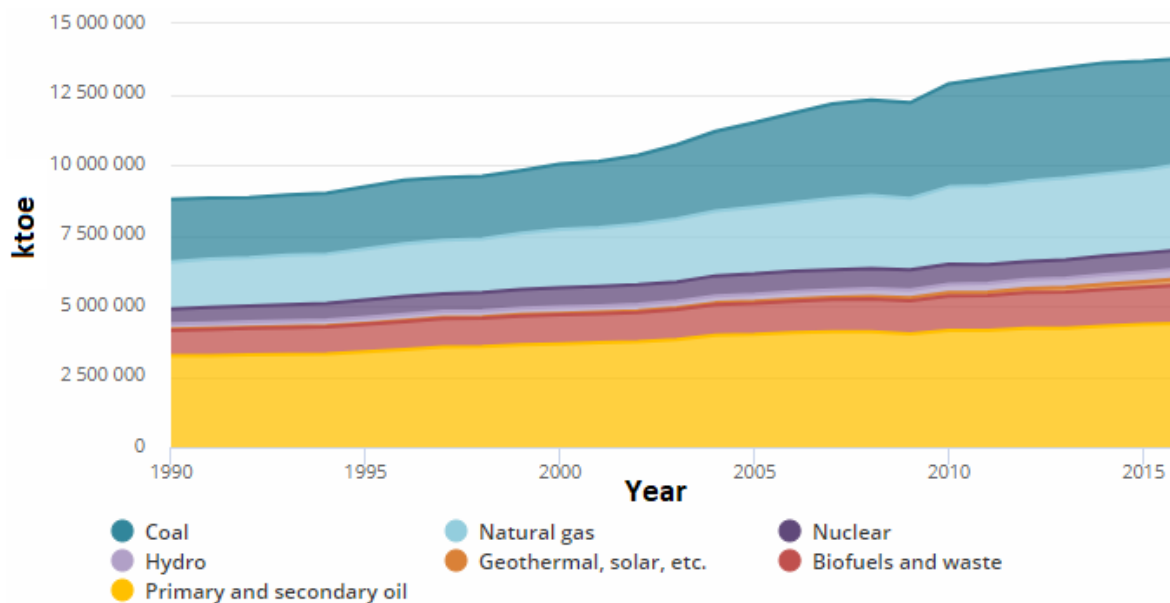
Λόγω της βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου, ο άνθρωπος δυσκολεύεται να περιορίσει τη χρήση της ενέργειας αφού είναι απαραίτητη για να καλύψει τις βασικές του ανάγκες, όπως για τη θέρμανση και κλιματισμό της κατοικίας του, για το μαγείρεμα του, για τα μέσα μεταφοράς και για τα αυτοκίνητα. Επίσης, μεγάλα ποσά ενέργειας καταναλώνονται σε βιομηχανίες, εργοστάσια και σε πολλές άλλες εγκαταστάσεις.

Ωστόσο, η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί σε μεγάλο βαθμό εάν χρησιμοποιηθούν τα κατάλληλα μέσα για τη παραγωγή της και μειωθούν σημαντικά οι λειτουργικές δαπάνες της. Η εξοικονόμηση ενέργειας γίνεται πιο ελκυστική αν σκεφτεί κανείς το κόστος ενέργειας αυξάνεται συνεχώς. Είναι γεγονός ότι αυτό επηρεάζει τη τεχνολογική εξέλιξη και η οικονομική ανάπτυξη κάθε χώρας.

Εκτός, από το οικονομικό τομέα, η ορθολογική χρήση της ενέργειας είναι απαραίτητη για τη προστασία του περιβάλλοντος. Η προστασία του περιβάλλοντος αποτελεί σε όλο το κόσμο, τη βασικότερη συνιστώσα στις δραστηριότητες του ανθρώπου, που αποσκοπούν σε καλύτερη ποιότητα ζωής χωρίς να υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του οικοσυστήματος.

Σύμφωνα με έρευνες, η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων το 2017 καλύπτει το 85% των ενεργειακών αναγκών παγκοσμίως. Σε αυτά, συμπεριλαμβάνονται το πετρέλαιο κατά 34% το κάρβουνο κατά 28% και το φυσικό αέριο κατά 23%. Το υπόλοιπο 15% των ενεργειακών αναγκών καλύπτεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [1.1].

Το πιο κάτω διάγραμμα (εικόνα 1.1) παρουσιάζει τη κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά μορφή ενέργειας τα τελευταία 25 χρόνια. Η πρωτογενής ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας που βρίσκεται στη φύση και δεν έχει υποβληθεί σε καμία διαδικασία μετατροπής από τον άνθρωπο. Η ενέργεια αυτή περιέχεται στα ακατέργαστα καύσιμα και άλλες μορφές ενέργειας που εισάγονται ως εισροές σε ένα σύστημα. Μπορεί να είναι μη ανανεώσιμη ή ανανεώσιμη ενέργεια[1.2].



Εικόνα 1.1: Συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας [1.3]

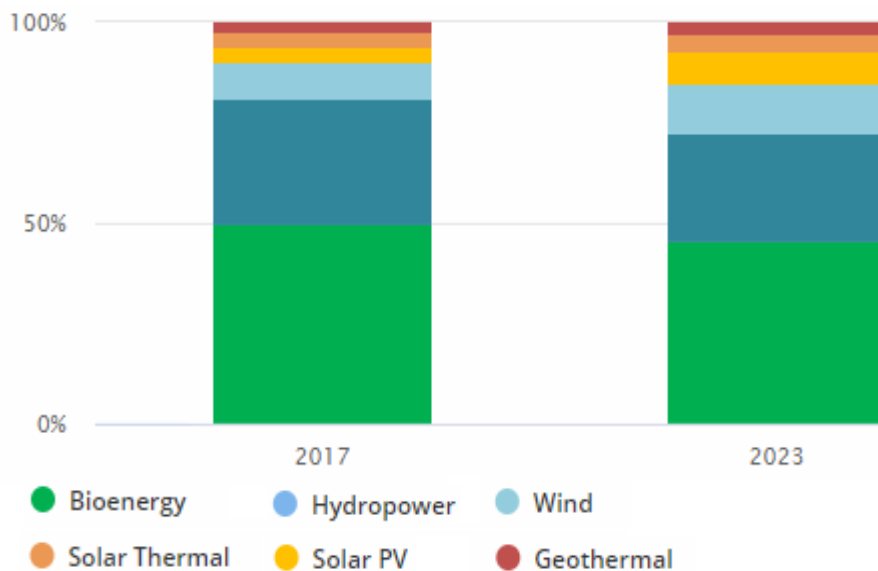
Όπως φαίνεται και στη εικόνα 1.1, η συνολική κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται με το χρόνο και το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής συνεχίζεται να καταναλώνεται από τα ορυκτά καύσιμα. Η καύση των ορυκτών καυσίμων παράγει κάθε χρόνο περίπου 21 δισεκατομμύρια τόνους διοξείδιο του άνθρακα. Εκτιμάται ότι οι φυσικές διεργασίες μπορούν να απορροφήσουν περίπου το ήμισυ αυτού του ποσού, συνεπώς υπάρχει καθαρή αύξηση σχεδόν 10,65 δισεκατομμυρίων τόνων ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα ανά έτος [1.4]. Αυτό είναι το κύριο αέριο που ευθύνεται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το σοβαρότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα. Από αυτή την ποσότητα, η μισή απορροφάτε από την βιόσφαιρα της γης και η υπόλοιπη παραμένει στον ατμοσφαιρικό αέρα. Έτσι, προκαλείται υπερθέρμανση του πλανήτη και δηλαδή αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης. Αυτά, έχουν ως αποτέλεσμα το καύσωνα, το λιώσιμο των πάγων, τη αύξηση της στάθμης της θάλασσας, πλημμύρες τα οποία έχουν άμεσο αντίκτυπο στη υγεία αλλά και στη κοινωνία του ανθρώπου. Παράλληλα, από τη καύση των ορυκτών καυσίμων, παράγονται και άλλα τοξικά και επιβλαβή σωματίδια (θειικά, νιτρικά κ.α.) που επιφέρουν την όξινη βροχή και γενικά χαλάνε τη ποιότητα ζωής του.

Δεδομένου λοιπόν των πιο πάνω και επειδή η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί κατά 30% μέχρι το 2040, είναι ανάγκη να περιοριστεί η καύση των ορυκτών καυσίμων και να χρησιμοποιηθούν περισσότερο οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [1.5].

1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η ανανεώσιμη ενέργεια είναι ενέργεια που παράγεται από πηγές που δεν εξαντλούνται ή μπορούν να αναπληρώνονται μέσα στο χρόνο ζωής του ανθρώπου. Είναι γνωστό, ότι οι ΑΠΕ αποτελούν τις πιο φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) που αναπτύσσονται είναι η ηλιακή (ηλιακά θερμικά και φωτοβολταϊκά συστήματα), η υδροηλεκτρική (υδροηλεκτρικοί σταθμοί), η αιολική (ανεμογεννήτριες), η γεωθερμική (γεωθερμικές αντλίες θερμότητας), η ενέργεια από βιομάζα και η ενέργεια από τα θαλάσσια κύματα. Τα ορυκτά καύσιμα δεν είναι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γιατί χρειάζονται εκατομμύρια χρόνια για να σχηματιστούν και έτσι εξαντλούνται με πολύ γρηγορότερο ρυθμό από τον ρυθμό με τον οποίο σχηματίζονται. Οι ΑΠΕ χρησιμοποιούνται κυρίως για τη παραγωγή ηλεκτρισμού, μηχανικής ενέργειας, για θέρμανση και για ψύξη.

Σύμφωνα με το διάγραμμα της εικόνας 1.2, το 2017, από τη συνολική παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ, το 50% ήταν από βιομάζα, το 31% από υδροηλεκτρική ενέργεια, το 9% από αιολική, το 8% από ηλιακή ενέργεια και το 2% από γεωθερμία.



Εικόνα 1.2: Κατανάλωση ενέργειας ανά μορφή ΑΠΕ[1.3]

Είναι εμφανές ότι μέχρι το 2023, σε σχέση με τις υπόλοιπες ΑΠΕ αναμένεται μεγαλύτερη αύξηση χρήσης της αιολικής ενέργειας και της ηλιακής ενέργεια ειδικά σε φωτοβολταϊκά.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι:

- ανεξάντλητες πηγές ενέργειας
- καθαρές προς το περιβάλλον
- έχουν χαμηλό κόστος λειτουργίας που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της οικονομίας
- η ανάπτυξη τους δημιουργεί περισσότερες θέσεις εργασίας απ' ότι η χρήση συμβατικών καυσίμων για κάλυψη των ενεργειακών αναγκών
- μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα τα οποία εξαντλούνται
- Οι περισσότερες κυβερνήσεις προωθούν τη χρήση τους, δίνοντας επιχορηγήσεις

Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό των ΑΠΕ είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Δυστυχώς όμως, μεγάλο μέρος της εκμετάλλευσης του δυναμικού τους παρεμποδίζεται για διάφορους λόγους. Οι κύριοι λόγοι είναι το υψηλό κόστος των περισσότερων συστημάτων, η απόδοση τους, η διαθεσιμότητα του χώρου (χρήση μεγάλων εκτάσεων γης) αλλά και τα πολιτικά και οικονομικά συμφέροντα.

Εντούτοις, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει βάλει στόχο τη αύξηση της χρήσης των ΑΠΕ και τη συμμετοχή των ΑΠΕ κατά τουλάχιστον 27% στο ενεργειακό μίγμα μέχρι το 2030 [1.6]. Για αυτό, για να ενθαρρύνει την χρήση των ΑΠΕ δίνει επιχορηγήσεις με σκοπό να παροτρύνει τα κράτη μέλη της.

1.3 Ενέργεια και κτίρια

Σύμφωνα με στοιχεία της ευρωπαϊκής επιτροπής, ο κτιριακός τομέας απορροφά περίπου το 40% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης στη Ευρώπη[1.7]. Συγκεκριμένα στη Ελλάδα, το 20% της κατανάλωσης ενέργειας οφείλεται στο κλιματισμό και τη θέρμανση των κτιρίων [1.8]. Λαμβάνοντας στοιχεία και από προηγούμενα έτη, είναι φανερό ότι ο αριθμός των κτιρίων θα συνεχίσει να αυξάνεται καθώς και η κατανάλωση ενέργειας σε αυτά. Η ενέργεια αυτή που καταναλώνεται στα κτίρια οφείλεται στη θέρμανση, την ψύξη (θερινό κλιματισμό), τον φωτισμό και τις άλλες εγκατεστημένες συσκευές. Τα τελευταία χρόνια η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) προωθεί την ορθολογική χρήση της ενέργειας για θέρμανση και κλιματισμό με τη θέσπιση νέων νόμων και πιο αυστηρών προδιαγραφών για τη επίτευξη των στόχων της.

Η εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια μπορεί να επιτευχθεί με σωστό ενεργειακό σχεδιασμό (βιοκλιματικός σχεδιασμός). Σε αυτή τη περίπτωση, η κατασκευή του κτιρίου γίνεται με βάση τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής. Σκοπός είναι η εξασφάλιση θερμικής και οπτικής άνεσης στο κτίριο με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Αυτό εξασφαλίζεται, αξιοποιώντας όλες τις διαθέσιμες πηγές από το περιβάλλον της περιοχής όπως είναι ο άνεμος, ο ήλιος, το νερό και το έδαφος. Για παράδειγμα, το καλοκαίρι εξασφαλίζεται φυσικό δροσισμός στο κτίριο (μέσω

δροσερών ανέμων) ενώ το χειμώνα γίνεται εκμετάλλευση του ήλιου για θέρμανση και παράλληλα επιδιώκεται ο φυσικός φωτισμός. Για την επίτευξη των πιο πάνω, λαμβάνονται υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά του κτιρίου όπως ο προσανατολισμός του, τα ανοίγματα του, τα δομικά υλικά κατασκευής (καλή θερμομόνωση) και γίνεται χρήση ενεργητικών και παθητικών ηλιακών συστημάτων. Κάποιες τεχνικές του βιοκλιματικού σχεδιασμού είναι ο τοίχος Trombe (τοίχος θερμικής αποθήκευσης), το ηλιακό θερμοκήπιο, οι φυτεμένες οροφές, η ηλιακή λίμνη, η ηλιακή καμινάδα [1.9].

Άλλοι τρόποι μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας είναι η χρήση πιο αποδοτικών συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού, η σωστή συντήρηση τους και πάνω από όλα με τη σωστή λειτουργία-συμπεριφορά των χρηστών.

Πιο κάτω αναφέρονται μερικοί λόγοι για τους οποίους είναι εφικτό και χρειάζεται να γίνει μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας στη θέρμανση και στο κλιματισμό των κτιρίων:

- Πάνω από 10 εκατομμύρια οικιακοί λέβητες που είναι εγκατεστημένοι σε χώρες της ΕΕ είναι παλαιότεροι από 20 ετών[1.10]. Αυτό μαζί με άλλα παλαιά συστήματα θέρμανσης οδηγεί σε μειωμένους βαθμούς απόδοσης και επομένως αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και περιβαλλοντική επιβάρυνση. Για αυτό, συνίσταται η αντικατάστασή τους, η οποία με κατάλληλα συστήματα θέρμανσης, με τη εφαρμογή συστημάτων ελέγχου και αυτοματισμών θα φέρει ένα μεγάλο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας και μείωση των ρύπων.
- Παρατηρείται ότι πλειοψηφία των κτιρίων (στην Ελλάδα περίπου το 80% του συνόλου) που κατασκευάστηκαν πριν από 40 χρόνια, δεν είναι καλά θερμομονωμένα [1.8]. Επομένως, απαιτούν πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας για να καλύψουν τις ανάγκες τους για κλιματισμό και θέρμανση, ειδικά τη χειμερινή περίοδο, και προσφέρουν πολλές δυνατότητες για εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας.
- Για τον κλιματισμό των κτιρίων, η κατανάλωση ενέργειας ήδη αυξάνεται και αναμένεται να αυξηθεί αρκετά τα επόμενα χρόνια . Αυτό αφορά τα κτίρια κατοικιών, κυρίως όμως τα κτίρια καταστημάτων, γραφείων και υπηρεσιών. Αυτή η αύξηση μπορεί να μειωθεί κατά 25% με τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων κλιματισμού. Τέτοια συστήματα είναι οι αντλίες θερμότητας, τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας, η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας και οι εφαρμογές συστημάτων ψύξης με απορρόφηση.

Βιβλιογραφία 1^{ου} κεφαλαίου

[1.1] BP Statistical Review of World Energy, June 2018

[1.2] https://en.wikipedia.org/wiki/Primary_energy

[1.3] Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA), World Energy Balances, 2018

[1.4] What Are Greenhouse Gases?, US Department of Energy, 2007

[1.5] Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA), World Energy Outlook, 2017

[1.6] EU Publication, The EU and Energy Union and climate action, 2017

[1.7] Κέντρο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, Εξοικονόμηση Ενέργειας στον κτιριακό τομέα

[1.8] Κ. Τ. Παπακώστας, Εξοικονόμηση ενέργειας σε συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού, Θεσσαλονίκη, 2009

[1.9] Σημειώσεις 'Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων', Χ. Τζιβανίδης

[1.10] Κέντρο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, Ενεργειακή αποδοτικότητα στο δομημένο περιβάλλον, Αθήνα, 2008

2. Θέρμανση-Κλιματισμός κτιρίων και Αντλία Θερμότητας

Σε αυτό το κεφάλαιο, αρχικά παρουσιάζονται βασικές έννοιες θερμότητας καθώς και πώς αυτές συνδέονται με τη θέρμανση και το κλιματισμό των κτιρίων. Στη συνέχεια, γίνεται περιγραφή των αντλιών θερμότητας και παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας τους, οι διάφοροι τύποι τους και εξηγείται γιατί είναι σημαντική η χρήση της σε σχέση με άλλα συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού.

2.1 Βασικές έννοιες θέρμανσης και κλιματισμού

Θερμότητα: είναι η ενέργεια που μεταφέρεται από το ένα σώμα σε άλλο ως αποτέλεσμα της διαφοράς θερμοκρασίας τους. Εάν συγκεντρωθούν δύο σωμάτια με διαφορετικές θερμοκρασίες, μεταφέρεται ενέργεια δηλαδή έχουμε ροή θερμότητας από το θερμότερο σώμα στο ψυχρότερο ($2^{\circ\text{C}}$ θερμοδυναμικός νόμος). Το αποτέλεσμα αυτής της μεταφοράς ενέργειας συνήθως, αλλά όχι πάντα, είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του ψυχρού σώματος και η μείωση της θερμοκρασίας του θερμότερου σώματος. Μερικές φορές, μια ουσία μπορεί να απορροφήσει θερμότητα χωρίς αύξηση της θερμοκρασίας του αλλάζοντας από μια φυσική κατάσταση (ή φάση) σε άλλη, όπως από ένα στερεό σε ένα υγρό (τήξη), από ένα στερεό σε έναν ατμό (εξάχνωση), από ένα υγρό σε έναν ατμό (βρασμός) ή από μια στερεή μορφή σε άλλη.

Μονάδα μέτρησης της θερμότητας στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων είναι το Joule. Άλλες μονάδες μέτρησης είναι το Btu (στο αγγλοσαξονικό σύστημα) και η θερμίδα (cal) ή χιλιοθερμίδα (kcal). Οι πιο πάνω μονάδες μέτρησης συνδέονται ως εξής:

$$1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal} = 4186,8 \text{ Joules} = 3.968 \text{ btu}$$

Η μετάδοση θερμότητας μπορεί να γίνει με 3 τρόπους: με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία.

- Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Λαμβάνει χώρα όταν υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα σε 2 στερεά σώματα που βρίσκονται σε επαφή χωρίς σχετική κίνηση. Η μετάδοση της θερμότητας στα στερεά πραγματοποιείται είτε μέσω μοριακών ταλαντώσεων είτε μέσω ελεύθερων ηλεκτρονίων. Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή υφίσταται και σε αέρια ή υγρά σώματα μόνο σε λεπτά στρώματα αυτών, καθώς σε παχύτερα στρώματα εμφανίζονται φαινόμενα συναγωγής[2.1].

Η πυκνότητα παροχής θερμότητας q [W/m^2] σε ένα στερεό σώμα δίνεται από τη σχέση:

$$q = k \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2.1)$$

όπου T_1, T_2 : οι θερμοκρασίες σε δυο διαφορετικά σημεία του στερεού σώματος

k : συντελεστής ειδικής αγωγιμότητας [$\text{W}/\text{m K}$], ο οποίος εξαρτάται από τις ιδιότητες του σώματος

L : το πάχος στρώματος μεταξύ των δύο σημείων [m]

- Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Συμβαίνει μεταξύ της επιφάνειας ενός στερεού σώματος και ενός ρευστού (υγρού ή αέριου σώματος) που έρχονται σε επαφή και έχουν διαφορετική θερμοκρασία. Η θερμική ενέργεια μεταφέρεται είτε από τις τυχαίες κινήσεις των μορίων (τη διάχυση) είτε με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, κατά τη οποία μετακινείται συλλογικά μεγάλος αριθμός μορίων.

Η πυκνότητα παροχής θερμότητας q [W/m^2] με συναγωγή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ροής και από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ρευστού και στερεής επιφάνειας και δίνεται από τη σχέση:

$$q = h (T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

όπου T_s : η θερμοκρασία στη επιφάνεια του στερεού σώματος

T_∞ : η θερμοκρασία του ρευστού σώματος σε σημείο που δεν επηρεάζεται πλέον από τη θερμοκρασία του στερεού

h : συντελεστής ειδικής συναγωγιμότητα ο οποίος εξαρτάται από τη γεωμετρία της επιφάνειας, το είδος του ρευστού και της ροής του [W/m^2K]

- Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Βασίζεται στη ικανότητα αρκετών σωμάτων να απορροφούν μέρος της ακτινοβολίας που δέχονται και να την επανεκπέμπουν. Έτσι, μεταξύ δύο σωμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας θα υπάρχει μετάδοση θερμότητας χωρίς την ανάγκη παρουσίας κάποιου ενδιάμεσου σώματος, σε αντίθεση με τους πιο πάνω τρόπους (αγωγή και συναγωγή) που η παρουσία υλικού μέσου είναι απαραίτητη για τη μεταφορά της θερμότητας.

Η πυκνότητα παροχής θερμότητας q [W/m^2] που ακτινοβολείται από ένα σώμα δίνεται από τη σχέση:

$$q = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.3)$$

όπου T_s : η θερμοκρασία του σώματος

ϵ : συντελεστής εκπομπής του σώματος, $0 < \epsilon < 1$

$\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8}$ [$W/m^2 K^4$] σταθερά Stefan-Boltzmann

Θερμοκρασία: Η θερμοκρασία είναι ένα φυσικό μέγεθος που εκφράζει τη θερμική ενέργεια ενός σώματος και δηλαδή τη κινητική ενέργεια των μορίων του. Μας δείχνει πόσο ζεστό ή κρύο είναι ένα σώμα. Μονάδες μέτρησης της στο διεθνές σύστημα μονάδων είναι το Kelvin [K]. Άλλες μονάδες μέτρησης της είναι το Celsius [C] και το Fahrenheit [F]. Η θερμοκρασία στη οποία τα

μόρια της ύλης σταματάνε να κινούνται εντελώς είναι οι 0 Kelvin (-273.15°C) και είναι θεωρητικά η χαμηλότερη θερμοκρασία που μπορεί να έχει ένα σώμα.

Λόγος υγρασίας: Σε ένα δείγμα υγρού αέρος, είναι ο λόγος της μάζας του υδρατμού προς τη μάζα του ξηρού αέρος που περιέχονται στο δείγμα.

Ειδική υγρασία: Είναι ο λόγος της μάζας του υδρατμού προς τη συνολική μάζα του υγρού αέρος

Σχετική υγρασία (%) : είναι ο λόγος του ποσού (γραμμομοριακού κλάσματος) του υδρατμού που περιέχεται σε ένα δεδομένο δείγμα υγρού-αέρος προς το μέγιστο λόγο του ποσού (γραμμομοριακού κλάσματος) του υδρατμού που μπορεί να έχει το δείγμα στη ίδια θερμοκρασία και πίεση[2.2].

Θερμοπερατότητα: είναι η ποσότητα θερμότητας ανά μονάδα χρόνου που περνά μέσα από 1m^2 στοιχείου κατασκευής με πάχος d (m) όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών αυτών είναι ίση με 1 K.

Συμβολίζεται με U και οι μονάδες μέτρησης της είναι οι $[\text{W} / \text{m}^2\text{K}]$

2.2 Θερμική συμπεριφορά κτιρίου

Στη παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία εντός κτιρίου και που προκαλούν ροή θερμότητας από και προς το εσωτερικό του.

➤ Θερμικές ανάγκες κτιρίου

Οι θερμικές ανάγκες ενός κτιρίου είναι το ποσό θερμότητας που πρέπει να ληφθεί ως βάση για τον υπολογισμό και το σχεδιασμό της εγκατάστασης θέρμανσης.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις θερμικές ανάγκες του κτιρίου σε κιλοβατώρες (kWh) :

- Το κλίμα της περιοχής του κτιρίου
- το μέγεθος και ο προσανατολισμός του
- το είδος και το πάχος των υλικών κατασκευής και της μόνωσης του
- το μέγεθος, ο προσανατολισμός και το είδος των παραθύρων του
- τα θερμικά κέρδη στο εσωτερικό του κτιρίου
- το εσωτερικό του κτιρίου όπως η διαμόρφωση του χώρου, οι τοίχοι κ.α.

➤ **Θερμικά κέρδη κτιρίου**

Θερμικό κέρδος είναι ο ρυθμός με τον οποίο η θερμότητα εισέρχεται ή παράγεται μέσα στο χώρο μια ορισμένη χρονική στιγμή.

Το θερμικά κέρδη μπορεί να είναι:

- Ηλιακά κέρδη (ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται εντός του χώρου μέσω των υαλοπινάκων)
- η παραγωγή θερμότητας μέσα στο χώρο (άνθρωποι, συσκευές, φωτισμός)
- η μεταφορά θερμότητας διαμέσου των εσωτερικών τοίχων του κτιρίου
- η μεταφορά θερμότητας δια μέσου των τοίχων από το περιβάλλον (σε περίπτωση που η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη από τη εσωτερική)

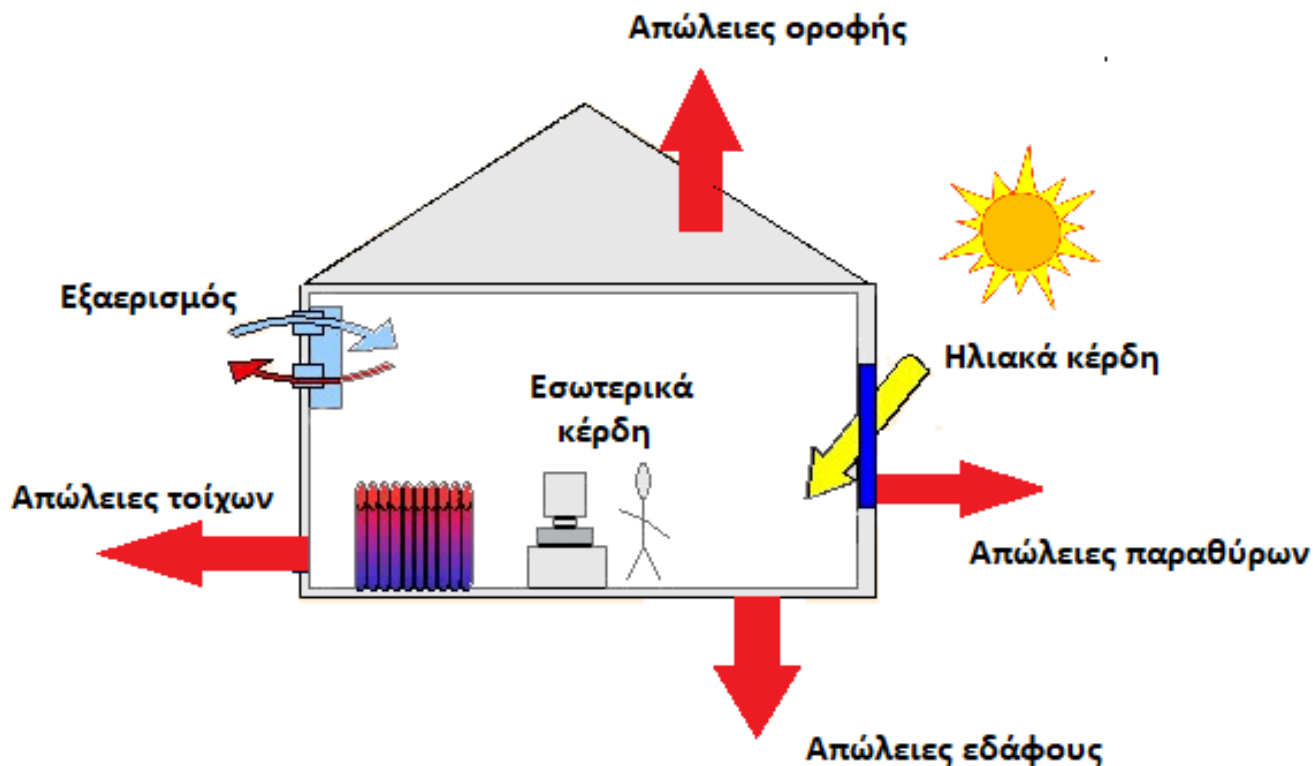
Το θερμικό κέρδος διαχωρίζεται στο αισθητό και στο λανθάνον. Το θερμικό κέρδος ονομάζεται αισθητό όταν πρόκειται για άμεση πρόσδοση θερμότητας στο χώρο με αγωγή, συναγωγή ή ακτινοβολία χωρίς να μεταβάλλει τη υγρασία του. Λανθάνον ονομάζεται όταν προστίθεται στο χώρο υδρατμός χωρίς τη μεταβολή της θερμοκρασίας ή της πίεσης του.

➤ **Θερμικές απώλειες κτιρίου**

Οι θερμικές απώλειες είναι η ροή θερμότητας που έχουμε από το εσωτερικό του χώρου προς το περιβάλλον σε περίπτωση που αυτό έχει χαμηλότερη θερμοκρασία. Αντίθετη, ροή θερμότητας έχουμε όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη θερμοκρασία του χώρου.

Οι συνολικές θερμικές απώλειες ενός κτιρίου οφείλονται κυρίως :

- Στις απώλειες αερισμού/εξαερισμού λόγω της χαμηλότερης (συνήθως) θερμοκρασίας του εισερχόμενου αέρα στο κτίριο
- Στις απώλειες θερμότητας των δομικών υλικών του κτιρίου λόγω των τοίχων, οροφής, παραθύρων, δαπέδου κ.α.



Εικόνα 2.1: Θερμικές απώλειες και θερμικά κέρδη του κτιρίου για θερμοκρασία περιβάλλοντος μικρότερη από εσωτερική θερμοκρασία [2.3]

Οι απώλειες θερμότητας δια μέσου των δομικών υλικών λόγω της διαφοράς εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας δίνονται από τη σχέση:

$$Q = U A (T_{in} - T_{out}) \quad (2.4)$$

Όπου A είναι η επιφάνεια συναλλαγής και U είναι ο συντελεστής θερμοπερατότητας [W / m^2K].

Όπως φαίνεται στη πιο πάνω εξίσωση, οι απώλειες θερμότητας εξαρτώνται από το συντελεστή θερμοπερατότητας. Όσο πιο χαμηλός ο συντελεστής θερμοπερατότητας, τόσο πιο μικρές οι απώλειες θερμότητας. Στην τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες που οφείλονται σε θερμική αγωγιμότητα και στη συναγωγή θερμότητας.

Οι απώλειες θερμότητας πρέπει να υπολογίζονται ξεχωριστά για κάθε δομικό στοιχείο, όταν υπάρχει διαφορετικός συντελεστής θερμοπερατότητας ή διαφορετική διαφορά θερμοκρασίας. Για ένα δομικό στοιχείο (π.χ. για εξωτερικό τοίχο), το οποίο αποτελείται από N στρώματα πάχους L_i το καθένα με αγωγιμότητα k_i , ο συντελεστής U δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{in}} + \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{k_i} + \frac{1}{h_{out}}} \quad (2.5)$$

Δηλαδή ο συντελεστής U εξαρτάται από την επιφάνεια της κατασκευής, το πάχος και το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k των οικοδομικών υλικών.

Οι θερμικές απώλειες είναι αδύνατο να εμποδιστούν τελείως και μπορούν μόνο να περιοριστούν ως προς την ένταση και τη διάρκειά τους. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλη θερμομόνωση των εξωτερικών επιφανειών του κτιρίου, η οποία μειώνει το ρυθμό μετάδοσης της θερμότητας από ή προς το κτίριο. Κτίρια με καλή μόνωση έχουν χαμηλό συντελεστή θερμοπερατότητας (δηλαδή μικρές απώλειες θερμότητας) ενώ κτίρια με κακή μόνωση κτιρίου έχουν υψηλό συντελεστή θερμοπερατότητας (δηλαδή υψηλές απώλειες θερμότητας).

Ο αερισμός ενός κτιρίου γίνεται για λόγους υγιεινής και γίνεται είτε εξαναγκασμένα (π.χ. από μηχανικούς αεριστήρες) για να έχουμε ανανέωση του αέρα του χώρου είτε αθέλητα (π.χ. διείσδυση εξωτερικού αέρα από διάκενα, πόρτες, παράθυρα) . Οι απαιτήσεις ανανέωσης ενός αέρος σε ένα χώρο ποικίλουν ανάλογα με τη περίπτωση που χρησιμοποιείται ο χώρος. Οι απώλειες αερισμού είναι ανάλογες της παροχής του εισερχόμενου αέρα και της διαφοράς θερμοκρασίας του χώρου με τη θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα.

2.3 Αντλία θερμότητας

Σε αυτή τη ενότητα περιγράφεται λεπτομερώς η λειτουργία και ο θερμοδυναμικός κύκλος της αντλίας θερμότητας. Ακόμη, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα της, οι διάφοροι τύποι της, και αναφέρονται διάφορες εφαρμογές της και συστήματα με τα οποία είναι εφικτό να συνδυαστεί.

2.3.1 Αρχή λειτουργίας της αντλίας θερμότητας

Σύμφωνα με το 2^ο θερμοδυναμικό νόμο και τη εξίσωση (2.6), σε όλες τις αυθόρμητες (μη αντιστρεπτές) διεργασίες η εντροπία αυξάνεται, δηλαδή σε ένα σύστημα η θερμότητα μεταφέρεται από ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας σε ένα σώμα χαμηλότερης και ποτέ προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Για τη αντίστροφη διεργασία απαιτείται πάντοτε κατανάλωση κάποιας μορφής έργου (ενέργειας). Επομένως, δίνοντας κάποιο ποσό ενέργειας (μηχανικό έργο ή θερμότητα) στη αντλία θερμότητας μπορούμε να έχουμε την αντίστροφη διεργασία, δηλαδή η αντλία θερμότητας μας επιτρέπει να έχουμε μεταφορά θερμότητας από ένα χώρο χαμηλότερης θερμοκρασίας σε ένα χώρο υψηλότερης θερμοκρασίας.

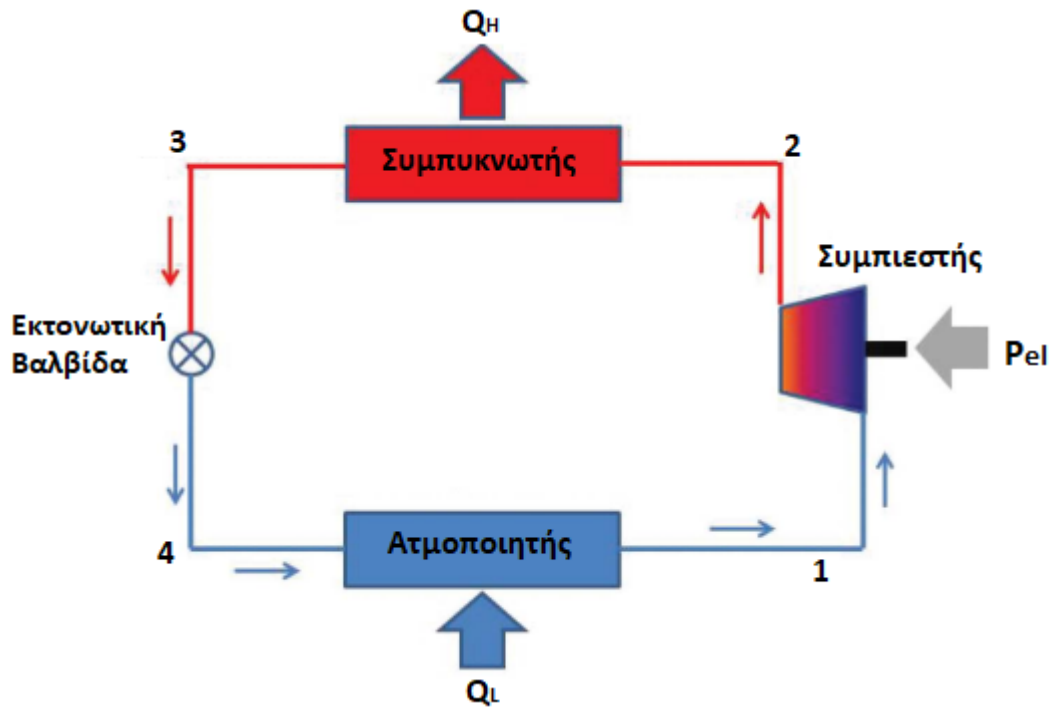
Έτσι για παράδειγμα, το χειμώνα η αντλία θερμότητας αφαιρεί (αντλεί) θερμότητα από το περιβάλλον (χαμηλή θερμοκρασία) και την διοχετεύει στο εσωτερικό του σπιτιού (υψηλότερη θερμοκρασία) προκειμένου να αυξήσει τη θερμότητα του εσωτερικού χώρου ενώ το καλοκαίρι γίνεται το αντίθετο.

Βάση της θερμοδυναμικής, τα πιο πάνω επιβεβαιώνονται από τη εξίσωση της εντροπίας:

$$\Delta S = S_B - S_A = \int_A^B \frac{dq}{T} \quad (2.6)$$

Η αντλία θερμότητας αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη (εικόνα 2.2) :

- ατμοποιητής
- συμπιεστή
- συμπυκνωτή
- βαλβίδα στραγγαλισμού



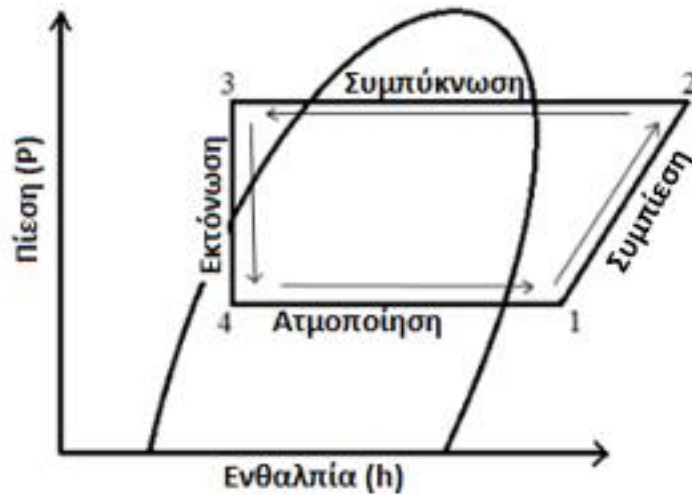
Εικόνα 2.2: Διάταξη της αντλίας θερμότητας [2.4]

Η λειτουργία μιας αντλίας θερμότητας βασίζεται στη φυσική ιδιότητα, όπου το σημείο βρασμού ενός υγρού αυξάνεται με τη πίεση. Με τη μείωση της πίεσης, ένα μέσο μπορεί να ατμοποιηθεί σε χαμηλές θερμοκρασίες (κατά λειτουργία ατμοποιητή) ενώ με τη αύξηση της πίεσης θα οδηγήσει σε υψηλό σημείο βρασμού (κατά τη λειτουργία του συμπυκνωτή). Αυτό, γίνεται πιο κατανοητό στη περιγραφή του κύκλου της αντλίας θερμότητας.

2.3.2 Περιγραφή του θερμοδυναμικού κύκλου της αντλίας θερμότητας

Αρχικά, περιγράφεται ο θερμοδυναμικός κύκλος της αντλίας θερμότητας για θέρμανση. Το εργαζόμενο μέσο που βρίσκεται σε χαμηλή πίεση και θερμοκρασία (**κατάσταση 4**), ατμοποιείται στον ατμοποιητή και γίνεται ατμός (**κατάσταση 1**). Σε αυτή τη διεργασία απαιτείται πρόσδοση θερμότητας στο ατμοποιητή. Στη συνέχεια, ο συμπιεστής συμπιέζει το εργαζόμενο μέσο αυξάνοντας τη θερμοκρασία και την πίεσή του και το οδηγεί μέσα στον συμπυκνωτή (**κατάσταση 2**) για να συμπυκνωθεί. Κατά τη συμπύκνωση του μέσου σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία, απελευθερώνεται θερμότητα, την οποία αξιοποιούμε και είναι 2,5 με 3,5 φορές περίπου μεγαλύτερη από την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώθηκε κατά την συμπίεση του εργαζόμενου μέσου. Τέλος, το εργαζόμενο μέσο (**κατάσταση 3**) οδηγείται στη εκτονωτική βαλβίδα όπου μειώνεται η πίεση και η θερμοκρασία του και μετατρέπεται σε ένα μείγμα από

υγρό και ατμό (κατάσταση 4). Έτσι ολοκληρώνεται ο θερμοδυναμικός του κύκλος και στη συνέχεια μπορεί να ατμοποιηθεί ξανά μέσω του ατμοποιητή.

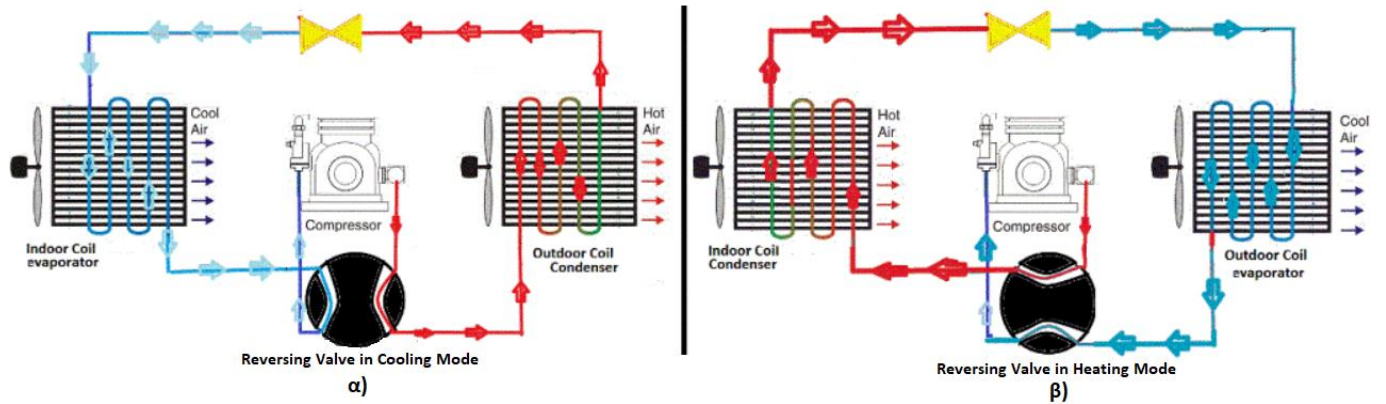


Εικόνα 2.3: Θερμοδυναμικός κύκλος αντλίας θερμότητας σε διάγραμμα P-h για θέρμανση

Με λίγα λόγια, δαπανάται ένα ποσό ηλεκτρικής ενέργειας έτσι ώστε ένα ποσό θερμότητας να αποκτήσει καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά, δηλαδή υψηλότερη θερμοκρασία και να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες για θέρμανση.

Ένα βασικό πλεονέκτημα της αντλίας θερμότητας είναι ότι μπορεί να παρέχει το χειμώνα θέρμανση και παράλληλα η ίδια μονάδα το καλοκαίρι μπορεί να αναστρέφει τη λειτουργία της και να παρέχει ψύξη.

Ανάλογα με την λειτουργία που θέλουμε να πετύχουμε (ψύξη ή θέρμανση) ο συμπυκνωτής μετατρέπεται σε ατμοποιητή και αντίστροφα. Επειδή όμως, στο συμπιεστή η αναρρόφηση και η κατάθλιψη είναι συγκεκριμένες και δηλαδή το ρευστό δεν μπορεί να περάσει ανάποδα από μέσα του η αναστροφή του κύκλου επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μιας ειδικής τετράοδης βαλβίδας που είναι ενσωματωμένη στην αντλία θερμότητας. Έτσι, κατά τη λειτουργία της ψύξης (π.χ. το καλοκαίρι), η θερμότητα αναρροφάται από τον χώρο που απαιτείται να κλιματιστεί και αποδίδεται σε μία εξωτερική πηγή θερμότητας (αέρας, νερό, γη), ενώ κατά τη λειτουργία της θέρμανσης (π.χ. το χειμώνα) έχουμε αναστροφή του ψυκτικού κύκλου και έτσι η θερμότητα αναρροφάται από μία εξωτερική πηγή θερμότητας (αέρας, νερό, γη) και αποδίδεται στον χώρο που απαιτείται να θερμανθεί.

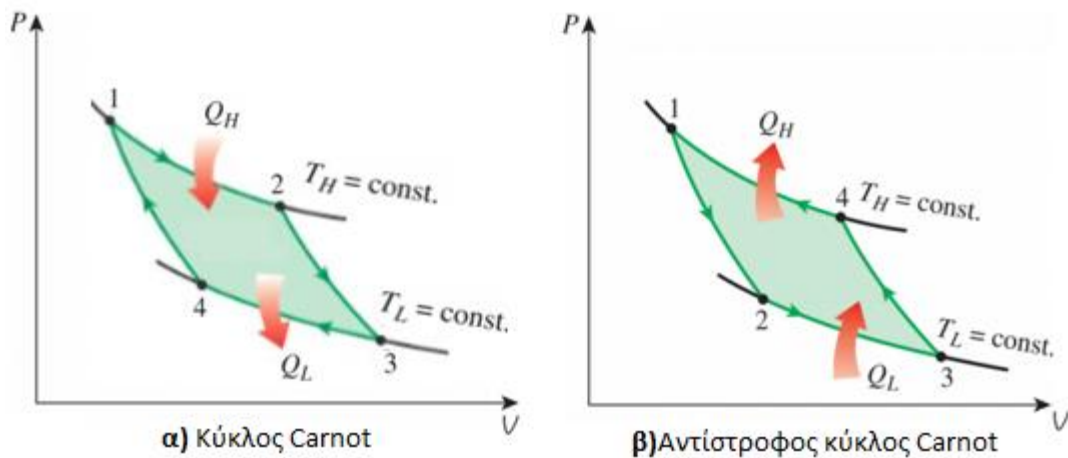


Εικόνα 2.4: α) Λειτουργία της μονάδας σε Ψύξη β) Λειτουργίας της μονάδας σε Θέρμανση [2.5]

2.3.3 Κύκλος Carnot και αντλία θερμότητας

Η αντλία θερμότητας είναι ουσιαστικά μια θερμική μηχανή που λειτουργεί όπως ο κύκλος Carnot αλλά με αντίθετη φορά.

Η λειτουργία του αντίστροφου κύκλου Carnot αποτελείται από τέσσερις μεταβολές όπως και ο κύκλος Carnot, δύο ισόθερμες και δύο αδιαβατικές (ισεντροπικές), που εκτελούνται μεταξύ μιας θερμής δεξαμενής με θερμοκρασία T_H και μιας ψυχρής δεξαμενής με θερμοκρασία T_C .



Εικόνα 2.5: Διάγραμμα P- V α) για κύκλο Carnot [2.6] β) για αντίστροφο κύκλο Carnot [2.7]

Στο αντίστροφο κύκλο Carnot (εικόνα 2.5β) έχουμε τις πιο κάτω μεταβολές:

Μεταβολή **1-2**: το εργαζόμενο μέσο υψηλής θερμοκρασίας T_H εκτονώνεται ισεντροπικά και οδηγείται σε χαμηλή θερμοκρασία T_L .

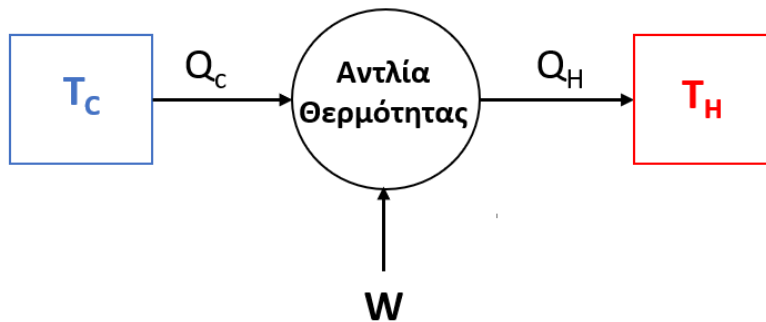
Μεταβολή **2-3**: Γίνεται ισοθερμικά πρόσδοση ποσού θερμότητας Q_L στο εργαζόμενο μέσο χαμηλής θερμοκρασίας, T_L .

Μεταβολή **3-4**: Το εργαζόμενο μέσο συμπιέζεται ισεντροπικά και οδηγείται σε υψηλή θερμοκρασία T_H .

Μεταβολή **4-1**: Το εργαζόμενο μέσο υψηλής θερμοκρασίας απορρίπτει ισοθερμικά ποσό θερμότητας Q_H . Κατά τη μεταβολή αυτή, το εργαζόμενο μέσο συμπυκνώνεται, δηλαδή από κορεσμένο ατμός γίνεται κορεσμένο υγρό.

Στις ιδανικές συνθήκες βαθμός απόδοσης του κύκλου Carnot δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \quad (2.7)$$



Εικόνα 2.6: Λειτουργία αντλίας θερμότητας

Εφαρμόζοντας το 1ο θερμοδυναμικό αξίωμα (αρχή διατήρησης της ενέργειας) γύρω από μία αντλία θερμότητας όπως φαίνεται στη εικόνα 2.6 έχουμε:

$$Q_C + W = Q_H \quad (2.8)$$

Έτσι ο αντίστοιχος θεωρητικός βαθμός απόδοσης της αντλίας θερμότητας ορίζεται ως ο συντελεστής συμπεριφοράς COP και δίνεται από τη σχέση:

$$\text{COP}_{\text{th}} = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (2.9)$$

Δηλαδή ο βαθμός απόδοσης είναι αυξάνεται, όσο μειώνεται είναι η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην πηγή και τον αποδέκτη θερμότητας.

Η πιο πάνω σχέση δίνει τη μέγιστη τιμή που μπορεί να έχει ο συντελεστής συμπεριφοράς σε μια αντλία θερμότητας.

Στη πραγματικότητα, ο συντελεστής συμπεριφοράς μιας αντλίας θερμότητας C.O.P (coefficient of performance) ορίζεται ως ο λόγος της θερμικής ισχύος (Q_H) που αποδίδει η αντλία θερμότητας προς την ηλεκτρική ισχύ (Q_{el}) που καταναλώνει:

$$COP = \frac{Q_H}{Q_{el}} \quad (2.10)$$

Από τα πιο πάνω γίνεται κατανοητό ότι όσο μεγαλύτερος ο συντελεστής C.O.P, τόσο πιο αποδοτική η αντλία θερμότητας. Οι τιμές του C.O.P κυμαίνονται μεταξύ 2.8 και 5.2 ανάλογα με το τύπο της αντλίας θερμότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τη λειτουργία της θέρμανσης, το C.O.P μειώνεται όταν όσο μειώνεται η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος

Τα αντίστοιχα ισχύουν για τη λειτουργία της ψύξης. Στη λειτουργία ψύξης, το αντίστοιχο του C.O.P είναι ο δείκτης ενεργειακής αποδοτικότητας E.E.R (Energy efficiency ratio), ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$E. E. R = \frac{Q_c}{Q_{el}} \quad (2.11)$$

όπου Q_c : η ψυκτική ισχύς της αντλίας θερμότητας [kW]

Επίσης, σε εγκαταστάσεις με ηλιακά ορίζεται ο ηλιακός συντελεστής συμπεριφοράς (Solar Coefficient of Performance) ως εξής:

$$SCOP = \frac{Q_H}{Q_{solar}} \quad (2.12)$$

2.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αντλίας θερμότητας

Η αντλία θερμότητας χαρακτηρίζεται από πολλά πλεονεκτήματα που είναι:

- Χαμηλό κόστος λειτουργίας

Όπως προαναφέρθηκε και πιο πάνω, μια απλή αντλία θερμότητας αέρα-αέρα χρησιμοποιεί το περιβάλλον για να θερμάνει ή να ψύξει έναν χώρο. Η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται μόνο στο στάδιο της άντλησης θερμότητας και ο χρήστης πληρώνει μόνο το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται κατά τη συμπίεση του ρευστού. Το ηλεκτρικό ρεύμα δηλαδή, δεν χρησιμοποιείται ως πηγή για τη δημιουργία θέρμανσης ή ψύξης και γι' αυτό η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος που απαιτείται για τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας είναι πολύ μικρή, σε σχέση με το αποτέλεσμα που παίρνουμε σε ψύξη ή θέρμανση. Για

παράδειγμα, αν αντλήσουμε 10kWh ενέργειας από το περιβάλλον συν 4kWh ηλεκτρικής ενέργειας που θα χρειαστούμε για τη μετατροπή θα έχουμε συνολικά 14kWh ωφέλιμης θερμικής ενέργειας. Έτσι η εξοικονόμηση στο κόστος λειτουργίας φτάνει στο 50-75% σε σχέση με άλλα συστήματα θέρμανσης (π.χ. λέβητες)

- Είναι καθαρή και φιλική στο περιβάλλον
Το περισσότερο ποσό ενέργειας που χρειάζονται το αντλούν από το περιβάλλον. Σε αντίθεση, με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης που καίνε ορυκτά καύσιμα, όπως πετρέλαιο ή φυσικό αέριο που επιβαρύνουν σημαντικά το περιβάλλον με ρύπους όπως το CO₂. Οι αντλίες θερμότητας με υψηλό ονομαστικό βαθμό απόδοσης (όπως και οι ηλιακά υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας) κατατάσσονται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- Εύκολη εγκατάσταση και μικρό μέγεθος
Όλες οι αντλίες θερμότητας (με εξαίρεση τη γεωθερμική) μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε μηχανοστάσιο και έχουν επιπλέον κέρδος χώρου εξαιτίας της έλλειψης δεξαμενής αποθήκευσης καυσίμου και καμινάδας απαγωγής καυσαερίων όπως στα συμβατικά συστήματα θέρμανσης
- Χαμηλό κόστος συντήρησης και υψηλή ασφάλεια λειτουργίας
Χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια και ενέργεια από το περιβάλλον χωρίς ορυκτά καύσιμα και καύσεις όπως σε άλλα συστήματα
- Θέρμανση και δροσισμός με μία μόνο μονάδα
Αντιστρέφοντας τον κύκλο λειτουργίας της αντλίας θερμότητας παράγεται θέρμανση ή δροσισμός αντίστοιχα.
- Μπορούν να συνδυαστούν αποδοτικά με τερματικές μονάδες χαμηλών θερμοκρασιών .
Για παράδειγμα, μπορούν να συνδυαστούν με Fan Coils, ενδοδαπέδιο σύστημα και με αλλά θερμαντικά σώματα). Επίσης, μπορεί να παράγει ζεστό νερό χρήσης για όλη τη διάρκεια του έτους.

Στα μειονεκτήματα της αντλίας θερμότητας είναι τα εξής:

- Έχουν υψηλό αρχικό κόστος, το οποίο όμως αποσβήνεται μετά από 2-3 χρόνια λειτουργίας
- Οι αντλίες που έχουν ως πηγή θερμότητας το αέρα του περιβάλλοντος, δεν μπορούν να δουλέψουν σε περιβάλλον με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από 5 °C)

2.3.5 Τύποι αντλίας θερμότητας

➤ Διάκριση αντλίας θερμότητας ανάλογα με το μέσο συναλλαγής τους

Οι αντλίες θερμότητας, ανάλογα με το μέσο που συναλλάσσεται εξωτερικά του χώρου (εξωτερικός εναλλακτήρας) και το μέσο που συναλλάσσεται εσωτερικά της χώρου (εσωτερικός εναλλακτήρας) κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα: Είναι ο πιο ευρέως διαδεδομένος τύπος αντλίας θερμότητας στη αγορά. Η εξωτερική μονάδα της αντλίας θερμότητας συναλλάσσεται με τον αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ η εσωτερική μονάδα της συναλλάσσεται με τον αέρα του εσωτερικού χώρου. Σε μερικές περιπτώσεις, αποτελούνται από δύο ή περισσότερες εσωτερικές μονάδες οι οποίες τοποθετούνται ξεχωριστά σε πολλούς κλιματιζόμενους χώρους του κτηρίου.
- Αντλίες θερμότητας αέρα-νερού: Το εξωτερικό στοιχείο της αντλίας θερμότητας συναλλάσσεται με τον αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ το εσωτερικό στοιχείο της συναλλάσσεται με νερό που αξιοποιείται στο κτήριο. Συνήθως, αυτό το νερό κυκλοφορεί στο υδραυλικό δίκτυο του κτηρίου και τελικά καταλήγει στις τερματικές μονάδες όπως Fan Coils, ενδοδαπέδια θέρμανση ή δροσισμό. Χρησιμοποιούνται περισσότερο σε μεγάλες εγκαταστάσεις κεντρικού κλιματισμού.
- Αντλίες θερμότητας νερού - αέρα: Το εξωτερικό στοιχείο της αντλίας θερμότητας αντλεί θερμότητα από το νερό ενώ η μεταφορά θερμότητας από και προς τον κλιματιζόμενο χώρο γίνεται μέσω του αέρα. Για παράδειγμα, η αντλία θερμότητας μπορεί να συναλλάσσει θερμότητα εξωτερικά με νερό το οποίο ζεσταίνεται μέσω της ηλιακής ενέργειας.
- Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (Αντλίες Θερμότητας νερού - νερού)
Οι αντλίες αυτές συναλλάσσουν θερμότητα εξωτερικά με το έδαφος (είτε μέσω γεώτρησης, είτε από την θάλασσα, λίμνη) το οποίο έχει σχεδόν σταθερή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του χρόνου. Έτσι το καλοκαίρι απάγουν τη θερμότητα από το κτήριο και την αποδίδουν στο έδαφος, ενώ το χειμώνα απορροφούν τη θερμότητα από το έδαφος και την αποδίδουν στο κτήριο. Επειδή η θερμοκρασία του εδάφους είναι σταθερή, σε αντίθεση με τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα που έχει τις μεγάλες διακυμάνσεις, η γεωθερμική αντλία θερμότητας έχει πολύ καλύτερη απόδοση από τις άλλες αντλίες θερμότητας. Το μειονέκτημα της, είναι το μεγάλο αρχικό κόστος για τη κατασκευή όλης της εγκατάστασης

➤ Τύποι αντλιών θερμότητας ανάλογα με τη θέση των μηχανισμών της

- Ενιαίες αντλίες θερμότητας (τύπου MonoBlock ή compact)
Όλα τα μέρη της συσκευής βρίσκονται εγκατεστημένα σε ένα ενιαίο κέλυφος. Είναι κατασκευασμένες για εγκατάσταση σε εξωτερικό χώρο ώστε να αντλούν άμεσα ενέργεια από τον περιβάλλον ατμοσφαιρικό αέρα και βρίσκονται κοντά στο σημείο όπου καταλήγουν οι κεντρικές σωληνώσεις του σπιτιού, οι οποίες κυκλοφορούν το νερό στα θερμομαντικά σώματα.
- Διαιρούμενες αντλίες θερμότητας (τύπου Split)
Τα μέρη της συσκευής είναι διαχωρισμένα. Το ψυκτικό συγκρότημα το οποίο αντλεί ενέργεια από τον περιβάλλον ατμοσφαιρικό αέρα βρίσκεται στη εξωτερική μονάδα ενώ στη εσωτερική μονάδα βρίσκεται το υδραυλικό συγκρότημα όπου είναι και το κομμάτι που συνδέονται οι σωλήνες σύνδεσης με τα θερμομαντικά σώματα

➤ Τύποι αντλιών θερμότητας ανάλογα με τον τρόπο που λειτουργούν:

- Τύπου inverter. Διαθέτουν έναν μηχανισμό που τους επιτρέπει να αυξομειώνουν τις στροφές του συμπιεστή τους και άρα κάθε στιγμή προσαρμόζουν την ισχύ τους ανάλογα με τις ανάγκες θέρμανσης ή ψύξης του χώρου με αποτέλεσμα την ιδιαίτερα χαμηλή κατανάλωση κατά τη λειτουργία τους.
- Τύπου on/off . Σε αντίθεση με τις πιο πάνω, λειτουργούν σε πλήρη ισχύ μέχρι να επιτευχθεί ο στόχος (θέρμανση ή ψύξη του χώρου μας) και μετά σταματούν (off) . Επανεκκινούν (on) όταν η θερμοκρασία του χώρου αποκλίνει και πάλι από την επιθυμητή.

Η ορθή επιλογή του κατάλληλου τύπου της αντλίας γίνεται με βάση τις ανάγκες και τις απαιτήσεις του επενδυτή, με στόχο να έχει τη καλύτερη ενεργειακή απόδοση του συστήματος και με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

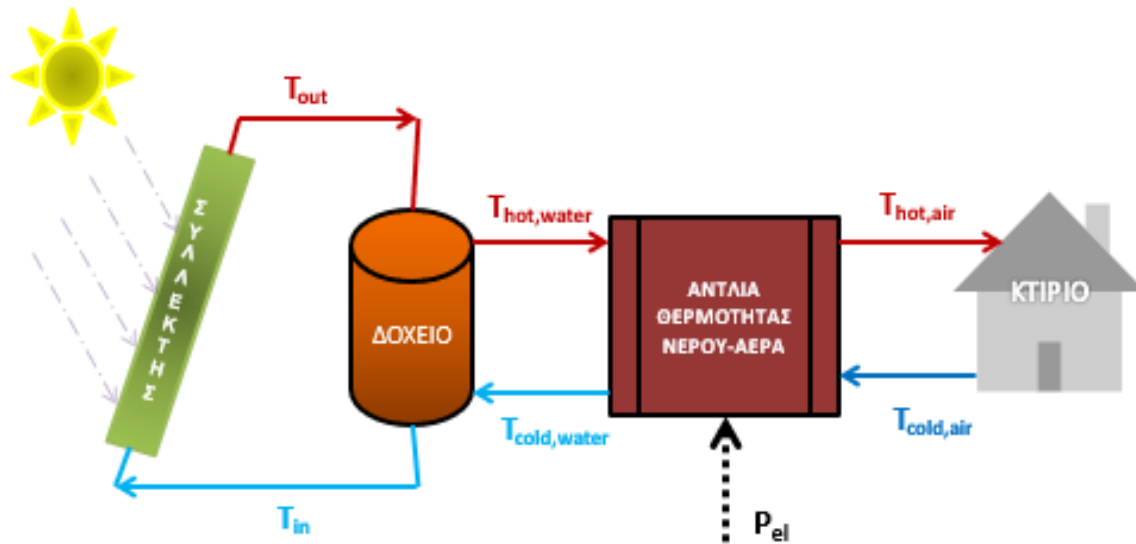
2.3.6 Ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας

Είναι μια αντλία νερού-αέρα ή νερού-νερού που συνδέεται με ένα σύστημα ηλιακών συλλεκτών και μπορεί να λειτουργήσει στη περίπτωση της θέρμανσης. Σε αντίθεση με τις αντλίες θερμότητας που αντλούν ενέργεια από το περιβάλλον, η Η.Υ.Α.Θ. αντλεί ενέργεια από το νερό το οποίο ζεσταίνεται μέσω ηλιακής ενέργειας. Συγκεκριμένα, το νερό θερμαίνεται από τους ηλιακούς συλλέκτες και οδηγείται σε ένα δοχείο αδρανείας. Μέσω αυτού του δοχείου, γίνεται παροχή ζεστού νερού στο ατμοποιητή της αντλίας θερμότητας και έτσι αυτή παρέχει θέρμανση στον χώρο (μέσω αέρα) ή παρέχει ζεστό νερό σε τερματικά σώματα π.χ. fan coils.

Τα πλεονέκτημα της ηλιακά υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας είναι ότι έχει υψηλές τιμές συντελεστή συμπεριφοράς COP (κοντά στο 5) σε σχέση με άλλες αντλίες θερμότητας που έχουν συντελεστή COP ίσο με 3. Αυτό συμβαίνει, διότι η χρήση του ζεστού νερού σε σχέση με το αέρα του περιβάλλοντος αυξάνει τη μέση θερμοκρασία στη οποία γίνεται η πρόσδοση θερμότητας στη Η.Υ.Α.Θ. Έτσι, στη Η.Υ.Α.Θ. , αφού έχουμε υψηλότερη θερμοκρασία πηγής θερμότητας δαπανάται μικρότερο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας στο συμπιεστή αφού το εργαζόμενο μέσο έχει ήδη υψηλή θερμοκρασία. Επομένως, η εγκατάσταση βελτιώνεται πολύ ενεργειακά.

Επίσης, το νερό που τροφοδοτεί την Η.Υ.Α.Θ. συνήθως δεν φτάνει σε χαμηλές θερμοκρασίες λόγω της θέρμανσης του από τους ηλιακούς συλλέκτες και δηλαδή η Η.Υ.Α.Θ. μπορεί να λειτουργεί καθόλη τη διάρκεια του χειμώνα. Σε αντίθεση με τις συνηθισμένες αντλίες θερμότητας που δυσκολεύονται να λειτουργήσουν για τις μέρες του χειμώνα που οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι χαμηλές και συνήθως μικρότερες από 5°C.

Ωστόσο, το συνολικό κόστος της εγκατάστασης αυξάνεται σε σχέση με πριν, λόγω του κόστους των ηλιακών συλλεκτών. Η απόσβεση αυτού του κόστους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως τον κλίμα της περιοχής (αριθμός μερών ηλιοφάνειας), τις θερμικές ανάγκες του κτιρίου κ.α. Για αυτό, στη συνέχεια γίνεται μια οικονομοτεχνική ανάλυση με στόχο να εξαχθούν περαιτέρω συμπεράσματα.



Εικόνα 2.7: Σύστημα ηλιακά υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητα νερού-αέρα [2.8]

Βιβλιογραφία 2^{ου} κεφαλαίου

[2.1] Ζ. Σαγιά, Μετάδοση θερμότητας, Αθήνα 2016

[2.2] Κ. Α. Antonopoulos, Κλιματισμός, Αθήνα 2015

[2.3] <http://nesa1.uni-siegen.de/wwwextern/idea/keytopic/3.htm>

[2.4] Christopher P. Crall, Understanding Thermal System, 2015

[2.5] <http://www.elephantearshvac.com/?p=288>

[2.6] <https://sites.google.com/a/sheffield.ac.uk/all-about-thermofluids/group-3/carnot-cycle>

[2.7] www.chegg.com

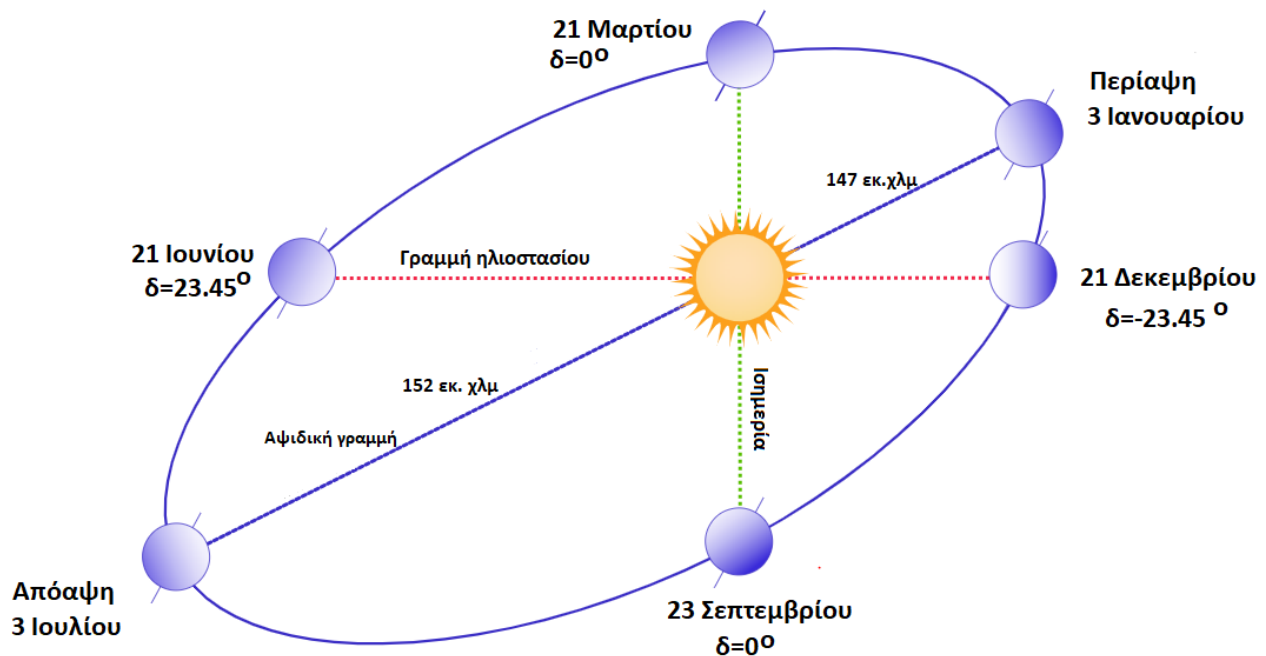
[2.8] Μπέλλος Ε. Αξιοποίηση και βελτιστοποίηση της χρήσης ηλιακών συστημάτων στα κτίρια, Διδακτωρική διατριβή, Αθήνα 2016

3. Ηλιακή ενέργεια

3.1 Εισαγωγή

Η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο άφθονη μόνιμη ενεργειακή πηγή στη γη. Η ύπαρξη του ήλιου είναι καθοριστική για τη εξέλιξη και την διατήρηση της ζωής στη Γη καθώς προσφέρει την απαραίτητη ενέργεια για την ανάπτυξη των ζωντανών οργανισμών και διατηρεί σε ανεκτά επίπεδα τις θερμοκρασίες για τη διαβίωση στη Γη. Οι περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προέρχονται άμεσα ή έμμεσα από τον ήλιο. Για παράδειγμα, η ενέργεια που είναι δεσμευμένη στις φυτικές ουσίες των φυτών προέρχεται από τον ήλιο. Με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, τα φυτά μετασχηματίζουν την ηλιακή ενέργεια σε βιομάζα την οποία χρησιμοποιούμε. Ακόμη, η αιολική ενέργεια προέρχεται από τους ανέμους οι οποίοι δημιουργούνται από τη θέρμανση του αέρα από τον ήλιο.

Η ενέργεια που εκπέμπεται από τον Ήλιο ακτινοβολείται στο διάστημα και ένα ποσό της ενέργειας αυτής της φθάνει στη Γη. Ένα μέρος του ποσού προσπίπτει στη Γη και ανακλάται πίσω στο διάστημα και το υπόλοιπο μέρος της απορροφάται από τη Γη και εκπέμπεται στο διάστημα ως ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Συγκεκριμένα, ο ήλιος εκπέμπει ισχύ της τάξης 10^{23} kW. Από αυτό το σύνολο, περίπου τα $1,8 \times 10^{14}$ kW φτάνουν στη γη και περίπου το 60% αυτής της ποσότητας ($\approx 1,08 \times 10^{14}$ kW) φτάνει στην επιφάνεια της γης. Η ποσότητα αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συνολική κατανάλωση ενέργειας του κόσμου. [3.1]



Εικόνα 3.1: Ετήσια περιφορά της γης γύρω από το ήλιο[3.2]

Η κίνηση της γης περί τον ήλιο αναλύεται σε 2 συνιστώσες. Η μια κίνηση της είναι η περιστροφή της γύρω από τον ίδιο της το άξονα και η δεύτερη κίνηση της είναι η περιφορά γύρω από τον ήλιο με ελλειπτική τροχιά. Η τροχιά της γης περί τον ήλιο είναι τέτοια ώστε η απόσταση τους να μεταβάλλεται κατά 1.7% σε σχέση με την μέση απόσταση τους η οποία είναι 149.504.312 km [3.3].

3.2 Χρήση της ηλιακής ενέργειας

Σε αυτή τη ενότητα παρουσιάζονται τα θετικά και τα αρνητικά της χρήση ηλιακής ενέργειας και αναφέρονται και οι διάφορες εφαρμογές της.

3.2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλιακής ενέργειας

Τα πλεονεκτήματα στη χρήση της ηλιακής ενέργειας είναι:

- Είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και έχει όλα τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ που αναφέρονται στο κεφάλαιο 1
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει ηλεκτρισμό (φωτοβολταϊκά). Τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια μπορεί να ανατροφοδοτήσει το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας
- Μπορεί να λειτουργήσει και ως πηγή θερμότητας. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πάρα πολλές εφαρμογές
- Η θερμότητα από τη ηλιακή ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και να αξιοποιηθεί κατάλληλα.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μικρής και σε μεγάλης κλίμακας συστήματα
- Τα συστήματα ηλιακής ενέργειας έχουν συνήθως γρήγορη απόσβεση του αρχικού κόστους και χαμηλό κόστος λειτουργίας. Επίσης, έχουν εύκολη συντήρηση, είναι αθόρυβα και έχουν διάρκεια ζωής πάνω από 25 χρόνια [3.4]
- Επειδή είναι ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, το κόστος δεν μεταβάλλεται με τις διακυμάνσεις της οικονομίας (σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα)
- Η χρήση της είναι ιδανική για απομονωμένα μέρη που αντιμετωπίζουν συχνά προβλήματα με το δίκτυο ηλεκτρισμού [3.5]
- Είναι μια τεχνολογία που εξελίσσεται και γίνονται έρευνες με στόχο η αποδοτικότητα των ηλιακών συστημάτων να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο [3.5]

Ωστόσο, υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα της χρήσης ηλιακής ενέργειας, τα οποία είναι:

- Μεγάλο αρχικό κόστος σε σχέση με άλλα συστήματα
- Μεγάλο κόστος για τη αποθήκευση της ενέργειας
- Τα ηλιακά συστήματα εξαρτώνται από τις κλιματικές συνθήκες και τοποθετούνται σε περιοχές με μεγάλο ηλιακό δυναμικό. Αν και η ηλιακή ενέργεια μπορεί ακόμα να συλλεχθεί

κατά τη διάρκεια συννεφιασμένων και βροχερών ημερών, η αποδοτικότητα των ηλιακών συστημάτων σε τέτοιες περιπτώσεις μειώνεται [3.5].

- Οι ηλιακοί συλλέκτες και τα φωτοβολταϊκά έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και συνεπώς για μεγάλη παραγωγή ισχύος απαιτούνται συχνά μεγάλες εγκαταστάσεις

3.2.2 Τρόποι εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί με τους παρακάτω τρόπους:

1) Για τη παροχή θερμότητας

- για τη παροχή ζεστού νερού χρήσης
- για τη αποθήκευση υπό μορφή θερμότητας σε κάποιο ρευστό
- για συστήματα θέρμανσης χώρων
- για συστήματα ψύξης με απορρόφηση/προσρόφηση
- για ξήρανση προϊόντων, διαδικασίες απόσταξης, συστήματα αφαλάτωσης
- για τη παραγωγή ατμού για τη κίνηση τουρμπινών με σκοπό τη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (έμμεση μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια)

2) Για τη άμεση παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος

Αυτό γίνεται με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων τα οποία μετατρέπουν το φως του ήλιου σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών [3.6]

3.3 Ηλιακή ακτινοβολία

Σε αυτή τη παράγραφο αναφέρονται βασικές έννοιες της ηλιακής ακτινοβολίας, εξηγούνται χρήσιμα μεγέθη και σχέσεις σχετικά με την ηλιακή γεωμετρία και παρουσιάζονται τρόποι υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας.

3.3.1 Ηλιακή ακτινοβολία εντός και εκτός ατμόσφαιρας

Η ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που δέχεται η μονάδα της επιφάνειας κάθετης στις ηλιακές ακτίνες στο όριο της ατμόσφαιρας ανά μονάδα χρόνου όταν η απόσταση γης-ηλίου λαμβάνει τη μέση τιμή της ονομάζεται ηλιακή σταθερά. Η τιμή της ηλιακής σταθεράς είναι $G_{sc}=1353 \text{ W/m}^2$.

Η μεταβολή της απόστασης της γης-ήλιου προκαλεί μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας κατά περίπου $\pm 3\%$ [3.3]. Έτσι, η ακτινοβολία G_{on} που δέχεται επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας κάθετο στις ακτίνες, την ημέρα n του έτους ($n=1\div 365$) δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$G_{on} = G_{sc} (1 + 0.033 \cos(\frac{360 n}{365})) \quad (3.1)$$

Στις 3 Ιανουαρίου που η Γη βρίσκεται στη μικρότερη απόσταση της από τον ήλιο η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας φθάνει σχεδόν τα 1400 W/m², ενώ στις 3 Ιουλίου όπου η απόσταση αυτή γίνεται μέγιστη η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται περίπου στα 1315 W/m² [3.3]

Μια επιφάνεια που βρίσκεται εντός ατμόσφαιρας δέχεται μικρότερη ηλιακή ακτινοβολία από ότι εάν βρισκόταν εκτός ατμόσφαιρας. Αυτό συμβαίνει διότι η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διέλευση της στη ατμόσφαιρα υπόκειται σε εξασθένηση λόγω του διασκορπισμού υπό τα μόρια του αέρα και της σκόνης και λόγω της απορρόφησης από τα O₃, H₂O και CO₂. Λόγω του διασκορπισμού προκύπτει η διάχυτος ακτινοβολία. Για αυτό, και η ηλιακή ακτινοβολία εξασθενεί σημαντικά όσο αυξάνεται η διαδρομή της μέσα στη ατμόσφαιρα.

Επομένως, η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη αποτελείται από 2 συνιστώσες: τη άμεσο ακτινοβολία και τη διάχυτο ακτινοβολία (εικόνα 3.2).

Άμεσος ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει κατευθείαν από τον ήλιο στη γη χωρίς να υπάρξει διασκορπισμός της μέσα στην ατμόσφαιρα. Η τιμή της αμέσου ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται με G_b

Διάχυτος ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη ύστερα από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά τη διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα και συμβολίζεται με G_d.

Ολική ακτινοβολία είναι το άθροισμα της αμέσου και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας από παρακείμενες επιφάνειες. Η τιμή της ολικής ακτινοβολίας του οριζοντίου επιπέδου συμβολίζεται με G και δίνεται από τη σχέση:

$$G = G_d + G_b \quad (3.2)$$

Η άμεσος και ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου συμβολίζονται G_{bT} και G_T με αντίστοιχα.

Η ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας G_o συνδέεται με τη κάθετο ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας G_{on}, μέσω της σχέσης:

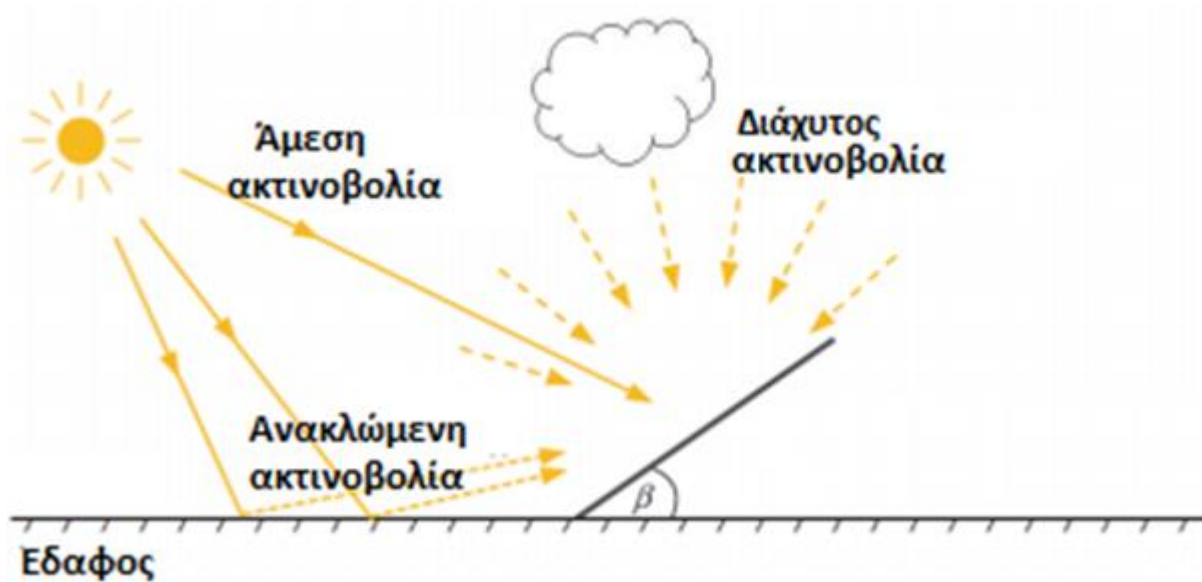
$$G_o = G_{on} \cos \theta_z \quad (3.3)$$

Με ολοκλήρωση της πιο πάνω εξίσωσης για χρονική περίοδο μιας ώρας, μπορεί να υπολογιστεί ο ωριαία ακτινοβολία I_o και στη συνέχεια μέσω αυτής μπορεί να υπολογιστεί και η ημερήσια ακτινοβολία H_o.

Μέσω του συντελεστή αιθριότητας, μπορεί να υπολογιστεί η ακτινοβολία εντός της ατμόσφαιρας G εφόσον είναι γνωστή η ακτινοβολία εκτός ατμοσφαίρας:

$$K_T = \frac{G}{G_o} \quad (3.4)$$

Ο συντελεστής αιθριότητας χαρακτηρίζει τη διαύγεια της ατμόσφαιρας (εάν υπάρχει νέφωση ή όχι) και για αυτό η τιμή του διαφέρει από περιοχή σε περιοχή [3.3]



Εικόνα 3.2: Ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας[3.7]

3.3.2 Ηλιακή Γεωμετρία- Χρήσιμες σχέσεις

Γεωγραφικό Πλάτος ϕ : Είναι η γωνιακή απόσταση του τόπου από τον Ισημερινό, $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$

Ηλιακή απόκλιση δ : είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Ισχύει ότι $-23,45 < \delta < 23,45$. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές της ηλιακής απόκλισης φαίνονται στη εικόνα 3.1.

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{360(284+n)}{365} \right) \quad (3.5)$$

Ωριαία γωνία ω : είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονά της με ρυθμό $0,25^\circ / \text{min}$.

$$\omega = \pm 0.25 \cdot (\text{αριθμός λεπτών από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (3.6)$$

$\omega > 0$ για μετά μεσημβρία, $\omega < 0$ για προ μεσημβρίας

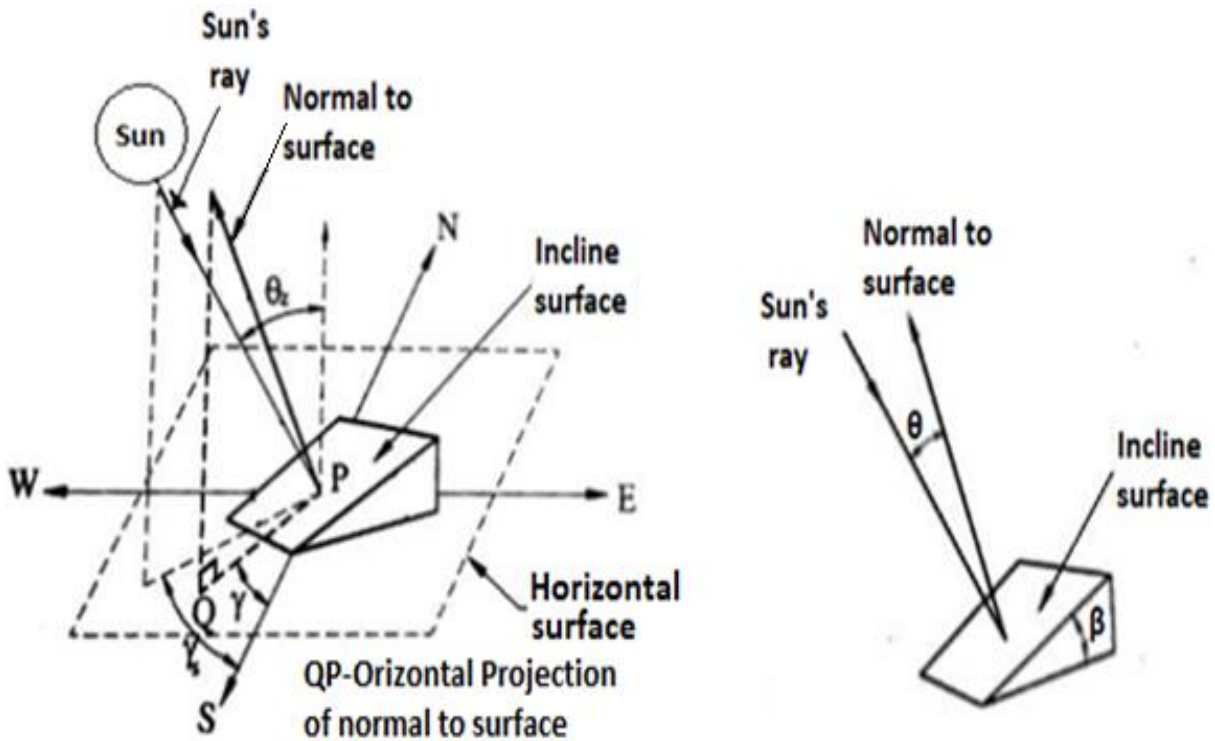
Αζιμούθιο επιφάνειας, γ : είναι η γωνία που σχηματίζει η προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο με τη κατεύθυνση του νότου.

Ο βέλτιστος προσανατολισμός συλλέκτη είναι ο νότιος για το βόρειο ημισφαίριο $\gamma = 0^\circ$ και ο

βόρειος για το νότιο ημισφαίριο $\gamma=180^\circ$, δηλαδή ο συλλέκτης πρέπει να είναι στραμμένος προς τον ισημερινό.

Αζιμούθιο ήλιου, γ_s : είναι η γωνία που σχηματίζει η προβολή της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο με τη κατεύθυνση του νότου.

Ηλιακό ύψος α : η γωνιά που σχηματίζουν οι ηλιακές ακτίνες με τη οριζόντιο επιφάνεια



Εικόνα 3.3: α) Ηλιακή γεωμετρία-Προσδιορισμός γωνιών ήλιου και κεκλιμένου επιπέδου[3.8] β) γωνιά πρόσπτωσης και κλίση β επιπέδου[3.8]

Κλίση επιπέδου β : είναι η γωνία που σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο $0^\circ < \beta < 180^\circ$.

Στη πραγματικότητα, σε ένα συλλέκτη, η επιφάνεια συλλογής δεν είναι οριζόντια αλλά έχει πάντα μια κλίση ώστε η ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει όσο το δυνατό πιο κάθετα σε αυτή. Όσο πιο κάθετα προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία στη επιφάνεια (συλλέκτη), τόσο μεγαλύτερη ισχύς προσπίπτει πάνω της. Έτσι δίνοντας τη κατάλληλη κλίση, έχουμε μέγιστη συλλογή ακτινοβολίας.

Η κλίση της επιφάνειας εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής και την εποχή του χρόνου που απαιτείται η περισσότερη ενέργεια. Προσεγγιστικά, ένας πρακτικός κανόνας για να έχουμε μέγιστη συλλογή ηλιακής ενέργειας:

- ετήσια, απαιτείται κλίση συλλέκτη $\beta = \text{γεωγραφικό πλάτος} \pm 5^\circ$
- το καλοκαίρι, απαιτείται κλίση συλλέκτη $\beta = \text{γεωγραφικό πλάτος} - 15^\circ$, δηλαδή ο συλλέκτης έχει μικρή κλίση σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο
- το χειμώνα, απαιτείται κλίση συλλέκτη $\beta = \text{γεωγραφικό πλάτος} + 15^\circ$, δηλαδή ο συλλέκτης έχει μεγάλη κλίση σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο (μεγαλύτερη κλίση από ότι το καλοκαίρι)

Αποκλίσεις της κλίσης συλλέκτη κατά $\pm 15^\circ$ προκαλούν μειώσεις της ενέργειας μόνο κατά 5% [3.3].

Γωνιά πρόσπτωσης θ της αμέσου ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια είναι η γωνία μεταξύ της καθέτου στην επιφάνεια και των προσπίπτουσών ηλιακών ακτίνων. Αυτή η γωνιά είναι καθοριστική για το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που συλλέγεται στη επιφάνεια.

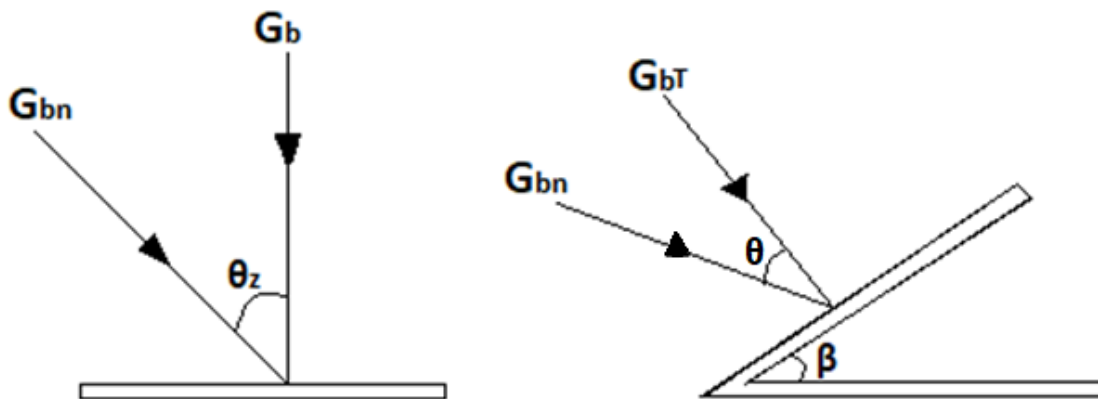
$$\cos\theta = \sin\varphi \sin\delta \cos\beta - \sin\delta \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \quad (3.7)$$

Γωνιά ζενίθ, θ_z : είναι η γωνία που σχηματίζεται από τις ηλιακές ακτίνες και την κατακόρυφο. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos\theta_z = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \quad (3.8)$$

$$\theta_z + \alpha = 90^\circ \quad (3.9)$$

3.3.3 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο



Εικόνα 3.4: α) Άμεσος ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας [3.3]

β) Άμεσος ακτινοβολία κεκλιμένης επιφάνειας [3.3]

Σύμφωνα με το εικόνα 3.4 , ισχύουν οι σχέσεις:

$$G_b = G_{bn} \cos\theta_z \quad (3.10)$$

$$G_{bT} = G_{bn} \cos\theta \quad (3.11)$$

Έτσι προκύπτει ο λόγος της άμεσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς τη άμεσο οριζόντιου επιπέδου:

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (3.12)$$

Ο λόγος διάχυτης ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς τη άμεσο οριζόντιου επιπέδου δίνεται από τη σχέση:

$$R_d = \frac{G_{dT}}{G_d} \quad (3.13)$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις, μπορεί να υπολογιστεί η ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου από τη σχέση:

$$G_T = G_{bT} + G_{dT} = R_b G_b + R_d G_d \quad (3.14)$$

Η εκτίμηση στο υπολογισμό της G_T μέσω της σχέσης (3.14) μπορεί να γίνει μέσω διάφορων μοντέλων που αναπτύχθηκαν.

3.4 Τύποι ηλιακών συλλεκτών

Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι τα πιο διαδεδομένα συστήματα των Α.Π.Ε. στις κατοικίες και ο αριθμός τους συνεχώς αυξάνεται. Ιδιαίτερα οι νέες κατοικίες διαθέτουν όλες τις απαραίτητες υποδομές για τη εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών. Συνήθως χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση του νερού και για τον κλιματισμό χώρων.

Οι ηλιακός συλλέκτης είναι ένας ειδικής μορφής εναλλάκτης θερμότητας που συλλέγει ή συγκεντρώνει τη ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπει σε θερμότητα. Δηλαδή μεταφέρει ενέργεια υπό μορφή ακτινοβολίας από μια πολύ μακρινή πηγή (ήλιος) σε ένα ρευστό.

Υπάρχουν 3 βασικοί τύποι ηλιακών συλλεκτών:

- Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης
- Συγκεντρωτικός ηλιακός συλλέκτης
- Ηλιακός συλλέκτης Κενού

Η επιλογή ενός συγκεκριμένου τύπου συλλέκτη εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής και από το φορτίο, δηλαδή από της επιθυμητές θερμοκρασίες.

3.4.1 Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης

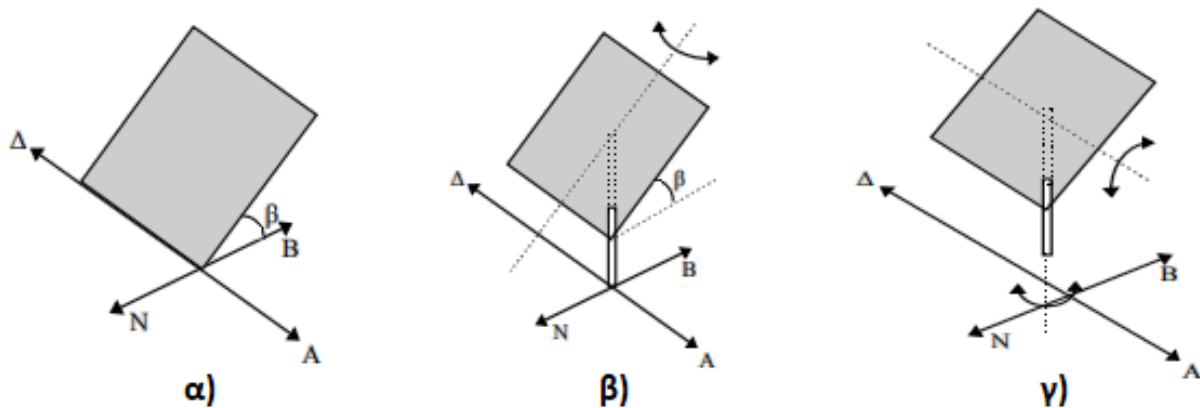
Ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος συλλέκτης που χρησιμοποιείται σε οικιακές χρήσεις κυρίως για τη παροχή ζεστού νερού χρήσης στα σπίτια και για θέρμανση κτιρίων. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές κλιματισμού και παραγωγή θερμότητας για βιομηχανική χρήση.

Χρησιμοποιείται κυρίως για μικρές και μέσες θερμοκρασίες, μέχρι 100 °C πάνω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος [3.3]. Σε αυτό το είδος συλλέκτη γίνεται εκμετάλλευση και της αμέσου και της διάχυτου ακτινοβολίας.

Επειδή, συνήθως οι συλλέκτες αυτοί είναι σταθεροί και δεν απαιτούν μηχανισμό κίνησης για τη παρακολούθηση του ήλιου είναι μηχανικά απλοί και δεν χρειάζονται μεγάλη συντήρηση.

Όταν είναι σταθεροί, τότε τοποθετούνται εστραμμένοι προς το ισημερινό ($\gamma = 0^\circ$) και με κλίση ως προς τη οριζόντια επιφάνεια, τέτοια ώστε να μεγιστοποιείται η συλλογή της ηλιακής ενέργειας ανάλογα με τη εποχή που θέλουμε.

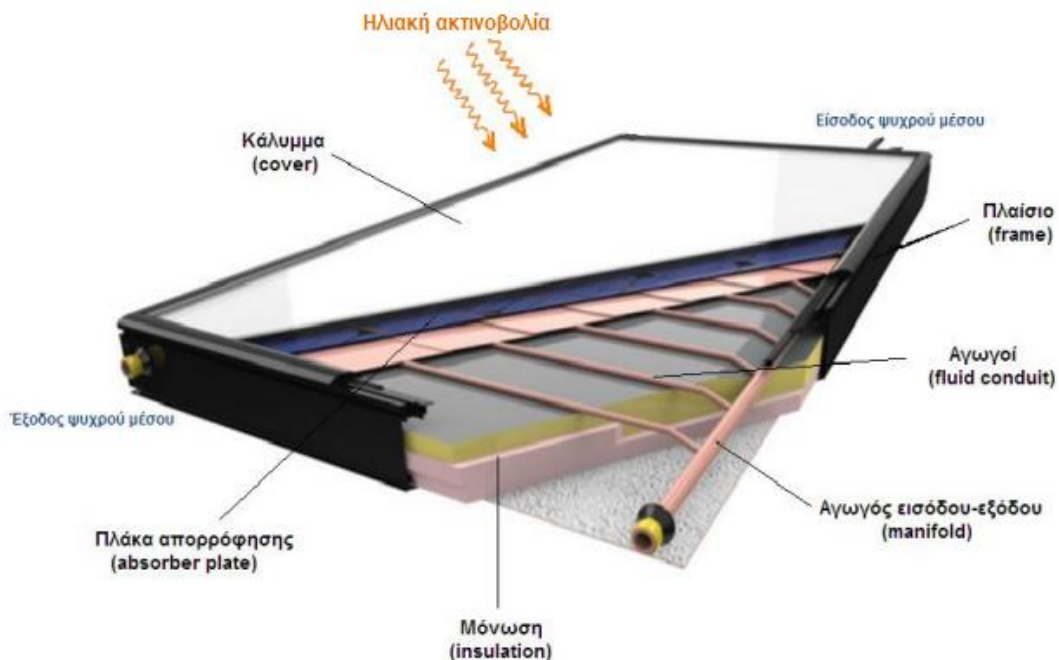
Σε μερικές περιπτώσεις, οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες έχουν μηχανισμό κίνησης για να κινούνται προς μια ή δυο κατευθύνσεις. Όταν ο συλλέκτης κινείται προς μια κατεύθυνση τότε ακολουθεί τη πορεία του ήλιου (αζιμούθιο) χωρίς να μεταβάλλει τη κλίση του. Εάν κινείται προς δυο κατευθύνσεις, τότε ο συλλέκτης κάνει και τη προηγούμενη κίνηση αλλά ταυτόχρονα αλλάζει και τη κλίση του (γωνιά β) ώστε να μεγιστοποιεί τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας κάθε χρονική περίοδο (εικόνα 3.5)



Εικόνα 3.5 : Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης **α)** με σταθερή κλίση **β)** με ένα άξονα ελευθερίας (αζιμούθιο) και σταθερή κλίση **γ)** δύο άξονες ελευθερίας (αζιμούθιο και ηλιακό ύψος)[3.9]

Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης είναι:

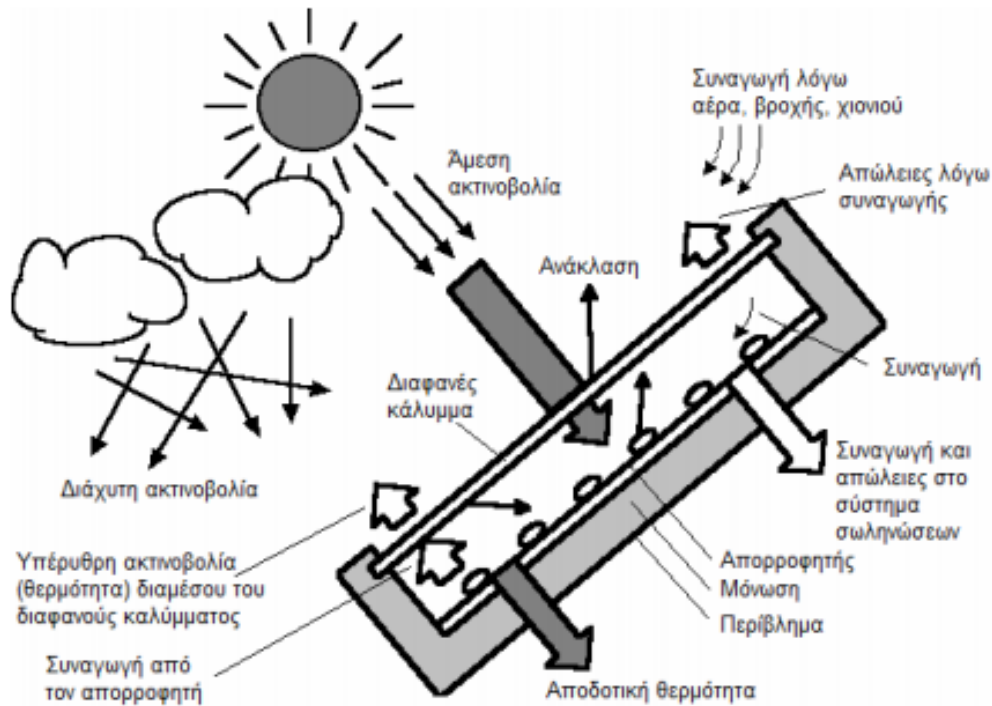
- Απορροφητήρας ή πλάκα απορρόφησης: Ο απορροφητήρας πρέπει να έχει υψηλή απορροφητικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας ώστε να συγκρατεί σχεδόν όλη την ακτινοβολία που δέχεται και να δίνει όσο το δυνατό περισσότερη θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι επικαλυμμένος με στρώμα μαύρου χρώματος ή με στρώμα επιλεκτικής βαφής με σκοπό να μειώνονται οι ανακλάσεις στη επιφάνεια του. Αυτοί που έχουν επιλεκτική βαφή, μπορεί να έχουν μέχρι και 30% μεγαλύτερη απόδοση, σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες με απλή μαύρη βαφή εξαιτίας της μείωσης των απωλειών λόγω ανάκλασης. Η πλάκα συνήθως είναι κατασκευασμένη από μεταλλικά υλικά όπως αλουμίνιο, χαλκό ή χάλυβα.
- Διαφανή κάλυμμα: Μπορεί να είναι ένα ή και περισσότερα. Τοποθετείται πάνω από τον απορροφητήρα, ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες δια συναγωγής και ακτινοβολίας από τη κύρια πλευρά του συλλέκτη προς το περιβάλλον. Συνηθίζεται να χρησιμοποιείται το απλό τζάμι ενώ σε περιοχές με δυσμενή συνθήκες μπορεί να τοποθετηθεί και διπλό τζάμι.
- Μόνωση: Είναι απαραίτητη, ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες στη πίσω και στις παράπλευρες επιφάνειες του συλλέκτη. Το σύνηθες υλικό που χρησιμοποιείται στη μόνωση είναι υαλοβάμβακας.
- Πλαίσιο που περιβάλλει συλλέκτη. Το πλαίσιο αυτό πρέπει να είναι ανθεκτικό και να προστατεύει το συλλέκτη από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως την σκόνη και την υγρασία. Συνήθως, είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο.



Εικόνα 3.6: Μέρη επίπεδου ηλιακού συλλέκτη[3.10]

➤ Αρχή λειτουργίας του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη

Η λειτουργία του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη στηρίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ένα μεγάλο μέρος της ηλιακή ακτινοβολίας που προσπίπτει στο διαφανές κάλυμμα, το διαπερνά και προσκρούει στην πλάκα απορρόφησης. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής της ακτινοβολίας συλλέγεται από τον απορροφητήρα και τις σωληνώσεις, ενώ το υπόλοιπο ανακλάται προς τυχαίες κατευθύνσεις και προσκρούει με τη σειρά του στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος (εικόνα 3.7). Το μεγαλύτερο μέρος της ανακλώμενης ακτινοβολίας, ανακλάται πάλι πίσω από την εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος προς την πλάκα, έτσι εγκλωβίζεται εντός του διακένου (φαινόμενο θερμοκηπίου) και τελικά απορροφάται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από τον απορροφητήρα. Ο απορροφητήρας μετατρέπει αυτή τη ηλιακή ενέργεια σε θερμική. Έτσι, η θερμότητα που δεσμεύεται από τον απορροφητήρα μεταφέρεται δια αγωγής στα τοιχώματα των αγωγών και στη συνέχεια δια συναγωγής στο εργαζόμενο μέσο.



Εικόνα 3.7: Λειτουργία επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [3.11]

Όπως προαναφέρθηκε, η επιφάνεια απορρόφησης μπορεί να είναι επιλεκτική ή μη επιλεκτική. Μια επιλεκτική επιφάνεια έχει υψηλή απορροφητικότητα στη ηλιακή ακτινοβολία και μικρό συντελεστή εκπομπής ϵ_p στη μεγάλη κύματος ακτινοβολία που εκπέμπει η επιφάνεια, μειώνοντας έτσι περαιτέρω τις θερμικές απώλειες. Αντίθετα, μια μη επιλεκτική επιφάνεια απορρόφησης έχει μεγάλο συντελεστή εκπομπής ϵ_p , κοντά στη μονάδα. Παρόλο που επιλεκτικός συλλέκτης είναι πιο αποδοτικός, είναι και πιο ακριβός, για αυτό ανάλογα με τη εφαρμογή επιλέγεται το κατάλληλο είδος επιφάνειας.

Ακόμη, σε μερικούς επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες είναι δυνατό να μην υπάρχει κάλυμμα. Αυτό γίνεται κυρίως για θέματα εξοικονόμησης κόστους σε εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών (μέχρι 30°C) όπως για παράδειγμα στη περίπτωση θέρμανσης νερού για πισίνες. Η απόδοση όμως αυτών των συλλεκτών μειώνεται σημαντικά σε περιπτώσεις που η διαφορά θερμοκρασίας εντός συλλέκτη και θερμοκρασίας περιβάλλοντος είναι μεγάλη, λόγω του ότι αυξάνονται οι απώλειες αφού δεν υπάρχει προστατευτικό κάλυμμα. [3.9]

➤ Απόδοση επίπεδου ηλιακού συλλέκτη

Η ωφέλιμη θερμική ισχύς από έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη δίνεται από τη εξίσωση (3.15) και εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

$$Q_u = [A_c \cdot (\tau\alpha)_n \cdot G_T \cdot F_R] - [A_c \cdot F_R \cdot U_L \cdot (T_m - T_a)] \quad (3.15)$$

A_c : επιφάνεια συλλέκτη [m^2]

G_T : ολική στιγμιαία προσπίπτουσα ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια [W/m^2]

T_m : μέση θερμοκρασία του νερού του συλλέκτη [$^{\circ}C$]

T_a : θερμοκρασία περιβάλλοντος [$^{\circ}C$]

F_R : συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη

τ : η διαπερατότητα του καλύμματος του συλλέκτη στην ηλιακή ακτινοβολία

α : η απορροφητικότητα του απορροφητήρα για την ηλιακή ακτινοβολία

U_L : ο συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών του συλλέκτη [$W/(m^2 K)$]

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης (3.15) εκφράζει τα θερμικά κέρδη από τη προσπίπτουσα ακτινοβολία λαμβάνοντας υπόψη τις οπτικές απώλειες ενώ ο δεύτερος όρος εκφράζει τις θερμικές απώλειες του συλλέκτη.

Ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη, ορίζεται ως ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης και δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c \cdot G_T} = F_R \cdot (\tau\alpha)_n - (F_R \cdot U_L) \cdot \frac{(T_m - T_a)}{G_T} \quad (3.16)$$

Ο συντελεστής $(\tau\alpha)_n$ με δείκτη n , αναφέρεται σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ήλιου.

Τυπικές τιμές των μεγεθών του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη δίνονται στο πιο κάτω πίνακα.

Απορροφητικότητα του απορροφητήρα	0.85-0.95
Διαπερατότητα του καλύμματος	0.88-0.95
Συντελεστή εκπομπής επιλεκτικού απορροφητήρα	0.05-0.15
Συντελεστή εκπομπής μη επιλεκτικού απορροφητήρα	0.90-0.98
Συντελεστής εκπομπής καλύμματος	0.88-0.90
Αγωγιμότητα μονωτικού υλικού (W/m K)	0.04
Αγωγιμότητα απορροφητήρα (W/m K)	210-385
Πάχος μόνωσης (mm)	4.0-5.0
Πάχος πλάκας απορρόφησης (mm)	0.5-1.0
Διάκενο μεταξύ πλάκας και καλύμματος (mm)	3-4
Συλλεκτική επιφάνεια (m ²)	1.5- 2.5
Αριθμός σωλήνων	8-11
Ανηγγμένη παροχή μάζας ανά m ² συλλεκτικής επιφάνειας (kg/m ² s)	0.01-0.03
Εσωτερική διάμετρος αγωγού (mm)	8-12
Εξωτερική διάμετρος αγωγού (mm)	10-15

Πίνακας 3.1: Τυπικές τιμές χαρακτηριστικών επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [3.12]

Οι τιμές των γινομένων $F_R \cdot (\tau\alpha)_n$ και $F_R \cdot U_L$ προκύπτουν από δοκιμές του συγκεκριμένου τύπου συλλέκτη και δηλαδή εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη όπως από το χρώμα του (αν είναι επιλεκτικός ή όχι), το αριθμό των υάλινων καλυμμάτων, την απορροφητικότητα του απορροφητήρα του, τη διαπερατότητα του καλύμματος του κ.α. Για αυτό και αυτά τα χαρακτηριστικά είναι κρίσιμα για τη απόδοση του συλλέκτη [3.3].

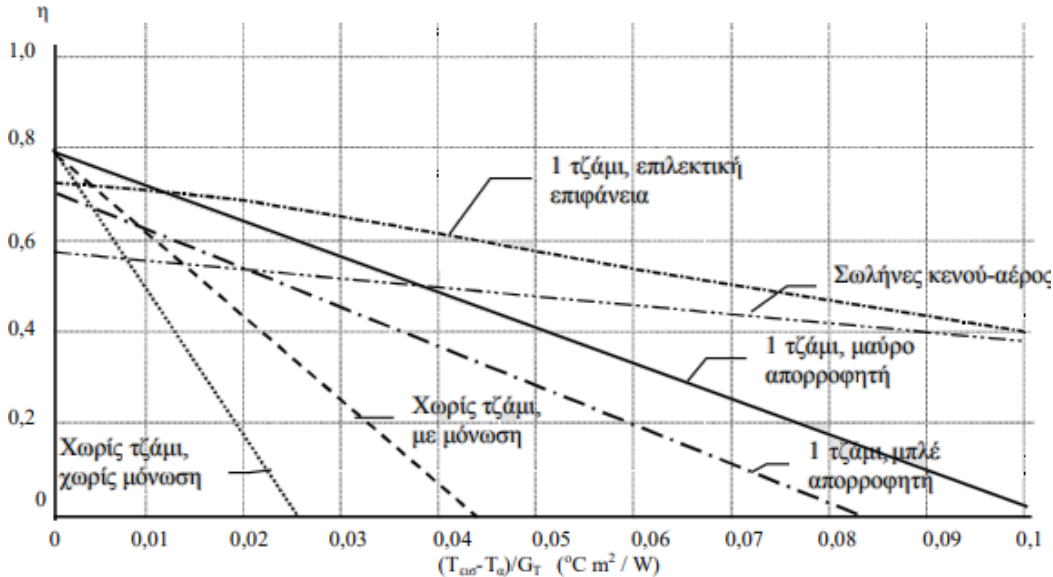
Πιο κάτω δίνονται τυπικές τιμές των μεγεθών $F_R (\tau\alpha)_n$ και $F_R U_L$ επιπέδου ηλιακού συλλέκτη που προέκυψαν από πειράματα, δοκιμές απόδοσης και πιστοποίησης του από αναγνωρισμένο εργαστήριο δοκιμών (Κέντρο Δοκιμών Ηλιακών Συλλεκτών του Δημόκριτου).

Χαρακτηριστικά ηλιακού συλλέκτη	$F_R (\tau\alpha)_n$	$F_R U_L (W/m^2K)$
Μαύρο χρώμα, 1 υαλοπίνακας	0.82	7.50
Μαύρο χρώμα, 2 υαλοπίνακες ή Επιλεκτική επιφάνεια με 1 υαλοπίνακα	0.75	5.00
Απλός συλλέκτης (πλαστικοί σωλήνες) χωρίς κάλυμμα και μόνωση	0.86	21.50
Συλλέκτης κενού	0.57	1.82

Πίνακας 3.2: Τυπικές τιμές παραμέτρων απόδοσης διάφορων τύπων επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [3.9]

Από το πιο πάνω πίνακα, παρατηρείται ότι ο απλός τύπου συλλέκτης χωρίς κάλυμμα και μόνωση, έχει τιμή $F_R (τα)_n$ μεγαλύτερη από ότι άλλοι τύποι και δηλαδή έχει μεγαλύτερα θερμικά κέρδη από τη προσπίπτουσα ακτινοβολία, ενώ η τιμή του $F_R \cdot U_L$ που είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι στους άλλους τύπους συλλέκτη δείχνει ότι έχει πολύ μεγαλύτερες θερμικές απώλειες.

Σύμφωνα με τη σχέση (3.16) ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη είναι γραμμική συνάρτηση της μεγέθους $(T_m - T_a)/G_T$ με κλίση $F_R U_L$ και έχει τομή με τον άξονα των τεταγμένων στη θέση $F_R (τα)_n$. Όλα αυτά παρουσιάζονται στην εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.8: Καμπύλες απόδοσης για διάφορους τύπους επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [3.9]

3.4.2 Συγκεντρωτικός ηλιακός συλλέκτης

Η χρήση των συγκεντρωτικών συλλεκτών γίνεται όταν είναι επιθυμητή η απόδοση ενέργειας σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές που επιτυγχάνονται με τους συνηθείς επίπεδους συλλέκτες. Για παράδειγμα, οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη παραγωγή ατμού σε ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες όπου χρειάζονται υψηλές θερμοκρασίες.

Η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας οπτικής ανακλαστικής συσκευής (κάτοπτρο) και γίνεται σε μικρή επιφάνεια απορρόφησης μειώνοντας έτσι τις θερμικές απώλειες. Σε αυτό το συλλέκτη, αξιοποιείται μόνο η άμεση ακτινοβολία.

Παρόλο, που οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες έχουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης έναντι των επιπέδων συλλεκτών, το κόστος κατασκευής ενός κατοπτρικού συλλέκτη είναι πολύ μεγαλύτερο από ενός επίπεδου συλλέκτη της ίδιας θερμικής ισχύος. Ακόμη, στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες απαιτείται συνεχής κίνηση ώστε να υπάρξει καλή εστίαση. Για τον σκοπό αυτό η

κίνηση ελέγχεται από αυτόματο σύστημα παρακολούθησης της θέσης του ήλιου. Η κίνηση τους μπορεί να γίνεται είτε περί ένα άξονα είτε περί δύο.

Τα κύρια μέρη ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη είναι:

- Συγκεντρωτής (κάτοπτρο)
- Δέκτης (περιλαμβάνει τον απορροφητήρα με το σύστημα μετατροπής της ακτινοβολίας σε άλλη μορφή ενέργειας)
- Μόνωση
- Κάλυμμα

Βασικό χαρακτηριστικό των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι ο λόγος συγκέντρωσης τους:

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (3.17)$$

Όπου A_a : η επιφάνεια που εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία [m^2]

A_r : η επιφάνεια του δέκτη που απορροφά τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία [m^2]

Οι τιμές του λόγου συγκέντρωσης κυμαίνονται από 1.5 έως 10000. Καθώς ο λόγος συγκέντρωσης αυξάνεται, αυξάνεται η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία, αυξάνονται η ακρίβεια της κατασκευής και η ποιότητα του οπτικού συστήματος, όμως αυξάνεται παράλληλα και το κόστος.

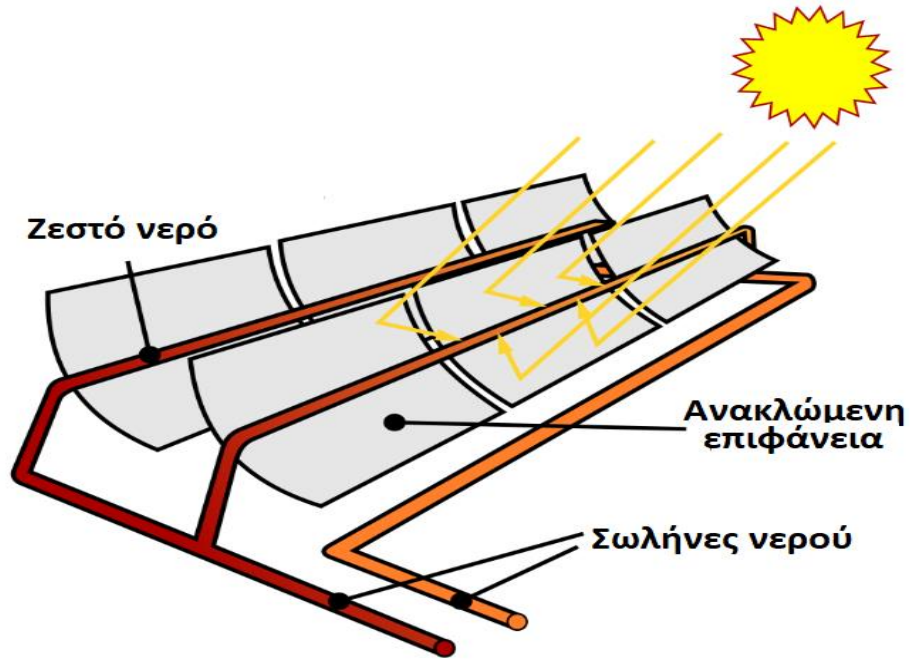
Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες χωρίζονται σε συλλέκτες γραμμικής εστίασης και σημειακής εστίασης.

➤ Συλλέκτες γραμμικής εστίασης

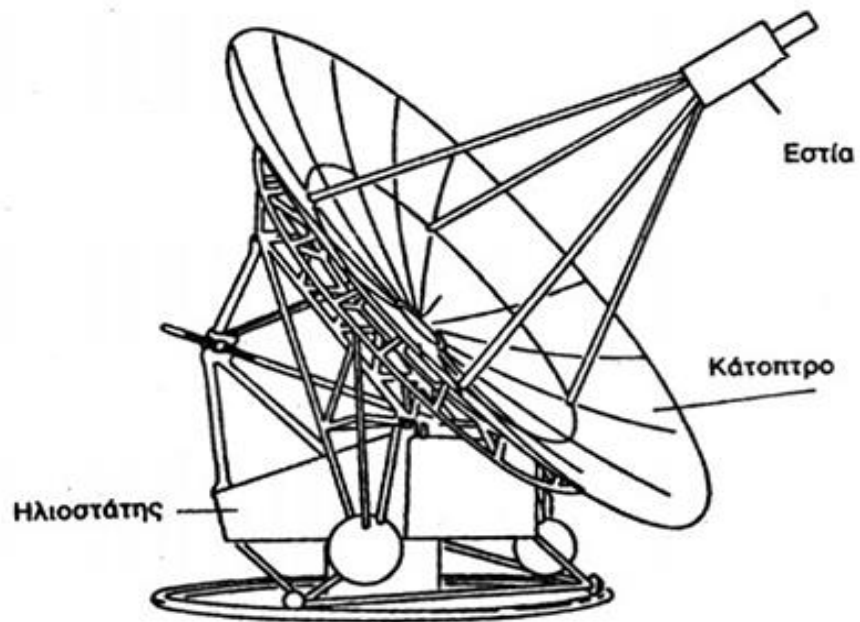
Αυτοί οι συλλέκτες αποτελούνται από παραβολικά διαμορφωμένα ανακλαστικά τμήματα (κάτοπτρα). Κατά μήκος αυτών, στο σημείο εστίασης τοποθετούνται σωλήνες που κυκλοφορεί το θερμοαπαγωγό ρευστό και στους οποίους γίνεται η συγκέντρωση της ακτινοβολίας (εικόνα 3.9). Χρησιμοποιούν υλικά με μεγάλη ανακλαστικότητα για τη συλλογή και τη συγκέντρωση μεγάλης θερμικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία. Είναι δηλαδή σύστημα πολύ υψηλής ισχύος και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται γενικά για την παραγωγή ατμού για ηλιακούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς και δεν χρησιμοποιούνται σε οικιακές εφαρμογές [3.13]

➤ Συλλέκτες σημειακής εστίασης

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες σημειακής εστίασης, συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα σημείο (εικόνα 3.10). Η παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου γίνεται σε δύο διαστάσεις. Συνήθως, οι συλλέκτες αυτοί χρησιμοποιούνται για τη παροχή θερμότητας σε μηχανές (όπως μηχανές Stirling). Επίσης, μπορούν να συνδυαστούν και με συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά για τη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος [3.13].



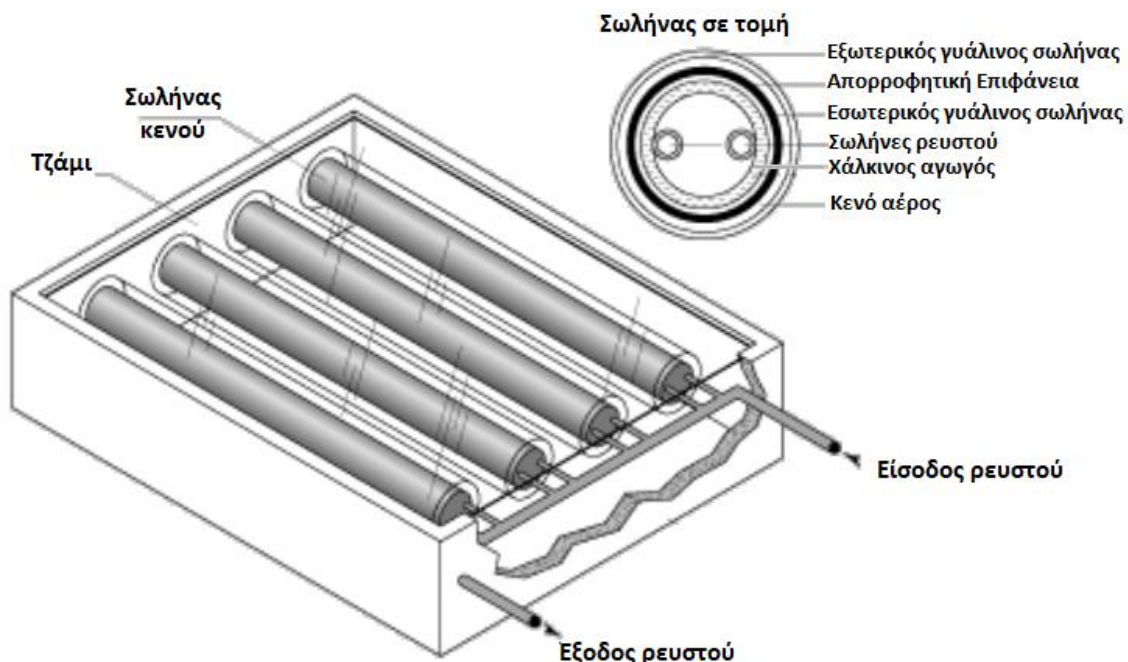
Εικόνα 3.9: Συγκεντρωτικός συλλέκτης γραμμικής εστίασης [3.13]



Εικόνα 3.10: Συγκεντρωτικός Συλλέκτης σημειακής εστίασης[3.14]

3.4.3 Ηλιακός συλλέκτης κενού

Οι ηλιακοί συλλέκτες κενού αποτελούνται από μια σειρά σωλήνων κενού σε παράλληλη διάταξη. Ο κάθε σωλήνας αποτελείται από δυο γυάλινους σωλήνες που ο ένας βρίσκεται μέσα στο άλλο με αποτέλεσμα ενδιάμεσα τους να υπάρχει κενό. Η ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά το γυάλινο σωλήνα, απορροφάται από τη μαύρη επιφάνεια(απορροφητής) που βρίσκεται εντός του εσωτερικού σωλήνα. Αυτός μετατρέπει τη ηλιακή ενέργεια σε θερμότητα. Το θερμοαπαγωγό ρευστό που περνάει έρχεται σε επαφή με αυτή τη επιφάνεια και παίρνει τη θερμότητα που συλλέγεται. Είναι αξιοσημείωτο, ότι το ποσοστό απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να φτάσει μέχρι και το 96% αφού το ποσοστό αντανάκλασης είναι πολύ μικρό [3.15]. Λόγω του ότι το κενό αέρος που υπάρχει μεταξύ των 2 σωλήνων είναι καλό μονωτικό υλικό μειώνονται οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον και ουσιαστικά υπάρχουν μόνο απώλειες ακτινοβολίας και όχι συναγωγής.



Εικόνα 3.11: Μέρη του Ηλιακού Συλλέκτη κενού[3.16]

Επιπλέον χαρακτηριστικά των συλλεκτών κενού είναι:

- Εκμεταλλεύονται και τη άμεση και τη διάχυτο ακτινοβολία
- Κυρίως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτούνται θερμοκρασίες νερού μεγαλύτερες των 80°C (ηλιακός κλιματισμός, βιομηχανία). Δε συνιστώνται σε κατοικίες, αφού τη θερινή περίοδο η θερμοκρασία στο εσωτερικό τους φτάνει σε πολύ ψηλές θερμοκρασίες [3.16].

- Επιτυγχάνονται υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και είναι ιδανικοί για ψυχρά κλίματα αφού έχουν μικρές απώλειες θερμότητας.
- Έχουν υψηλές αποδόσεις σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες
- Έχουν μικρό βάρος και όγκο και μεγάλη αντοχή σε θερμοκρασίες έως μείον 40°C,
- Λόγω των πιο πάνω πλεονεκτημάτων τους, έχουν πολύ μεγαλύτερο κόστος από ότι οι επίπεδοι συλλέκτες.

Βιβλιογραφία 3^{ου} κεφαλαίου

[3.1] World Energy Council, World Energy Resources, Chapter 8, Solar, 2013

[3.2] https://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_orbit

[3.3] Κ.Α. Αντωνόπουλος, Θερμικά-Ηλιακά συστήματα, Αθήνα, 2015

[3.4] Greenmatch, Advantage and disadvantage of solar energy, 2019

[3.5] <https://www.celsius.gr/1128CC47.el.aspx>

[3.6] <http://www.allaboutenergy.gr/HliakiEnergeia.html>

[3.7] <http://darsunenergy.com/solar-irradiance/>

[3.8] Bhargav Patel, Earth sun angle, 2015

[3.9] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, Αθήνα, Ιούνιος 2011

[3.10] <http://solimpeks.com/volther-powervolt-en>

[3.11] Ηλιακοί Συλλέκτες, Γιάννης Κατσίγιαννης, Χανιά

[3.12] Μπέλλος Ε. Αξιοποίηση και βελτιστοποίηση της χρήσης ηλιακών συστημάτων στα κτίρια, Διδακτωρική διατριβή, Αθήνα 2016

[3.13] Jordan Hanania, Kailyn Stenhouse, Brodie Yyelland, Jason Donev, Solar collectors, 2018

[3.14] https://www.appropedia.org/Understanding_solar_concentrators#Point.2C_Line.2C_or_Non-Focusing

[3.15] <https://www.green-solar.net/>

[3.16] <http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/evacuated-tube-collector.html>

4. Πρόγραμμα προσομοίωσης Trnsys

4.1 Εισαγωγή στο πρόγραμμα Trnsys

Το TRNSYS (Transient System Simulation Tool) είναι ένα εξαιρετικά ευέλικτο γραφικό περιβάλλον λογισμικού που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς μεταβατικών συστημάτων στο χρόνο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δυναμικές προσομοιώσεις συστημάτων και για τη αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

Χρησιμοποιείται σε πολλές από τις ακόλουθες εφαρμογές:

- Συστήματα προσομοίωσης κτιρίων
- Συστήματα συμπαραγωγής
- Συστήματα κλιματισμού HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning)
- Συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακά, φωτοβολταϊκά, γεωθερμικά, αιολικά συστήματα, βιομάζα)
- Ηλιακές θερμικές διεργασίες

Το TRNSYS περιέχει μια εκτεταμένη βιβλιοθήκη εξαρτημάτων (στοιχείων) που τα περισσότερα έχουν να κάνουν με ενεργειακά συστήματα σε κτίρια. Περιλαμβάνει στοιχεία όπως για τη διαχείριση των δεδομένων καιρού, την επεξεργασία της ηλιακής ακτινοβολίας, τον βασικό εξοπλισμό HVAC, τις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, τις ηλιακές θερμικές και ηλεκτρικές τεχνολογίες, τη θερμική αποθήκευση και στοιχεία για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Τα μοντέλα κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε οι χρήστες να μπορούν να τροποποιούν τα υπάρχοντα στοιχεία ή να γράφουν τα δικά τους, επεκτείνοντας τις δυνατότητες του περιβάλλοντος. Δεδομένου αυτού, είναι δυνατή η ανταλλαγή μοντέλων μεταξύ των χρηστών και η συνεχής υποστήριξη του προγράμματος (από άποψη του λογισμικού) με καινούριες εκδόσεις.

Ένα σύστημα στο Trnsys δημιουργείται ενώνοντας γραφικά τα στοιχεία (εξαρτήματα) του στο στούντιο προσομοίωσης (simulation studio). Δηλαδή, οι έξοδοι ενός εξαρτήματος συνδέονται γραφικά με τις εισόδους ενός άλλου. Οι χρήστες μπορούν να παρακολουθήσουν την τιμή οποιασδήποτε μεταβλητής συστήματος σε διαγράμματα καθώς εξελίσσεται η προσομοίωση (οποιαδήποτε θερμοκρασία, παροχή, ποσά θερμότητας κλπ.). Οι συσκευές εξόδου επιτρέπουν επίσης στον χρήστη μεγάλη ευελιξία στην ενσωμάτωση, εκτύπωση και αναφορά οποιασδήποτε τιμής εξόδου εξαρτήματος.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το Trnsys διαθέτει τη δυνατότητα για τη σύνδεση του με άλλα εργαλεία και εφαρμογές (π.χ. Microsoft Excel, Matlab) για την περαιτέρω επεξεργασία κατά ή μετά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

4.2 Προσομοίωση της Η.Υ.Α.Θ. στο πρόγραμμα προσομοίωσης TRNSYS

Στη ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο τρόπος που έγινε η προσομοίωση του συστήματος μας στο Trnsys. Αρχικά, γίνεται προσομοίωση του κτιρίου με ρύθμιση των χαρακτηριστικών του και ακολούθως γίνεται η συνδεσμολογία όλων των στοιχείων (components) που χρειάζονται για τη εγκατάσταση μας.

4.2.1 Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών του κτιρίου

Ανοίγοντας το πρόγραμμα Trnsys, δημιουργούμε ένα νέο project και συγκεκριμένα ένα building project zone. Επιλέγουμε μια ζώνη να έχει το κτίριο και στη συνέχεια εισάγουμε τις πιο κάτω επιλογές.

Για τη προσομοίωση του συστήματος επιλέχθηκε ένα τυπικό κτίριο με τις εξής διαστάσεις:

Μήκος: 10m

Πλάτος: 10m

Ύψος: 3m

Για τα ανοίγματα (παράθυρα) του κτιρίου θεωρήθηκε συντελεστής σκίασης 0.7, επιλέχθηκαν διπλά τζάμια και ανάλογα με το προσανατολισμό τους θεωρήθηκαν οι πιο κάτω διαστάσεις:

Νότος: 6m

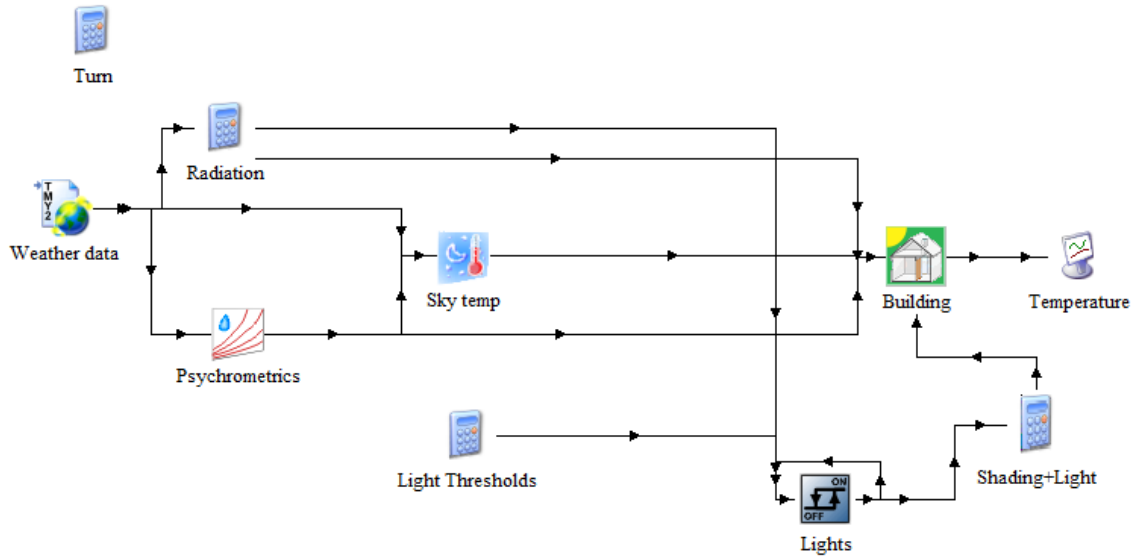
Βορράς: 0m

Ανατολή: 3m

Δύση: 3m

Ως τοποθεσία επιλέχθηκε η πόλη της Αθήνας και ο προσανατολισμός του κτιρίου έμεινε ως έχει στο πρόγραμμα, δηλαδή κάθε πλευρά του κοιτούσε ένα σημείο του ορίζοντα.

Για τον αερισμό του χώρου επιλέχθηκαν εναλλαγές αέρα 0.7 /hour. Δεν επιλέχθηκε να υπάρχει κάποιο σύστημα φυσικού ή μηχανικού αερισμού. Επίσης, δεν επιλέχθηκε να υπάρχει κάποιο σύστημα ψύξης ή θέρμανσης στο χώρο, αφού θα οριστεί η αντλία θερμότητας ως σύστημα θέρμανσης στην συνέχεια. Μέσω των πιο πάνω, το αρχικό πρόγραμμα που δημιουργείται στο Trnsys με τα συνδεδεμένα στοιχεία στο κτίριο είναι το πιο κάτω:

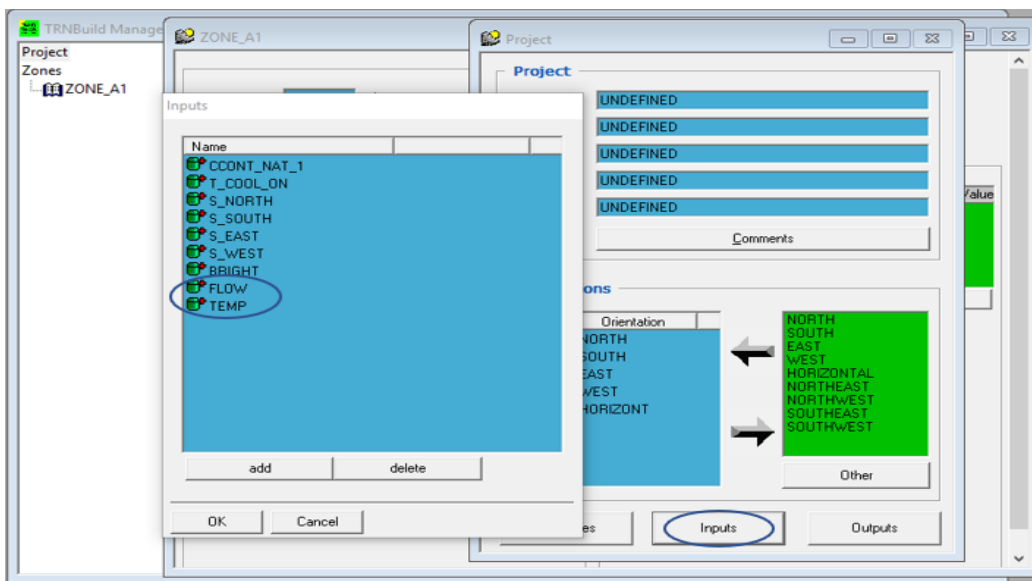


Εικόνα 4.1: Προσομοίωση κτιρίου στο πρόγραμμα Trnsys

4.2.2 Επεξεργασία του κτιρίου μέσω του προγράμματος TRNBuild

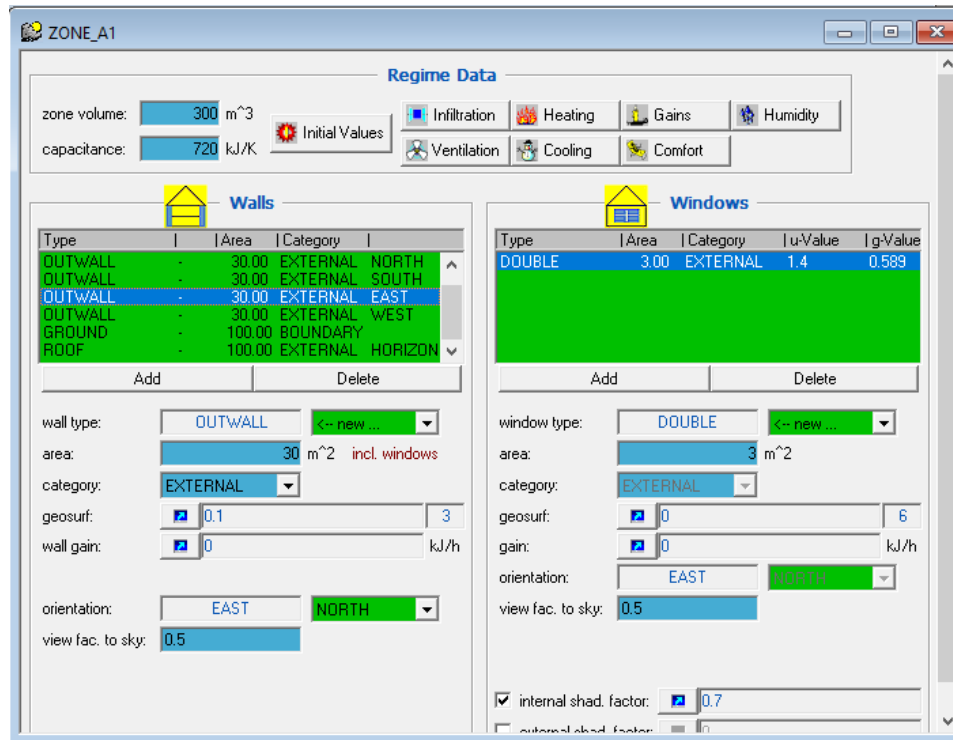
Με δεξί κλικ στο εικονίδιο του κτιρίου και “edit building” μεταφερόμαστε στο πρόγραμμα TRNBuild στο οποίο μπορούμε να κάνουμε τροποποιήσεις στο κτίριο σχετικά με τις πιο πάνω παραμέτρους που αναφέρθηκαν ή και για άλλες παραμέτρους του κτιρίου.

Καταρχήν, εισάγουμε δυο νέες μεταβλητές στις παράμετρος εισόδου (INPUTS) του κτιρίου, τις οποίες ονομάζουμε “FLOW” και “TEMP” και αντιστοιχούν στη παροχή και στη θερμοκρασία του αέρα που θα εισάγει η αντλία θερμότητας που θα συνδεθεί με το κτίριο αργότερα.



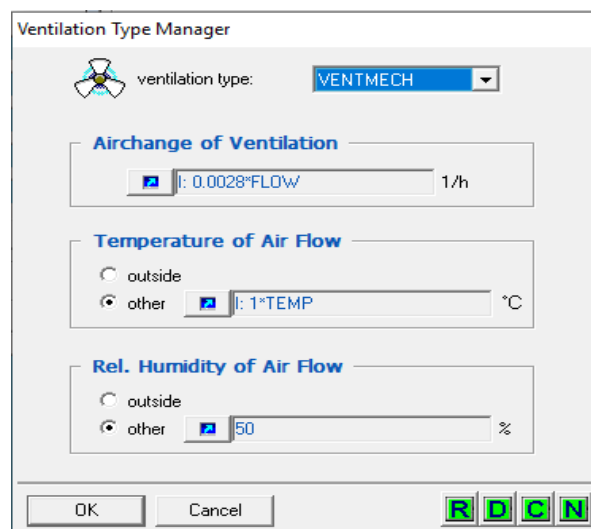
Εικόνα 4.2: Εισαγωγή μεταβλητών εισόδου στο κτίριο

Στη πιο κάτω εικόνα, της ζώνης που επιλέξαμε (Zone_A1), φαίνεται πως γίνεται ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των τοίχων και των παραθύρων του κτιρίου:



Εικόνα 4.3: Προσδιορισμός τοίχων και παραθύρων του κτιρίου

Όπως φαίνεται στη πιο πάνω εικόνα, μπορούμε να επεξεργαστούμε και άλλα μεγέθη όπως το αερισμό, θέρμανση, ψύξη, θερμικά κέρδη του κτιρίου από τη επιλογές που υπάρχουν στο πάνω μέρος. Ακολουθως, πατώντας στη επιλογή “ventilation” ρυθμίζουμε τα πιο κάτω:

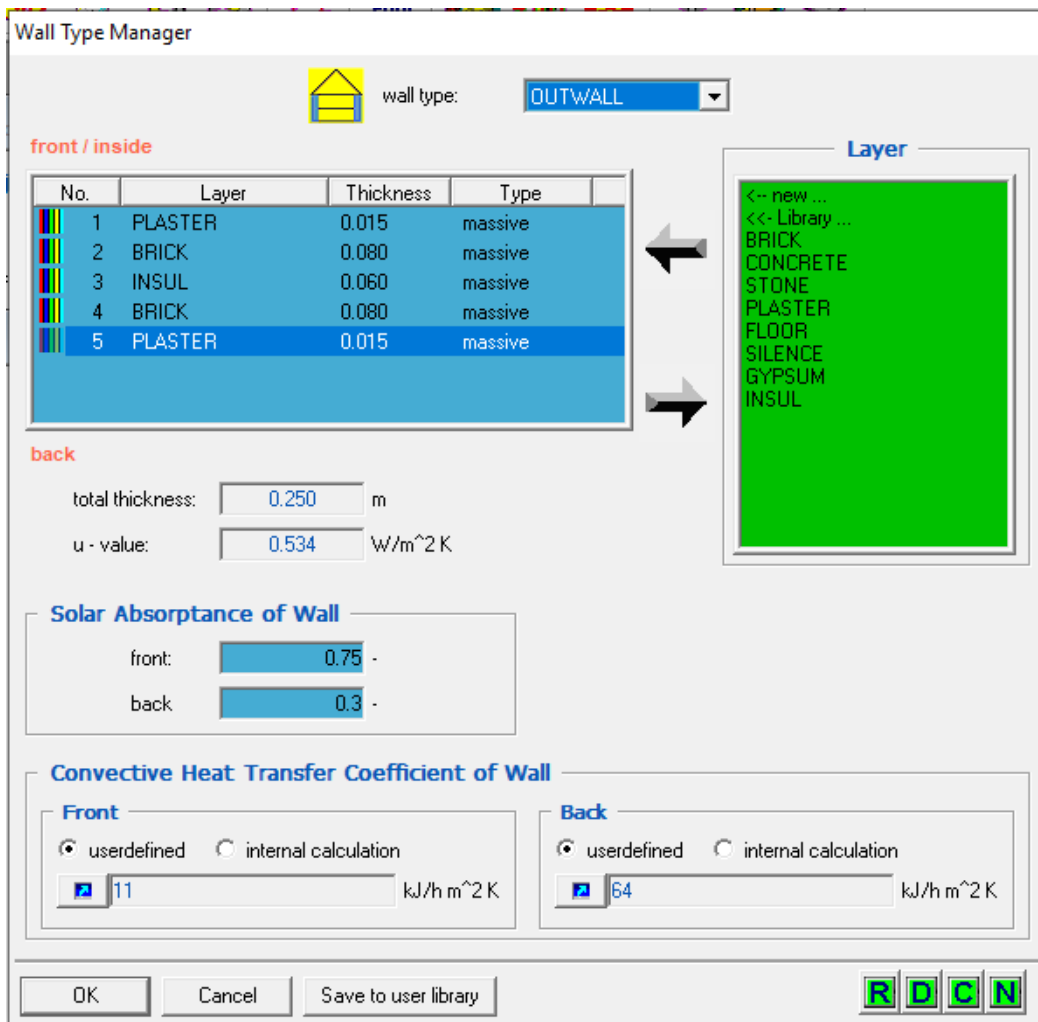


Εικόνα 4.4: Προσδιορισμός αερισμού χώρου

Η σχετική υγρασία στο χώρο θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 50%. Η μεταβλητή TEMP αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του αέρα που δίνεται από τη αντλία θερμότητας. Η μεταβλητή FLOW είναι η παροχή αέρα \dot{m} της αντλίας θερμότητας προς το κτίριο, η οποία προσδιορίζεται στην αντλία θερμότητας σε μονάδες kg/hr και για αυτό ο πιο συντελεστής 0.028 προκύπτει λόγω της μετατροπής των μονάδων μέτρησης από kg/hr σε 1/hr σε ως εξής:

$$\frac{1}{hr} = \frac{\dot{V} \left(\frac{m^3}{hr} \right)}{V(m^3)} = \frac{\dot{m} \left(\frac{kg}{hr} \right)}{\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) V(m^3)} = \frac{\dot{m} \left(\frac{kg}{hr} \right)}{\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) V(m^3)} = \frac{\dot{m} \left(\frac{kg}{hr} \right)}{1.18 \left(\frac{kg}{m^3} \right) 300(m^3)} = 0.0028 \cdot \dot{m} \left(\frac{kg}{hr} \right) \quad (4.1)$$

Από το μενού του TRNBuild, επιλέγουμε Type Manager και μετά επιλέγουμε Walls με σκοπό να προσδιορίσουμε στο πρόγραμμα τα υλικά και το πάχος τους από τα οποία είναι κατασκευασμένοι οι εξωτερικοί τοίχοι, το δάπεδο και η οροφή.



Εικόνα 4.5: Προσδιορισμός υλικών των τοίχων του κτιρίου

Για το συγκεκριμένο κτίριο, επιλέχθηκαν τα εξής υλικά:

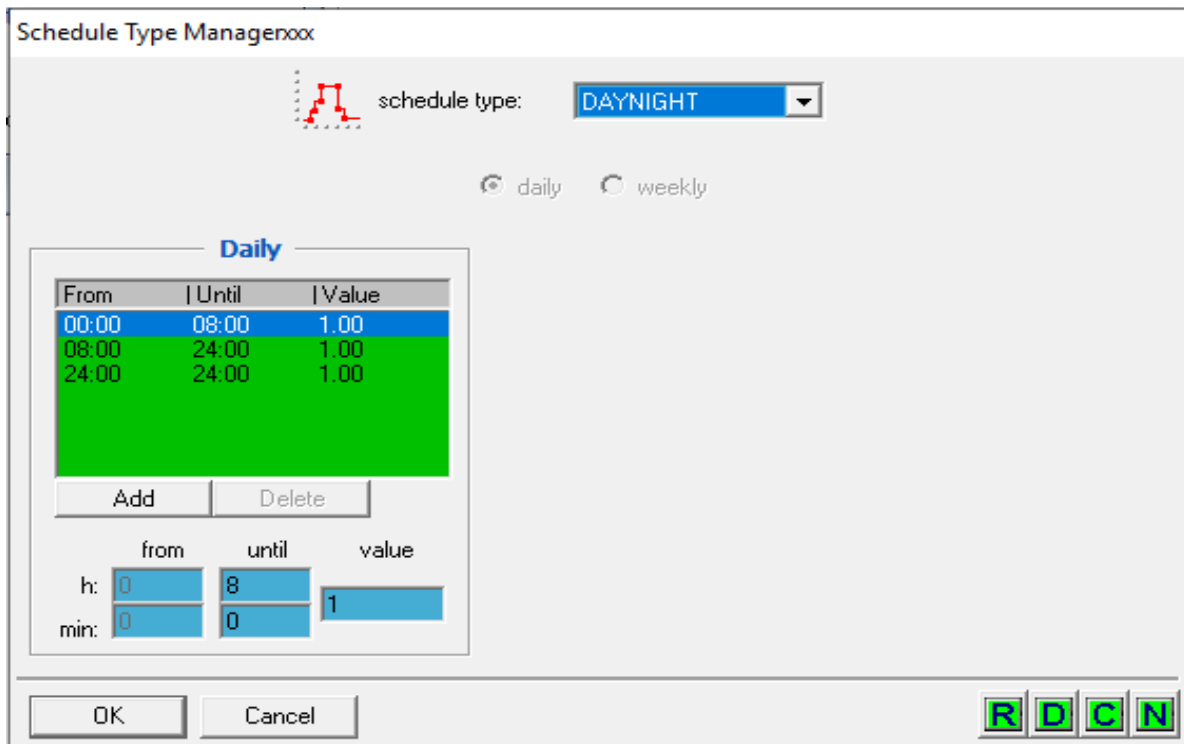
Για τους τοίχους:

- Επίχρισμα: 1.5 cm
- Δρομική Οπτοπλινθοδομή: 8 cm
- Μόνωση: 6 cm
- Δρομική Οπτοπλινθοδομή: 8cm
- Επίχρισμα: 1.5 cm

Για τη οροφή:

- Οπλισμένο σκυρόδεμα: 24 cm
- Μόνωση: 10 cm
- Επίχρισμα: 1.5 cm

Τέλος, από τη επιλογή Schedule Type Manager που βρίσκεται στο μενού του TRNBuild, προσδιορίζουμε κατάλληλα τις ώρες, ώστε η εγκατάσταση μας να λειτουργεί καθόλη τη διάρκεια της ημέρας (24 ώρες).

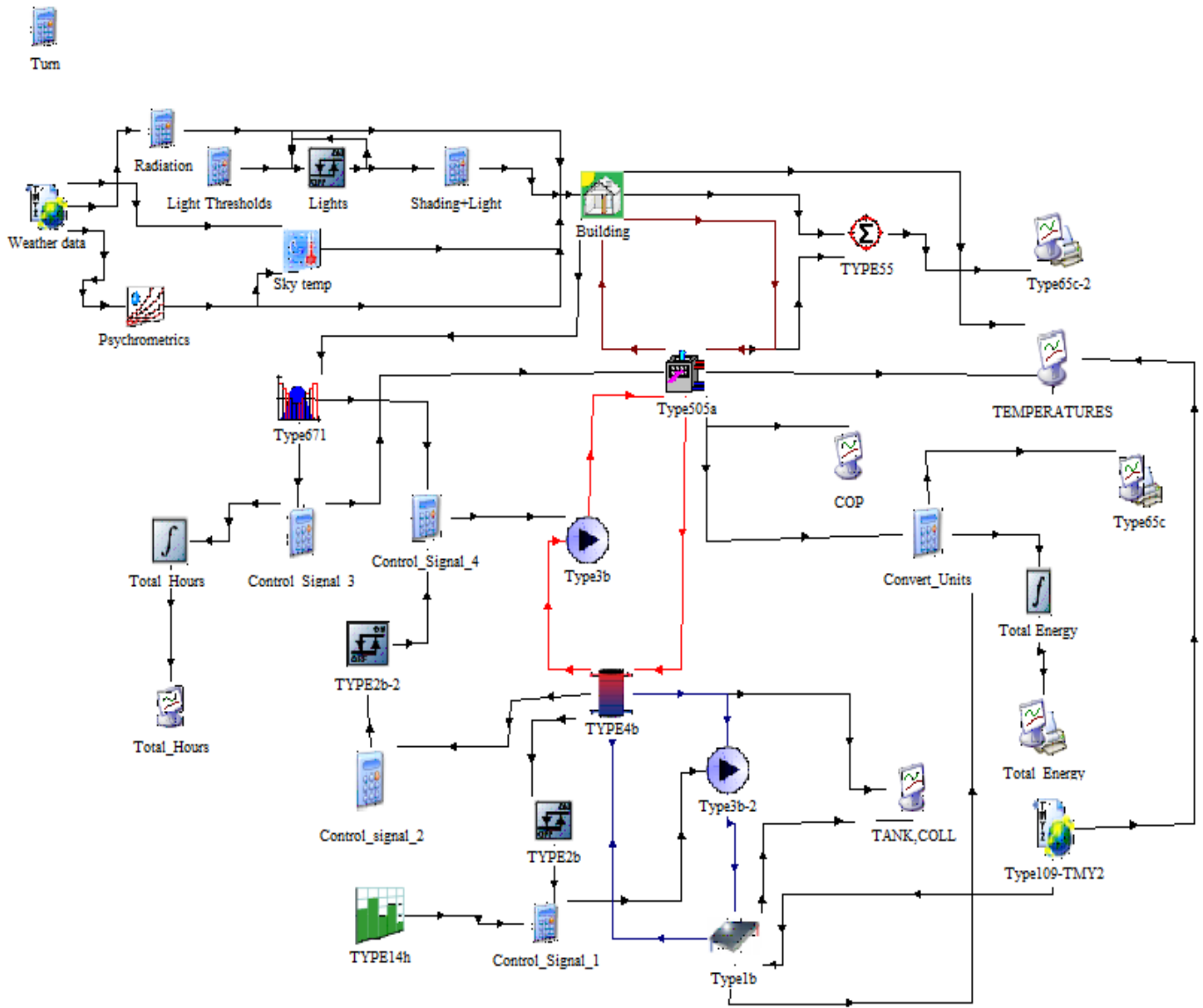


Εικόνα 4.6: Ρύθμιση ωραρίου λειτουργίας του κτιρίου

Έτσι, αφού γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις στο κτίριο, γίνεται αποθήκευση του αρχείου TRNBuild και μεταφερόμαστε στο κυρίως πρόγραμμα του Trnsys (simulation studio).

4.2.3 Προσομοίωση της εγκατάστασης στο Simulation Studio του Trnsys

Σε αυτή τη ενότητα θα παρουσιαστούν όλα τα στοιχεία που χρειάστηκαν για τη προσομοίωση της εγκατάστασης, τα χαρακτηριστικά τους, οι ρυθμίσεις που έγιναν καθώς και ο τρόπος με τον οποίο συνδέθηκαν. Σκοπός είναι η λειτουργία της αντλίας θερμότητας υποβοηθούμενης από ηλιακά για τη θέρμανση του κτιρίου κατά τη περίοδο του χειμώνα. Το κτίριο σύμφωνα με τα πιο πάνω που ορίστηκαν, έχει θερμικές ανάγκες κοντά στις 8500 κιλοβατώρες (kWh).



Εικόνα 4.7: Το πρόγραμμα όλης της εγκατάστασης που προσομοιώθηκε στο Trnsys

Η αντλία θερμότητας που επιλέχθηκε είναι τύπου “Type505a”, η οποία είναι αντλία νερού-αέρα. Στη συνέχεια, όπως φαίνεται πιο κάτω έγιναν οι απαραίτητες ρυθμίσεις ώστε η αντλία να λειτουργεί σε θέρμανση ενώ οι λειτουργίες της σε ψύξη και θέρμανση ζεστού νερού απενεργοποιήθηκαν.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Humidity mode	1	-			More...
2	Logical unit for cooling data	37	-			More...
3	Logical unit for heating data	38	-			More...
4	Logical unit number for cooling correction data	39	-			More...
5	Logical unit number for heating correction data	40	-			More...
6	Number of water flow steps	3	-			More...
7	Number of water temps. - cooling	4	-			More...
8	Number of water temps. - heating	4	-			More...
9	Number of wet bulb steps	6	-			More...

Εικόνα 4.8: Παράμετροι λειτουργίας της αντλίας θερμότητας

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
13	Inlet DHW temperature	40.0	C			More...
14	Inlet DHW flow rate	0	kg/hr			More...
15	Cooling control signal	0	-			More...
16	Heating control signal	0	-			More...
17	Stage 1 auxiliary signal	0.0	-			More...
18	Stage 2 auxiliary signal	0.0	-			More...
19	Fan control signal	0.0	-			More...
20	Fraction of outside air	0	Fraction			More...
21	Cooling desuperheater temperature	60.0	C			More...

Εικόνα 4.9: Απενεργοποίηση Λειτουργίας Αντλίας Θερμότητας σε Θέρμανση Ζεστού Νερού και Ψύξης

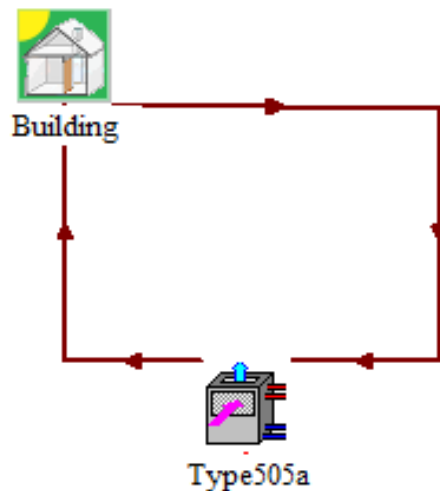
(HeatPump) Type505a

Parameter Input Output Derivative Special Cards External Files Comment

22	🔒	Heating desuperheater temperature	55.0	C	More...
23	🔒	Desuperheater UA - cooling	1500.0	kJ/hr.K	More...
24	🔒	Desuperheater UA - heating	1500.0	kJ/hr.K	More...
25	🔒	Fraction of rated cooling power	0	-	More...
26	🔒	Fraction of rated cooling capacity	0	-	More...
27	🔒	Fraction of rated heating power	1	-	More...
28	🔒	Fraction of rated heating capacity	1	-	More...
29	🔒	Pressure rise through heat pump	0.0	atm	More...

Εικόνα 4.10: Ρύθμιση λειτουργίας Αντλίας Θερμότητας σε θέρμανση

Η συνολική παροχή αέρα της αντλίας θερμότητας βελτιστοποιείται στο κεφάλαιο 7, όπου υπολογίστηκε ίση με 500 l/s για το συγκεκριμένο σύστημα. Πιο κάτω φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο συνδέεται το κτίριο με το στοιχείο της αντλία θερμότητας.



Εικόνα 4.11: Σύνδεση κτιρίου με αντλία θερμότητας

(HeatPump) Type505a -> Building

Classic | Table

Select variable filter : All

Exiting fluid temperature	1- TAMB (AMBIENT TEMPERATURE)	0
Exiting fluid flow rate	2- ARELHUM (RELATIVE AMBIENT HUMIDITY)	0
Outlet air temperature	3- TSKY (FIKTIVE SKY TEMPERATURE)	0
Outlet air humidity ratio	4- ITNORTH (INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION NORTH)	0
Outlet air %RH	5- ITSOUTH (INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION SOUTH)	0
Outlet air flow rate	6- ITEAST (INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION EAST)	0
Outlet air pressure	7- ITWEST (INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION WEST)	0
Exiting DHW temperature	8- ITHORIZONT (INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION HORIZONT)	0
Exiting DHW flow rate	9- IBNORTH (INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION NORTH)	0
Total heat transfer to air	10- IBSOUTH (INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION SOUTH)	0
Sensible heat transfer to air	11- IBEAST (INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION EAST)	0
Latent heat transfer to air	12- IBWEST (INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION WEST)	0
Heat transfer to water	13- IBHORIZONT (INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION HORIZONT)	0
Heat transfer to DHW stream	14- AINORTH (ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION NORTH)	0
Compressor power	15- AISOUTH (ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION SOUTH)	0
Heat pump power	16- AIEAST (ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION EAST)	0
C.O.P.	17- AIWEST (ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION WEST)	0
EER	18- AIHORIZONT (ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION HORIZONT)	0
Auxiliary heater power	19- CCONT_NAT_ (INPUT)	0
Condensate temperature	20- T_COOL_ON (INPUT)	0
Condensate flow rate	21- S_NORTH (INPUT)	0
	22- S_SOUTH (INPUT)	0
	23- S_EAST (INPUT)	0
	24- S_WEST (INPUT)	0
	25- BRIGHT (INPUT)	0
	26- FLOW (INPUT)	0
	27- TEMP (INPUT)	0

Εικόνα 4.12: Συνδεσμολογία Αντλίας Θερμότητας με το κτίριο

(HeatPump) Building -> Type505a

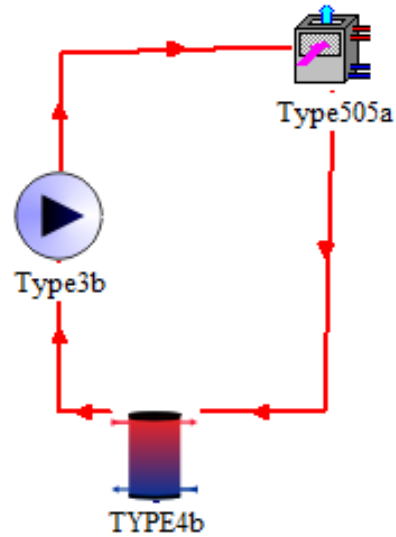
Classic | Table

Select variable filter : All

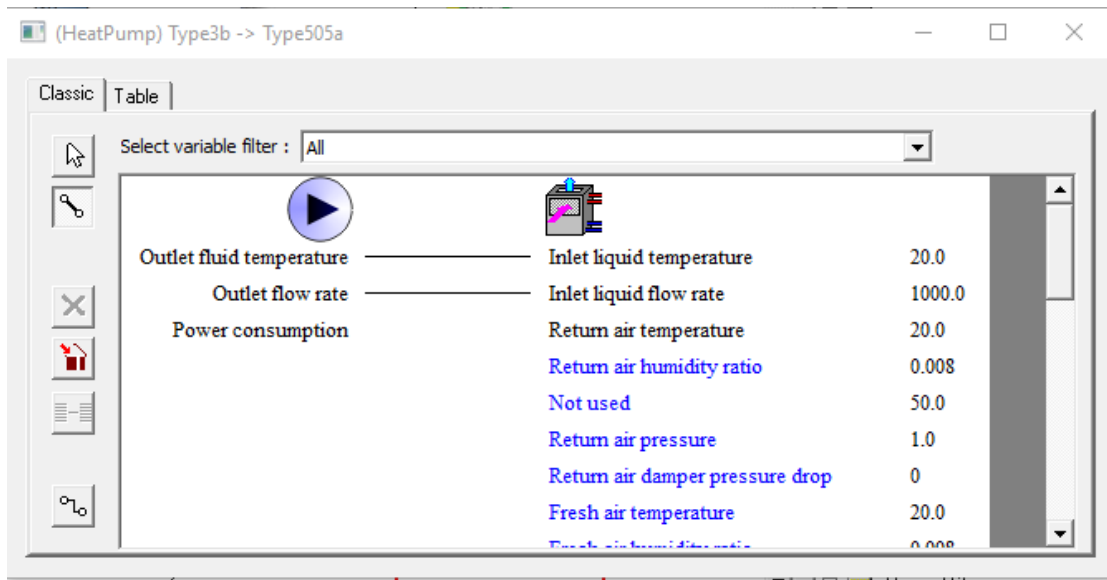
1- (air temperature of zone) TAIR_1	Inlet liquid temperature	2
	Inlet liquid flow rate	1
	Return air temperature	2
	Return air humidity ratio	(
	Not used	:
	Return air pressure	1
	Return air damper pressure drop	(
	Fresh air temperature	(

Εικόνα 4.13: Σύνδεση κτιρίου με τη αντλία θερμότητας

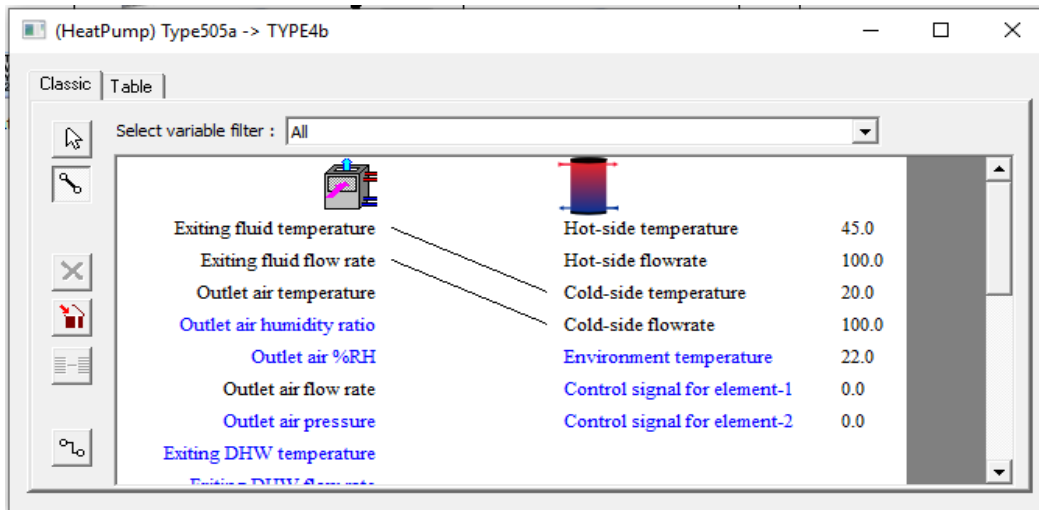
Πιο κάτω φαίνεται η σύνδεση του κυκλώματος δοχείου αδρανείας με τη αντλία θερμότητας.



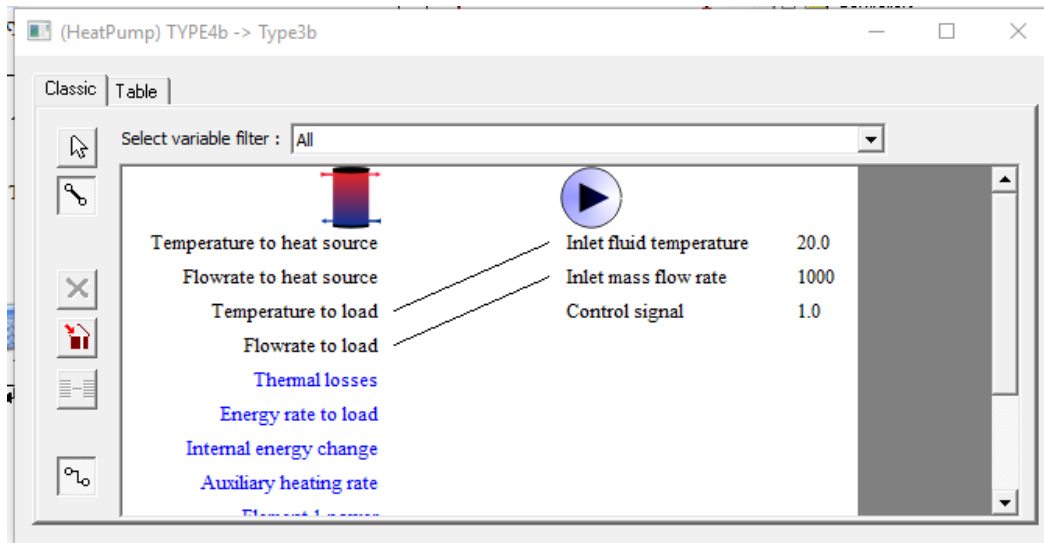
Εικόνα 4.14: Συνδεσμολογία κυκλώματος αντλίας θερμότητας με δοχείο αποθήκευσης



Εικόνα 4.15: Συνδεσμολογία κυκλοφορητή με τη αντλία θερμότητας



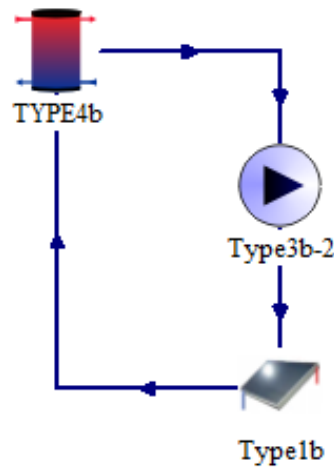
Εικόνα 4.16: Συνδεσμολογία αντλίας θερμότητας με δοχείο αποθήκευσης



Εικόνα 4.17: Συνδεσμολογία δοχείου αποθήκευσης με το κυκλοφορητή

Η μέγιστη παροχή των κυκλοφορητών ορίζεται στο κεφάλαιο 7 σύμφωνα με τη βελτιστοποίηση που γίνεται. Γενικά, για το συγκεκριμένο σύστημα μια καλή τιμή είναι τα 1000 kg/hr.

Στη συνέχεια, περιγράφεται το κύκλωμα του δοχείου αποθήκευσης και ηλιακών συλλεκτών όπου χρησιμοποιήθηκαν επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες με σταθερή κλίση β.



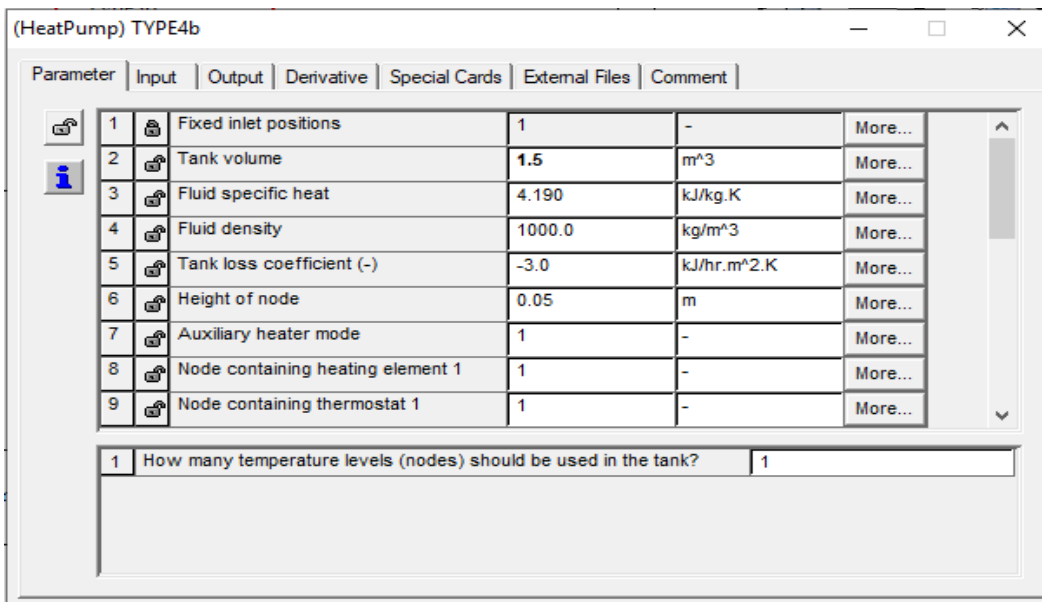
Εικόνα 4.18: Κύκλωμα του δοχείου αποθήκευσης και ηλιακών συλλεκτών

Για τους συλλέκτες και το δοχείο αποθήκευσης ορίστηκαν οι πιο κάτω παράμετροι. Κατά τη λειτουργία του GenOpt όμως, οι τιμές συλλεκτικής επιφάνειας και του όγκου του δοχείου θα αλλάξουν όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια.

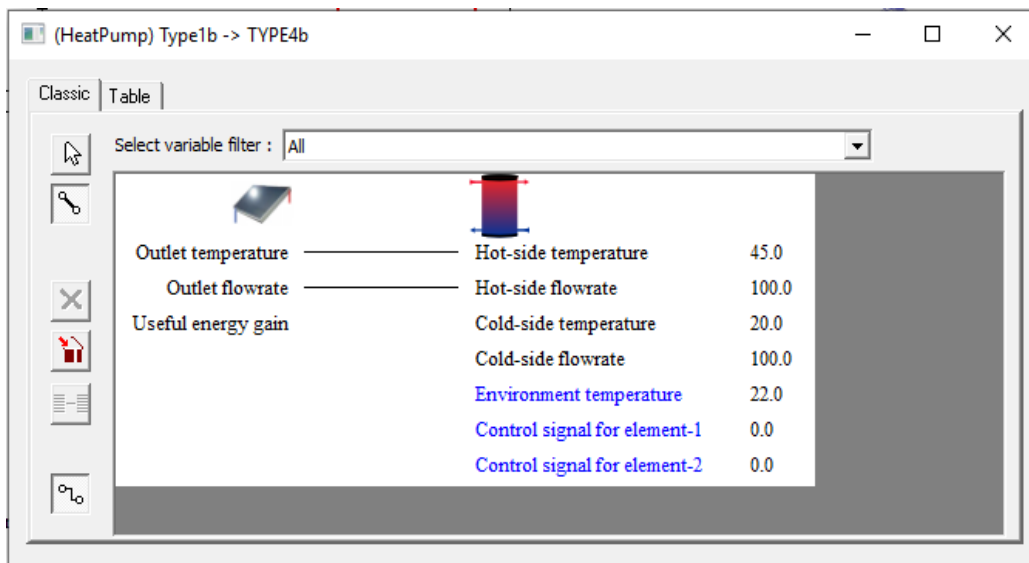
(HeatPump) Type1b

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Number in series	1	-			More...
2	Collector area	30	m ²			More...
3	Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K			More...
4	Efficiency mode	1	-			More...
5	Tested flow rate	40	kg/hr.m ²			More...
6	Intercept efficiency	0.80	-			More...
7	Efficiency slope	3.611111	W/m ² .K			More...
8	Efficiency curvature	0.05	kJ/hr.m ² .K ²			More...
9	Optical mode 2	2	-			More...

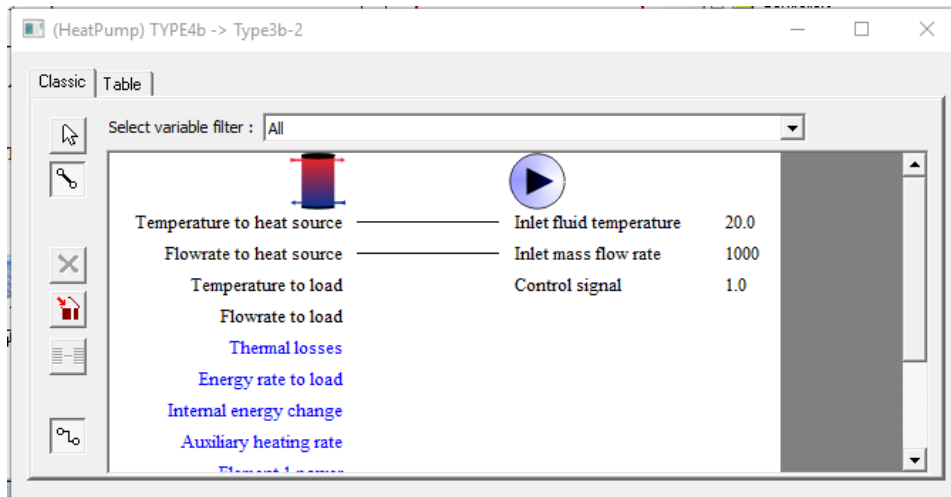
Εικόνα 4.19: Επεξεργασία παραμέτρων επιφάνειας συλλέκτη



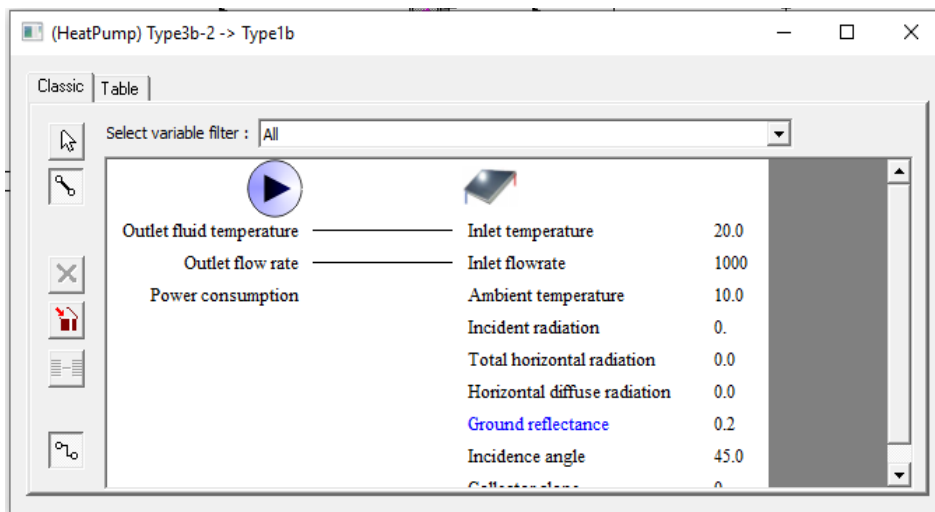
Εικόνα 4.20: Επεξεργασία παραμέτρων δοχείου αποθήκευσης



Εικόνα 4.21: Σύνδεση επιφάνειας συλλέκτη με δοχείου αποθήκευσης

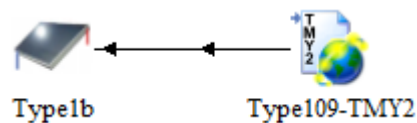


Εικόνα 4.22: Σύνδεση δοχείου αποθήκευσης με το κυκλοφορητή

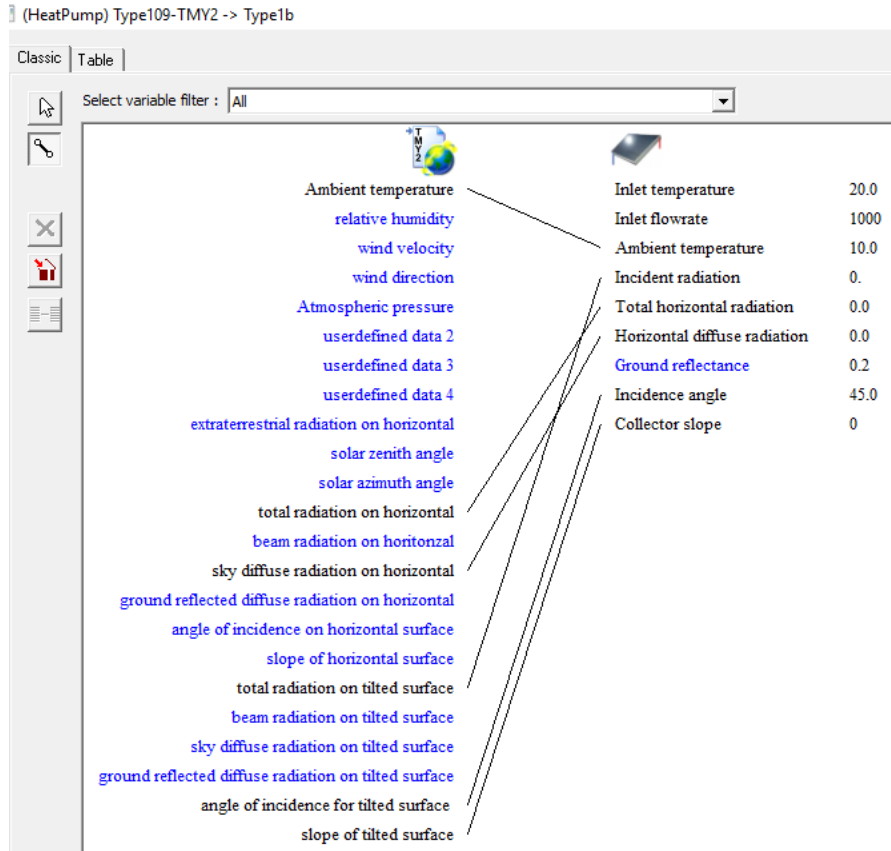


Εικόνα 4.23: Σύνδεση κυκλοφορητή με τη επιφάνεια συλλέκτη

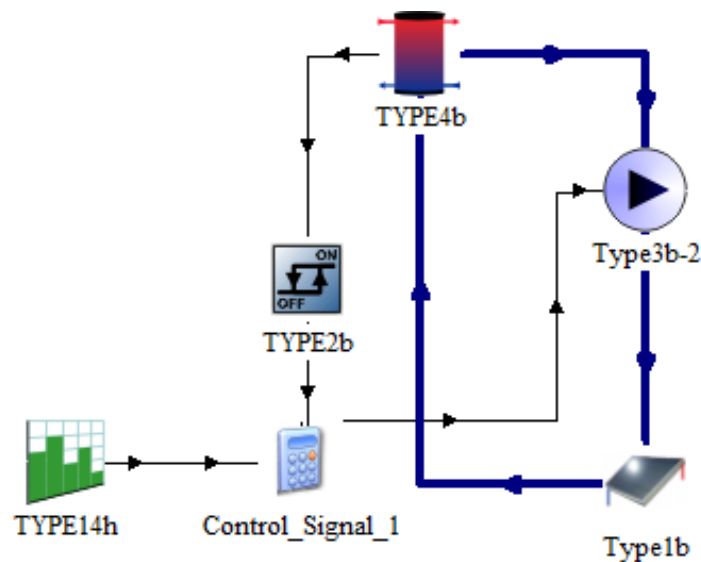
Στη συνέχεια, γίνεται σύνδεση των μετεωρολογικών δεδομένων με τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Από τα External Files του στοιχείου Type109-TMY2 επιλέχθηκαν τα μετεωρολογικά δεδομένα της Αθήνας και η κλίση των συλλεκτών σε αυτό το στοιχείο επιλέχθηκε αρχικά να είναι ίση με 45 °C .



Εικόνα 4.24: Σύνδεση μετεωρολογικών δεδομένων με τους ηλιακούς συλλέκτες

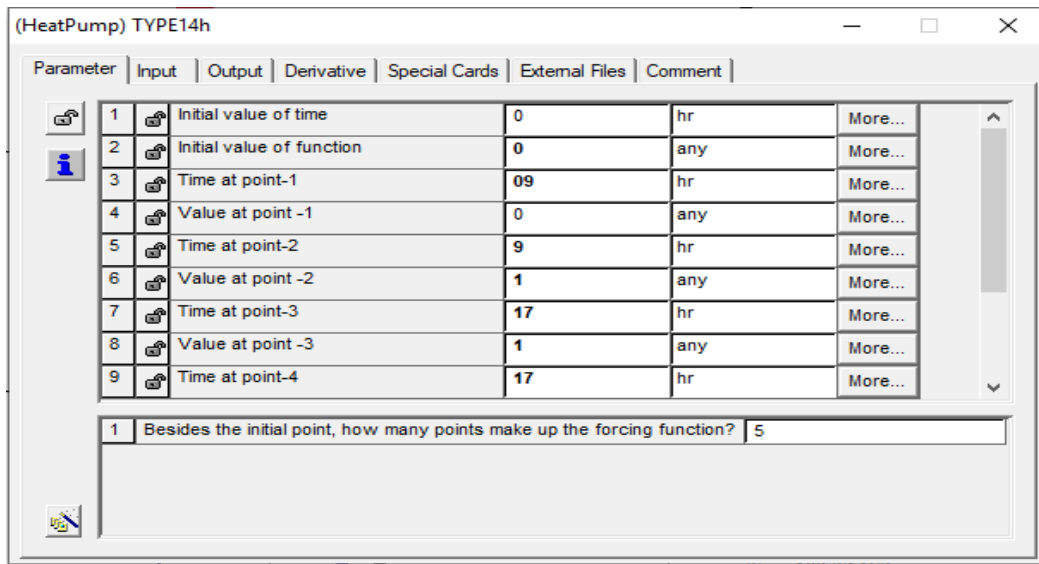


Εικόνα 4.25: Συνδεσμολογία παραμέτρων μετεωρολογικών δεδομένων και ηλιακών συλλεκτών

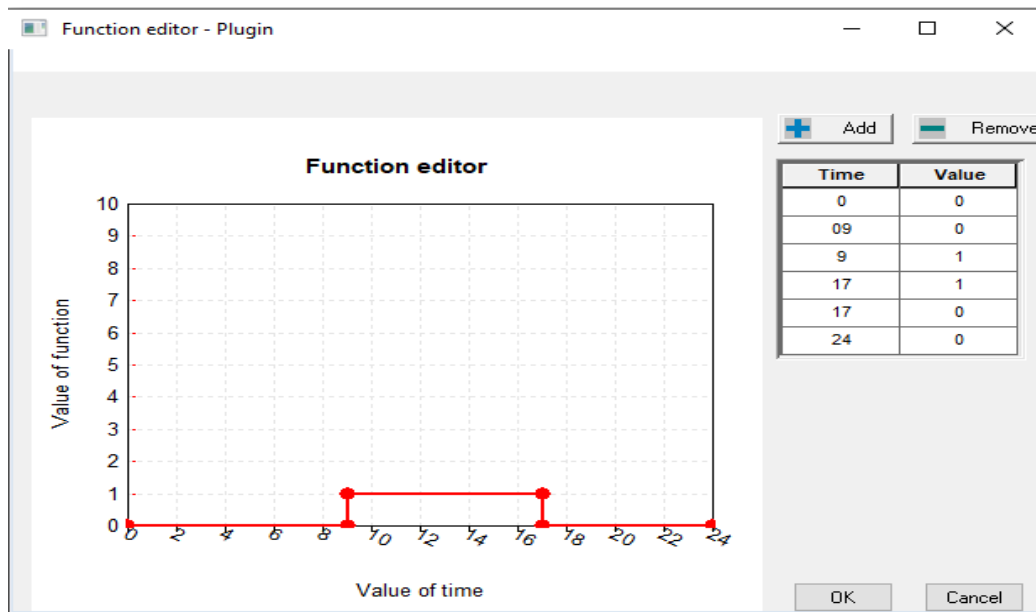


Εικόνα 4.26: Ρύθμιση της διάρκειας λειτουργίας του κυκλώματος των συλλεκτών-δοχείου αποθήκευσης

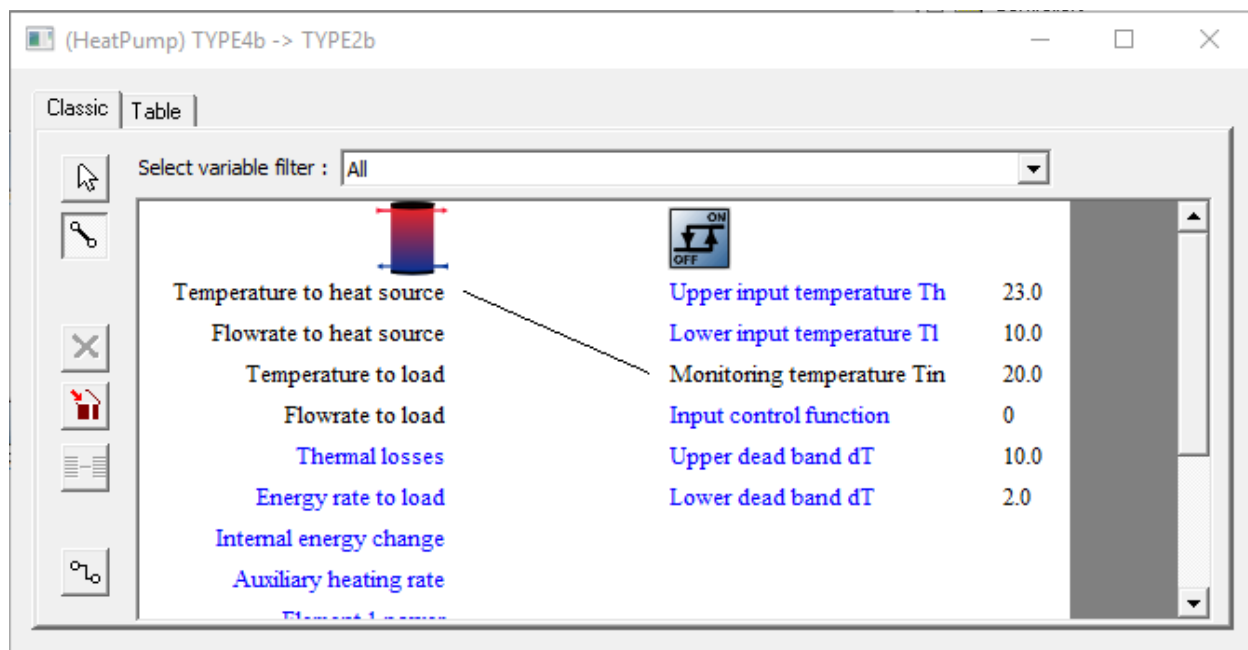
Για την ομαλή λειτουργία του, το κύκλωμα ηλιακών συλλεκτών και δοχείου αποθήκευσης επιλέχθηκε να λειτουργεί από τις 09.00 μέχρι τις 17.00 με τη προϋπόθεση η θερμοκρασία εντός του δοχείου αποθήκευσης να μην ξεπερνά τους 100 °C. Τα πιο πάνω εφαρμόστηκαν με τη βοήθεια των στοιχείων TYPE14h και TYPE2b (εικόνα 4.26). Το στοιχείο “equation” με το όνομα “Control signal 1” χρειάζεται για να ελέγχει εάν ισχύουν οι 2 πιο πάνω προϋποθέσεις με σκοπό να δίνει σήμα στο κυκλοφορητή του πιο πάνω κυκλώματος για τη διακοπή ή τη λειτουργία του.



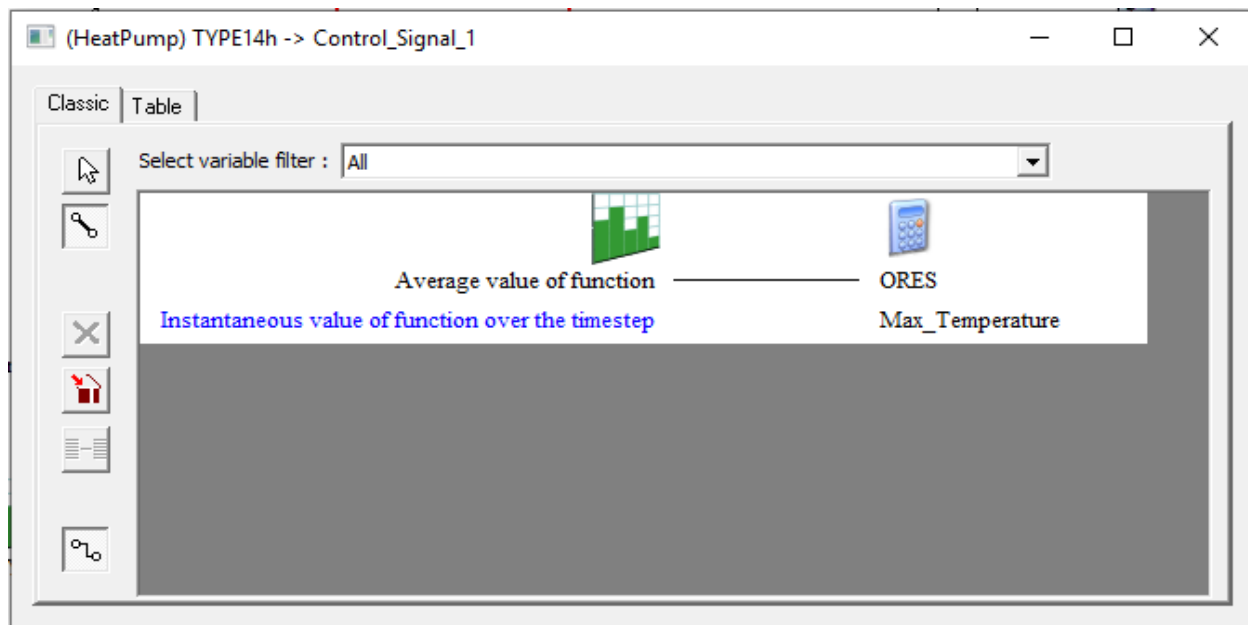
Εικόνα 4.27: Ρυθμίσεις ωραρίου λειτουργίας του συστήματος μέσω του στοιχείου TYPE14h



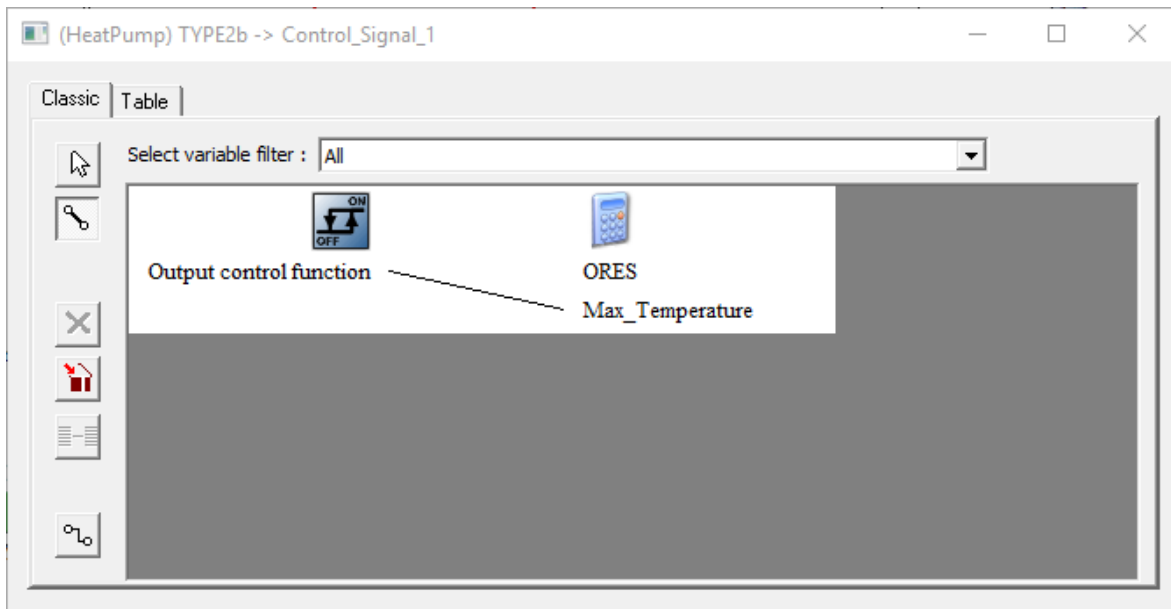
Εικόνα 4.28: Ωραρίου λειτουργίας της εγκατάστασης στο στοιχείο Type14h



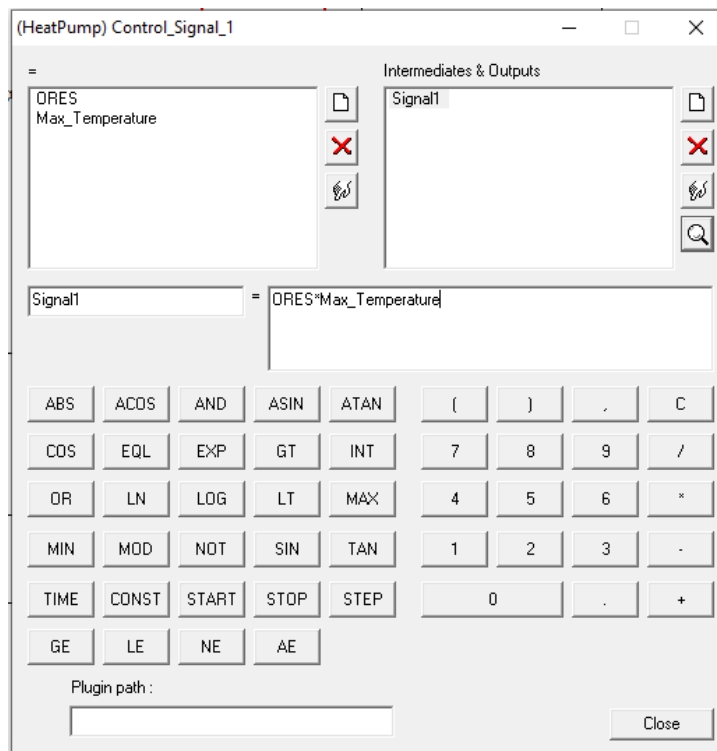
Εικόνα 4.29: Σύνδεση δοχείου αποθήκευσης με στοιχείο διακόπτη



Εικόνα 4.30: Σύνδεση στοιχείων Type14h και "Equation" για το ωράριο λειτουργίας

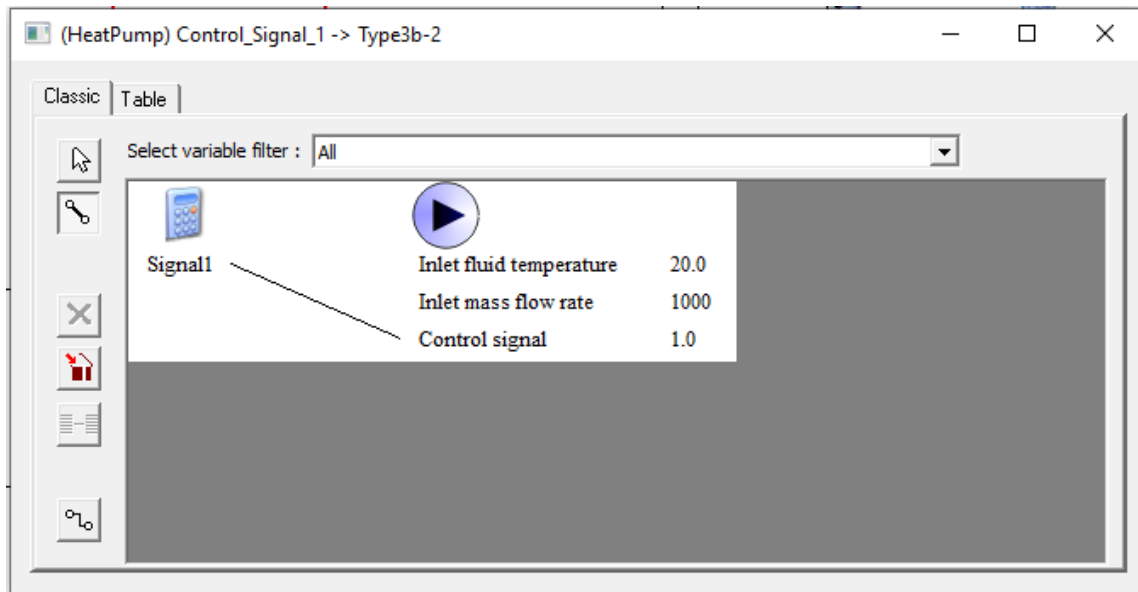


Εικόνα 4.31: Σύνδεση στοιχείου διακόπτη και στοιχείου “equation”

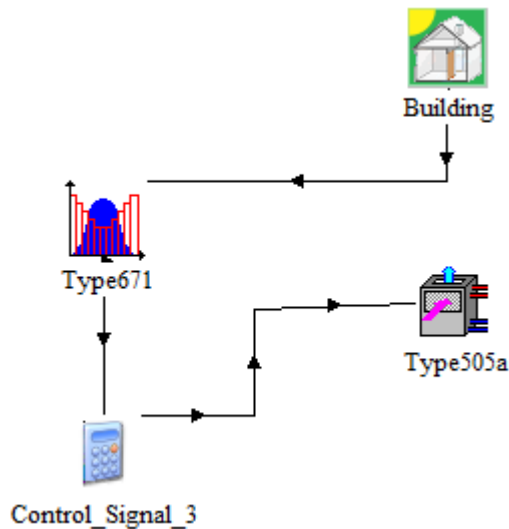


Εικόνα 4.32: Είσοδοι και έξοδοι στο στοιχείο “equation”

Η μεταβλητή εξόδου “Signal1” του στοιχείου Control_Signal_1 που είναι το γινόμενο των δυο εισόδων του, παίρνει τιμές 0 ή 1 και στέλνεται ως σήμα στη μεταβλητή εισόδου της αντλίας “Control Signal” η οποία καθορίζει αν η αντλία θα λειτουργεί ή όχι.

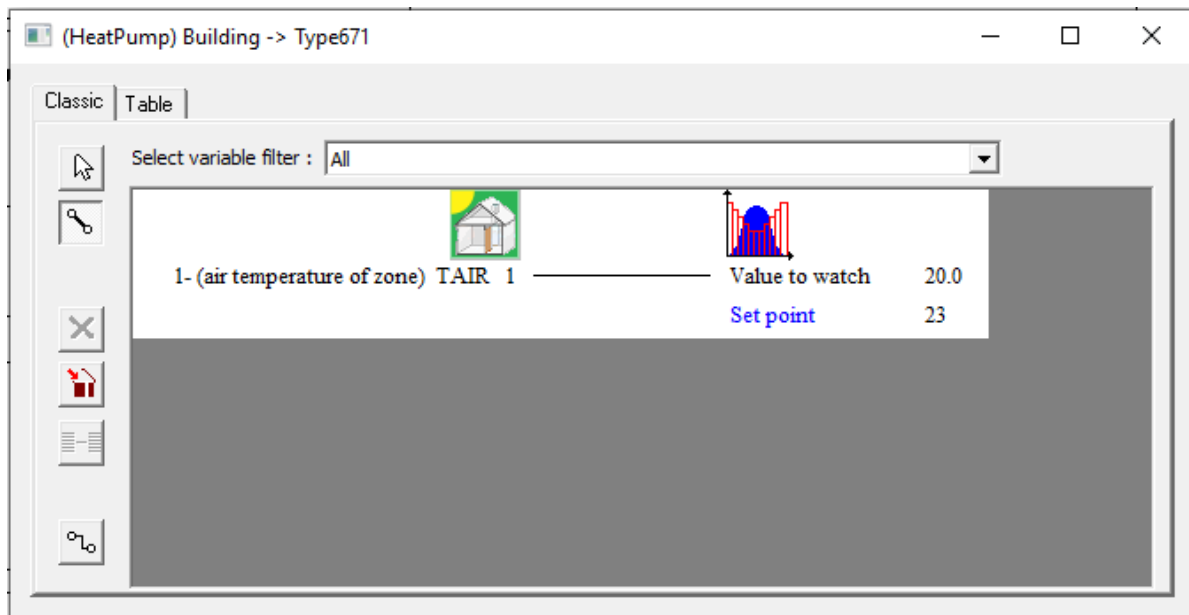


Εικόνα 4.33: Έλεγχος λειτουργίας κυκλοφορητή μέσω του στοιχείου equation (με το όνομα Control_Signal_1)

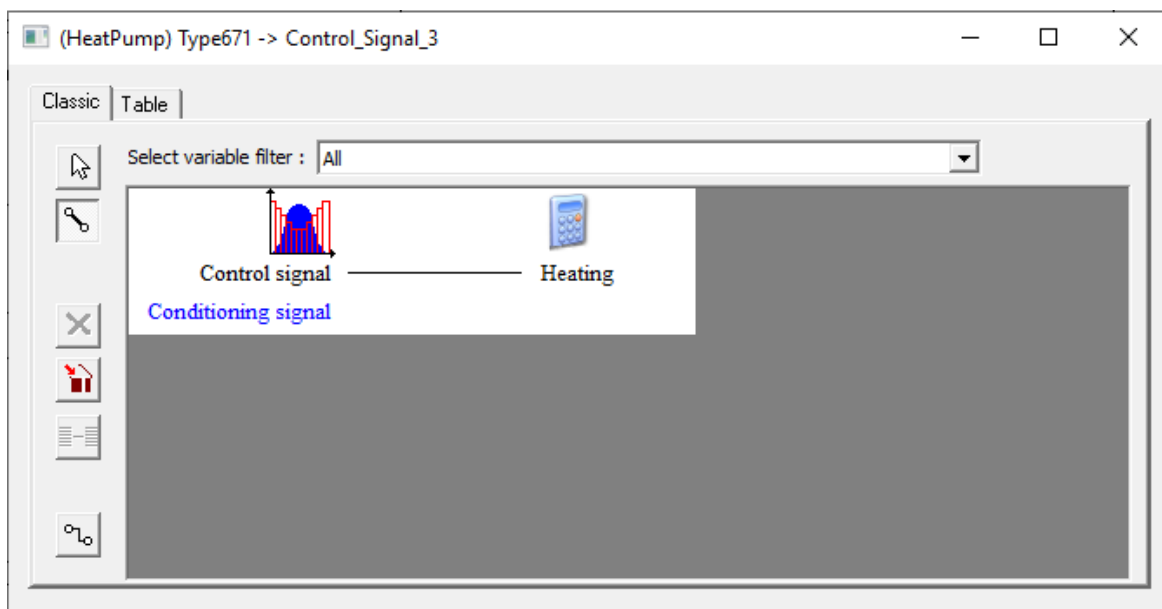


Εικόνα 4.34: Έλεγχος λειτουργίας (on/off) Αντλίας Θερμότητας

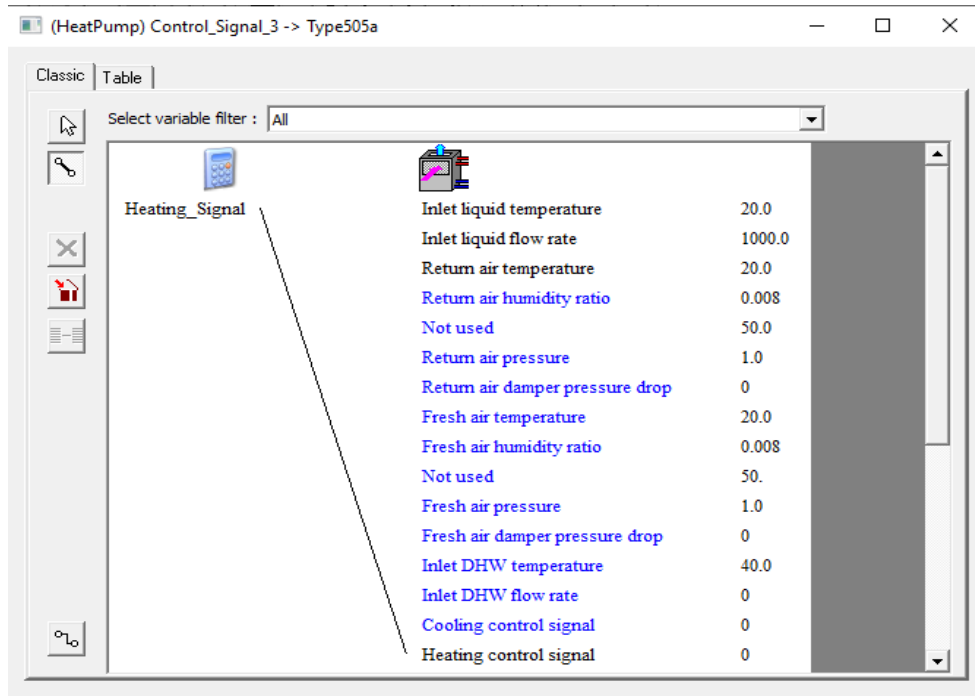
Η θερμοκρασία του κτιρίου συνδέεται με το στοιχείο Type671, το οποίο ελέγχει αν η θερμοκρασία αυτή είναι κάτω από όριο των 23 °C που βάλαμε (εικόνα 4.34). Το στοιχείο Type671, μέσω του στοιχείου Control_Signal_3 στέλνει σήμα στην αντλία θερμότητας για να λειτουργεί σε θέρμανση, όταν η θερμοκρασία του κτιρίου πέσει πιο χαμηλά από 23 °C. Σε αντίθετη, περίπτωση η αντλία θερμότητας θα απενεργοποιείται και δεν θα λειτουργεί. Αντίστοιχα, το στοιχείο Type671 στέλνει το ίδιο σήμα και στο στοιχείο Control_Signal_4 για τη ενεργοποίηση/απενεργοποίηση του κυκλοφορητή Type3b όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. (εικόνα 4.38).



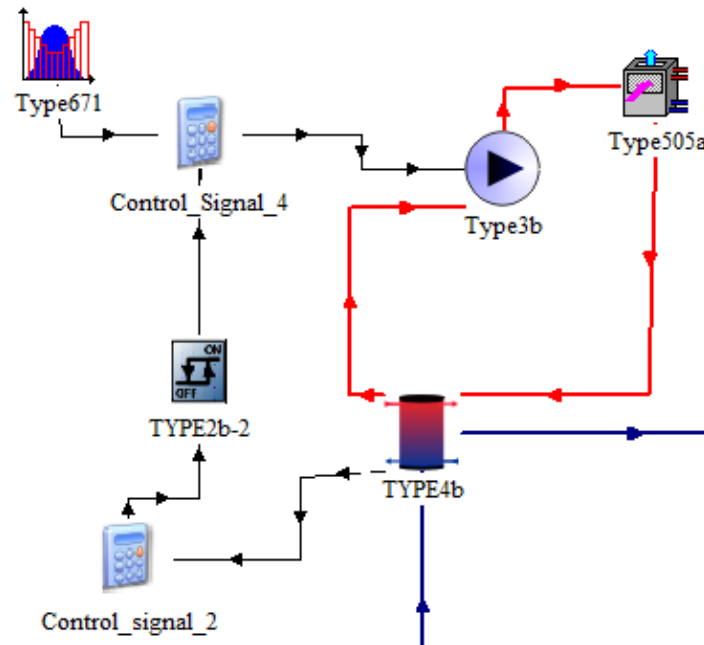
Εικόνα 4.35: Έλεγχος της θερμοκρασίας του σπιτιού μέσω του στοιχείου Type671



Εικόνα 4.36: Σύνδεση στοιχείου Type671 με το στοιχείο Heating με σκοπό τη θέρμανση ή όχι του σπιτιού



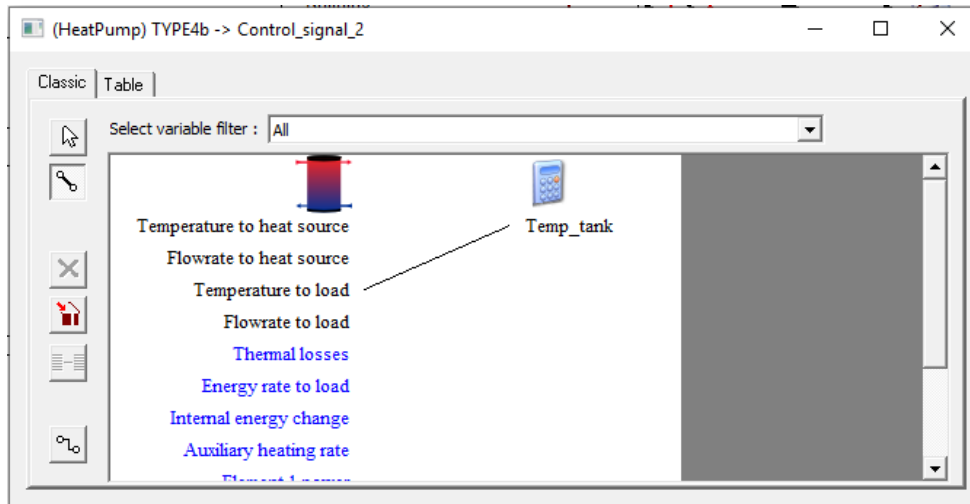
Εικόνα 4.37: Καταχώρηση σήματος στη αντλία θερμότητας για τη λειτουργία της σε θέρμανση



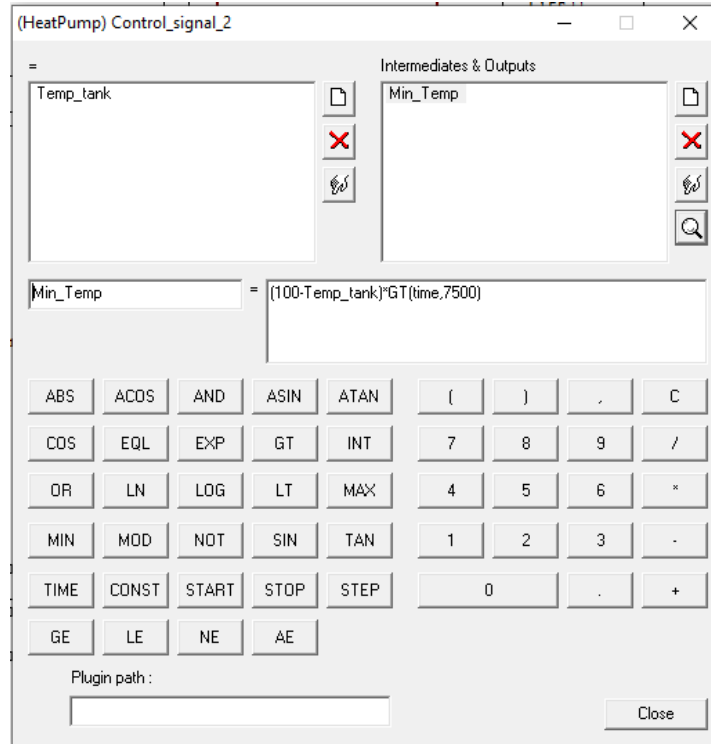
Εικόνα 4.38: Έλεγχος της λειτουργίας της εγκατάστασης

Στη εικόνα 4.38, παρουσιάζεται το σύστημα που είναι υπεύθυνο για τη διακοπή ή όχι της λειτουργίας όλου του κυκλώματος αντλίας θερμότητας με δοχείο αποθήκευσης. Ο έλεγχος αυτός γίνεται επειδή χωρίς αυτόν, η θερμοκρασία του δοχείου αποθήκευσης σε αρκετές περιπτώσεις έπαιρνε πολύ χαμηλές τιμές κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, κάτι το οποίο έπρεπε να διορθωθεί για τη σωστή λειτουργία του. Για αυτό, μέσω του στοιχείου

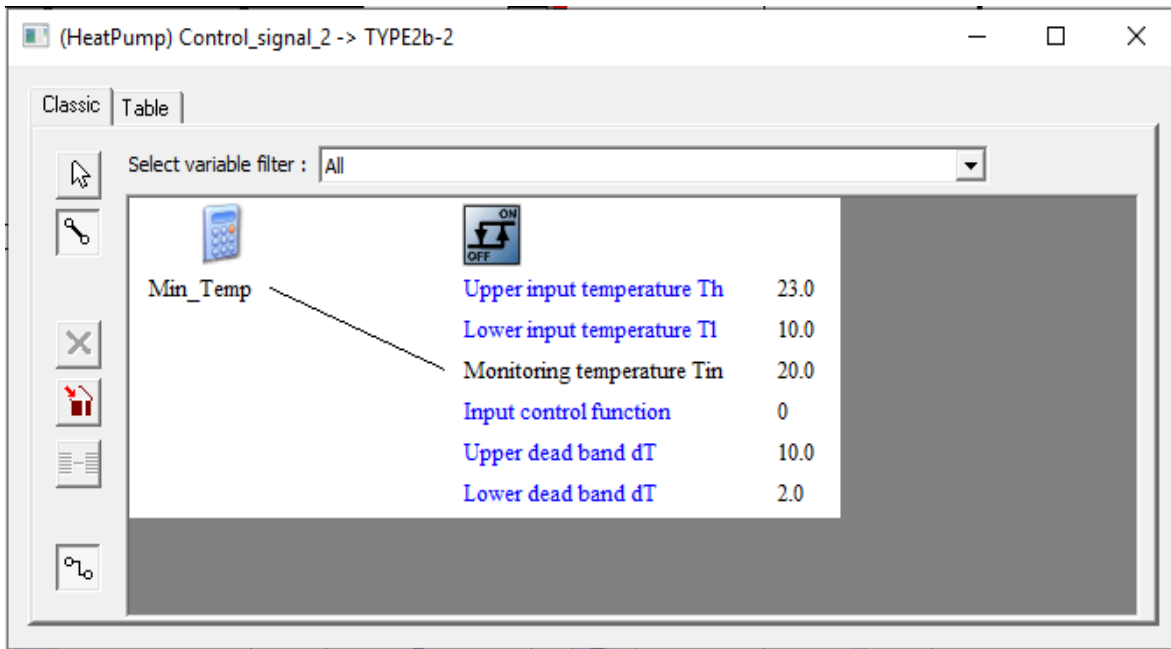
Control_signal_2 και Type2b-2 ελέγχεται, η θερμοκρασία του δοχείου αποθήκευσης ώστε να διατηρείται πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο. Συγκεκριμένα, εάν η θερμοκρασία του δοχείου αποθήκευσης φτάσει πολύ χαμηλά (κοντά στους 0 °C) , τότε η λειτουργία του κυκλοφορητή Type3b διακόπτεται μέχρι να ξανανέβει η θερμοκρασία του δοχείου. Ο έλεγχος αυτός αρχίζει να γίνεται μετά από κάποιο χρόνο που η λειτουργία του συστήματος έχει ήδη σταθεροποιηθεί.



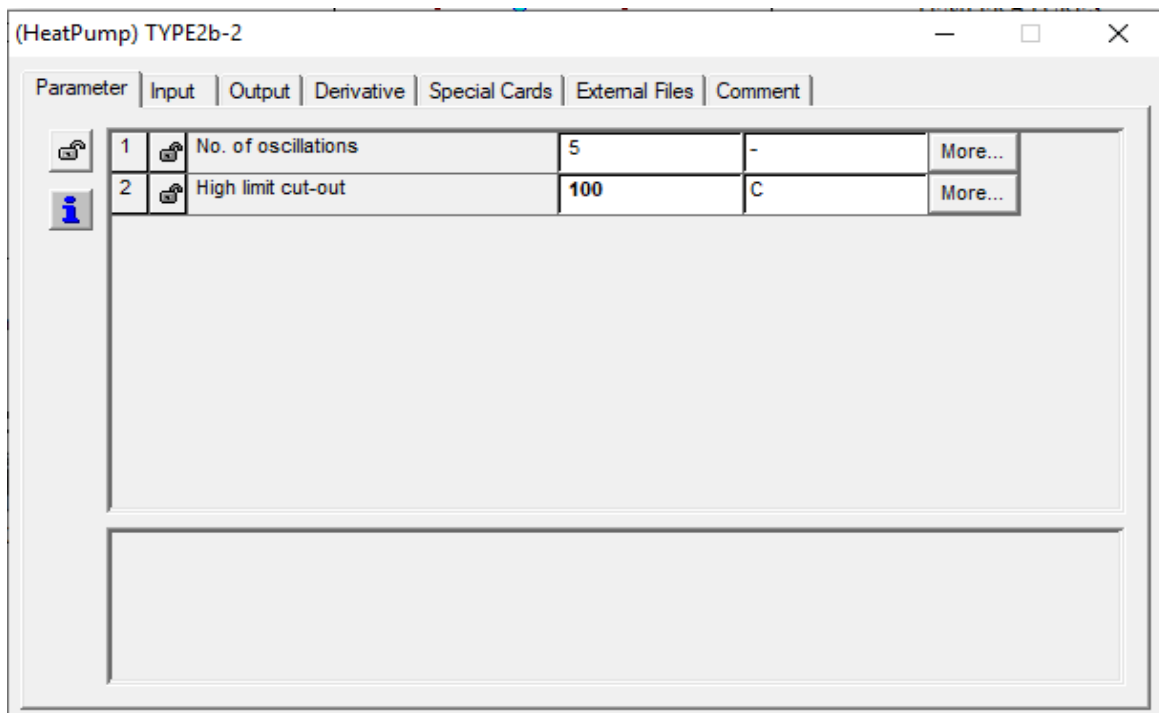
Εικόνα 4.39: Σύνδεση της θερμοκρασίας του δοχείου αποθήκευσης με το στοιχείο Control_Signal_2 με σκοπό το έλεγχο της



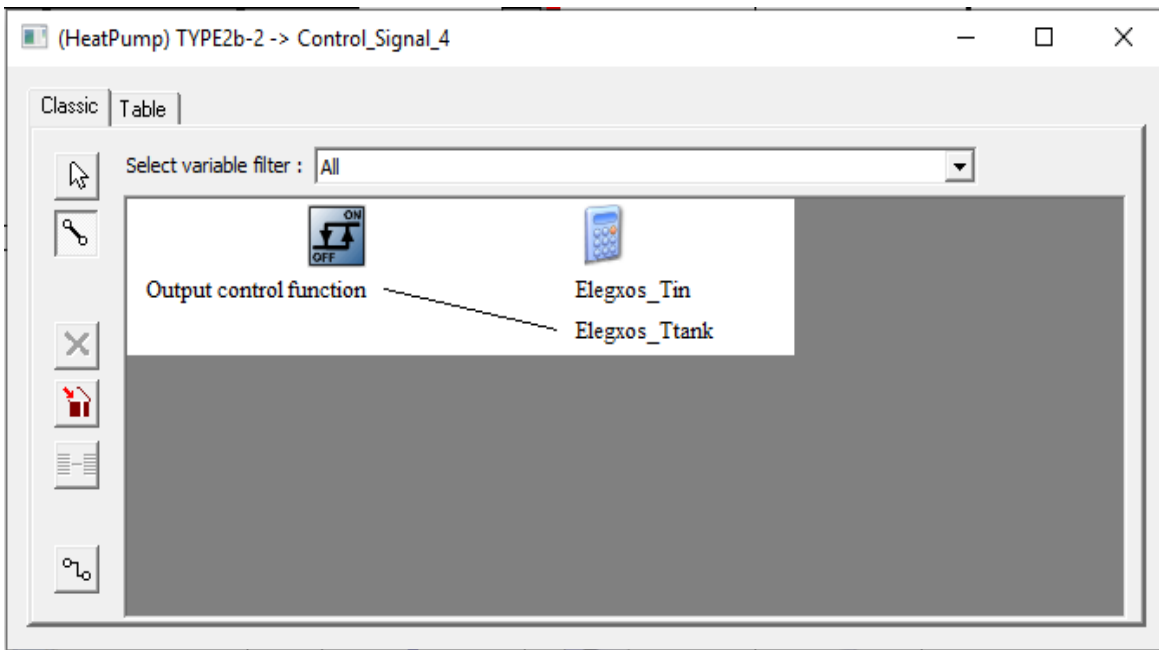
Εικόνα 4.40: Σύγκριση θερμοκρασίας του δοχείου με τη ελάχιστη θερμοκρασία που επιτρέπεται να έχει



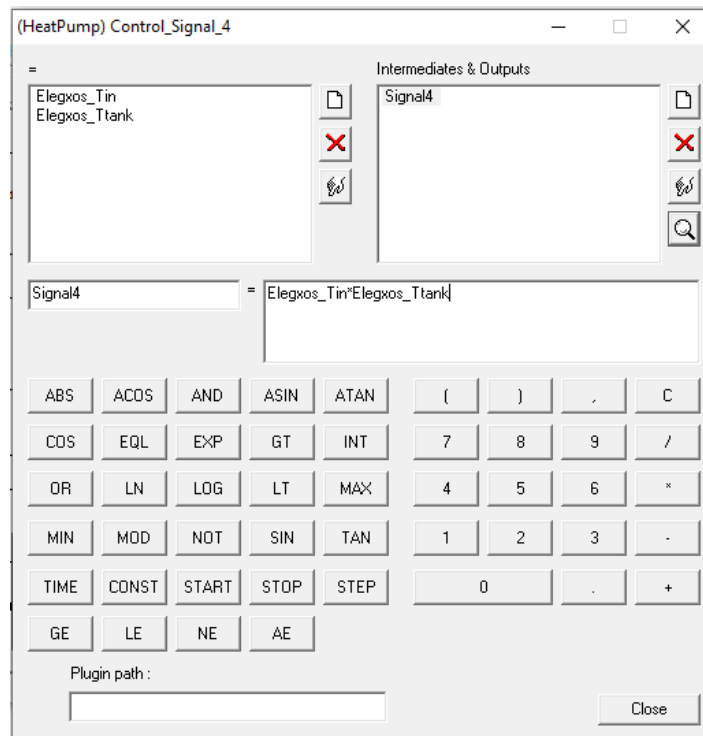
Εικόνα 4.41: Έλεγχος της θερμοκρασίας του δοχείου στο στοιχείο (διακόπτη) Type2b-2



Εικόνα 4.42: Παράμετροι του στοιχείου (διακόπτη) TYPE2b-2

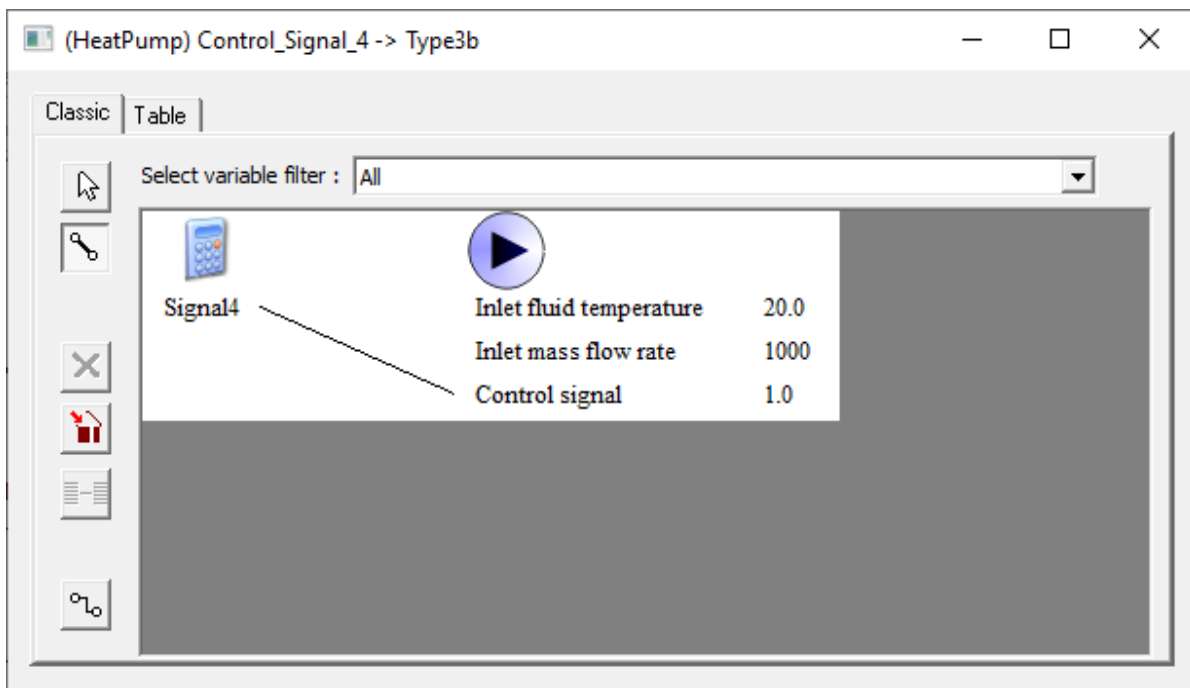


Εικόνα 4.43: Αποστολή σήματος από το διακόπτη στο στοιχείο Control_Signal_4



Εικόνα 4.44: Στοιχείο Control_Signal_4

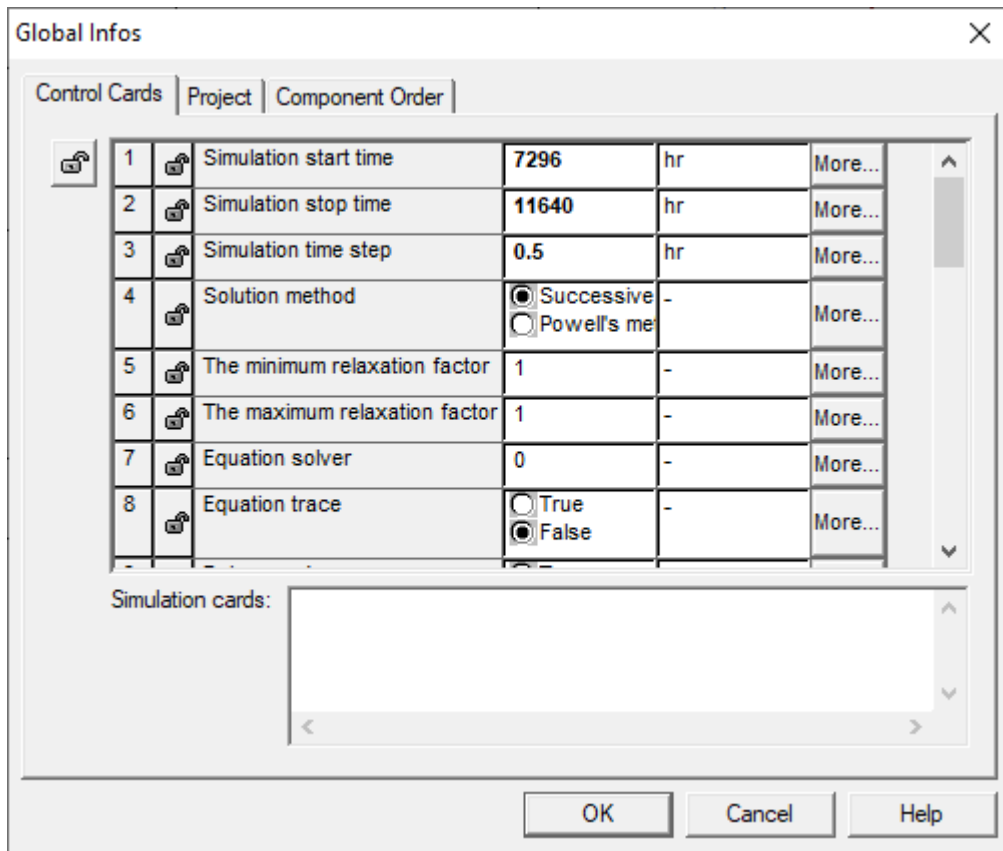
Ο κυκλοφορητής Type3b και άρα το κύκλωμα της Αντλίας Θερμότητας-δοχείου αποθήκευσης, θα σταματούν να δουλεύουν σε περίπτωση που το κτίριο έχει θερμοκρασία πάνω από 23°C και δηλαδή δεν χρειάζεται θέρμανση ή σε περίπτωση που η θερμοκρασία του δοχείου αποθήκευσης γίνει πολύ χαμηλή. Για να επιτευχθεί αυτό, ρυθμίζουμε τις μεταβλητές του στοιχείου Control_Signal_4 όπως φαίνεται στη εικόνα 4.44 και εικόνα 4.45.



Εικόνα 4.45: Σύνδεση στοιχείου Control_Signal_4 με το κυκλοφορητή Type3b

Τέλος, για τη εξαγωγή των αποτελεσμάτων του πιο πάνω συστήματος και τη δημιουργία διαγραμμάτων, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία εκτυπωτών τύπου Type 65d και Type 65c. Το στοιχείο equation με το όνομα “Convert_Units” χρειάστηκε για τη μετατροπή των μονάδων μέτρησης της ισχύς από kJ/hr σε kW. Ακόμη, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία Type24 (ολοκληρωτές) με σκοπό το υπολογισμό της συνολικής ηλεκτρικής που καταναλώνει η αντλία θερμότητας και θερμικής ενέργειας που δίνεται στο κτίριο κατά τη διάρκεια όλης της χρονικής περιόδου (Νοέμβριος μέχρι Απρίλιος). Άλλο ένα στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Type55 μέσω του οποίου υπολογίστηκαν η ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμές θερμοκρασίας εντός του κτιρίου. Η σύνδεση όλων αυτών των στοιχείων φαίνεται στη εικόνα 4.7.

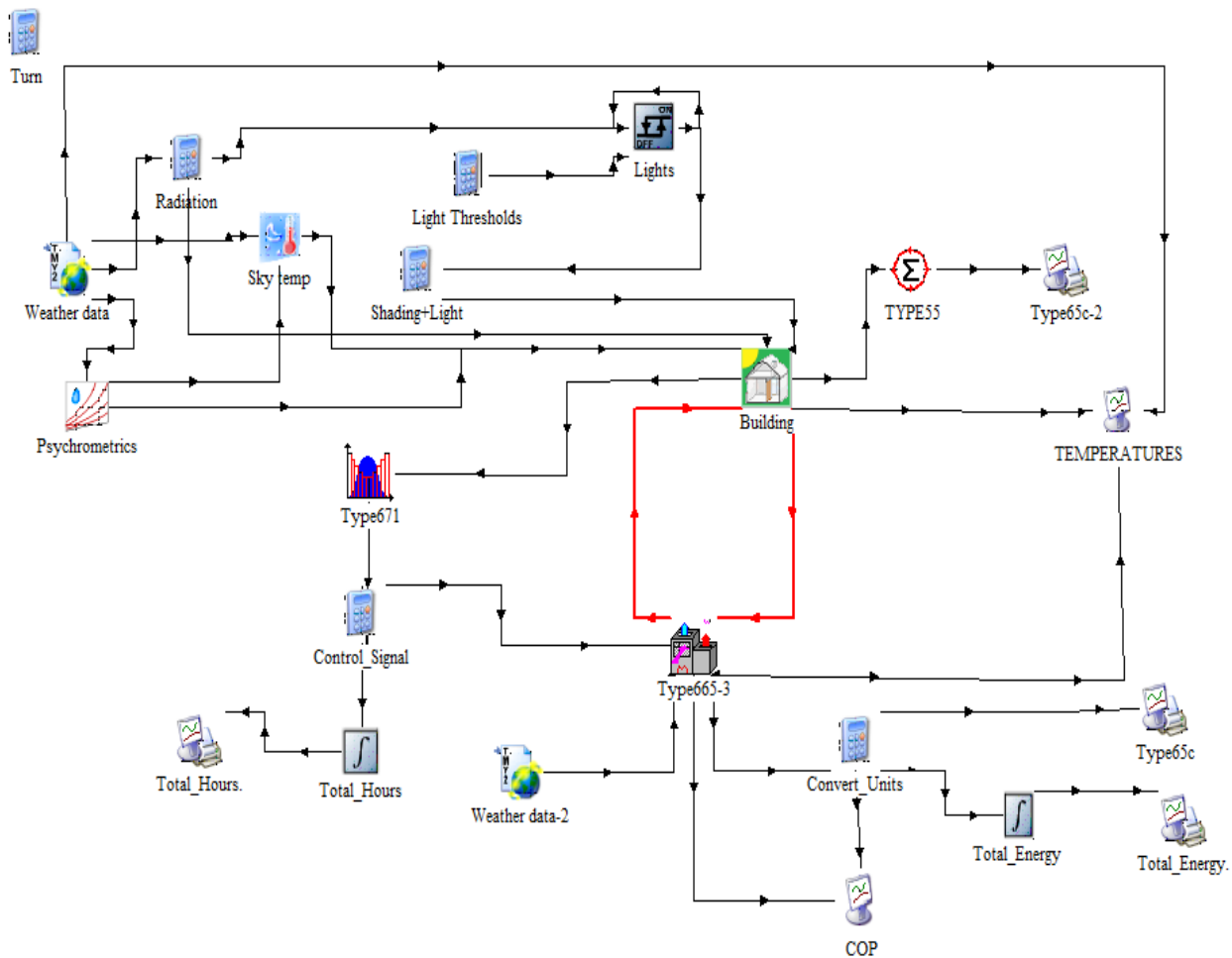
Μέσω των ρυθμίσεων του Control Cards που βρίσκεται στο μενού του Trnsys, επιλέγαμε κάθε φορά τη χρονική περίοδο που θέλαμε να προσομοιωθεί το σύστημα μας. Το βήμα σε όλες τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι 0.5 hour.



Εικόνα 4.46: Ρύθμιση προσομοίωσης για τη χρονική περίοδο Νοέμβριο-Απρίλιο με βήμα 0.5 hour

4.3 Προσομοίωση αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα στο πρόγραμμα Trnsys

Στο πρόγραμμα Trnsys, προσομοιώθηκε και η αντλία θερμότητας αέρα-αέρα για τη θέρμανση του ίδιου κτιρίου. Ουσιαστικά, το κύκλωμα της αυτής της εγκατάστασης είναι σχεδόν το ίδιο με πριν, με τη διαφορά ότι αφαιρέθηκαν οι κυκλοφορητές, το δοχείο αποθήκευσης και οι ηλιακοί συλλέκτες.



Εικόνα 4.47: Προσομοίωσης αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα στο πρόγραμμα Trnsys

Ο σκοπός της προσομοίωσης αυτής, είναι για να γίνει στη συνέχεια σύγκριση της αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα σε σχέση με την Η.Υ.Α.Θ ως προς τη ενεργειακή τους απόδοση και το συνολικό τους κόστος.

5. Βελτιστοποίηση σε κτίρια και πρόγραμμα βελτιστοποίησης GenOpt

Σε αυτό το κεφάλαιο, αρχικά παρουσιάζονται βασικές έννοιες και μέθοδοι βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται σε προβλήματα προσομοίωσης κτιρίων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται παράγοντες που επηρεάζουν γενικά το χρόνο επίλυσης και τη ακρίβεια της λύσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Τέλος, γίνεται εισαγωγή στα προγράμματα GenOpt και TRNopt και αναφέρονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται.

5.1 Χρήσιμες έννοιες για προβλήματα βελτιστοποίησης

Βασικές έννοιες σχετικά με τη βελτιστοποίηση ενός προβλήματος και για τις οποίες θα γίνει αναφορά στη συνέχεια είναι η εξής:

Αντικειμενική συνάρτηση (Objective Function) είναι μια συνάρτηση που εκφράζει ένα μέγεθος που εξαρτάται από τις μεταβλητές σχεδιασμού και η ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση αυτού του μεγέθους αποτελεί το στόχο του προβλήματος. Εάν στόχος είναι η ελαχιστοποίηση αυτού του μεγέθους, τότε αυτή η συνάρτηση ονομάζεται συνάρτηση κόστους (cost function). Για παράδειγμα, μια συνάρτηση κόστους μπορεί να είναι το συνολικό κόστος λειτουργίας ενός κτιρίου.

Μεταβλητές σχεδιασμού (design variables) ή ελεύθερες μεταβλητές (free variables) είναι οι μεταβλητές ενός προβλήματος που είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και λαμβάνουν ακέραιες ή πραγματικές τιμές. Στόχος είναι να δοθούν κατάλληλες τιμές στις μεταβλητές αυτές με σκοπό τη βελτιστοποίηση του προβλήματος.

5.2 Περιγραφή μεθόδων βελτιστοποίησης σε προβλήματα προσομοίωσης κτιρίων

Στο πίνακα 5.1 παρουσιάζονται ανά κατηγορία, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται σε διάφορα προβλήματα κτιρίων και δίνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι πιο δημοφιλείς αλγόριθμοι και αρκετά ικανοί σε προβλήματα βελτιστοποίησης σε κτίρια είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithm), οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (evolutionary algorithm) και οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης με σμήνος σωματιδίων (Particle Swarm Optimization -PSO).

Κατηγορία	Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα	Αλγόριθμοι
Μέθοδοι άμεσης αναζήτησης Direct search family (including generalized pattern search-GPS methods)	<ul style="list-style-type: none"> • Μέθοδοι απαλλαγμένες από παραγώγους • Συνήθως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και αν η συνάρτηση του κόστους έχει μικρές ασυνέχειες • Μερικές μέθοδοι δεν μπορούν να δώσουν ακριβώς τη βέλτιστη λύση • Επηρεάζονται από τοπικά ελάχιστα • Οι μέθοδοι Coordinate search έχουν συχνά προβλήματα με μη ομαλές συναρτήσεις 	<ul style="list-style-type: none"> • Hooke-Jeeves algorithms • Coordinate search algorithm • Mesh adaptive search algorithm • Generating set search algorithm • Simplex algorithms
Μέθοδοι βασισμένοι στη κλίση της συνάρτησης (Gradient-based family)	<ul style="list-style-type: none"> • Γρήγορη σύγκλιση σε ένα σημείο • Ευαίσθητες σε ασυνέχειες της αντικειμενικής συνάρτησης • Ευαίσθητες σε συναρτήσεις με τοπικά ακρότατα 	<ul style="list-style-type: none"> • Bounded BFGS • Levenberg Marquardt algorithm • Discrete Armijo Gradient algorithm • CONLIN method
Στοχαστικές μέθοδοι βασισμένες στο πληθυσμό (Meta-heuristic method Stochastic population methods)	<ul style="list-style-type: none"> • Μπορούν να αναζητήσουν πολύ μεγάλους χώρους αναζήτησης • Δεν κολλάνε σε τοπικά ακρότατα • Μεγάλος αριθμός αξιολογήσεων-επαναλήψεων • Δεν εγγυούνται ότι θα βρουν το καθολικό ακρότατο 	<ul style="list-style-type: none"> • Εξελικτικοί αλγόριθμοι • Γενετικοί αλγόριθμοι • Swarm intelligence methods • Particle Swarm Optimization (PSO) • Ant colony algorithm • Bee colony algorithm
Μετα-ευριστικές μέθοδοι (Meta-heuristic method Trajectory search family)	<ul style="list-style-type: none"> • Εύκολη η εφαρμογή τους ακόμα και για σύνθετα προβλήματα • Κατάλληλες για διακριτά προβλήματα βελτιστοποίησης • Δεν είναι δυνατόν να διαπιστωθεί εάν η λύση που έχει ληφθεί είναι βέλτιστη ή όχι 	<ul style="list-style-type: none"> • Simulated annealing • Tabu search • Hill climbing method
Υβριδικές μέθοδοι (Hybrid family)	Συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων	<ul style="list-style-type: none"> • PSO-Hooke Jeeves • GA-GPS, CMA-ES/HDE • HS-BFGS algorithm

Πίνακας 5.1: Μέθοδοι βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται στα κτίρια [5.1]

Από έρευνα που έγινε με σκοπό τη σύγκριση αλγορίθμων, διαπιστώθηκε ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να βρουν μια αρκετά καλή λύση σε μικρό χρονικό διάστημα χωρίς όμως να μπορούν να εγγυηθούν τη καλύτερη λύση[5.2]. Το ίδιο ισχύει και για το υβριδικό αλγόριθμο (hybrid algorithm), ο οποίος όμως, μερικές φορές είναι πιο πιθανό να βρει την καλύτερη λύση όμως σε μεγαλύτερο χρόνο. Επίσης, οι συγκεκριμένοι αυτοί αλγόριθμοι δεν εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα και για αυτό είναι ικανοί στη αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων με πολλά τοπικά ακρότατα όπως συχνά παρατηρείται στην προσομοίωση κτιρίων.

5.3 Επιλογή κατάλληλης μεθόδου βελτιστοποίησης

Η επιλογή του αλγόριθμου βελτιστοποίησης για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα είναι κρίσιμη ώστε να αποδώσει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα στο λιγότερο δυνατό χρόνο δηλαδή να συγκλίνει γρήγορα κοντά στη βέλτιστη λύση. Η παροχή ενός γενικού κανόνα για την επιλογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης είναι γενικά ανέφικτη λόγω του της πολυπλοκότητας και της ποικιλομορφίας των προβλημάτων βελτιστοποίησης κτιρίων.

Οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τη μέθοδο βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα πρόβλημα είναι οι εξής [5.3,5.4] :

- ο τύπος των μεταβλητών σχεδιασμού του προβλήματος (συνεχείς τιμές ή διακριτές ή και τα δυο)
- η παρουσία περιορισμών στην αντικειμενική συνάρτηση
- ο τύπος της αντικειμενικής συνάρτησης (αν είναι γραμμική ή κυρτή ή ασυνεχείς). Για παράδειγμα, αν στη αντικειμενική συνάρτηση υπάρχουν ασυνέχειες τότε η μέθοδος βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί δεν θα πρέπει να είναι “ευαίσθητη” σε τέτοιες ασυνέχειες γιατί αλλιώς θα μας οδηγήσει σε λάθος αποτέλεσμα.
- ο αριθμός των τοπικών ακρότατων. Η μέθοδος πρέπει ικανή να βρει το καθολικό ακρότατο της αντικειμενικής συνάρτησης και να μην “εγκλωβίζεται” σε τοπικά ακρότατα
- Μερικές μέθοδοι για να λειτουργήσουν σωστά είναι σημαντικό να δοθούν κατάλληλες αρχικές τιμές στις μεταβλητές σχεδιασμού

5.4 Επιλογή κατάλληλων μεταβλητών σχεδίασης

Ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών σχεδίασης καθορίζεται αρχικά την πολυπλοκότητα του προβλήματος και μετά από την ικανότητα της αλγόριθμου βελτιστοποίησης στο να βρει τη λύση.

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης δεν έχουν κάποιο περιορισμό ως προς τον αριθμό των μεταβλητών σχεδίασης, όμως ένας πρακτικός κανόνας είναι ότι οι μεταβλητές σχεδίασης πρέπει να είναι συνολικά κάτω από 10. [5.5] Ακόμη, όσο πιο πολλές οι μεταβλητές σχεδίασης, τόσο πιο σύνθετο γίνεται το πρόβλημα και ο αλγόριθμος τόσο πιο δύσκολα και πιο πολύ χρόνο θα χρειάζεται για να βρει τη καλύτερη λύση.

Το υπολογιστικό κόστος (χρόνος) κατά τη βελτιστοποίηση αυξάνεται επίσης σημαντικά (εκθετικά), καθώς στο πρόβλημα αντιμετωπίζονται περισσότερες διακριτές μεταβλητές [5.6]. Οι διακριτές μεταβλητές γενικά καθιστούν το πρόβλημα βελτιστοποίησης μη κυρτό και ασυνεχές, και επομένως πολύ πιο δύσκολο να λυθεί [5.6]. Για αυτό, συνιστάται όπου είναι δυνατό να αποφεύγονται οι διακριτές μεταβλητές κατά τη λύση προβλημάτων βελτιστοποίησης .

5.5 Πρόγραμμα βελτιστοποίησης GenOpt

Το GenOpt είναι ένα πρόγραμμα βελτιστοποίησης γραμμένο σε γλώσσα Java, δεν εξαρτάται από αλλά προγράμματα και αυτό το καθιστά εφαρμόσιμο σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων βελτιστοποίησης. Χρησιμοποιείται κυρίως σε προβλήματα βελτιστοποίησης σε κτίρια όπως για προβλήματα ελαχιστοποίησης του λειτουργικού κόστους και για προβλήματα ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας.

Το GenOpt μπορεί να συνδυαστεί με οποιοδήποτε πρόγραμμα προσομοίωσης (π.χ. TRNSYS, EnergyPlus, Dymola). Η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του GenOpt και του προγράμματος προσομοίωσης γίνεται μόνο με αρχεία κειμένου.

Στόχος του GenOpt είναι ο προσδιορισμός των τιμών των μεταβλητών σχεδιασμού για την ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους, η τιμή της οποίας υπολογίζεται από το εξωτερικό πρόγραμμα προσομοίωσης.

Για να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση, το GenOpt δημιουργεί αυτόματα αρχεία εισόδου του προγράμματος προσομοίωσης. Με τη εκκίνηση του GenOpt, αρχίζει να λειτουργεί το πρόγραμμα προσομοίωσης και μόλις τελειώσει η προσομοίωση, το GenOpt διαβάζει τη τιμή της συνάρτησης κόστους από το αρχείο αποτελεσμάτων του προγράμματος προσομοίωσης, ελέγχει για πιθανά λάθη της προσομοίωσης και στη συνέχεια καθορίζει ένα νέο σύνολο παραμέτρων εισόδου για να αρχίσει η επόμενη προσομοίωση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί το ελάχιστο της συνάρτησης κόστους.

Οι μεταβλητές σχεδιασμού στο GenOpt μπορούν να είναι συνεχείς μεταβλητές (συνήθως με κατώτατα και ανώτερα όρια), διακριτές μεταβλητές ή και οι δύο, συνεχείς και διακριτές μεταβλητές. Οι περιορισμοί στις εξαρτώμενες μεταβλητές μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας λειτουργίες ποινών ή φραγμών.

Κάποια από τα κύρια πλεονεκτήματα του προγράμματος GenOpt είναι τα εξής:

- Χρησιμοποιεί τεχνικές που κάνουν αυτόματα τη βελτιστοποίηση χωρίς να χρειάζεται η παρέμβαση του χρήστη κατά τη λειτουργία του προγράμματος.
- Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης από το πρόγραμμα αυτό ή να εφαρμόσει έναν προσαρμοσμένο αλγόριθμο χωρίς να χρειάζεται να συναρμολογήσει και να κατανοήσει ολόκληρο το περιβάλλον βελτιστοποίησης.
- Δίνει συνήθως μια καλή λύση σε σχετικά μικρό χρόνο σε σύνθετα προβλήματα στα οποία η συνάρτηση κόστους απαιτεί μεγάλο χρόνο για το υπολογισμό της, περιλαμβάνει πολλές ανεξάρτητες μεταβλητές και η οποία μπορεί να βελτιστοποιηθεί μόνο μέσω αριθμητικής βελτιστοποίησης. Σε αντίθεση με τις παραμετρικές μελέτες οι οποίες αποφέρουν μόνο μερική βελτίωση και απαιτούν υψηλό χρόνο εργασίας σε τέτοιου είδους προβλήματα.

- Έχει αναπτυχθεί κυρίως για προβλήματα βελτιστοποίησης, στα οποία δεν υπάρχουν αναλυτικές πληροφορίες της συνάρτησης του κόστους όπως για παράδειγμα να μην είναι διαθέσιμες παράγωγοι (κλίσεις) της [5.3]. Σημειώνεται όμως ότι για προβλήματα που η κλίση της συνάρτησης του κόστους είναι διαθέσιμη ή για προβλήματα γραμμικού προβληματισμού υπάρχουν λογισμικά που είναι πιο αποτελεσματικά.

5.6 Λειτουργία προγράμματος TRNOpt

Το TRNOpt είναι ένα πρόγραμμα που διατίθεται στη βιβλιοθήκη βελτιστοποίησης της TESS του προγράμματος Trnsys υπό μορφή στοιχείου (component) και ο ρόλος του είναι να συνδέει τη λειτουργία του προγράμματος προσομοίωσης TRNSYS με το πρόγραμμα βελτιστοποίησης GenOpt. Λειτουργεί δηλαδή ως περιβάλλον διεπαφής (interface) μεταξύ αυτών των δυο προγραμμάτων.

Χρησιμοποιείται για τη περίπτωση που είναι επιθυμητή η βελτιστοποίηση ενός συστήματος το οποίο έχει προσομοιωθεί στο πρόγραμμα Trnsys. Για να το πετύχει αυτό, αρκεί ο χρήστης να καταχωρήσει στο πρόγραμμα TRNOpt ένα αρχείο εισόδου, τις μεταβλητές για τις οποίες θέλει να γίνει η βελτιστοποίηση, τα όρια των τιμών που μπορούν να πάρουν αυτές οι μεταβλητές, τη συνάρτηση κόστους (αντικειμενική συνάρτηση) και να επιλέξει τη μέθοδο βελτιστοποίησης. Αφού καταχωρηθούν όλα αυτά, ο χρήστης μεταφέρεται μέσω του TRNOpt στο περιβάλλον του GenOpt για να αρχίσει η λειτουργία του και δηλαδή η βελτιστοποίηση. Τα αποτελέσματα καταγράφονται σε αρχεία τύπου κειμένου. Η πιο πάνω διαδικασία περιγράφεται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 6.

➤ Περιγραφή των μεθόδων του προγράμματος TRNOpt που χρησιμοποιήθηκε

Πιο κάτω περιγράφονται οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσω του στοιχείου TrnOpt. Να σημειωθεί ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι γενικά θεωρούνται αποδοτικοί δεν είναι διαθέσιμοι από αυτό το πρόγραμμα [5.7].

Οι αλγόριθμοι GPS Hooke Jeeves και GPS Coordinate Search είναι μέλη της οικογένειας αλγορίθμων γενικής αναζήτησης (GPS). Και οι δύο αλγόριθμοι μπορούν να εκτελεστούν χρησιμοποιώντας πολλαπλά σημεία εκκίνησης για να αυξηθεί η πιθανότητα εύρεσης του καθολικού ακρότατου εάν η συνάρτηση κόστους έχει αρκετά τοπικά ακρότατα. Αυτοί οι 2 αλγόριθμοι καθώς και ο αλγόριθμος Simplex algorithm of Nelder and Mead μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης με συνεχείς ανεξάρτητες μεταβλητές και όχι για μεταβλητές με διακριτές τιμές.

Οι αλγόριθμοι PSOCC, PSOCC Mesh, and PSOIW είναι μέλη της οικογένειας αλγορίθμων PSO (Particle Swarm Optimization), οι οποίοι είναι παγκόσμιοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης με συνεχείς ή και ανεξάρτητες διακριτές μεταβλητές. Ο υβριδικός γενικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης (Hybrid Algorithm) είναι ένας συνδυασμός των αλγορίθμων PSO και Hooke-Jeeves. Ο υβριδικός

αλγόριθμος, αρχικά κάνει μια βελτιστοποίηση με σμήνος σωματιδίων (PSO) για συνεχείς και διακριτές ανεξάρτητες μεταβλητές και στη συνέχεια μεταβαίνει στον αλγόριθμο αναζήτησης γενικευμένου μοτίβου Hooke-Jeeves για να κάνει μικρές αλλαγές στις συνεχείς ανεξάρτητες μεταβλητές ώστε να τις βελτιώσει.

Ασυνέχειες στη συνάρτηση του κόστους μπορεί να προκαλέσουν ασταθής συμπεριφορά των αλγορίθμων βελτιστοποίησης που έχουν ως αποτέλεσμα την αποτυχία και δυσμενείς επιπτώσεις στο σύγκλιση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Ένας τέτοιος αλγόριθμος βελτιστοποίησης είναι ο αλγόριθμος Hooke-Jeeves. Επίσης, για τον ίδιο λόγο, μέθοδοι όπως οι Discrete Armijo Gradient algorithm οι οποίες δουλεύουν με πεπερασμένες διαφορές και στηρίζονται στη παράγωγο της αντικειμενικής συνάρτησης δεν συνιστάται να χρησιμοποιούνται για τη επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης κτιρίων. Σε αντίθεση με τις δυο πάνω μεθόδους, οι υβριδικοί αλγόριθμοι παρουσιάζουν αξιοσημείωτη ικανότητα αντιμετώπισης τέτοιων αντικειμενικών συναρτήσεων με ασυνέχειες.

Σημειώνεται ότι στο πρόγραμμα TRNopt, υπάρχει και η παραμετρική μέθοδος η οποία εξετάζει όλο το σύνολο των υποψήφιων λύσεων για να βρει τη βέλτιστη. Δηλαδή, σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου, αλλάζει η τιμή της μόνο μιας μεταβλητής σχεδιασμού χωρίς να αλλάζουν οι υπόλοιπες. Για αυτό, αυτή η μέθοδος είναι αποδοτική όμως είναι και πολύ αργή.

Βιβλιογραφία 5^{ου} κεφαλαίου

[5.1]. Nguyen A. T., Reiter S., Rigo P., A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis, Applied Energy 2014

[5.2]. Wetter, M. and Wright, J. A. A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for non-smooth simulation-based optimization. Building and Environment.

[5.3] Wetter, M. GenOpt, Generic optimization program - User manual, version 3.1.1. ,Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016

[5.4] Nielsen, T. R. Optimization of buildings with respect to energy and indoor environment. PhD thesis, Danmarks Techniske Universitet, 2002.

[5.5] Wetter, M. GenOpt, Generic optimization program - User manual, version 3.0.0. Technical report LBNL-5419. s.l. : Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009

[5.6] Frontline Systems, Inc. Premium Solver platform for Mac: User guide. Incline Village, NV : Frontline Systems, Inc., 2011

[5.7] Vasileios Machairas, Aris Tsangrassoulis, Kleo Axarli, "Algorithms for optimization of building design: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014.

6. Βελτιστοποίηση του συστήματος μέσω των προγραμμάτων TRNSYS και GenOpt

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι απαραίτητες ρυθμίσεις που πρέπει να γίνουν στο πρόγραμμα του Trnsys (στο οποίο έχει προσομοιωθεί ήδη το σύστημα της Η.Υ.Α.Θ.) για να είναι εφικτή η βελτιστοποίηση δηλαδή η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της εγκατάστασης. Στη συνέχεια, θα αναφερθεί ο τρόπος με τον οποίο συνδέεται το πρόγραμμα Trnsys και το GenOpt και εξηγούνται οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν για να γίνει η βελτιστοποίηση.

6.1 Ελαχιστοποίηση του κόστους της εγκατάστασης

Στόχος της χρήσης του προγράμματος GenOpt είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους της συστήματος της Η.Υ.Α.Θ. , με τη επιλογή κατάλληλου εμβαδού συλλεκτικής επιφάνειας και όγκου του δοχείου αποθήκευσης. Να σημειωθεί ότι σε αυτό το κόστος δεν συμπεριλαμβάνονται το αρχικό κόστος της αντλίας θερμότητας και το κόστος σύνδεσης των στοιχείων της εγκατάστασης (π.χ. κόστος κυκλοφορητών), καθώς αυτά αποτελούν ένα σταθερό κόστος που δεν αφορά τη βελτιστοποίηση.

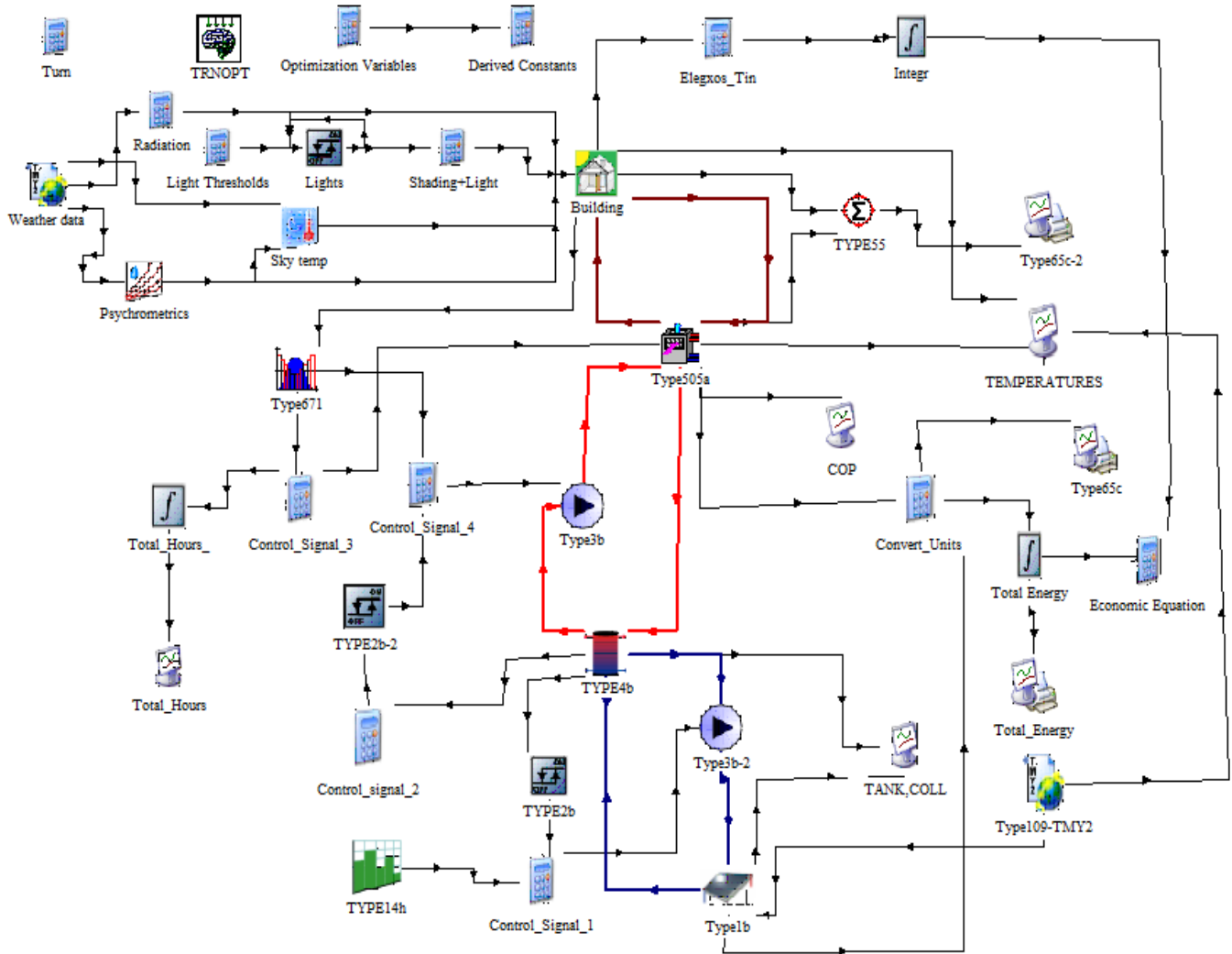
Ως συνολικό κόστος της εγκατάστασης θεωρήθηκε το άθροισμα των πιο κάτω:

- I. Κόστος Ηλιακών Συλλεκτών: Το κόστος ηλιακών συλλεκτών υπολογίζεται από το γινόμενο του εμβαδού επιφάνειας των συλλεκτών επί το κόστος ανά m^2 συλλέκτη, το οποίο θεωρήθηκε ίσο με 130 €/m^2
- II. Κόστος Δοχείου αποθήκευσης: Το κόστος του δοχείου αποθήκευσης δίνεται από το γινόμενο του όγκου του (m^3) επί το κόστος ανά m^3 κατασκευής του δοχείου, το οποίο θεωρήθηκε ίσο με 750 €/m^3
- III. Κόστος Λειτουργίας: Υπολογίζεται από το γινόμενο των πιο κάτω μεγεθών:
 - κόστος της κιλοβατώρας [kWh/€]: Θεωρήθηκε ίσο με 0.17 kWh/€
 - Συνολική Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας από του συστήματος για τη περίοδο Νοέμβριος-Απρίλιος [kWh/χρόνο]: Υπολογίζεται μέσω προσομοίωσης του συστήματος στο πρόγραμμα Trnsys
 - Συντελεστής R, για τη αναγωγή του κόστους λειτουργίας στη σημερινή κατάσταση που δίνεται από τη σχέση:

$$R = \sum_{i=1}^{25} \frac{1}{(1+r)^i} = \frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N} \quad (6.1)$$

Όπου N είναι η διάρκεια ζωής της εγκατάστασης που θεωρήθηκε 25 χρόνια και r το επιτόκιο αναγωγής που θεωρήθηκε ίσο με 3% και σταθερό για όλα τα χρόνια. Μέσω της πιο πάνω σχέσης, ο συντελεστής R υπολογίστηκε ίσως με 17.413

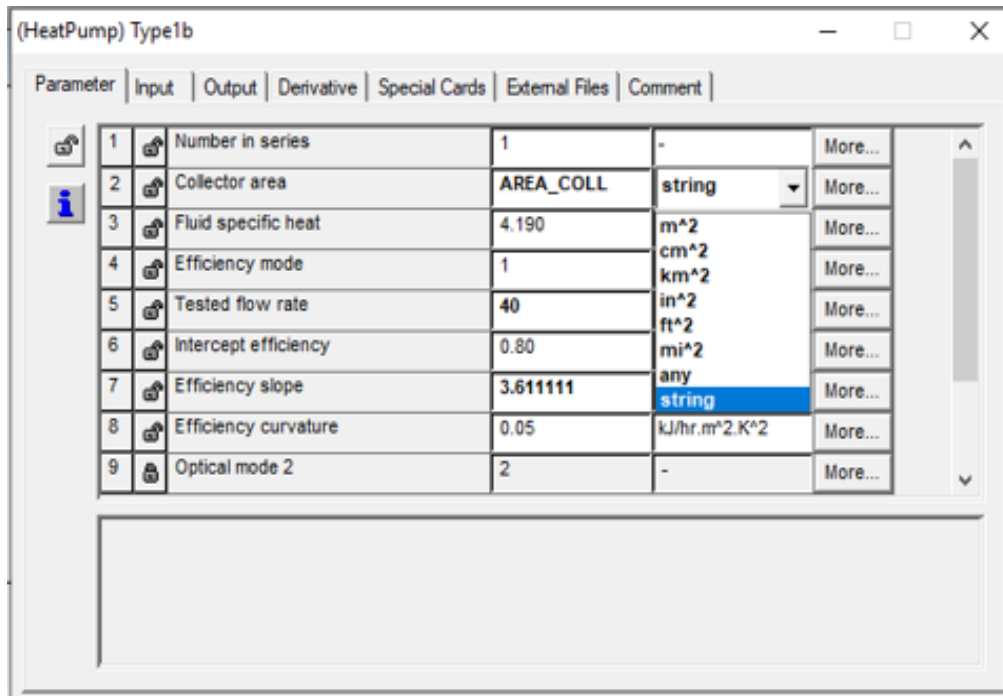
6.2 Προσαρμογή του κυκλώματος της εγκατάστασης στο Trnsys με σκοπό να γίνει η χρήση του προγράμματος GenOpt μέσω του στοιχείου TRNOpt



Εικόνα 6.1: Το πρόγραμμα της εγκατάστασης που προσομοιώθηκε στο Trnsys για να βελτιστοποιηθεί μέσω του προγράμματος GenOpt

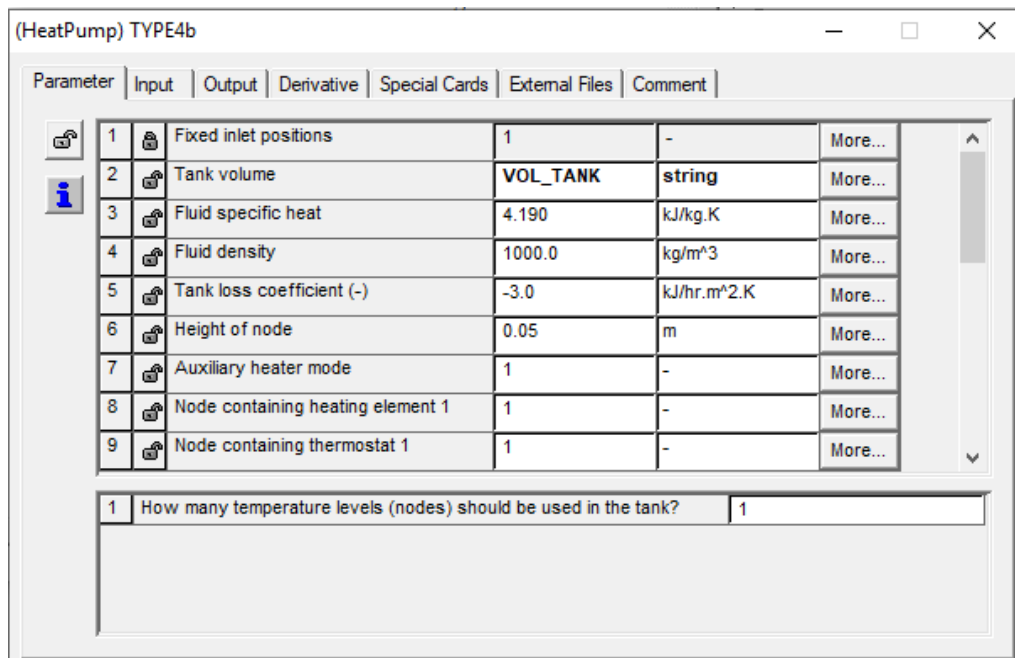
Αρχικά, για να μπορούμε να ορίσουμε μια μεταβλητή ως μεταβλητή σχεδιασμού στο πρόγραμμα GenOpt, θα πρέπει αυτή η μεταβλητή να βρίσκεται σε κάποιο στοιχείο τύπου “equation” του κυκλώματος μας στο Trnsys και η τιμή της μέσα στο κύκλωμα να προσδιορίζεται σε αυτό το στοιχείο απευθείας από το χρήστη και να μην εξαρτάται από κάποια άλλη μεταβλητή. Είναι ανάγκη λοιπόν, να εφαρμοστούν τα πιο κάτω για τις μεταβλητές σχεδιασμού που επιλέχθηκαν.

Για τη μεταβλητή επιφάνειας συλλέκτη, επιλέγεται το στοιχείο του συλλέκτη (Type 1b) και ρυθμίζονται τα εξής όπως φαίνεται στη πιο κάτω εικόνα.



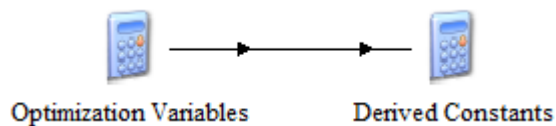
Εικόνα 6.2: Αλλαγή τύπου της μεταβλητής της συλλεκτικής επιφάνειας

Για τη μεταβλητή όγκου του δοχείου κάνουμε τη αντίστοιχη διαδικασία μέσω του στοιχείου του δοχείου αποθήκευσης (Type 4b).

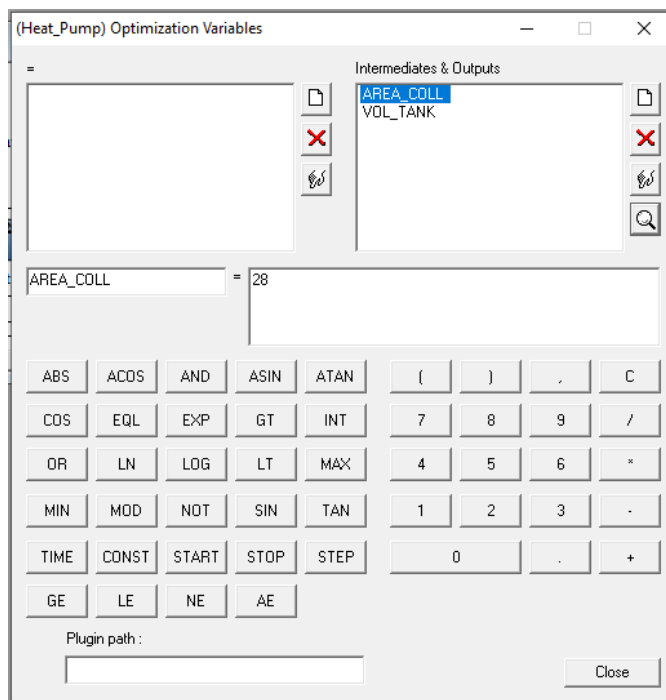


Εικόνα 6.3: Αλλαγή τύπου της μεταβλητής του όγκου του δοχείου αποθήκευσης

Έπειτα, προσθέτουμε τα πιο κάτω στοιχεία στο κύκλωμα της εγκατάστασης μας.



Εικόνα 6.4: Δημιουργία στοιχείων τύπου “equation” στο πρόγραμμα της εγκατάστασης

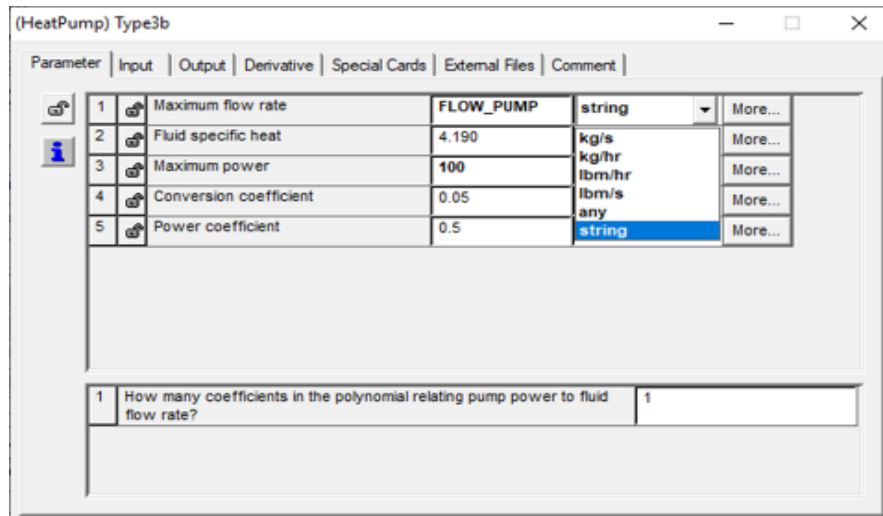


Εικόνα 6.5: Ορισμός μεταβλητών σχεδιασμού για τη βελτιστοποίηση

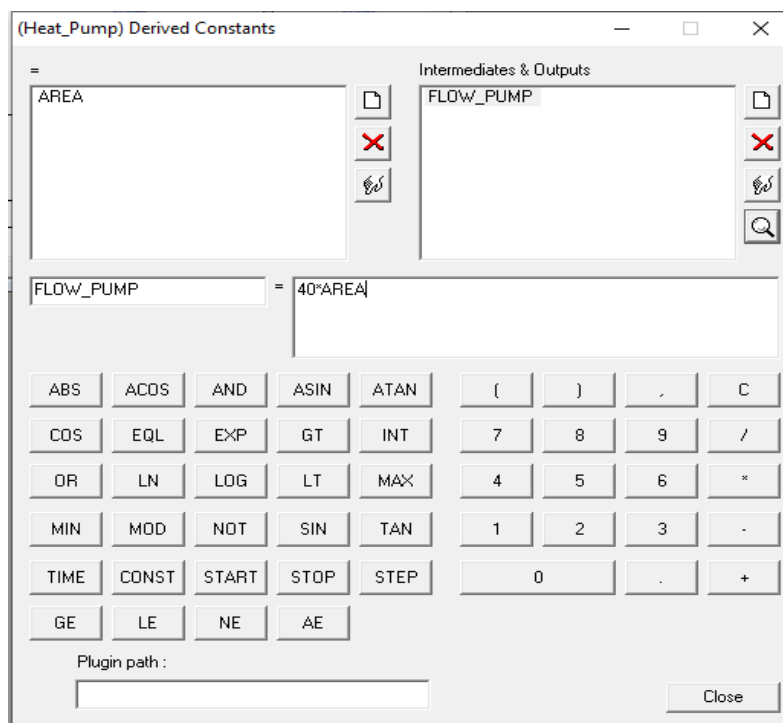
Στις πιο πάνω μεταβλητές που αποτελούν μεταβλητές βελτιστοποίησης δίνονται δύο αρχικές λογικές τιμές.

Σε περίπτωση που η τιμή μιας μεταβλητής του κυκλώματος είναι εξαρτημένη (συναρτησει) από μια μεταβλητή βελτιστοποίησης, τότε ακολουθείται η πιο κάτω διαδικασία.

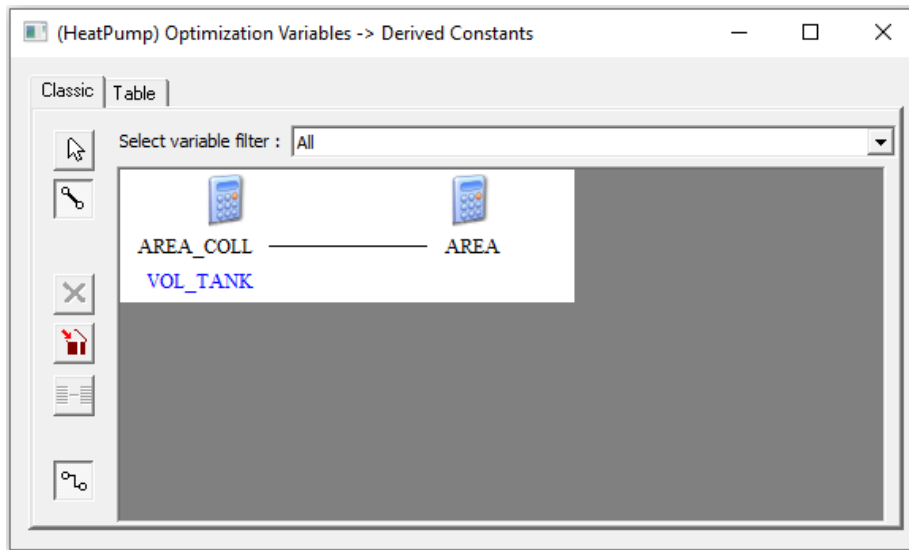
Για παράδειγμα, σε αυτή τη περίπτωση θεωρήσαμε ότι το μέγεθος της μέγιστης παροχής της αντλίας (μεταβλητή “Maximum flow rate”) μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος της επιφάνειας του συλλέκτη (μεταβλητή “Area”), το οποίο αποτελεί μεταβλητή βελτιστοποίησης. Για να επιτευχθεί αυτό, μέσω του στοιχείου της αντλίας (Type3b) , αλλάζουμε το τύπο της μεταβλητής σε string και προσθέτουμε τη μεταβλητή αυτή στο στοιχείο Derived Constants όπως φαίνεται στις πιο κάτω εικόνες.



Εικόνα 6.6: Ρύθμιση της παροχής αντλίας

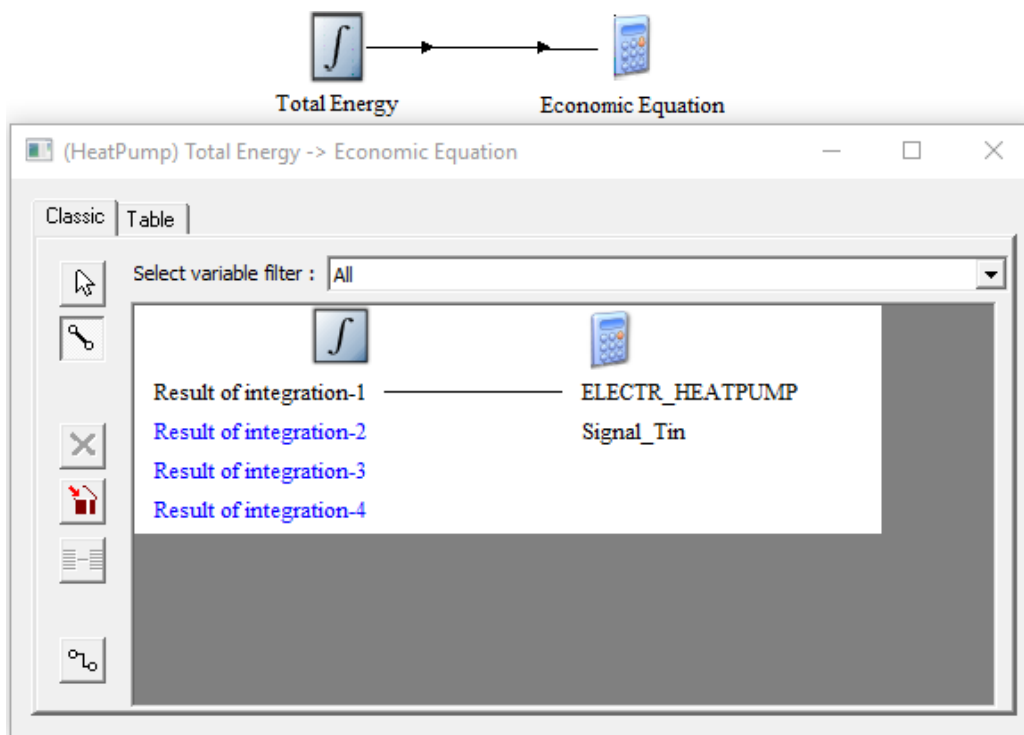


Εικόνα 6.7: Προσδιορισμός τιμής της παροχής της αντλίας



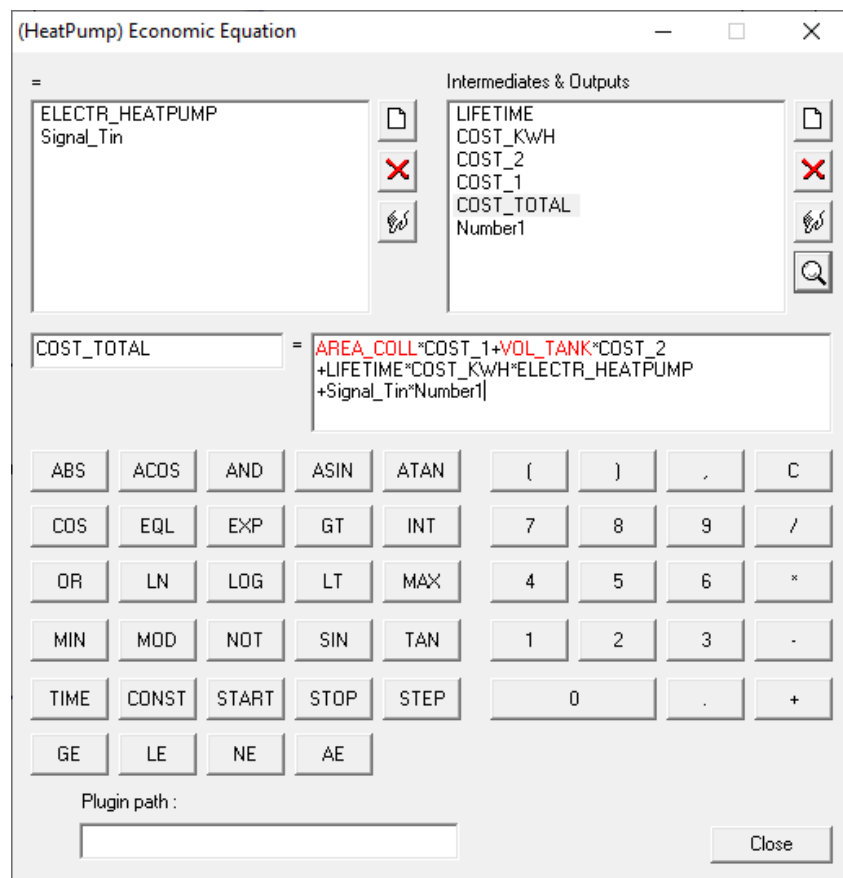
Εικόνα 6.8: Σύνδεση στοιχείου μεταβλητών βελτιστοποίησης και στοιχείου εξαρτώμενων μεταβλητών από τις μεταβλητές βελτιστοποίησης

Με βάση τα πιο κάτω, προσδιορίζουμε τη συνάρτηση κόστους αφού ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους.

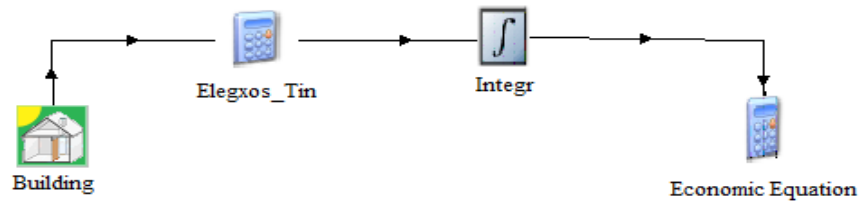


Εικόνα 6.9: Σύνδεση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στη συνάρτηση κόστους

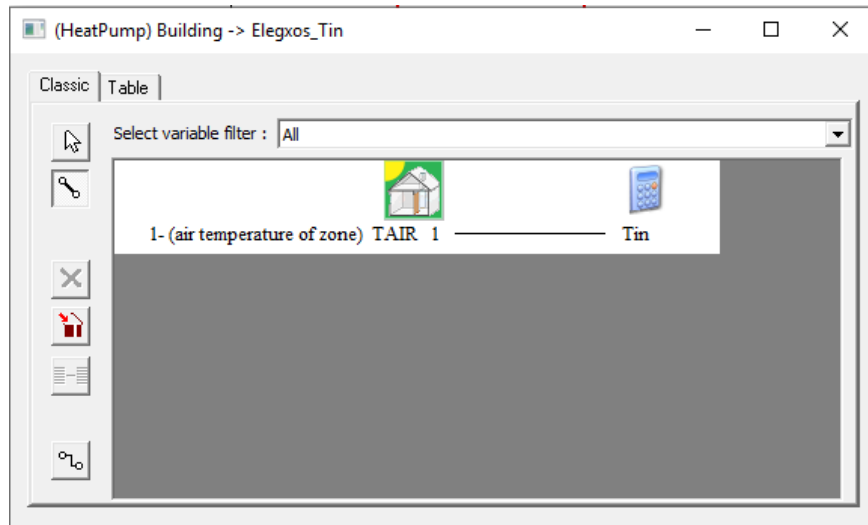
Η σχέση της συνάρτησης του κόστους (εικόνα 6.10) αντιστοιχεί στο συνολικό κόστος του συστήματος, το οποίο υπολογίζεται όπως προαναφέρθηκε στη αρχή του κεφαλαίου. Στη συνάρτηση αυτή όμως υπάρχει και ένας επιπλέον όρος στη εξίσωση. Η μεταβλητή “Signal_Tin” παίρνει την τιμή 0, εάν για τη συγκεκριμένη επιλογή των παραμέτρων εισόδου (εμβαδού συλλεκτών A_c και όγκου του δοχείου V), η θερμοκρασία εντός κτιρίου είναι ικανοποιητική και μεγαλύτερη από ένα όριο κατά τη διάρκεια της δοκιμής προσομοίωσης. Αν όμως η θερμοκρασία εντός κτιρίου ξέφυγε και γίνονταν αρκετές φορές μικρότερη από την απαιτούμενη (π.χ. 22 °C), τότε αυτή η μεταβλητή έπαιρνε τιμή μεγαλύτερή από 0. Στη μεταβλητή “Number1” δόθηκε ένας μεγάλος αριθμός. Αυτό έγινε, έτσι ώστε όταν η συγκεκριμένη επιλογή των παραμέτρων εισόδου δεν ικανοποιούσε τις απαιτήσεις μας, δηλαδή δεν οδηγούσε σε ομοιόμορφη θερμοκρασία εντός κτιρίου πάνω από ένα όριο για τη μεγαλύτερη διάρκεια του χρόνου, τότε η συνάρτηση του κόστους έπαιρνε μια πολύ μεγάλη τιμή (λόγω του όρου που προστέθηκε) και έτσι αυτή η υποψήφια λύση απορρίπτονταν αυτόματα. Αυτή, η διαδικασία ήταν απαραίτητο να γίνει, έτσι ώστε το πρόγραμμα GenOpt να μπορεί να βρει μια βέλτιστη λύση που να ικανοποιεί παράλληλα και τις απαιτήσεις μας. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στις επόμενες εικόνες.



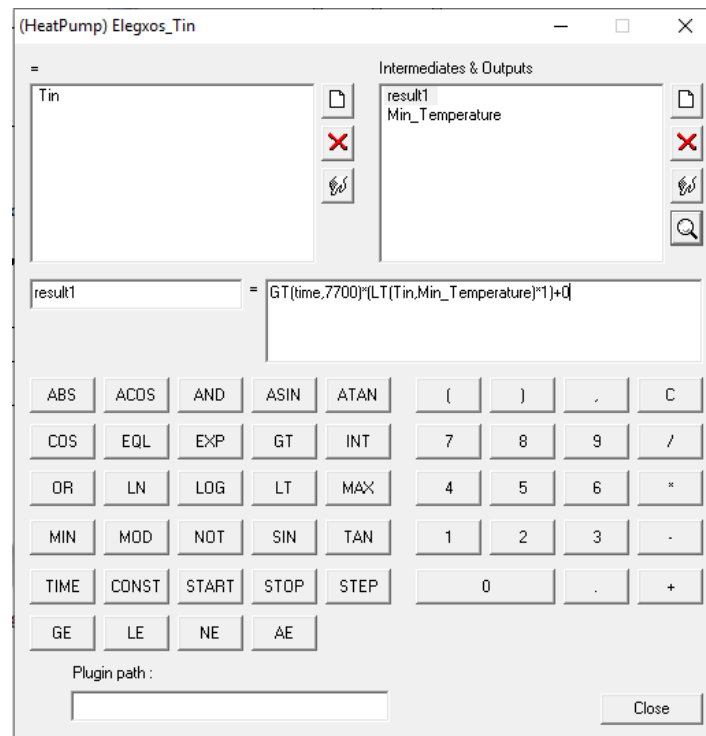
Εικόνα 6.10: Ορισμός της συνάρτησης κόστους



Εικόνα 6.11: Κύκλωμα ελέγχου της θερμοκρασίας εντός κτιρίου

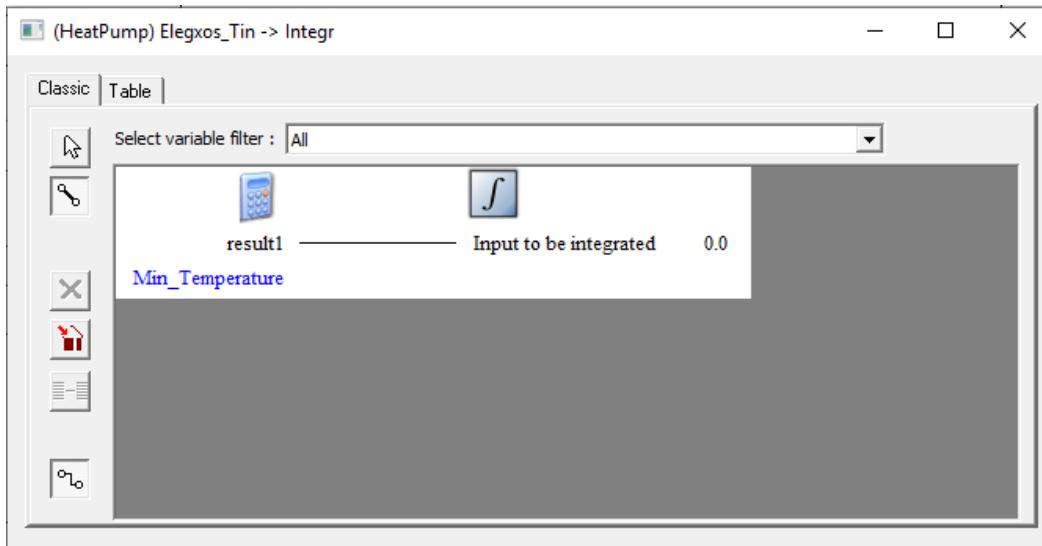


Εικόνα 6.12: Σύνδεση κτιρίου με το στοιχείο ελέγχου της θερμοκρασίας του

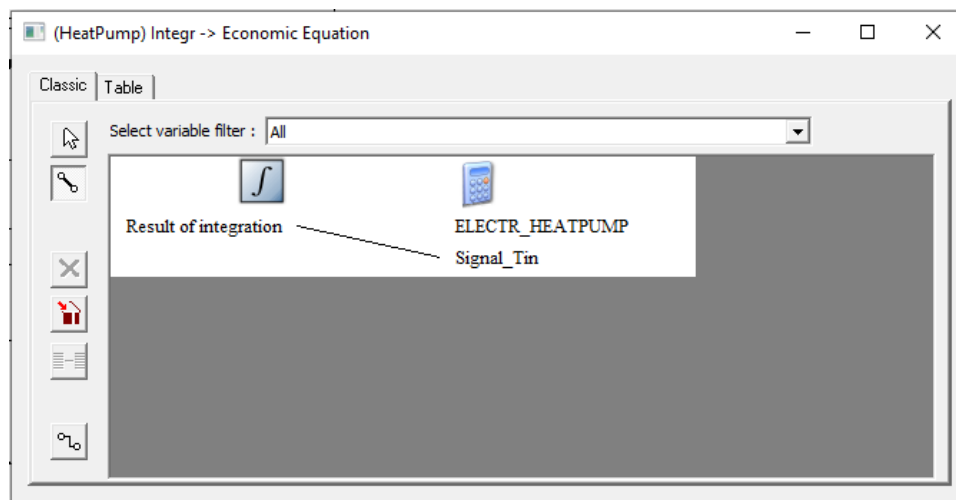


Εικόνα 6.13: Έλεγχος της θερμοκρασίας του σπιτιού

Να σημειωθεί ότι ο έλεγχος σε κάθε προσομοίωση, άρχιζε να γίνεται μετά από ένα χρονικό διάστημα από τη εκκίνηση της προσομοίωσης της, όπου η λειτουργία του συστήματος είχε σταθεροποιηθεί. Για αυτό, προστέθηκε και ο όρος του χρόνου (time) στη συνάρτηση του ελέγχου της θερμοκρασίας στη εικόνα 6.13.



Εικόνα 6.14: Επεξεργασία αποτελέσματος του ελέγχου που έγινε για τη θερμοκρασία του κτιρίου



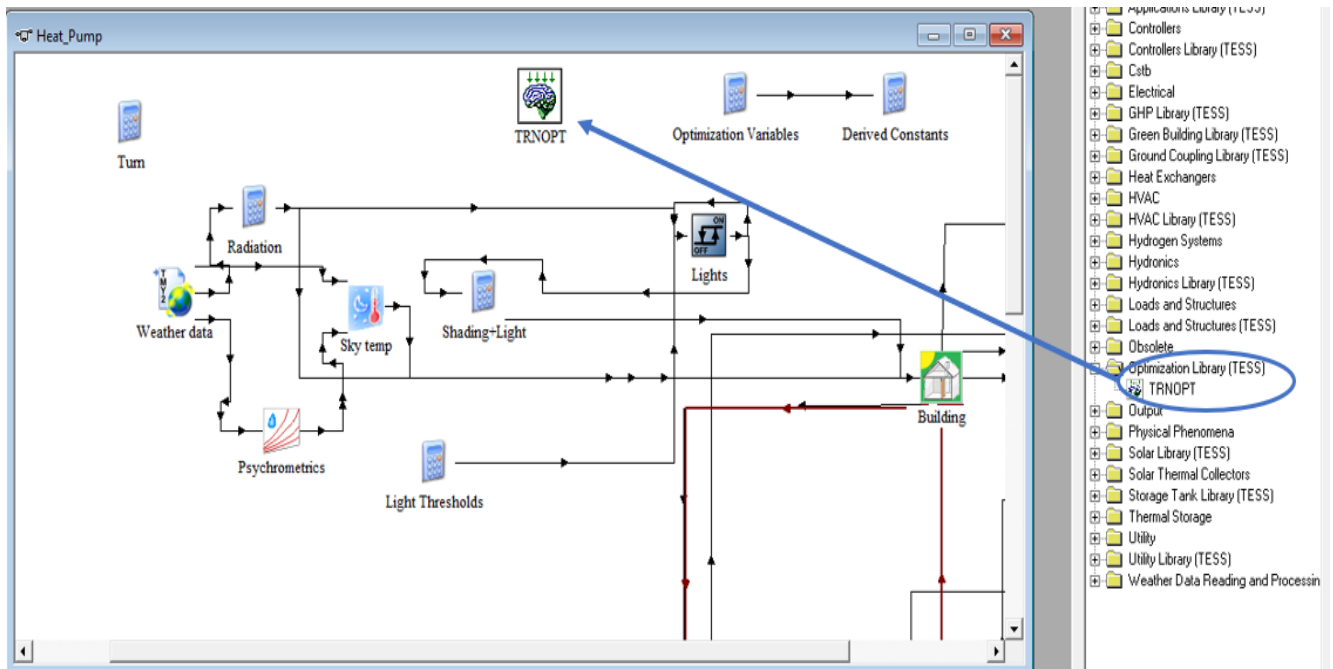
Εικόνα 6.15: Αποστολή του σήματος ελέγχου θερμοκρασίας στη συνάρτηση κόστους

6.3 Χρήση του προγράμματος βελτιστοποίησης GenOpt μέσω του στοιχείου TRNOpt

Αφού σχεδιαστεί το κύκλωμα της εγκατάστασης όπως εξηγήθηκε στη προηγούμενη ενότητα και είναι έτοιμο για να γίνει η βελτιστοποίηση, δίνονται οποιεσδήποτε τιμές στις μεταβλητές βελτιστοποίησης, και τρέχουμε το πρόγραμμα για να δημιουργηθούν τα αρχεία με τα αποτελέσματα. Αυτό είναι απαραίτητο να γίνει πριν να χρησιμοποιήσουμε το στοιχείο TRNOpt, διότι το αρχείο αποτελεσμάτων τύπου “TRNSYS input file” (τύπου .dck) που δημιουργείται από το τρέξιμο του προγράμματος Trnsys, θα χρειαστεί για να αρχίσει η λειτουργία του προγράμματος GenOpt. Επίσης, είναι αναγκαίο να εκτελεστούν οι ενέργειες που αναφέρονται στο παράρτημα της παρούσας εργασίας, για να υπάρξει ομαλή λειτουργία μεταξύ TRNSYS και προγράμματος GenOpt.

➤ Εισαγωγή στο πρόγραμμα του TRNOpt

Έχοντας ανοικτό το πρόγραμμα που δημιουργήσαμε στο Trnsys, από τη βιβλιοθήκη TESS που υπάρχει στα δεξιά της επιφάνειας εργασίας, επιλέγεται από το φάκελο “Optimization Library (TESS)” το στοιχείο (component) TRNOPT. Παίρνουμε το στοιχείο TrnOpt και το τοποθετούμε σε ένα κενό σημείο στο κύκλωμα όπως φαίνεται. Δεν χρειάζεται να το συνδέσουμε με κάποιο άλλο στοιχείο του κυκλώματος.

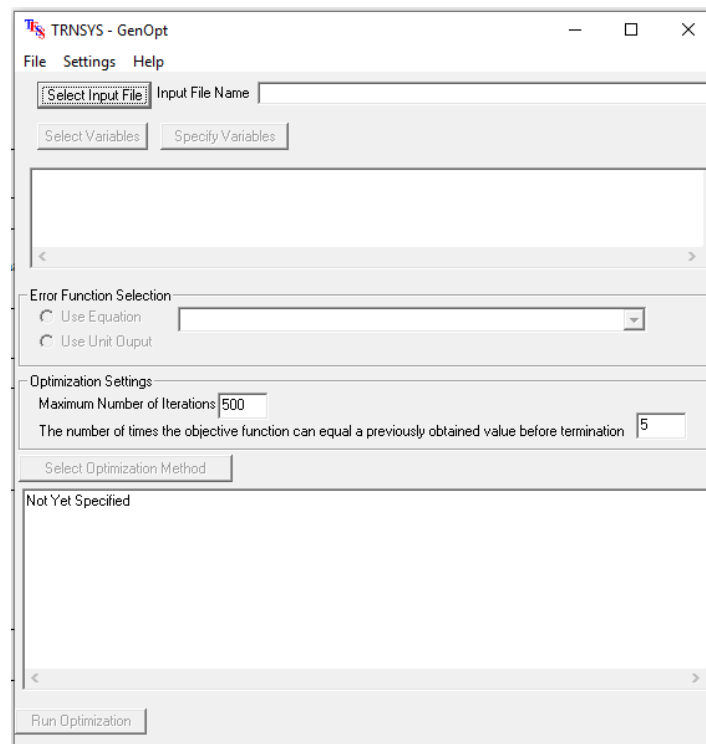


Εικόνα 6.16: Σύνδεση του TRNSYS με το GenOpt μέσω του στοιχείου TRNOpt

Κάνοντας διπλό κλικ στο εικονίδιο του TrnOpt εμφανίζεται η πιο κάτω εικόνα και πατάμε στο εικονίδιο που βρίσκεται κάτω αριστερά. Έτσι λοιπόν, μεταφερόμαστε στο περιβάλλον του TRNOpt (σύνδεση Trnsys-GenOpt).

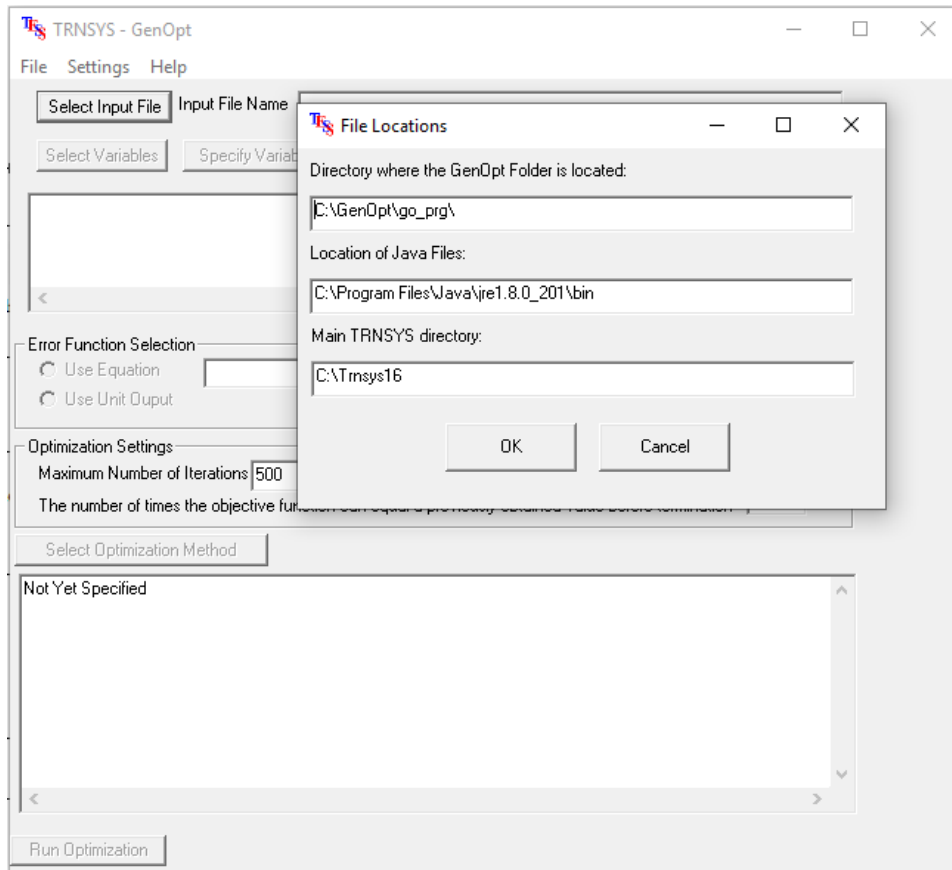


Εικόνα 6.17: Είσοδος στο περιβάλλον του στοιχείου TRNOpt



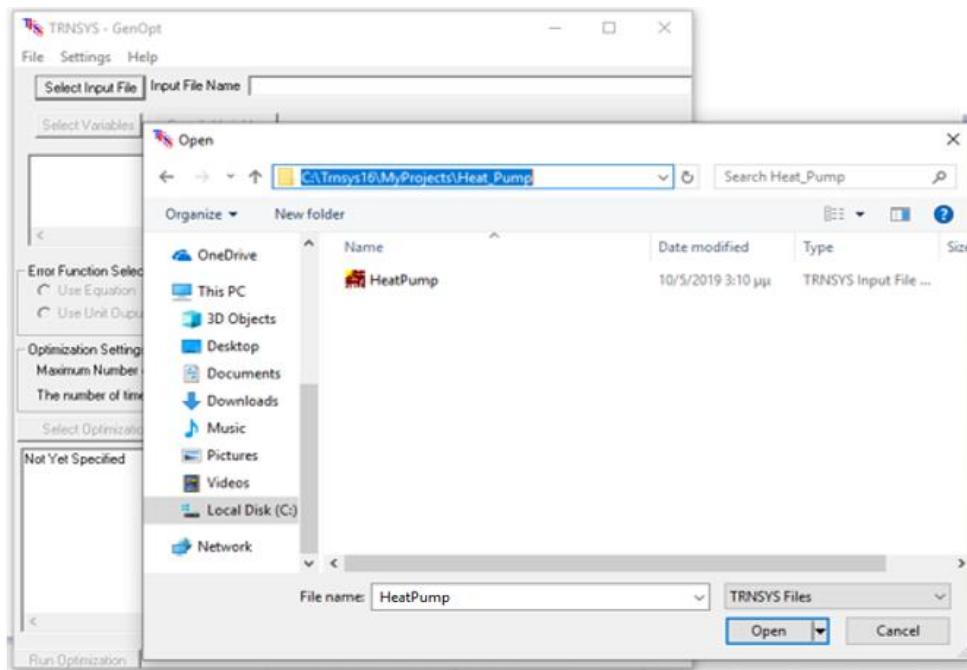
Εικόνα 6.18: Ρυθμίσεις για τη βελτιστοποίηση του συστήματος

Καταρχήν, πατάμε στη εντολή Settings που βρίσκεται στο πάνω μέρος του παραθύρου. Βεβαιωνόμαστε ότι υπάρχουν σωστά οι τοποθεσίες του προγράμματος GenOpt, Java και Trnsys αντίστοιχα, όπως τις είχαμε βάλει και στο παράρτημα και πατάμε “OK”. Εάν δεν υπάρχουν οι συγκεκριμένες τοποθεσίες, τότε χρειάζεται να ξανά συμπληρωθούν.



Εικόνα 6.19: Σύνδεση των προγραμμάτων που θα χρησιμοποιηθούν

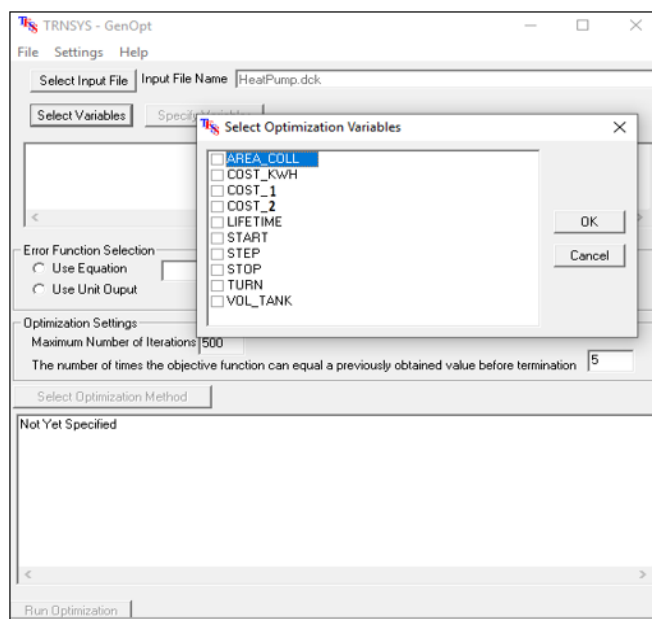
Πατώντας στο “Select Input File”, επιλέγουμε το αρχείο αποτελεσμάτων τύπου TRNSYS input file (τύπου .dck) το οποίο είχε δημιουργηθεί από το τελευταίο τρέξιμο που κάναμε και βρίσκεται στο φάκελο στον οποίο έχουμε αποθηκευμένο το αρχείο του Trnsys της εγκατάστασης μας.



Εικόνα 6.20: Επιλογή αρχείου αποτελεσμάτων του συστήματος μας

➤ Προσδιορισμός μεταβλητών σχεδίασης

Αφού πρώτα επιλέξουμε το αρχείο εισόδου (εικόνα 6.20), στη συνέχεια μπορούμε να επιλέξουμε τις μεταβλητές σχεδιασμού (μεταβλητές βελτιστοποίησης) για τη βελτιστοποίηση μας από τη επιλογή “Select Variable” και πατάμε οκ. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι μεταβλητές σχεδιασμού είναι η επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη και ο όγκος του δοχείου αποθήκευσης του νερού.

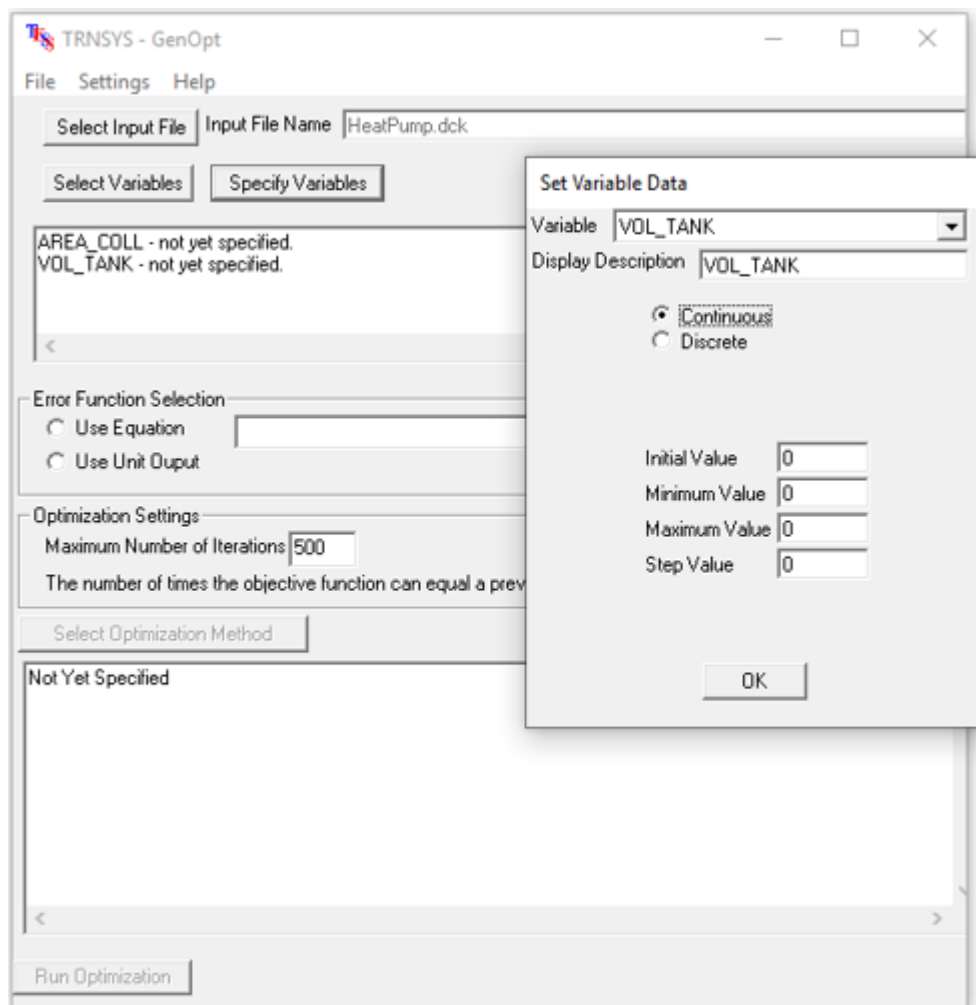


Εικόνα 6.21: Επιλογή μεταβλητών σχεδίασης

Επιλέγοντας το “Specify Variables” μπορούμε να προσδιορίσουμε στο πρόγραμμα εάν οι μεταβλητές σχεδιασμού που δώσαμε, παίρνουν συνεχείς ή διακριτές τιμές καθώς και το εύρος τιμών τους.

Εμφανίζονται οι πιο κάτω επιλογές:

- *Variable*: επιλέγουμε τη μεταβλητή που θέλουμε να προσδιορίσουμε
- *Display Description*: Γράφουμε το όνομα με το οποίο θέλουμε να εμφανίζεται η μεταβλητή στα αποτελέσματα που θα μας δώσει το GenOpt



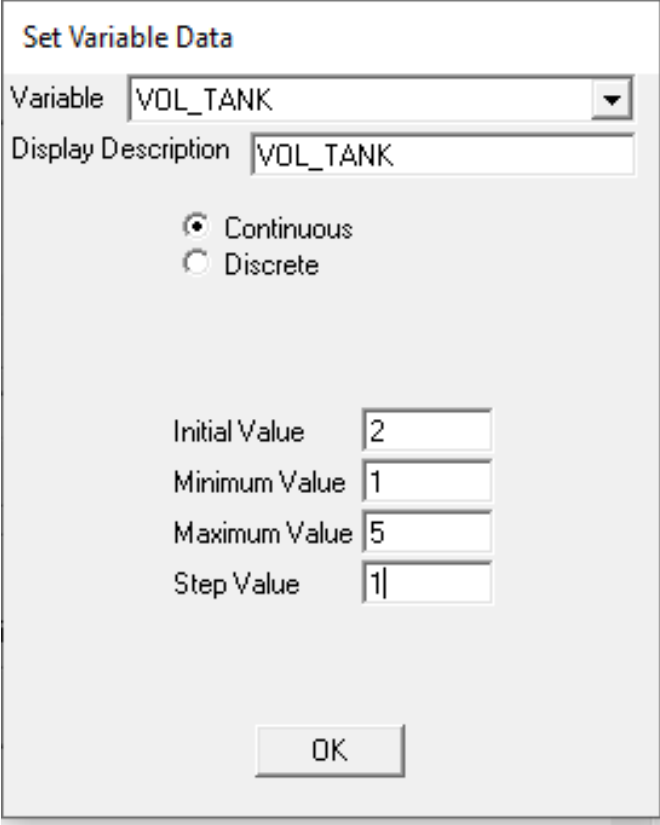
Εικόνα 6.22: Προσδιορισμός των τιμών της μεταβλητής σχεδίασης

Υπάρχουν 2 βασικές κατηγορίες για το προσδιορισμό των μεταβλητών μας

1) Εάν η μεταβλητή σχεδιασμού μας παίρνει συνεχείς τιμές τότε επιλέγουμε “continuous” και προσδιορίζουμε τις πιο κάτω τιμές [6.2]:

- *Initial value:* Αρχική τιμή. Η τιμή στη οποία προβλέπουμε ότι βρίσκεται κοντά η λύση.
- *Minimum Value:* Η ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει η μεταβλητή σχεδίασης κατά τους υπολογισμούς
- *Maximum Value:* Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η μεταβλητή σχεδίασης κατά τους υπολογισμούς
- *Step Value:* Αυτή η τιμή χρησιμοποιείται με διαφορετικό τρόπο με βάση τη μέθοδο βελτιστοποίησης που επιλέγεται[6.1]. Αντιπροσωπεύει μια παράμετρο της συνάρτησης που χρησιμοποιεί η μέθοδος κατά τη λειτουργία της.

Για παράδειγμα, στη πιο κάτω εικόνα ο αλγόριθμος θα δίνει τιμές στη μεταβλητή από 1 μέχρι 5 και η αρχική τιμή 2. Οι ακριβής τιμές που μπορεί να πάρει η μεταβλητή καθορίζονται από τον αλγόριθμο ανάλογα με το τρόπο που χρησιμοποιεί τη τιμή του step value που του δώσαμε.



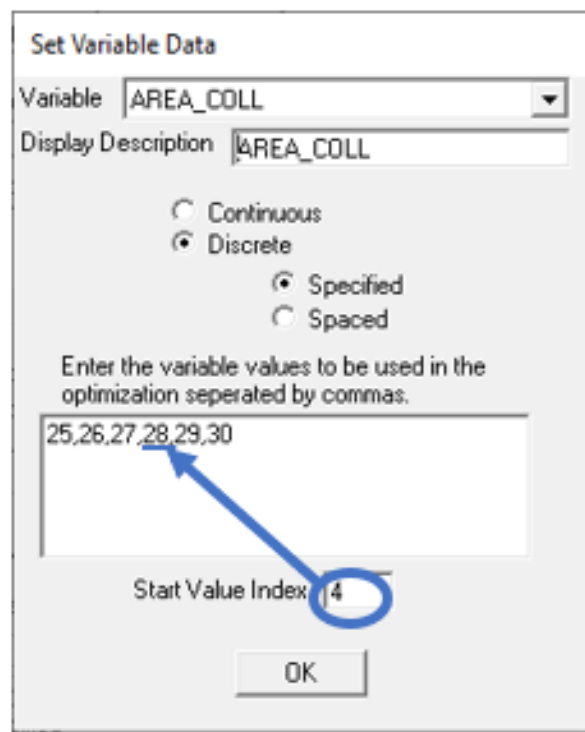
The image shows a dialog box titled "Set Variable Data". It contains the following elements:

- Variable:** A dropdown menu showing "VOL_TANK".
- Display Description:** A text box containing "VOL_TANK".
- Radio Buttons:** Two options, "Continuous" (which is selected) and "Discrete".
- Input Fields:** Four text boxes for numerical values:
 - Initial Value:** 2
 - Minimum Value:** 1
 - Maximum Value:** 5
 - Step Value:** 1
- Buttons:** An "OK" button at the bottom center.

Εικόνα 6.23: Ρυθμίσεις για μεταβλητή με συνεχείς τιμές

2) α) Εάν η μεταβλητή σχεδιασμού μας παίρνει διακριτές τιμές και μάλιστα συγκεκριμένες τιμές, τότε επιλέγουμε “discrete” και στη συνέχεια “specified” (εικόνα 6.24)

Συμπληρώνουμε στο κουτί όλες τις τιμές που μπορεί να πάρει η μεταβλητή μας χωρισμένες με κόμμα[6.2]. Στο κουτί “Start Value index” προσδιορίζουμε την τιμή από τη οποία θέλουμε να ξεκινήσει ο αλγόριθμος (αρχική τιμή). Δεν γράφουμε την ίδια τη τιμή αλλά βάζουμε τη θέση της τιμής που βρίσκεται στο πιο πάνω κουτί. Για παράδειγμα, στη Εικόνα 6.24 εάν βάλουμε ‘4’ στο κουτί του “Start Value index”, τότε ο αλγόριθμος θα ξεκινήσει να δουλεύει με τη τιμή ‘28’ αφού είναι αυτή που βρίσκεται 4^η στη σειρά των τιμών που δώσαμε στο κουτί πιο πάνω.



Εικόνα 6.24: Ρυθμίσεις για μεταβλητή που μπορεί να πάρει μόνο συγκεκριμένες τιμές

2) β) Για τη επιλογή “Discrete space variable” (εικόνα 6.25), συμπληρώνουμε τα πιο κάτω [6.2]:

- *Minimum Value:* Η ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει η μεταβλητή σχεδίασης κατά τους υπολογισμούς
- *Maximum Value:* Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η μεταβλητή σχεδίασης κατά τους υπολογισμούς
- *Number of intervals:* Ο αριθμός των διαστημάτων που θα υπάρχουν ανάμεσα στη ελάχιστη και μέγιστη τιμή. Αυτό καθορίζει δηλαδή το βήμα της μεταβλητής.
- *Start Value Index:* Καθορίζεται η αρχική τιμή με την οποία θα ξεκινήσει ο αλγόριθμος. Δεν γράφουμε την ίδια τη τιμή αλλά βάζουμε τη θέση της τιμής που βρίσκεται στη σειρά των τιμών που ορίσαμε στις 3 επιλογές πιο πάνω.
- *Linear/Logarithmic:* Επιλέγουμε αν οι τιμές μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής που ορίσαμε πιο πάνω θα διαχωρίζονται γραμμικά ή λογαριθμικά

Για παράδειγμα (εικόνα 6.25), βάζοντας τις συγκεκριμένες τιμές που φαίνονται, οι τιμές που μπορεί να πάρει η μεταβλητή Area_Coll είναι από την τιμή 15 έως και τη τιμή 45 με βήμα 1 και η αρχική τιμή είναι το 24 (αφού είναι 10^η στη σειρά).

The image shows a dialog box titled "Set Variable Data". It contains the following fields and options:

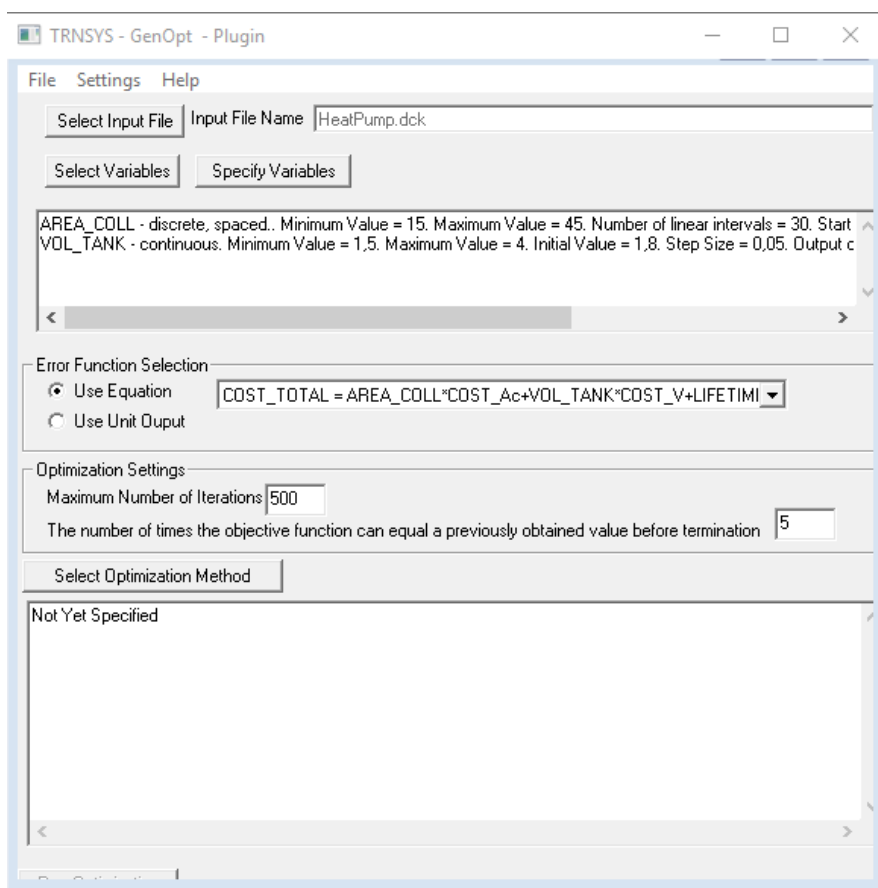
- Variable: AREA_COLL
- Display Description: AREA_COLL
- Continuous:
- Discrete:
 - Specified:
 - Spaced:
- Minimum Value: 15
- Maximum Value: 45
- Number of Intervals: 30
- Start Value Index: 10
- Linear:
- Logarithmic:
- OK button

Εικόνα 6.25: Ρυθμίσεις για μεταβλητή με διακριτές τιμές

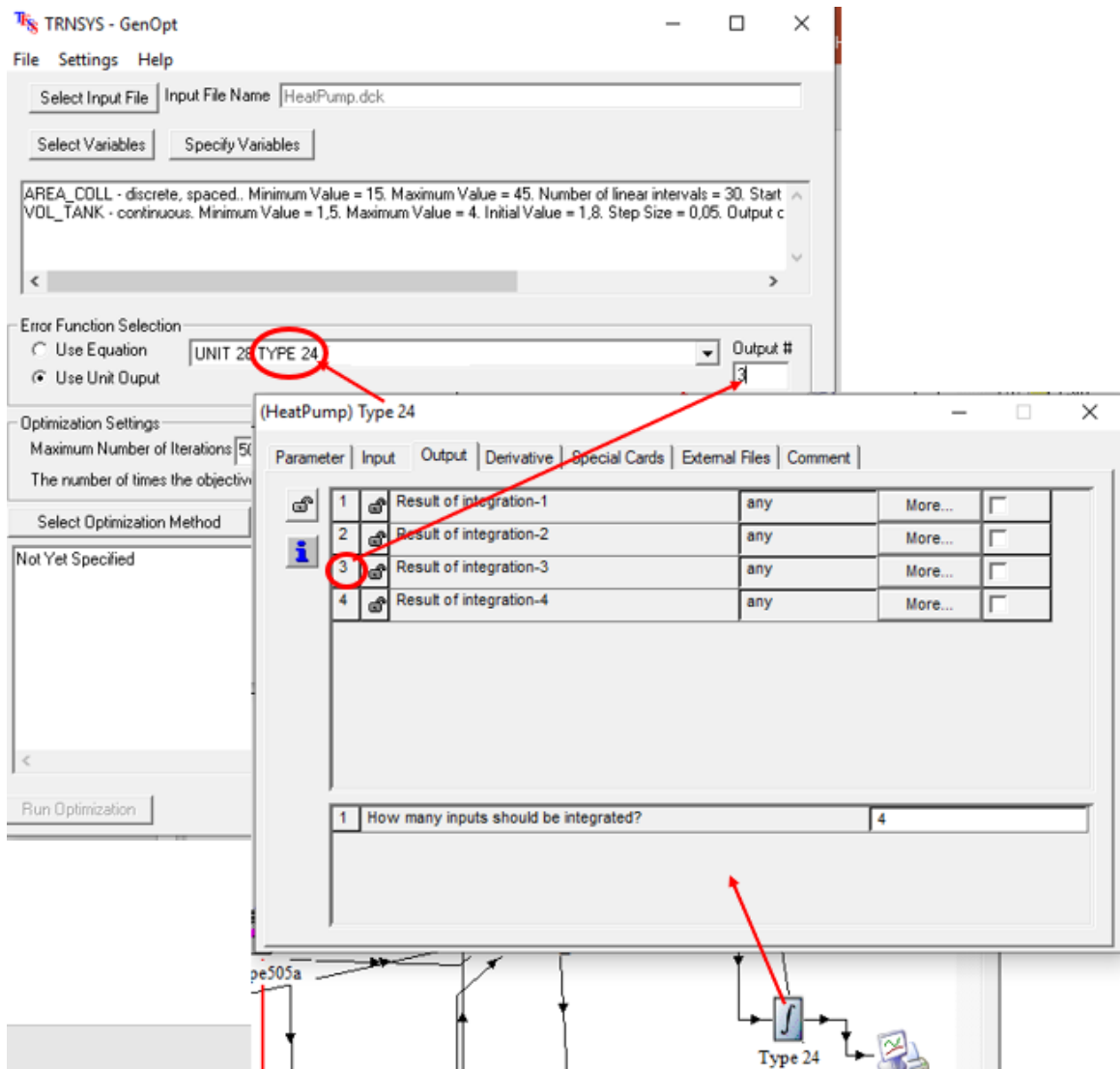
➤ **Επιλογή συνάρτησης ή μεγέθους με σκοπό τη ελαχιστοποίηση του**

Αφού προσδιορίσουμε τις μεταβλητές σχεδιασμού μπορούμε να επιλέξουμε ένα από τα πιο κάτω από τη κατηγορία “Error Function Selection” [6.2]:

- *Use Equation:* Επιλέγουμε τη συνάρτηση που θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε εφόσον η συνάρτηση μας βρίσκεται σε μια ισότητα (σε στοιχείο “equation”) στο πρόγραμμα μας στο Trnsys (εικόνα 6.26).
- *Use Unit Output:* Αυτή η επιλογή γίνεται, όταν θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε (ελαχιστοποιήσουμε) ένα μέγεθος που αποτελεί έξοδο από κάποιο στοιχείο (component) του Trnsys που έχουμε στο κύκλωμα μας. Εάν το επιλέξουμε τότε στο “Output” που αναγράφεται δίπλα βάζουμε το αριθμό εξόδου του μεγέθους που έχει στο συγκεκριμένο στοιχείο (εικόνα 6.27). Για παράδειγμα, μέσω αυτής της επιλογής, θα μπορούσε να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αποτελεί μεταβλητή (αποτέλεσμα) εξόδου του στοιχείου Type24.



Εικόνα 6.26: Προσδιορισμός αντικειμενικής συνάρτησης (συνάρτησης κόστους)



Εικόνα 6.27: Προσδιορισμός μεταβλητής κάποιου στοιχείου σε περίπτωση που επιθυμείται η ελαχιστοποίηση της

➤ **Ρυθμίσεις σχετικά με το τερματισμό της λειτουργίας του αλγόριθμου**

Από τη κατηγορία “Optimization Settings” προσδιορίζουμε το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων που μπορεί να εκτελέσει ο αλγόριθμος (Maximum Number of iterations) για να σταματήσει τη λειτουργία του.

Επίσης, μπορούμε να καθορίσουμε μέχρι πόσες φορές μπορεί ο αλγόριθμος να βρει το ίδιο αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης για να σταματήσει τη λειτουργία του.

➤ Επιλογή Μεθόδου Βελτιστοποίησης και προσδιορισμός των παραμέτρων της

Τέλος, κάνοντας κλικ στο κουμπί “Select Optimization Method” επιλέγουμε μέθοδο βελτιστοποίησης. Οι μέθοδοι αυτοί περιγράφονται σε προηγούμενη ενότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι για συνεχείς μεταβλητές σχεδίασης είναι διαθέσιμες όλες οι μέθοδοι ενώ για μεταβλητές με διακριτές τιμές μόνο μερικές μέθοδοι είναι διαθέσιμες.

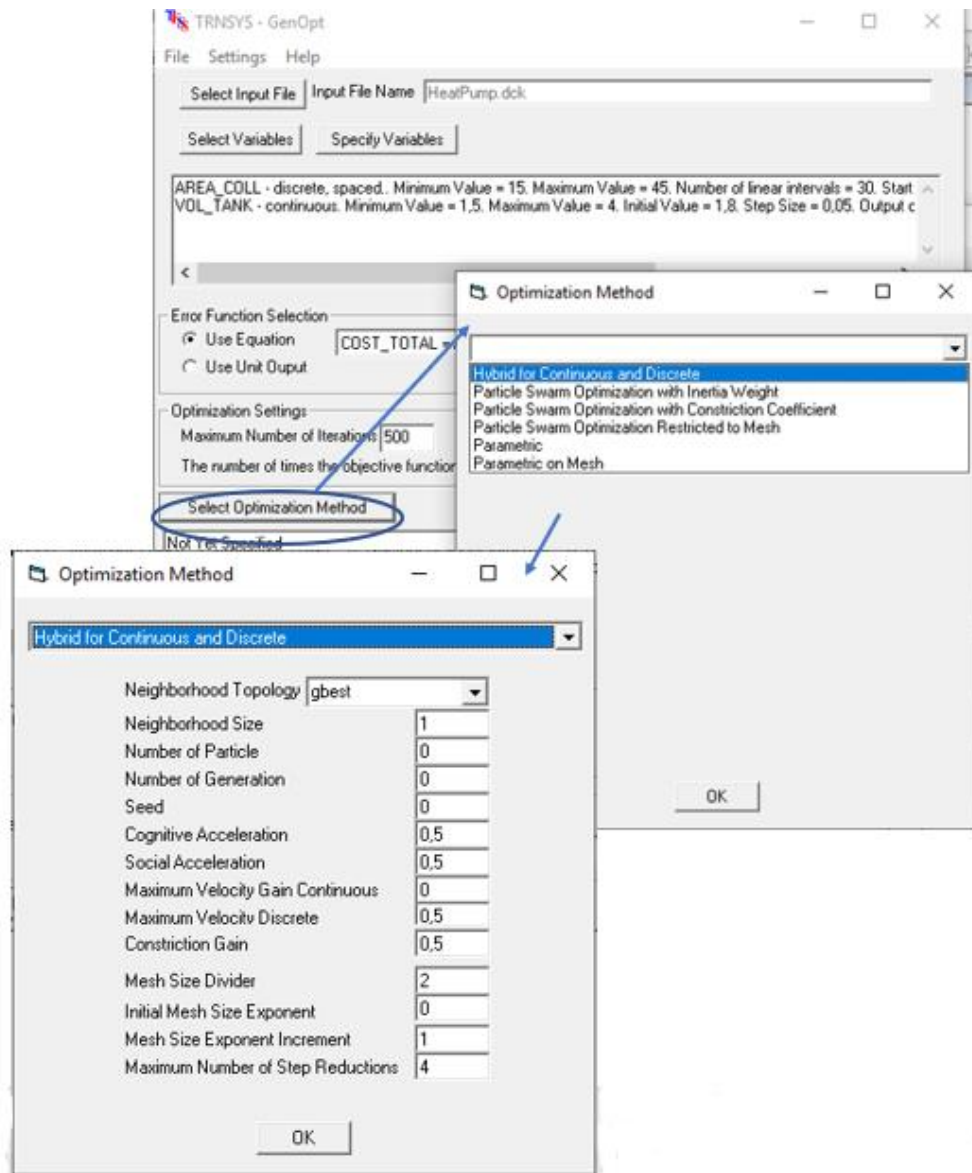
Στη συνέχεια, συμπληρώνουμε τις παραμέτρους της συγκεκριμένης μεθόδου που επιλέξαμε (εικόνα 6.28). Οι παράμετροι αυτοί έχουν να κάνουν με τη διαδικασία επίλυσης που χρησιμοποιεί η κάθε μέθοδος[6.1]. Κάποιες σημαντικοί παράμετροι των κύριων μεθόδων που θα χρησιμοποιηθούν στο πρόβλημα μας είναι οι εξής:

- *Number of Generations, n_G* : είναι ο αριθμός των γενεών που θα δημιουργηθούν μέχρι το τερματισμό της λειτουργίας της μεθόδου.
- *Number of particles, n_p* : είναι ο “αριθμός των σωματιδίων”, δηλαδή ο αριθμός των υποψήφιων λύσεων που υπάρχουν σε κάθε γενιά.
- *Number of neighborhoods, n* : ο αριθμός των γειτονικών υποψήφιων λύσεων που υπάρχουν.

Συνήθως, ισχύει η σχέση $n_G > n_p > n$.

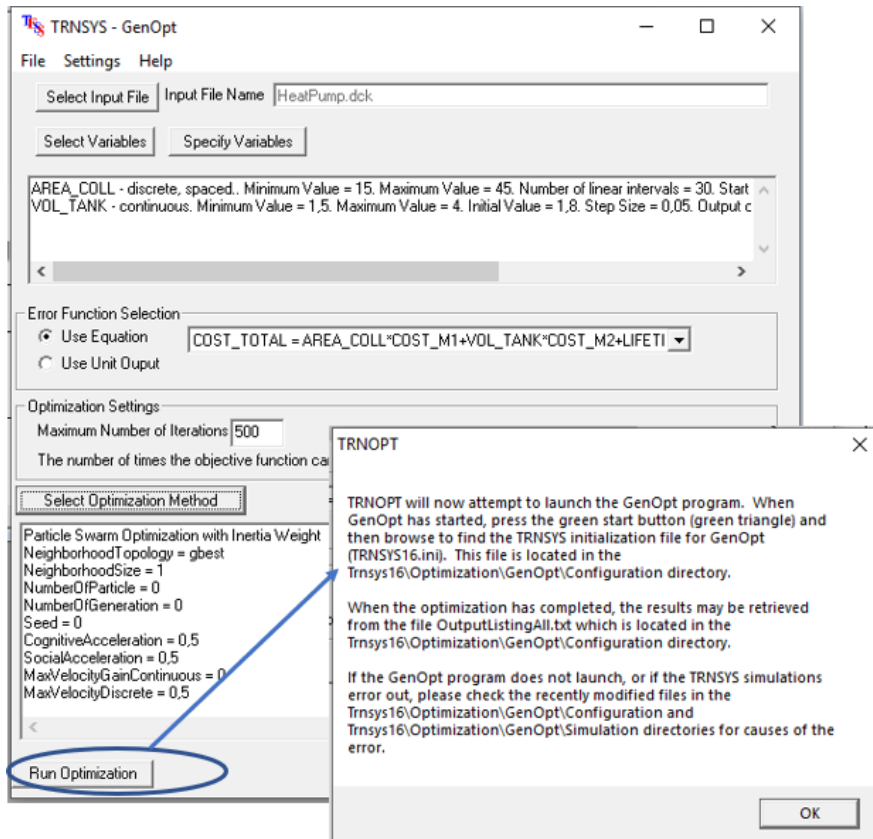
Ακόμη, πολλές φορές το ένα μέγεθος είναι πολλαπλάσιο του άλλου[6.1]. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών καθορίζουν το συνολικό αριθμό επαναλήψεων της μεθόδου που επιλέχθηκε. Όσο μεγαλύτερες τιμές έχουν, τόσο μεγαλύτερο χρόνο θα χρειαστεί η μέθοδος για να τελειώσει αλλά τόσο πιο κοντά στη βέλτιστη λύση θα είναι η λύση που θα βρει.

Οι υπόλοιπες παράμετροι που εμφανίζονται εμπλέκονται στις εξισώσεις που χρησιμοποιεί η κάθε μέθοδος κατά τη διαδικασία που ακολουθεί για να κάνει τη βελτιστοποίηση και συνήθως παίρνουν τις τυπικές τιμές που υπάρχουν ήδη καταχωρημένες μόλις επιλέξουμε τη μέθοδο. [6.1] Να σημειωθεί ότι τα δεκαδικά ψηφία των παραμέτρων αυτών πρέπει να χωρίζονται με τελεία. Εάν σε κάποια παράμετρο δοθεί λάθος τιμή (που βρίσκεται εκτός ορίων), τότε το πρόγραμμα GenOpt θα αναφέρει αυτό το πρόβλημα μόλις πάει να ξεκινήσει.

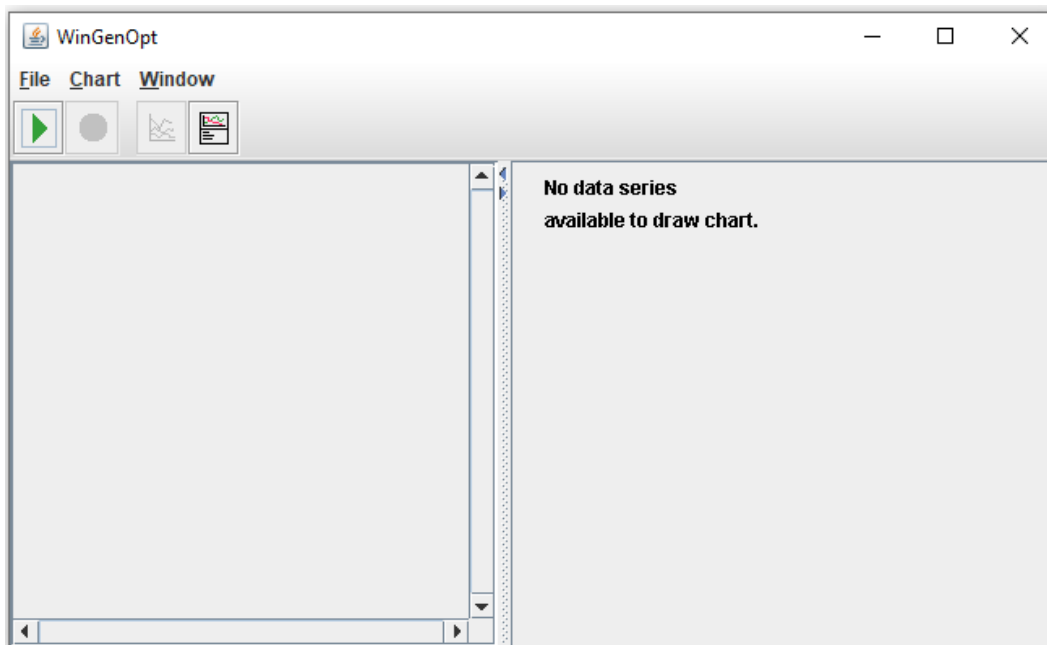


Εικόνα 6.28: Επιλογή μεθόδου και παραμέτρων βελτιστοποίησης

Αφού εκτελέσουμε όλα τα πιο πάνω βήματα, τότε ενεργοποιείται η εντολή “Run Optimization” (εικόνα 6.29). Αφού πατήσουμε “Run optimization” πατάμε ok στο παράθυρο που εμφανίζεται. Με αυτό τον τρόπο μεταφερόμαστε στη επιφάνειας εργασίας του προγράμματος GenOpt (εικόνα 6.30). Αυτομάτως, δημιουργούνται κάποια αρχεία που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του GenOpt στους φακέλους “Configuration” και “Simulation” που βρίσκονται στη τοποθεσία “C:\Trnsys16\Optimization\GenOpt” του υπολογιστή μας.



Εικόνα 6.29: Καταχώρηση των ρυθμίσεων για τη εισαγωγή στο GenOpt



Εικόνα 6.30: Επιφάνεια εργασίας του GenOpt

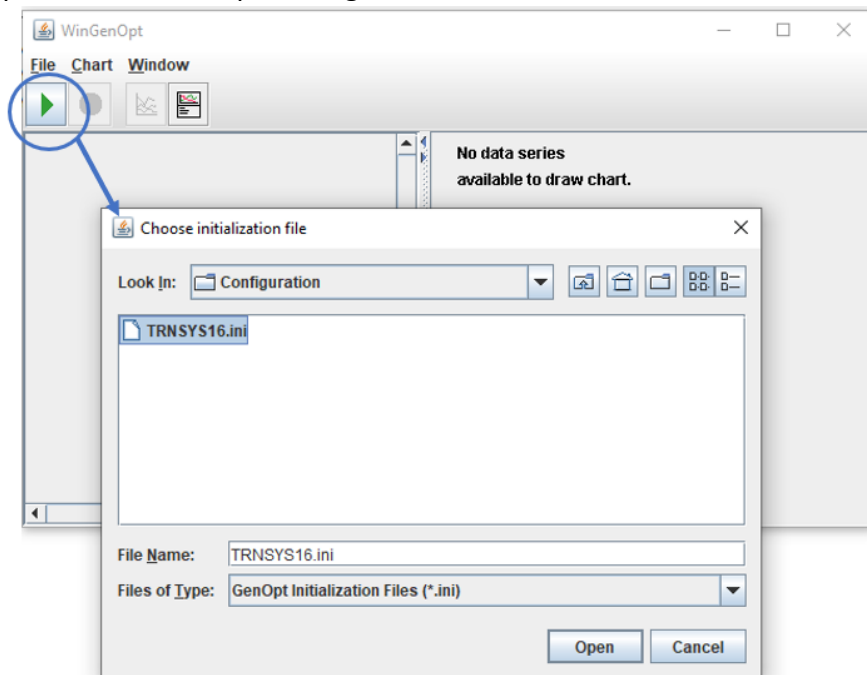
Πριν προχωρήσουμε στη εκτέλεση του προγράμματος GenOpt είναι απαραίτητο να εφαρμόσουμε τα επόμενα βήματα για τη ομαλή λειτουργία του προγράμματος.

Μέσα στο φάκελο “Configuration” στη τοποθεσία που προαναφέρθηκε, υπάρχει το αρχείο “command.txt” που μπορούμε να το ανοίξουμε για να το ελέγξουμε. Παρατηρούμε ότι εκεί βρίσκονται όλα τα δεδομένα της καρτέλας TrnOpt που προαναφέρθηκαν πιο πάνω. Επιβεβαιωνόμαστε ότι σε αυτό το αρχείο, όλοι οι δεκαδικοί αριθμοί διαχωρίζουν το δεκαδικό τους μέρος με τελεία και όχι με κόμμα. Εάν όχι, τότε τις αντικαθιστούμε με τελεία. Ακόμη, επιβεβαιώνουμε ότι οι τιμές που δώσαμε στις παραμέτρους του αλγόριθμου που επιλέξαμε, να είναι εντός αποδεκτών ορίων τους. Εάν χρειαστεί να διορθώσουμε κάποια παράμετρο του αλγόριθμου, τότε είναι δυνατό να τη διορθώσουμε μέσω αυτού του αρχείου πριν να τρέξουμε το πρόγραμμα του GenOpt.

Τέλος, θα πρέπει να γίνει αντιγραφή του αρχείου τύπου Trnsys Building Description File (.bui) στη τοποθεσία C:\Trnsys16\Optimization\GenOpt\Simulation επειδή θα χρειαστεί από το πρόγραμμα GenOpt στη συνέχεια. Αυτό το αρχείο είναι που περιγράφει το κτίριο και που είχε ήδη δημιουργηθεί πριν από το χρήστη μέσω του Trnsys και βρίσκεται στη ίδια τοποθεσία που είναι και το αρχείο του Trnsys που δημιουργήσαμε.

Αφού εφαρμοστούν τα πιο πάνω, το πρόγραμμα GenOpt είναι έτοιμο να τρέξει. Πατάμε έναρξη (πράσινο κουμπί) και μετά επιλέγουμε το αρχείο τύπου .ini (εικόνα 6.31) .

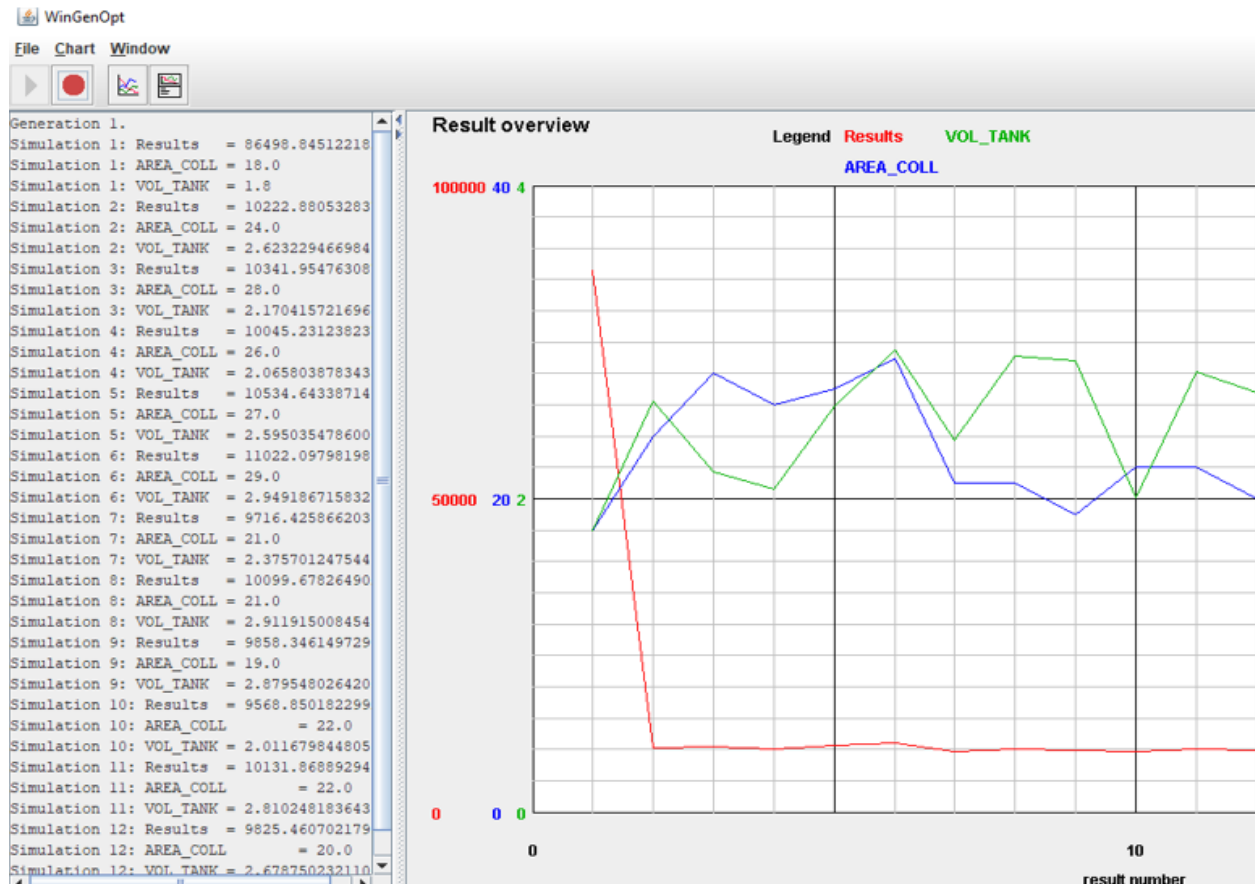
Αυτό το αρχείο τύπου .ini , έχει ήδη δημιουργηθεί αυτομάτως από τη προηγούμενη διαδικασία που κάναμε στο πρόγραμμα TRNopt και βρίσκεται στη τοποθεσία: C:\Trnsys16\Optimization\GenOpt\Configuration



Εικόνα 6.31: Διαδικασία έναρξης Λειτουργίας του GenOpt

Σε περίπτωση που υπάρχει κάποιο πρόβλημα, στην εκκίνηση του προγράμματος, τότε το πρόγραμμα θα περιγράψει το πρόβλημα που υπάρχει στη επιφάνεια εργασίας.

Με τη εκκίνηση του προγράμματος έχουμε τη πιο κάτω εικόνα και δημιουργούνται τα αρχεία των αποτελεσμάτων στο φάκελο Configuration.



Εικόνα 6.32: Αποτελέσματα στη επιφάνεια εργασίας του GenOpt

Στη αριστερή στήλη της εικόνας φαίνεται ο αριθμός της επανάληψης μαζί με τις τιμές των μεταβλητών της και το αντίστοιχο αποτέλεσμα που βρέθηκε. Στο διάγραμμα, ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο αριθμό της επανάληψης. Ο κατακόρυφος άξονας έχει πολλές κλίμακες όπου η κάθε μια αντιστοιχεί στο αποτέλεσμα και οι άλλες στις μεταβλητές σχεδιασμού και δηλαδή δείχνει τη μεταβολή του αποτελέσματος ανάλογα με τη μεταβολή των μεταβλητών σε κάθε επανάληψη.

Το αρχείο αποτελεσμάτων που δημιουργείται είναι σε μορφή κειμένου (.txt) και έχει μια από τις πιο κάτω μορφές πίνακα ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται:

Simulation Number	Main Iteration	AREA_COLL (optival 1)	VOL_TANK (optival 2)	Results	Number of Generation
1	1	29	2	10336.63	Generation 1
2	2	34	2.75	11451.37	Generation 1
3	3	19	2.25	29413.99	Generation 1
4	4	25	2.15	9993.916	Generation 2
5	5	40	2.75	12182.42	Generation 2
6	6	33	3.15	11630.64	Generation 2
7	7	45	2.5	12626.36	Generation 3
8	8	35	3.1	11829.37	Generation 3

Πίνακας 6.1: Παράδειγμα αποτελεσμάτων του προγράμματος GenOpt με τη μέθοδο PSO IW

Simulation Number	Main Iteration	AREA_COLL (optival 1)	VOL_TANK (optival 2)	Results	Comment
248	451	23	2	9674.486	Minimum point of initialization
249	452	23	2	9674.486	Initial point
250	453	23	2.05	9708.736	Cost not reduced at OPTVAL2+dOPTVAL2
251	453	23	1.95	9640.993	Cost reduced at OPTVAL2-dOPTVAL2
251	453	23	1.95	9640.993	Global search reduced cost
252	454	23	1.9	12106.52	Exploration base Delta = 1 0
253	454	23	1.85	14570.25	Cost not reduced at OPTVAL2-dOPTVAL2
253	454	23	1.95	9640.993	Cost reduced at OPTVAL2+dOPTVAL2
253	454	23	2	9674.486	Cost not reduced at OPTVAL2+dOPTVAL2

Πίνακας 6.2: Παράδειγμα αποτελεσμάτων του προγράμματος GenOpt με τη υβριδική μέθοδο

Η 1^η στήλη (Simulation Number) δείχνει πόσες διαφορετικές δοκιμές (συνδυασμοί) των μεταβλητών σχεδιασμού έγιναν. Η 2^η στήλη (main Iteration) δείχνει τον αύξοντα αριθμό της συγκεκριμένης επανάληψης. Στη τελευταία στήλη, σε κάποιες μεθόδους φαίνεται ο αύξων αριθμός της γενιάς (Generation Number). Σε άλλες μεθόδους, η τελευταία στήλη δείχνει σχόλια για το πως μεταβάλλεται το αποτέλεσμα ανάλογα με τη τεχνική που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη επανάληψη. Οι μεταβλητές "OPTVAL1" και "OPTVAL2" συμβολίζουν τις μεταβλητές σχεδιασμού.

Βιβλιογραφία 6^{ου} κεφαλαίου

[6.1] Wetter, M. GenOpt, Generic optimization program - User manual, version 3.1.1. ,Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016

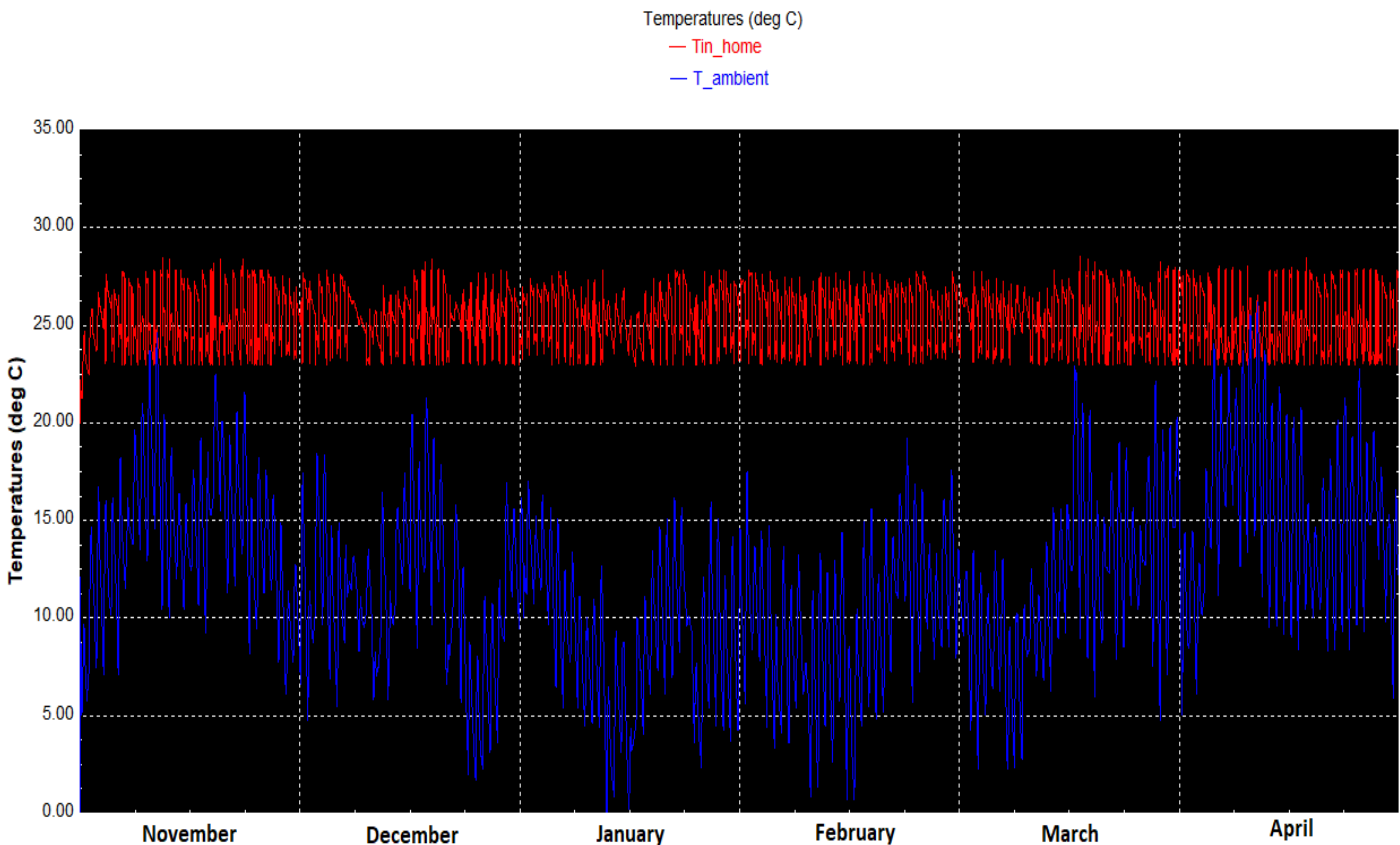
[6.2] TRNOPT v16 Manual, Installation and Run-Time Instructions

7. Αποτελέσματα

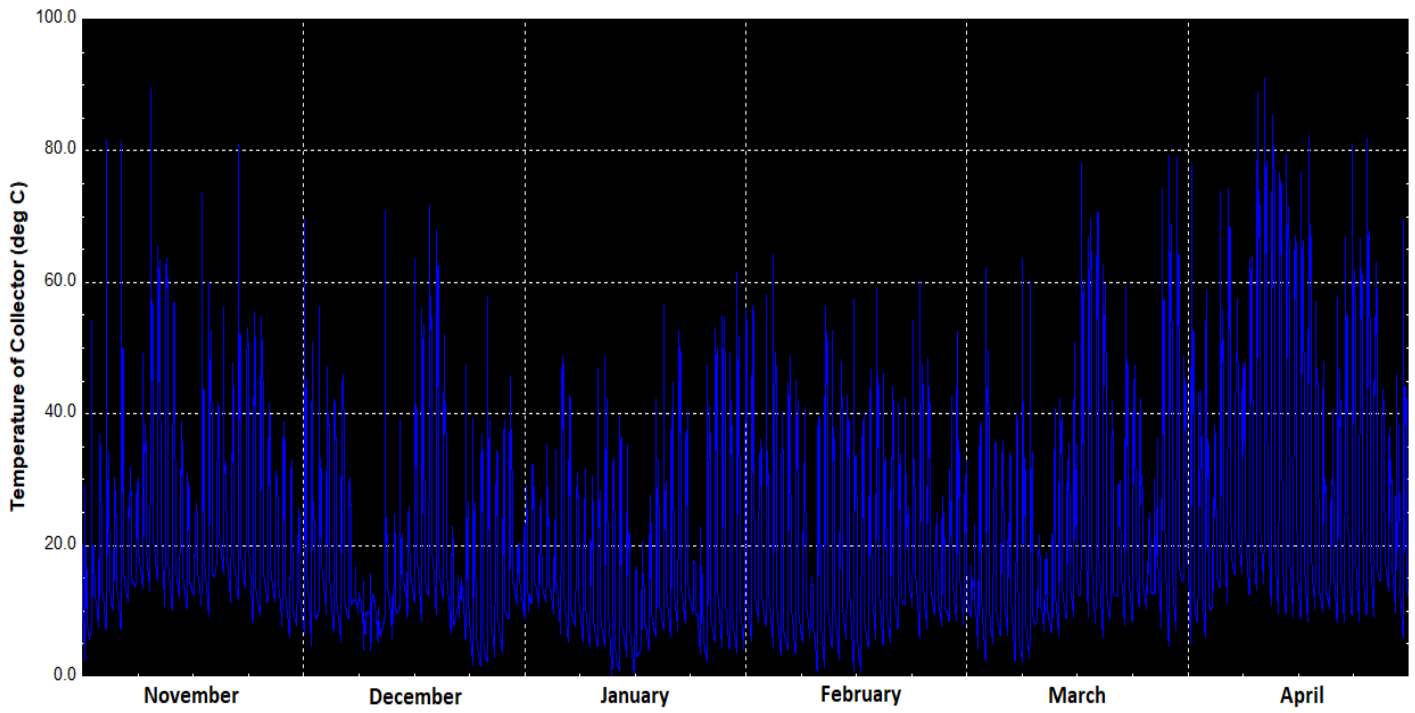
Σε αυτή τη ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη προσομοίωση της εγκατάστασης στο πρόγραμμα Trnsys. Αρχικά, παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα θερμοκρασιών των στοιχείων της εγκατάστασης καθόλη τη διάρκεια της χρονικής περιόδου. Στη συνέχεια, γίνεται επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Trnsys και εξάγονται χρήσιμα διαγράμματα για τη περαιτέρω ανάλυση του συστήματος. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του συστήματος που έγινε στο πρόγραμμα GenOpt. Τέλος, γίνεται σύγκριση της Η.Υ.Α.Θ με μια αντλία θερμότητας αέρα-αέρα. Όλα τα αποτελέσματα αφορούν κτίριο στη περιοχή της Αθήνας για τη χρονική περίοδο από Νοέμβριο μέχρι και Απρίλιο.

7.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο πρόγραμμα Trnsys

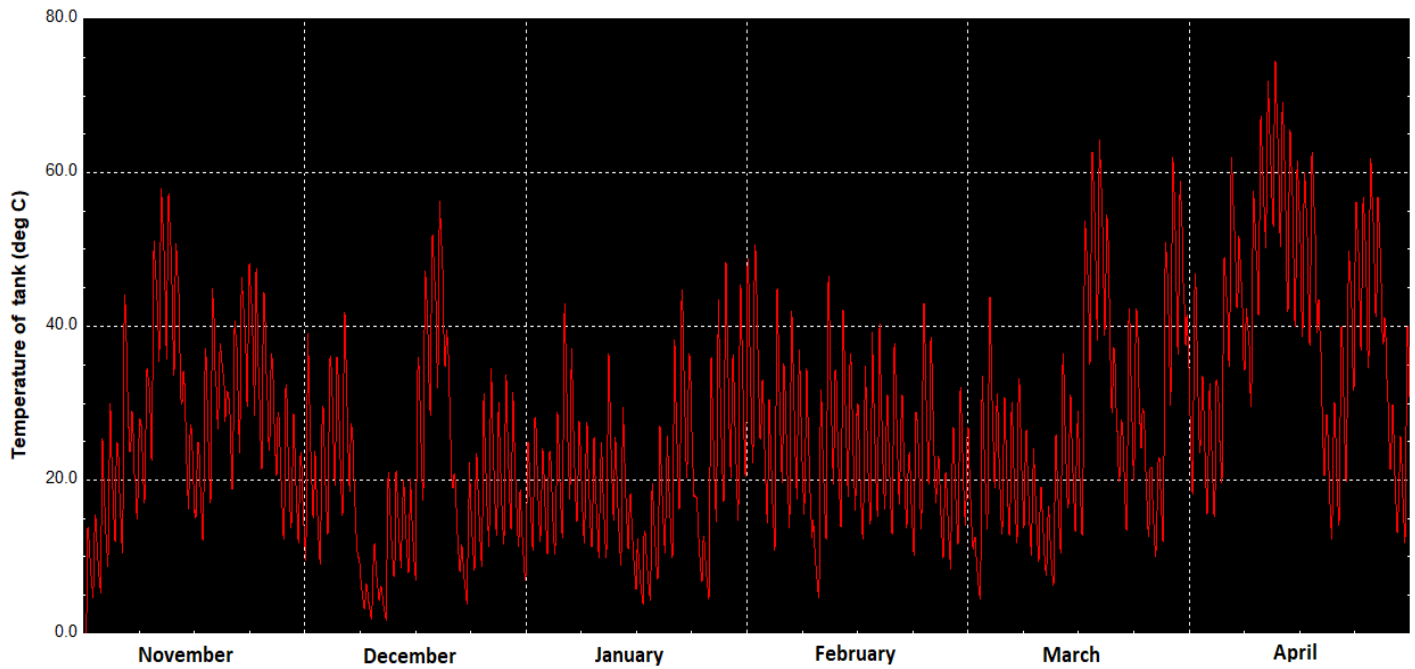
Σε αυτή τη ενότητα παρουσιάζονται τα διαγράμματα των θερμοκρασιών και των φορτίων της εγκατάστασης που προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα TRNSYS.



Εικόνα 7.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου και θερμοκρασίας περιβάλλοντος ανά μήνα

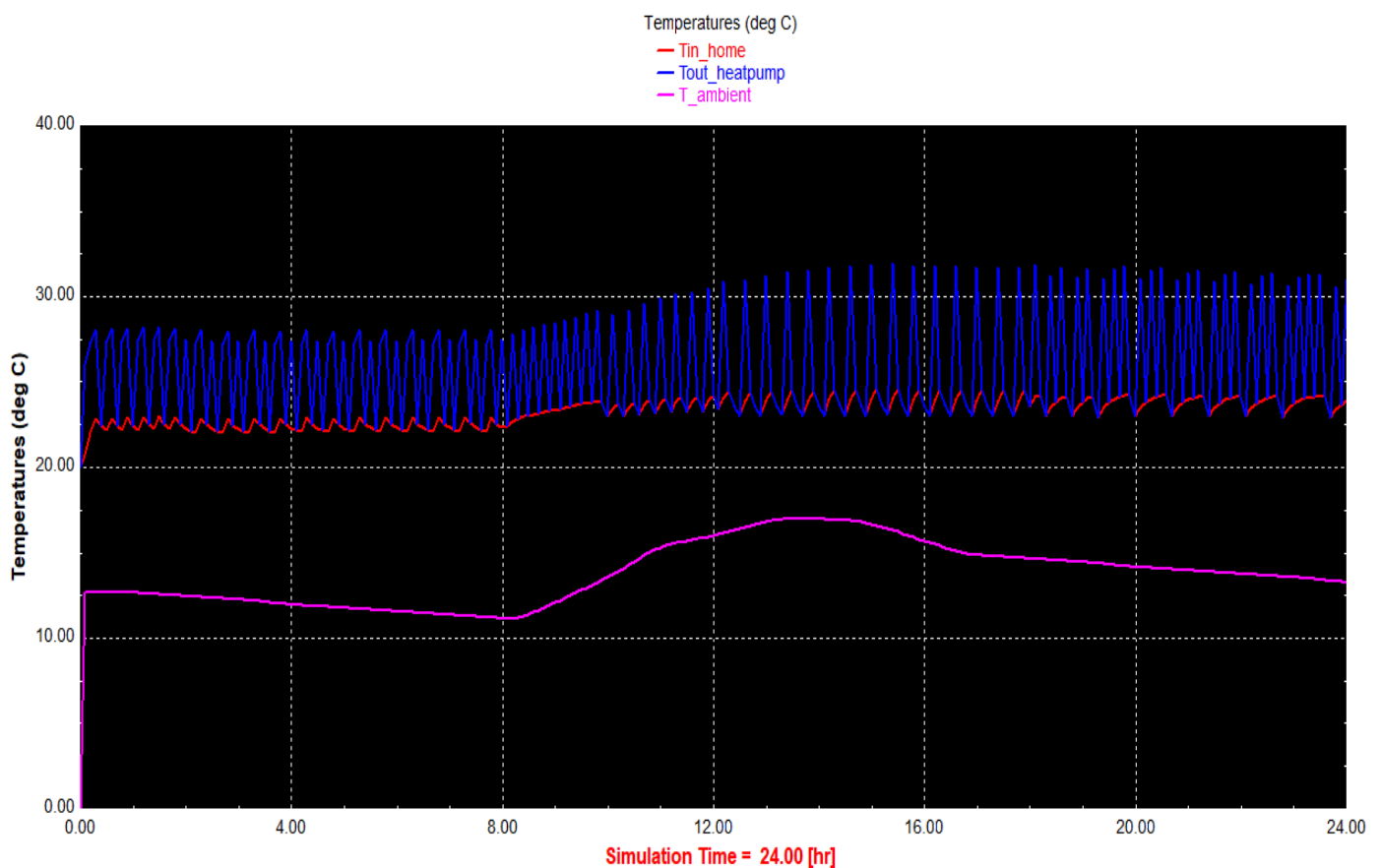


Εικόνα 7.2: Διάγραμμα θερμοκρασίας του συλλέκτη ανά μήνα



Εικόνα 7.3: Διάγραμμα θερμοκρασίας του δοχείου αποθήκευσης ανά μήνα

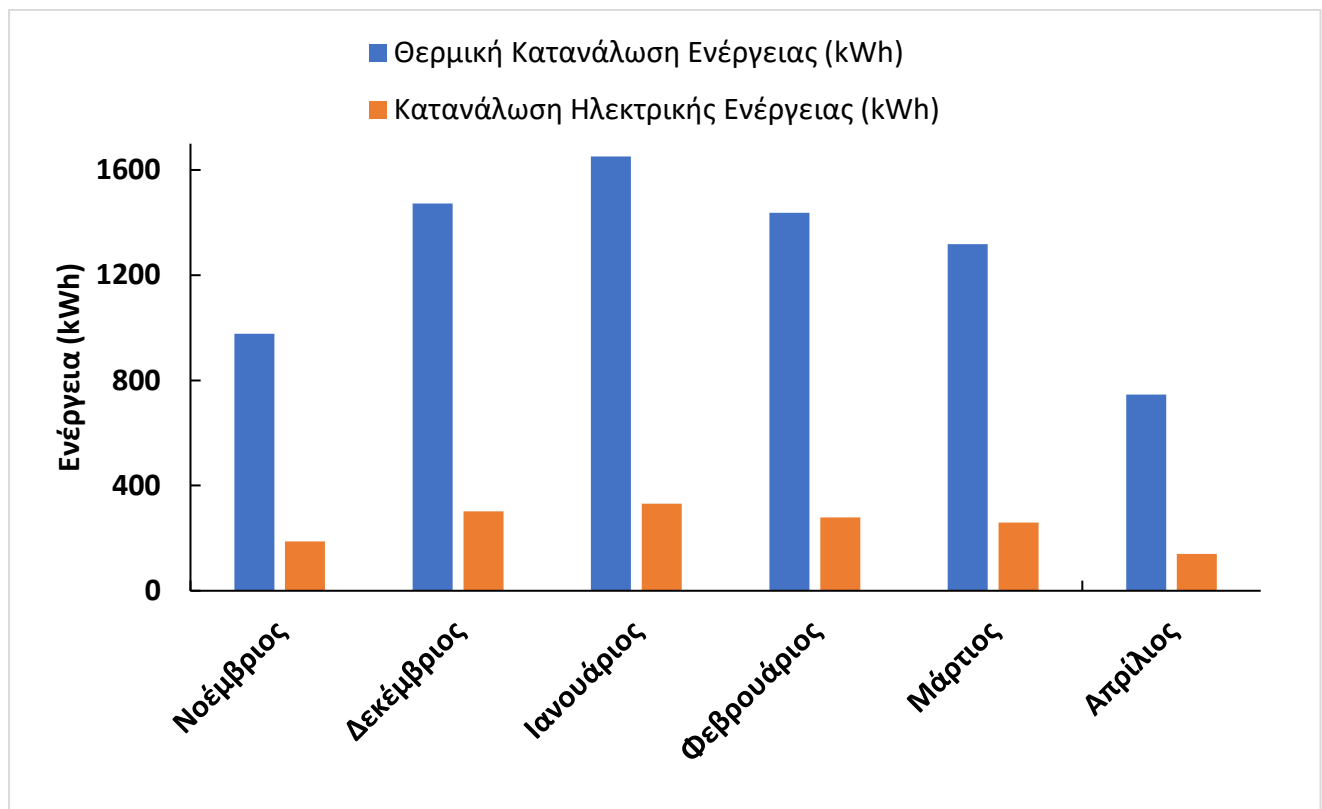
Από τη εικόνα 7.1, παρατηρούμε ότι υπάρχει ομοιόμορφο προφίλ θερμοκρασιών στο κτίριο ακόμα και τις μέρες του Ιανουαρίου όπου η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι πολύ χαμηλή. Στη εικόνα 7.3 παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του δοχείου αποθήκευσης είναι μέσα στα αποδεκτά όρια που είχαμε θέσει για τη σωστή λειτουργία του συστήματος, δηλαδή δεν ξεπερνά τους 100°C και ούτε παίρνει πολύ χαμηλές τιμές. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του νερού του δοχείου αποθήκευσης είναι σχεδόν η ίδια με τη θερμοκρασία του νερού συλλέκτη σε κάθε χρονική στιγμή. Αυτό δείχνει ότι το συγκεκριμένο κύκλωμα λειτουργεί ομαλά.



Εικόνα 7.4: Διάγραμμα θερμοκρασίας εντός κτιρίου, θερμοκρασίας εξόδου αέρα από τη αντλία θερμότητας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος για τη 1^η Ιανουαρίου

Παρατηρείται ότι το σύστημα μας κατά την εκκίνηση του χρειάζεται κάποια λεπτά για να αρχίσει να λειτουργεί ομαλά και η θερμοκρασία εντός του κτιρίου να σταθεροποιηθεί. Όπως φαίνεται, στο πιο πάνω διάγραμμα η θερμοκρασία εντός κτιρίου κυμαίνεται μεταξύ 22-23 °C κατά τη διάρκεια μιας ημέρας του Ιανουαρίου στην οποία η θερμοκρασία είναι κάτω από 16 °C. Ο αέρας στη έξοδο της αντλία θερμότητας έχει συνεχώς θερμοκρασία πάνω από 23 °C.

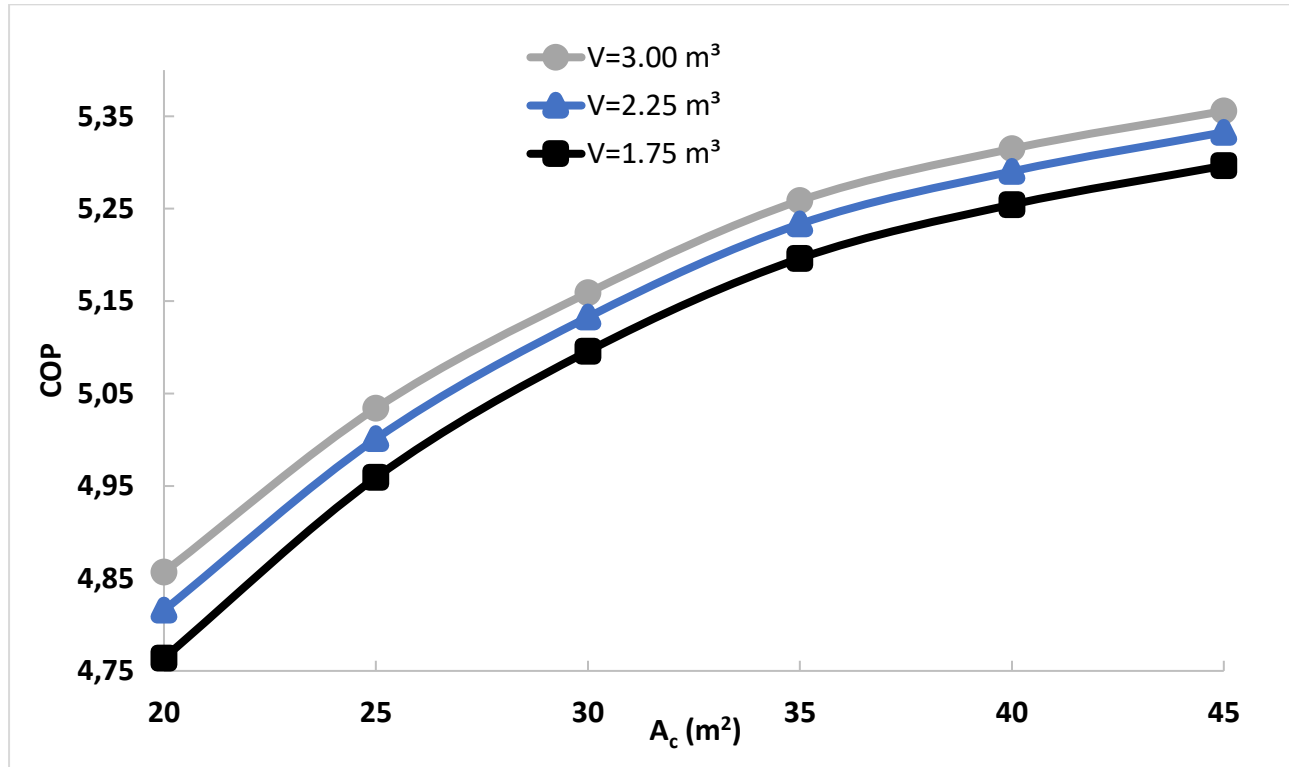
Από τη εικόνα 7.5, παρατηρούμε ότι οι μήνες Νοέμβριος και Απρίλιος έχουν το μικρότερο θερμικό φορτίο, όπως ήταν αναμενόμενο. Ο μήνας με το μεγαλύτερο θερμικό φορτίο άρα και με τη μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο Ιανουάριος.



Εικόνα 7.5: Διάγραμμα θερμικής κατανάλωσης ενέργειας από το κτίριο και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τη αντλία θερμότητας ανά μήνα

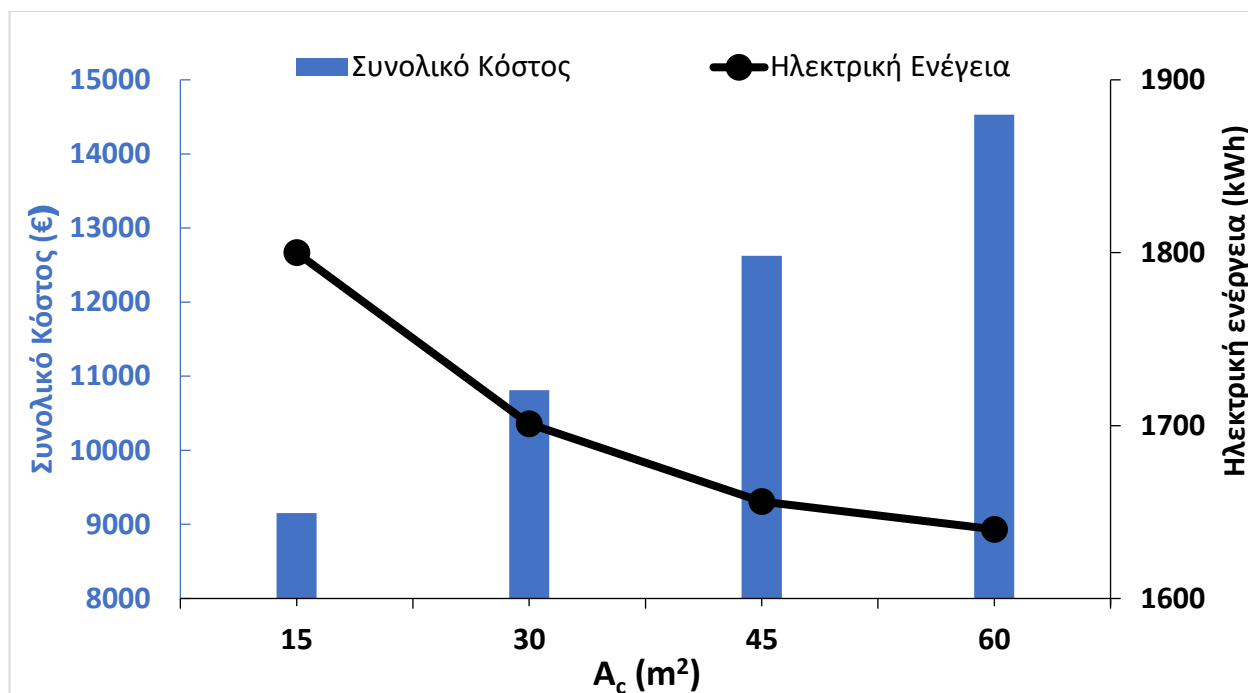
7.2 Αποτελέσματα ενεργειακής απόδοσης και συνολικού κόστους της εγκατάστασης

Σε αυτή τη ενότητα, παρουσιάζονται χρήσιμα διαγράμματα, τα οποία δείχνουν πως οι βασικοί παράμετροι της εγκατάστασης (επιφάνεια συλλεκτών και όγκος δοχείου αποθήκευσης) επηρεάζουν το συνολικό κόστος της εγκατάστασης και ταυτόχρονα πως επηρεάζεται η ενεργειακή απόδοση της Η.Υ.Α.Θ.

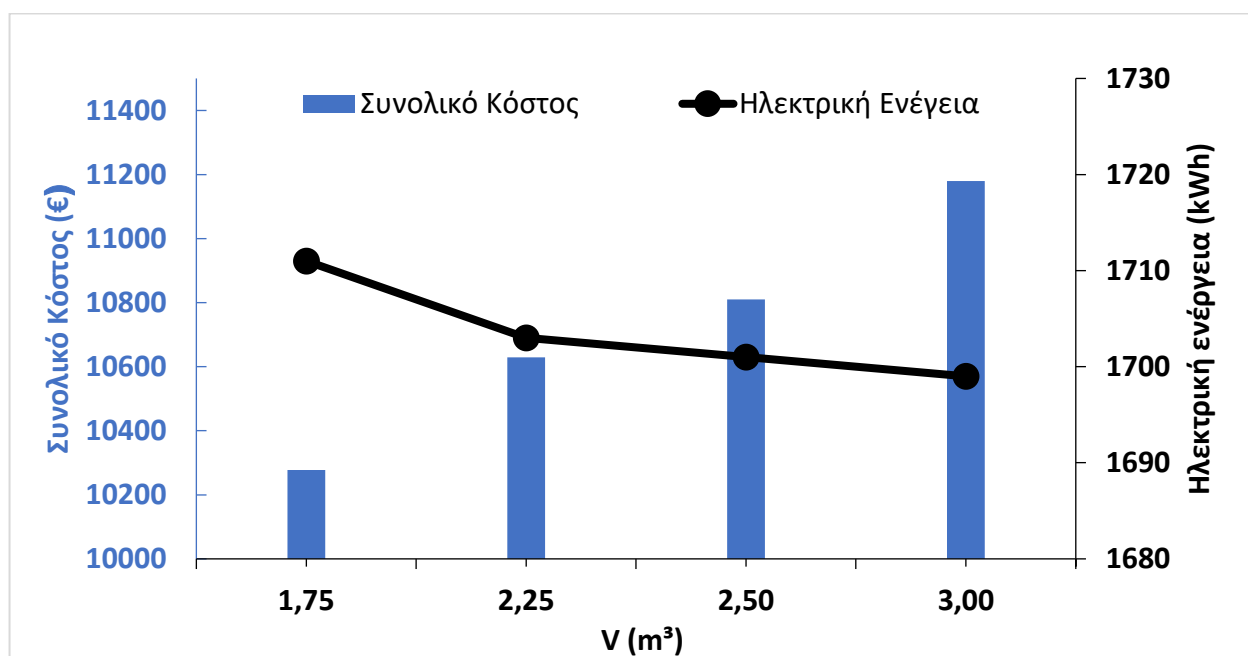


Εικόνα 7.6: Διάγραμμα συντελεστή συμπεριφοράς συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας για διάφορες τιμές του όγκου του δοχείου για τη περίοδο του χειμώνα

Από το πιο πάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι με τη αύξηση της συλλεκτική επιφάνειας ή του όγκου του δοχείου αποθήκευσης, αυξάνεται και ο συντελεστής συμπεριφοράς COP. Παρατηρείται όμως ότι με τη αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας για τιμές της μεγαλύτερες των $45m^2$ δεν υπάρχει σημαντική αύξηση του COP. Το αντίστοιχο συμβαίνει και για το όγκο του δοχείου αποθήκευσης για τιμές του μεγαλύτερες από $3.0 m^3$.



Εικόνα 7.7: Διάγραμμα συνολικού κόστους Η.Υ.Α.Θ και συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τη συλλεκτική επιφάνεια και για όγκο δοχείου αποθήκευσης σταθερό και ίσο με 2.5 m³



Εικόνα 7.8: Διάγραμμα συνολικού κόστους Η.Υ.Α.Θ και συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με το όγκο δοχείου αποθήκευσης και για σταθερή συλλεκτική επιφάνεια ίση με 30 m²

Σύμφωνα με τα πιο πάνω διαγράμματα, παρατηρούμε ότι για μια συγκεκριμένη τιμή του όγκου του δοχείου, καθώς η συλλεκτική επιφάνεια αυξάνεται, η ηλεκτρική ενέργεια μειώνεται. Παρ' όλα αυτά, το συνολικό κόστος της εγκατάστασης αυξάνεται σε πολύ μεγαλύτερο ρυθμό, διότι το αρχικό κόστος για τη αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας είναι πολύ μεγαλύτερο από ότι το κόστος που εξοικονομούμε λόγω της μείωσης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Καθώς ο όγκος δοχείου αποθήκευσης αυξάνεται, για σταθερή συγκεκριμένη συλλεκτική επιφάνεια παρατηρούμε ότι η ηλεκτρική ενέργεια μειώνεται αλλά σε πολύ μικρότερο ρυθμό από ότι στη προηγούμενη περίπτωση. Να σημειωθεί ότι τα πιο πάνω διαγράμματα είναι θεωρητικά για να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα και δεν εγγυόνται ομοιόμορφη θερμοκρασία στο κτίριο.

Η επιλογή των δυο αυτών μεγεθών είναι αρκετά σύνθετο πρόβλημα διότι:

- Όταν το ένα μέγεθος (π.χ. συλλεκτική επιφάνεια) μειώνεται απαιτείται αύξηση του άλλου μεγέθους(π.χ. όγκου δοχείου) ώστε να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα και ομοιόμορφη θερμοκρασία στο κτίριο και αυτό οδηγεί σε αύξηση του κόστους.
- Καθώς οι διαστάσεις των δυο αυτών μεγεθών μειώνονται, μειώνεται το αρχικό κόστος της εγκατάστασης αλλά παράλληλα το κόστος λειτουργίας (κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας) αυξάνεται, με αποτέλεσμα η μεταβολή του συνολικού κόστους να είναι αρχικά απρόβλεπτη και λίγο δύσκολο για να υπολογιστεί.

Επομένως, φτάνουμε στο συμπέρασμα, θα πρέπει να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός τιμής της συλλεκτικής επιφάνειας και όγκου του δοχείου αποθήκευσης ώστε το συνολικό κόστος να είναι το ελάχιστο δυνατό και με τη προϋπόθεση το προφίλ θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου να είναι ομοιόμορφο χωρίς απότομες αυξομειώσεις κατά την διάρκεια της περιόδου Νοεμβρίου-Απριλίου.

7.3 Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους με τη χρήση του προγράμματος GenOpt

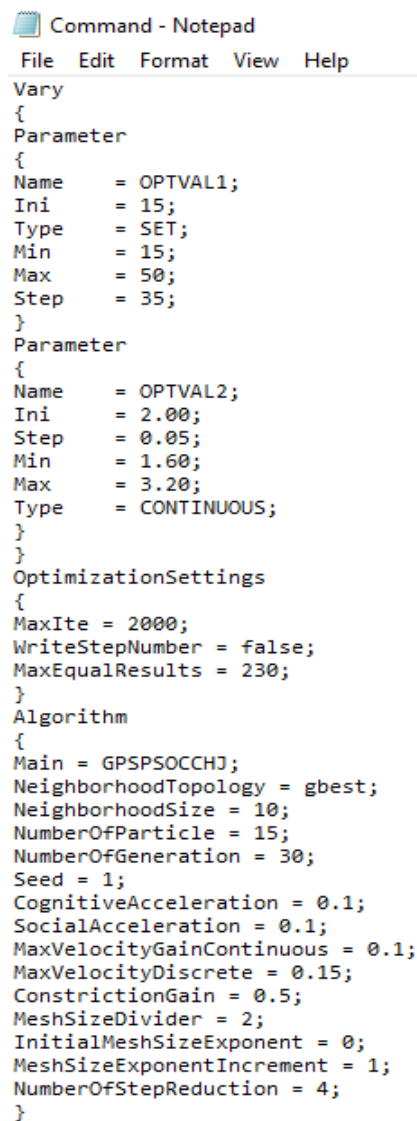
Στόχος είναι η επιλογή εμβαδού συλλεκτικής επιφάνειας και όγκου του δοχείου αποθήκευσης που να ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος και να διατηρείται ομοιόμορφη θερμοκρασία στο κτίριο.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα έχει πολλά τοπικά ακρότατα, για αυτό πρέπει να υπάρχει προσοχή η μέθοδος που χρησιμοποιείται να μην “εγκλωβίζεται” εύκολα σε τοπικά ακρότατα. Για να αποφευχθεί αυτό, κατά τη βελτιστοποίηση μέσω του προγράμματος, έγιναν αρκετά τρεξίματα και κάθε φορά δίνονταν διαφορετικές αρχικές τιμές στις μεταβλητές σχεδιασμού, έτσι ώστε στο τέλος να ελέγχεται αν το αποτέλεσμα είναι το ίδιο (βέλτιστο) ανεξαρτήτως των αρχικών τιμών που δίνονται. Επίσης, λόγω του ότι η συνάρτηση του κόστους είναι σε μερικά σημεία ασυνεχής, πρέπει να χρησιμοποιείται κατάλληλη μέθοδος βελτιστοποίησης έτσι ώστε να μην επηρεάζεται από τις ασυνέχειες αυτές.

Για το συγκεκριμένο σύστημα, δοκιμάστηκαν αρκετές μέθοδοι βελτιστοποίησης έτσι ώστε να γίνει σύγκριση τους και να εξαχθούν συμπεράσματα. Πιο κάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων που θεωρήθηκαν ως οι πιο ικανές για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

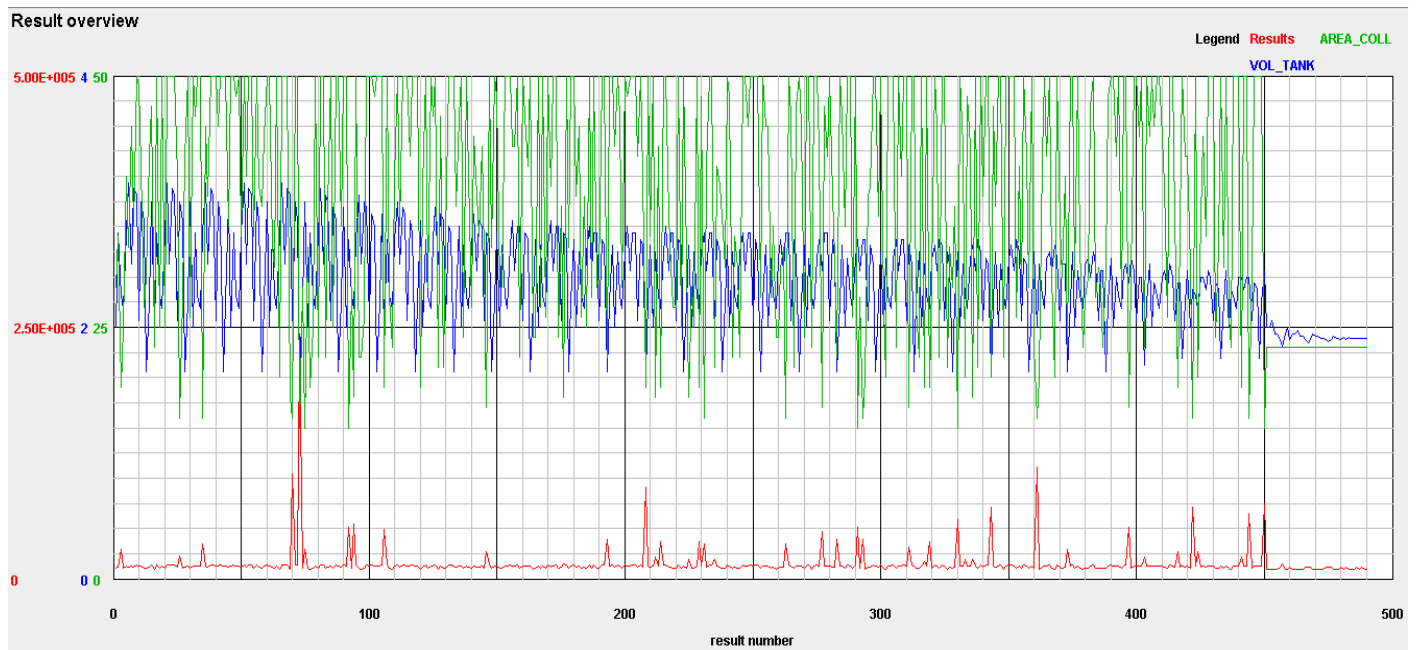
➤ **Αποτελέσματα Χρήσης Υβριδικού αλγορίθμου (Hybrid method for continues and discrete)**

Η συλλεκτική επιφάνεια ορίστηκε να παίρνει διακριτές τιμές από 15 m² μέχρι 50 m² με βήμα 1 m² και αρχική τιμή 29 m² και ο όγκος του δοχείου ορίστηκε να παίρνει συνεχείς τιμές από 1.60 m³ μέχρι 3.20 m³ με βήμα 0.05 (χρειάζεται για το πρώτο μέρος της μεθόδου) και με αρχική τιμή ίση με 2.00 m². Οι παράμετροι για τη λειτουργία της μεθόδου, εμφανίζονται στο αρχείο Command που δημιουργήθηκε και φαίνονται στη εικόνα 7.9. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου αλγορίθμου.

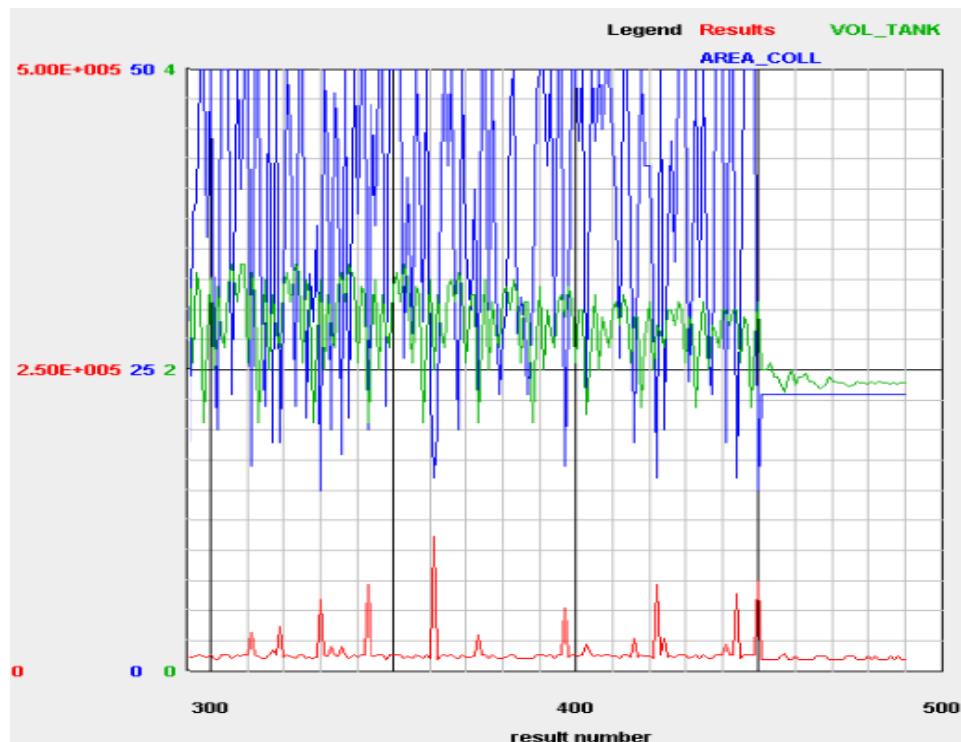


```
Command - Notepad
File Edit Format View Help
Vary
{
Parameter
{
Name = OPTVAL1;
Ini = 15;
Type = SET;
Min = 15;
Max = 50;
Step = 35;
}
Parameter
{
Name = OPTVAL2;
Ini = 2.00;
Step = 0.05;
Min = 1.60;
Max = 3.20;
Type = CONTINUOUS;
}
}
OptimizationSettings
{
MaxIte = 2000;
WriteStepNumber = false;
MaxEqualResults = 230;
}
Algorithm
{
Main = GPSPSOCCHJ;
NeighborhoodTopology = gbest;
NeighborhoodSize = 10;
NumberOfParticle = 15;
NumberOfGeneration = 30;
Seed = 1;
CognitiveAcceleration = 0.1;
SocialAcceleration = 0.1;
MaxVelocityGainContinuous = 0.1;
MaxVelocityDiscrete = 0.15;
ConstrictionGain = 0.5;
MeshSizeDivider = 2;
InitialMeshSizeExponent = 0;
MeshSizeExponentIncrement = 1;
NumberOfStepReduction = 4;
}
```

Εικόνα 7.9: Παράμετροι της υβριδικής μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε



Εικόνα 7.10: Διάγραμμα αποτελεσμάτων Υβριδικού αλγόριθμου



Εικόνα 7.11: Διάγραμμα αποτελεσμάτων στις τελευταίες επαναλήψεις του Υβριδικού αλγόριθμου

Σύμφωνα, με αυτά που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, εάν για τη επιλογή των παραμέτρων που κάναμε, η θερμοκρασία εντός του κτιρίου ήταν ανομοιόμορφη και κάτω από ένα όριο για μεγάλο χρονικό διάστημα, τότε η συνάρτηση του κόστους έπαιρνε μια πολύ μεγάλη τιμή έτσι ώστε οι υποψήφιες λύσεις αυτές να απορρίπτονται. Για αυτό, και στη τελευταία στήλη του πίνακα αποτελεσμάτων διευκρινίζεται αν η υποψήφια λύση που δοκιμάστηκε από τον αλγόριθμο είναι αποδεκτή ή όχι.

Αριθμός Προσομοίωσης	Αριθμός Επανάληψης	Συλλεκτική Επιφάνεια (m ²)	Όγκος δοχείου (m ³)	Αποτέλεσμα συνάρτησης κόστους	Αριθμός Γενεάς (Generation) / Σχόλια του GenOpt	Σχόλιο (Αποδεκτή ή Απορριπτόμενη λύση)
1	1	29	2.00	10336.63	1	Αποδεκτή
2	2	34	2.75	11451.37	1	Αποδεκτή
3	3	19	2.25	29413.99	1	Απορρίπτεται
4	4	25	2.15	9993.92	1	Αποδεκτή
5	5	40	2.75	12182.42	1	Αποδεκτή
6	6	33	3.15	11630.64	1	Αποδεκτή
7	7	45	2.50	12626.36	1	Αποδεκτή
8	8	35	3.10	11829.37	1	Αποδεκτή
9	9	50	3.05	13657.19	1	Αποδεκτή
10	10	49	2.05	12806.35	1	Αποδεκτή
11	11	41	3.00	12500.26	1	Αποδεκτή
12	12	27	2.85	10718.34	1	Αποδεκτή
13	13	30	1.65	10208.79	1	Αποδεκτή
14	14	42	2.20	12040.47	1	Αποδεκτή
15	15	47	3.00	13246.54	1	Αποδεκτή
16	16	23	2.00	9674.49	2	Σχεδόν Βέλτιστη
17	17	50	2.75	13444.09	2	Αποδεκτή
18	18	25	2.25	10062.07	2	Αποδεκτή
19	19	50	2.15	13005.82	2	Αποδεκτή
20	20	25	2.75	10422.56	2	Αποδεκτή
21	21	50	3.15	13735.30	2	Αποδεκτή
22	22	50	2.50	13254.95	2	Αποδεκτή
23	23	50	3.10	13695.06	2	Αποδεκτή
23	24	50	3.05	13657.19	2	Αποδεκτή
24	25	40	2.05	11676.70	2	Αποδεκτή
25	26	16	3.00	22113.97	2	Απορρίπτεται

26	27	28	2.85	10836.88	2	Αποδεκτή
27	28	42	1.65	11651.01	2	Αποδεκτή
28	29	50	2.20	13040.27	2	Αποδεκτή
29	30	26	3.00	10716.45	2	Αποδεκτή
...	
...(Αποτελέσματα γενεών από 2 έως 30)...						
...	
243	438	50	2.25	13075.24	30	Αποδεκτή
243	439	50	2.15	13005.82	30	Αποδεκτή
243	440	50	2.40	13186.20	30	Αποδεκτή
244	441	19	2.40	22019.73	30	Απορρίπτεται
245	442	50	2.30	13111.77	30	Αποδεκτή
245	443	50	2.40	13186.20	30	Αποδεκτή
246	444	16	2.40	64189.11	30	Απορρίπτεται
246	445	30	2.05	10483.84	30	Αποδεκτή
247	446	50	2.35	13147.94	30	Αποδεκτή
247	447	50	2.30	13111.77	30	Αποδεκτή
247	448	50	1.75	12725.99	30	Αποδεκτή
247	449	50	2.20	13040.27	30	Αποδεκτή
248	450	15	2.45	74119.16	30	Απορρίπτεται
16	16	23	2.00	9674.49	Minimum point	Αποδεκτή
248	451	23	2.00	9674.49	Minimum point of initialization	Αποδεκτή
249	452	23	2.00	9674.49	Initial point	Αποδεκτή
250	453	23	2.05	9708.74	Cost not reduced at OPTVAL2+dOPTVAL2	Αποδεκτή
251	453	23	1.95	9640.99	Cost reduced at OPTVAL2-dOPTVAL2	Βέλτιστη
251	453	23	1.95	9640.99	Global search reduced cost	Αποδεκτή
252	454	23	1.90	12106.52	Exploration base Delta = 1 0	Απορρίπτεται
253	454	23	1.85	14570.25	Cost not reduced at OPTVAL2-dOPTVAL2	Απορρίπτεται
253	454	23	1.95	9640.99	Cost reduced at OPTVAL2+dOPTVAL2	Αποδεκτή
253	454	23	2.00	9674.49	Cost not reduced at OPTVAL2+dOPTVAL2	Αποδεκτή
253	454	23	1.90	12106.52	Cost not reduced at OPTVAL2-dOPTVAL2	Απορρίπτεται
253	454	23	1.95	9640.99	Iteration step did not reduce cost Reduce step size to '0 5'	Αποδεκτή

253	455	23	1.95	9640.99	Exploration base Delta = 0 5	Αποδεκτή
254	455	23	1.98	9657.08	Cost not reduced at OPTVAL2+dOPTVAL2	Αποδεκτή
255	455	23	1.93	9622.66	Cost reduced at OPTVAL2-dOPTVAL2	Αποδεκτή
255	455	23	1.93	9622.66	Global search reduced cost	Αποδεκτή
255	456	23	1.90	12106.52	Exploration base Delta = 0 5	Απορρίπτεται
256	456	23	1.88	12084.34	Cost reduced at OPTVAL2-dOPTVAL2	Απορρίπτεται
256	456	23	1.90	12106.52	Cost not reduced at OPTVAL2-dOPTVAL2	Απορρίπτεται
256	456	23	1.95	9640.99	Cost not reduced at OPTVAL2+dOPTVAL2	Αποδεκτή
256	456	23	1.93	9622.66	Iteration step did not reduce cost Reduce step size to '0 25'	Αποδεκτή
256	457	23	1.93	9622.66	Exploration base Delta = 0 25	Αποδεκτή
257	457	23	1.91	9612.54	Cost reduced at OPTVAL2-dOPTVAL2	Αποδεκτή
257	457	23	1.91	9612.54	Global search reduced cost	Αποδεκτή
257	458	23	1.90	12106.52	Exploration base Delta = 0 25	Απορρίπτεται
258	458	23	1.89	12096.45	Cost reduced at OPTVAL2-dOPTVAL2	Απορρίπτεται
258	458	23	1.90	12106.52	Cost not reduced at OPTVAL2-dOPTVAL2	Απορρίπτεται
258	458	23	1.93	9622.66	Cost not reduced at OPTVAL2+dOPTVAL2	Αποδεκτή
258	458	23	1.91	9612.54	Iteration step did not reduce cost Reduce step size to '0 125'	Αποδεκτή
258	459	23	1.91	9612.54	Exploration base Delta = 0 125	Αποδεκτή
259	459	23	1.92	9617.55	Cost not reduced at OPTVAL2+dOPTVAL2	Αποδεκτή
260	459	23	1.92	9617.55	Cost not reduced at OPTVAL2+dOPTVAL2	Αποδεκτή
260	459	23	1.91	9612.54	Iteration step did not reduce cost Reduce step size to '0 0625'	Αποδεκτή
260	460	23	1.91	9612.54	Exploration base Delta = 0 0625	Αποδεκτή

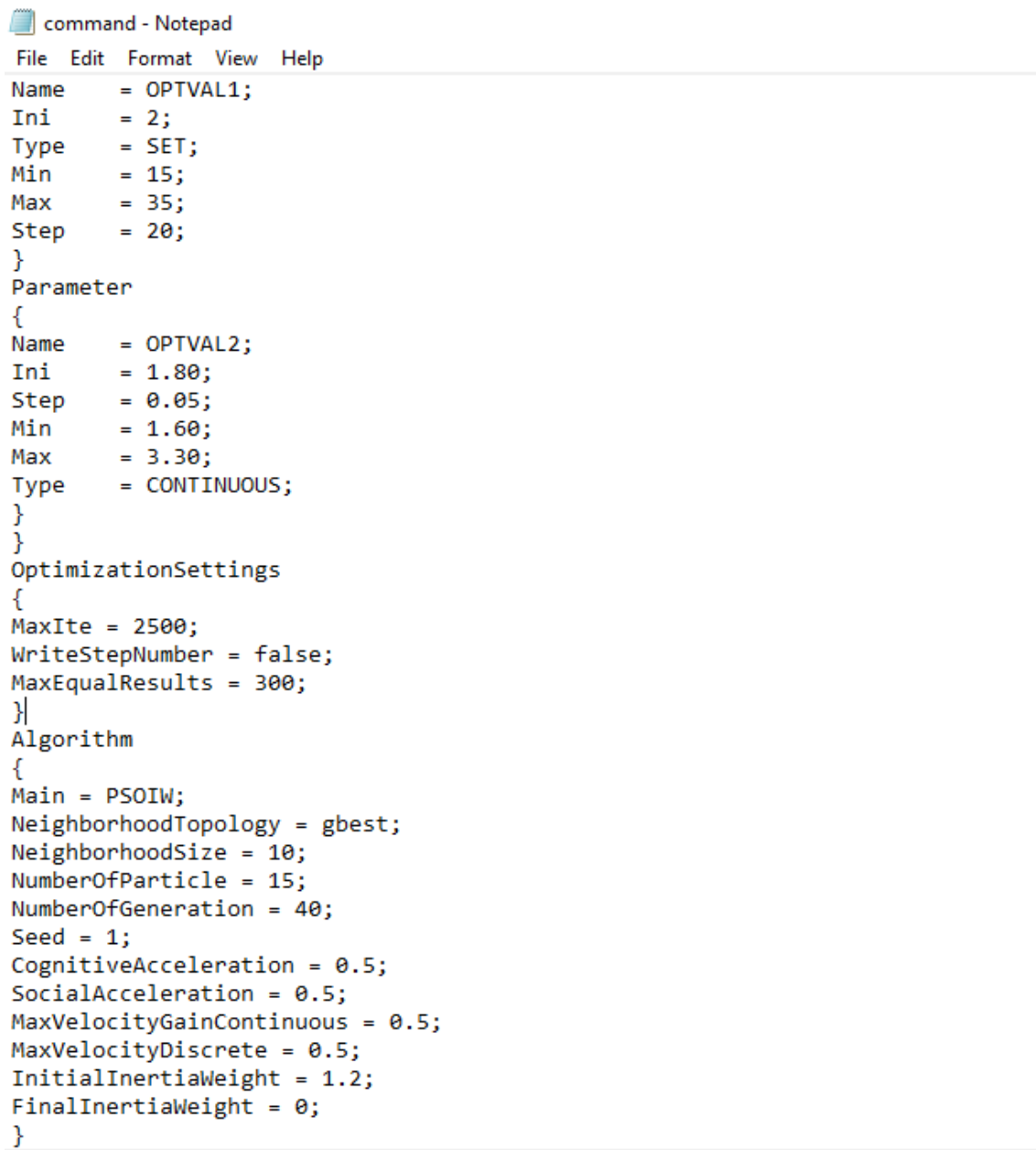
261	460	23	1.90	12112.18	Cost not reduced at OPTVAL2-dOPTVAL2	Απορρίπτεται
262	460	23	1.92	9615.04	Cost not reduced at OPTVAL2+dOPTVAL2	Αποδεκτή
262	460	23	1.92	9615.04	Cost not reduced at OPTVAL2+dOPTVAL2	Αποδεκτή
262	460	23	1.91	9612.54	<i>Iteration step did not reduce cost Maximum number of step reductions reached</i>	Βέλτιστη

Πίνακας 7.1 : Αποτελέσματα Υβριδικού αλγόριθμου στο πρόγραμμα GenOpt

Όπως φαίνεται, στο πιο πάνω πίνακα η λειτουργία του υβριδικού αλγόριθμου χωρίζεται σε 2 βήματα. Στο πρώτο βήμα, εφαρμόζεται η μέθοδος Particle Swarm Optimization Constriction Coefficient μέχρι να συμπληρωθεί ο αριθμός όλων των γενεών που του καθορίσαμε (Generation 30) βρίσκοντας μια καλή λύση. Δηλαδή, βρίσκει μια λύση κοντά στη βέλτιστη στη 16^η επανάληψη όπως φαίνεται στο πιο πάνω πίνακα. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί τη πιο πάνω επιλογή, η οποία αποτελούσε τη καλύτερη λύση για το πρώτο μέρος λειτουργίας του και στη συνέχεια, στο 2^ο μέρος λειτουργίας του εφαρμόζει το αλγόριθμο Hookes-Jeeves για να βελτιώσει ακόμη περισσότερο τη λύση που βρήκε. Έτσι, καταφέρνει εν τέλη να βρει τη καλύτερη λύση.

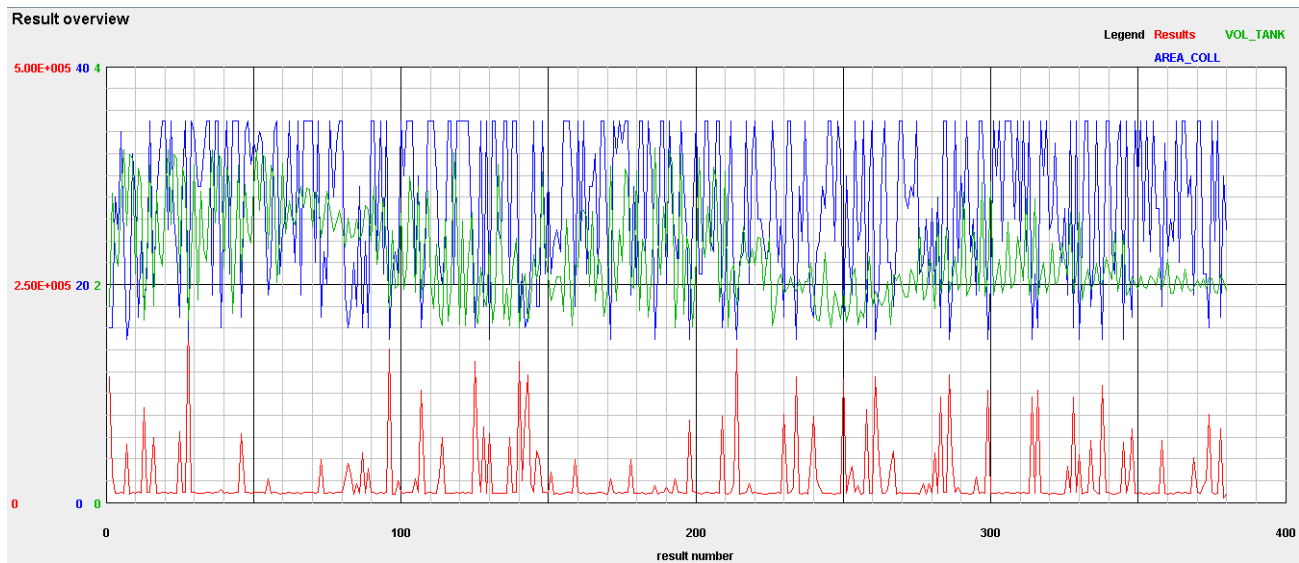
➤ **Αποτελέσματα μεθόδου Particle Swarm Optimization Algorithm With Inertial Weight (PSOIW)**

Για αυτή τη μέθοδο ορίσαμε τις πιο κάτω παραμέτρους για τη λειτουργία της, οι οποίες εμφανίζονται στο αρχείο Command που δημιουργήθηκε. Η συλλεκτική επιφάνεια ορίστηκε να παίρνει διακριτές τιμές από 15 m² μέχρι 35 m² με βήμα 1 m² και αρχική τιμή 17 m² και ο όγκος του δοχείου ορίστηκε να παίρνει συνεχείς τιμές από 1.80 m³ μέχρι 3.30 m³ με βήμα 0.05 και με αρχική τιμή ίση με 1.80 m³. Στη συνέχεια, φαίνονται τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου αλγορίθμου.

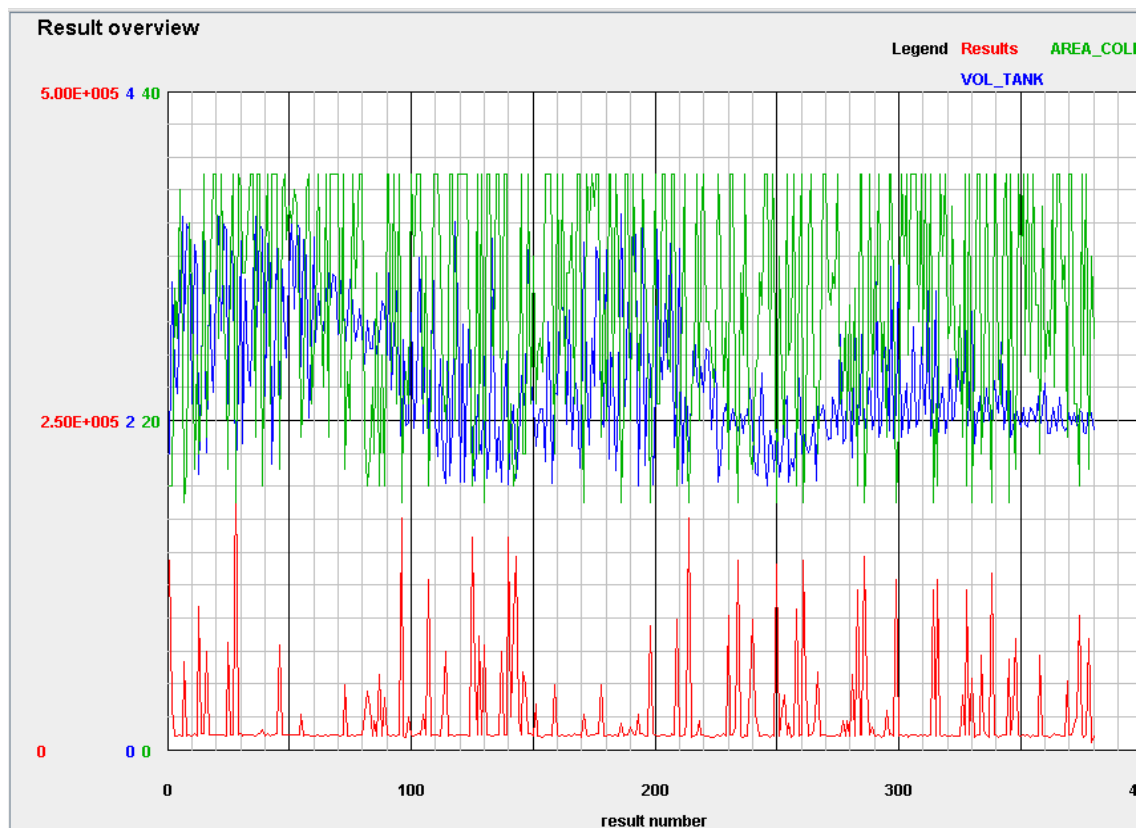


```
command - Notepad
File Edit Format View Help
Name = OPTVAL1;
Ini = 2;
Type = SET;
Min = 15;
Max = 35;
Step = 20;
}
Parameter
{
Name = OPTVAL2;
Ini = 1.80;
Step = 0.05;
Min = 1.60;
Max = 3.30;
Type = CONTINUOUS;
}
}
OptimizationSettings
{
MaxIte = 2500;
WriteStepNumber = false;
MaxEqualResults = 300;
}
}
Algorithm
{
Main = PSOIW;
NeighborhoodTopology = gbest;
NeighborhoodSize = 10;
NumberOfParticle = 15;
NumberOfGeneration = 40;
Seed = 1;
CognitiveAcceleration = 0.5;
SocialAcceleration = 0.5;
MaxVelocityGainContinuous = 0.5;
MaxVelocityDiscrete = 0.5;
InitialInertiaWeight = 1.2;
FinalInertiaWeight = 0;
}
```

Εικόνα 7.12: Παράμετροι της μεθόδου PSO IW που χρησιμοποιήθηκε



Εικόνα 7.13: Διάγραμμα αποτελεσμάτων αλγόριθμου PSO IW



Εικόνα 7.14: Διάγραμμα αποτελεσμάτων αλγόριθμου PSO IW

Αριθμός Προσομοίωσης	Αριθμός Επανάληψης	Συλλεκτική Επιφάνεια (m ²)	Όγκος δοχείου (m ³)	Αποτέλεσμα συνάρτησης κόστους	Αριθμός γενεάς (Generation)	Σχόλιο
1	1	16	1.80	143792.55	1	Απορρίπτεται
2	2	16	2.84	31998.91	1	Απορρίπτεται
3	3	28	2.29	10430.80	1	Αποδεκτή
4	4	25	2.17	10002.26	1	Αποδεκτή
5	5	34	2.81	11495.78	1	Αποδεκτή
6	6	24	3.24	10661.89	1	Αποδεκτή
7	7	15	2.54	66681.69	1	Απορρίπτεται
8	8	17	3.19	9868.81	1	Αποδεκτή
9	9	32	3.15	11515.79	1	Αποδεκτή
10	10	28	2.10	10294.46	1	Αποδεκτή
11	11	17	3.07	12278.33	1	Απορρίπτεται
12	12	24	2.91	10424.14	1	Αποδεκτή
13	13	18	1.67	108920.65	1	Απορρίπτεται
14	14	21	2.24	12122.26	1	Απορρίπτεται
15	15	35	3.09	11825.39	1	Αποδεκτή
16	16	19	1.80	74107.90	2	Απορρίπτεται
17	17	28	2.84	10831.83	2	Αποδεκτή
18	18	32	2.29	10888.15	2	Αποδεκτή
19	19	35	2.17	11148.39	2	Αποδεκτή
20	20	35	2.81	11614.47	2	Αποδεκτή
21	21	25	3.24	10779.42	2	Αποδεκτή
22	22	35	2.54	11417.79	2	Αποδεκτή
23	23	26	3.19	10858.01	2	Αποδεκτή
24	24	23	3.15	10490.59	2	Αποδεκτή
25	25	17	2.10	81594.58	2	Απορρίπτεται
26	26	30	3.07	11228.03	2	Αποδεκτή
27	27	35	2.91	11689.95	2	Αποδεκτή
28	28	15	1.68	213608.53	2	Απορρίπτεται
29	29	35	2.25	11206.47	2	Αποδεκτή
30	30	34	3.09	11705.04	2	Αποδεκτή
31	31	29	1.86	10235.24	3	Αποδεκτή
32	32	29	2.86	10953.37	3	Αποδεκτή
33	33	32	2.33	10914.22	3	Αποδεκτή
34	34	35	2.21	11178.20	3	Αποδεκτή
35	35	35	2.82	11626.06	3	Αποδεκτή
36	36	19	3.24	10119.05	3	Αποδεκτή
37	37	35	2.57	11437.63	3	Αποδεκτή
38	38	35	3.19	11899.87	3	Αποδεκτή
39	39	16	3.16	14728.53	3	Απορρίπτεται

...	
...Αποτελέσματα γενεών από 3 έως 12...						
...	
166	166	32	1.85	10580.50	12	Αποδεκτή
167	167	21	2.25	12125.96	12	Αποδεκτή
168	168	35	2.17	11149.18	12	Αποδεκτή
169	169	35	1.71	10830.40	12	Αποδεκτή
170	170	23	1.96	9647.50	12	Βέλτιστη
171	171	15	3.08	27059.97	12	Απορρίπτεται
172	172	35	2.27	11224.65	12	Αποδεκτή
173	173	32	1.85	10584.34	12	Αποδεκτή
174	174	35	2.50	11387.69	12	Αποδεκτή
175	175	33	2.21	10942.25	12	Αποδεκτή
176	176	35	3.06	11796.16	12	Αποδεκτή
177	177	35	2.97	11735.61	12	Αποδεκτή
178	178	19	2.01	49251.28	12	Απορρίπτεται
179	179	29	1.96	10304.64	12	Αποδεκτή
180	180	20	3.04	10087.07	12	Αποδεκτή
181	181	35	1.76	10863.29	13	Αποδεκτή
182	182	35	2.41	11326.12	13	Αποδεκτή
183	183	22	2.29	9764.23	13	Αποδεκτή
184	184	35	1.70	10814.78	13	Αποδεκτή
185	185	30	2.14	10545.67	13	Αποδεκτή
186	186	15	3.26	19687.13	13	Απορρίπτεται
187	187	21	2.42	9748.70	13	Αποδεκτή
188	188	35	2.09	11094.37	13	Αποδεκτή
189	189	35	2.72	11544.77	13	Αποδεκτή
190	190	20	2.31	17059.60	13	Απορρίπτεται
191	191	35	3.23	11926.54	13	Αποδεκτή
192	192	27	3.10	10900.98	13	Αποδεκτή
193	193	24	1.60	27011.11	13	Απορρίπτεται
194	194	22	2.05	12094.99	13	Απορρίπτεται
195	195	35	3.20	11908.12	13	Αποδεκτή
331	331	24	1.86	9682.85	23	Αποδεκτή
332	332	35	2.02	11043.50	23	Αποδεκτή
333	333	35	2.15	11130.48	23	Αποδεκτή
334	334	18	1.96	71607.84	23	Απορρίπτεται
335	335	22	2.00	14562.41	23	Αποδεκτή
336	336	35	2.20	11168.77	23	Αποδεκτή
337	337	23	2.00	9672.45	23	Αποδεκτή
338	338	15	2.01	133824.63	23	Απορρίπτεται

339	339	35	2.24	11205.25	23	Αποδεκτή
340	340	35	2.13	11124.29	23	Αποδεκτή
341	341	23	2.05	9706.23	23	Αποδεκτή
342	342	21	2.48	9792.77	23	Αποδεκτή
343	343	33	1.94	10753.81	23	Αποδεκτή
344	344	35	2.10	11099.97	23	Αποδεκτή
345	345	15	2.46	69127.31	23	Απορρίπτεται
346	346	35	1.90	10964.54	24	Αποδεκτή
347	347	21	1.95	26925.34	24	Απορρίπτεται
348	348	17	2.07	84070.11	24	Απορρίπτεται
349	349	35	2.01	11036.79	24	Αποδεκτή
350	350	30	1.96	10421.39	24	Αποδεκτή
351	351	35	2.08	11088.25	24	Αποδεκτή
352	352	24	1.98	9765.69	24	Αποδεκτή
353	353	35	1.96	11005.23	24	Αποδεκτή
354	354	23	2.08	9730.91	24	Αποδεκτή
355	355	35	2.04	11062.42	24	Αποδεκτή
356	356	27	1.99	10106.38	24	Αποδεκτή
357	357	27	2.15	10213.67	24	Αποδεκτή
358	358	18	1.96	71611.42	24	Απορρίπτεται
359	359	33	2.06	10829.43	24	Αποδεκτή
360	360	23	2.23	9830.59	24	Αποδεκτή
361	361	26	1.92	9945.42	25	Αποδεκτή
362	362	24	1.92	9727.26	25	Αποδεκτή
363	363	35	2.08	11089.29	25	Αποδεκτή
364	364	22	2.04	12088.40	25	Αποδεκτή
365	365	35	1.94	10986.17	25	Αποδεκτή
366	366	35	2.14	11125.33	25	Αποδεκτή
367	367	28	1.97	10204.80	25	Αποδεκτή
368	368	30	1.94	10408.15	25	Αποδεκτή
369	369	19	1.97	51718.58	25	Απορρίπτεται
370	370	35	2.05	11063.75	25	Αποδεκτή
371	371	35	1.97	11013.24	25	Αποδεκτή
372	372	21	2.05	19493.08	25	Αποδεκτή
373	373	21	1.97	24431.74	25	Απορρίπτεται
374	374	16	2.06	101468.55	25	Απορρίπτεται
375	375	35	2.05	11064.95	25	Αποδεκτή

Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα μεθόδου PSO IW στο πρόγραμμα GenOpt

Παρατηρείται ότι αν και η αρχικές τιμές που δόθηκαν ήταν σχετικά κοντά στη βέλτιστη λύση, ο αλγόριθμος αυτός βρίσκει τη βέλτιστη λύση στη 120^η επανάληψη.

➤ Αποτελέσματα και σύγκριση μεθόδων βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν

Μέθοδος Βελτιστοποίησης	Εμβαδό Συλλεκτικής Επιφάνειας (m ²)	Όγκος Δοχείου Αποθήκευσης (m ³)	Κόστος (€)	Λύση (Βέλτιστη/Καλή)
Υβριδική Μέθοδος	23.00	1.91	9612.54	Βέλτιστη
PSO CC	22.00	2.15	9670.63	Σχεδόν Βέλτιστη
PSO IW	23.00	1.96	9647.50	Βέλτιστη
Coordinate Search	25.00	1.71	9692.19	Καλή (όχι βέλτιστη)
Nelder Mead Neill	23.03	1.91	9608.36	Βέλτιστη
Hooke-Jeeves	25.01	1.71	9690.50	Καλή (όχι βέλτιστη)
Παραμετρικά	23.00	1.95	9641.75	Βέλτιστη

Πίνακας 7.3: Συνοπτικά αποτελέσματα που βρήκε η κάθε μέθοδος

Οι διαφορές στα αποτελέσματα των πιο πάνω μεθόδων είναι πολύ μικρές και οφείλονται στις μεταβλητές σχεδιασμού όπου στη παραμετρική μελέτη είχαν διακριτές τιμές ενώ σε άλλες μεθόδους είχαν συνεχείς τιμές.

Παρατηρείται ότι οι υβριδικές μέθοδοι και οι μέθοδοι PSO βρήκαν τη βέλτιστη λύση με πολύ μικρές διαφορές όπως αναμένονταν. Η μέθοδος Coordinate Search αν και γενικά αποφεύγεται να χρησιμοποιείται διότι πολλές φορές σε συναρτήσεις με ασυνέχειες ή τοπικά ελάχιστα δεν οδηγεί στο επιθυμητό αποτέλεσμα, βρήκε μια καλή λύση αλλά όχι τη βέλτιστη. Το ίδιο ισχύει και για τη μέθοδο Hooke-Jeeves. Η μέθοδος Simplex algorithm of Nelder and Mead η οποία αν και βρήκε το επιθυμητό αποτέλεσμα, δεν συστήνεται σε τέτοια προβλήματα αφού σε μεταβλητές με διακριτές τιμές δεν μπορεί να εφαρμοστεί.

7.4 Αποτελέσματα παραμετρικής μελέτης για ελαχιστοποίηση του κόστους

Πιο κάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης που έγινε. Η συλλεκτική επιφάνεια μεταβάλλονταν ανά 1 m^2 ενώ ο όγκος του δοχείου αποθήκευσης μεταβάλλονταν ανά 0.05 m^3 . Για κάθε δοκιμή, ελέγχονταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου ώστε να είναι ομοιόμορφη και πάνω από 23°C .

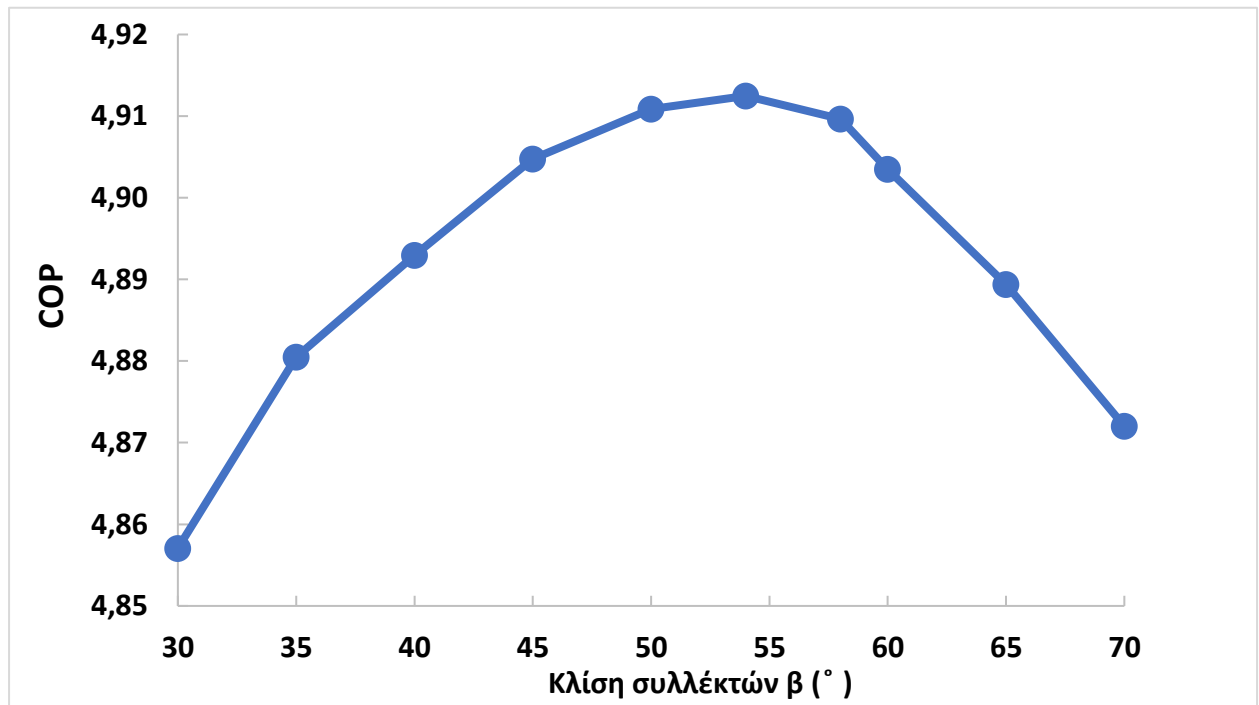
Όγκος Δοχείου Αποθήκευσης (m^3)	Εμβαδό Συλλεκτικής Επιφάνειας (m^2)	Συνολική κατανάλωση ενέργειας (kWh)	Θερμικό Φορτίο (kWh)	COP	Συνολικό Κόστος (€)
3.45	15.00	1786	8418	4.71	9824.44
2.90	18.00	1775	8482	4.78	9769.37
2.52	20.00	1766	8526	4.83	9717.73
2.35	21.00	1759	8552	4.86	9699.51
2.15	22.00	1756	8579	4.89	9670.63
1.95	23.00	1753	8598	4.90	9641.75
1.85	24.00	1745	8615	4.94	9673.07
1.75	25.00	1741	8634	4.96	9716.23
1.65	26.00	1736	8642	4.98	9756.42
1.60	30.00	1713	8699	5.08	10170.84
1.55	35.00	1698	8745	5.15	10738.94
1.55	40.00	1685	8774	5.21	11350.45
1.55	45.00	1671	8810	5.27	11959.01
1.40	60.00	1663	8843	5.32	13772.83
1.30	75.00	1660	8842	5.33	15638.95
1.30	90.00	1656	8843	5.34	17577.11

Πίνακας 7.4: Αποτελέσματα παραμετρικής μελέτης για κτίριο με θερμικές ανάγκες 8500kWh και απαιτούμενη θερμοκρασία 23°C

Σύμφωνα με τα πιο πάνω αποτελέσματα, παρατηρείται ότι το κόστος ελαχιστοποιείται για τιμή συλλέκτη ίση με 23 m^2 και τιμή όγκου του δοχείου ίση με 1.95 m^3 . Οι τιμές αυτές είναι κοντά στις τιμές που βρήκαν και οι μέθοδοι του προγράμματος GenOpt.

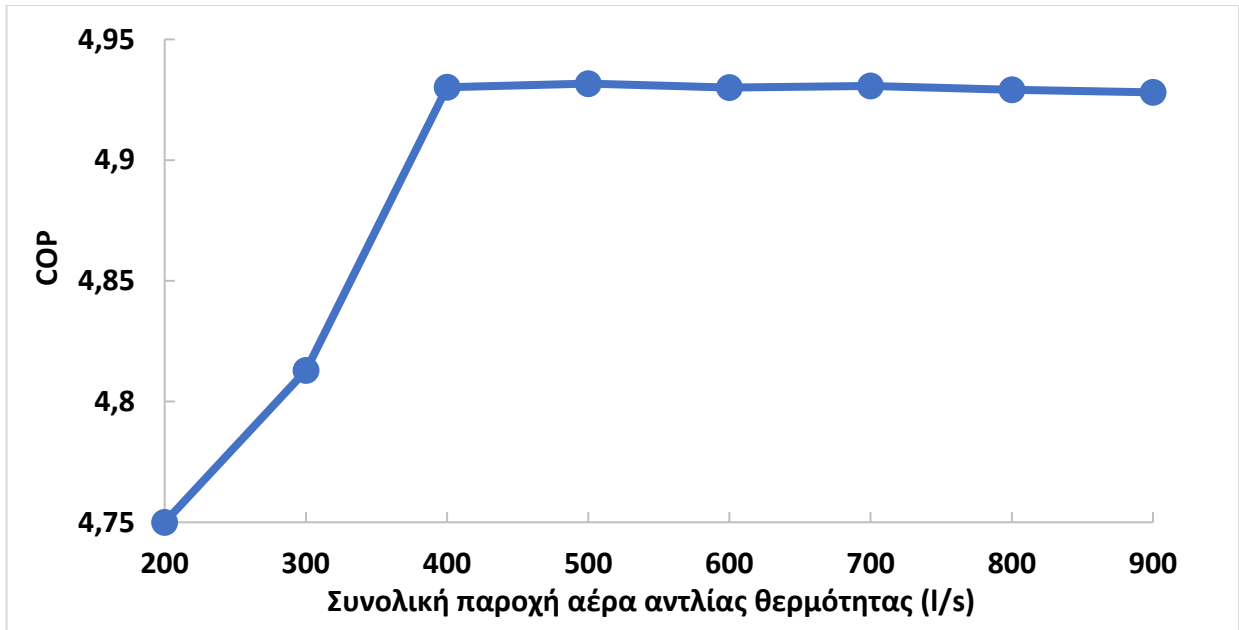
7.5 Βελτιστοποίηση συστήματος μεταβάλλοντας άλλες παραμέτρους της εγκατάστασης

Σε αυτή τη παράγραφο, παρουσιάζονται τα διαγράμματα που δείχνουν πως μεταβάλλεται η ενεργειακή απόδοση της Η.Υ.Α.Θ καθώς αλλάζουν κάποιες παράμετροι της εγκατάστασης όπως η κλίση του συλλέκτη και οι παροχές των κυκλοφορητών.

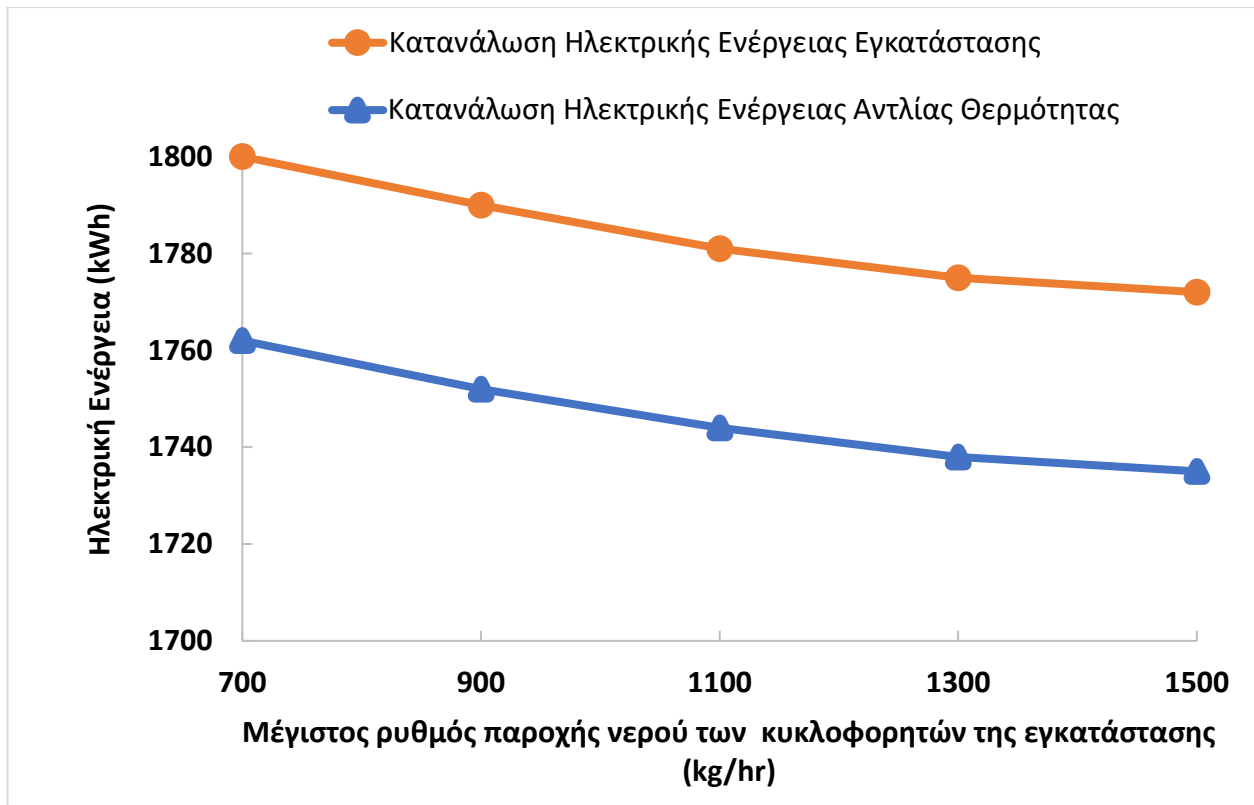


Εικόνα 7.15: Διάγραμμα συντελεστή συμπεριφοράς COP σε σχέση με τη κλίση των συλλεκτών β

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής απόδοσης μεγιστοποιείται για κλίση ηλιακών συλλεκτών ίση με 54°. Για αυτό, επιλέγεται κλίση 54 ° για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος.



Εικόνα 7.16: Διάγραμμα Συντελεστή συμπεριφοράς COP της Η.Υ.Α.Θ. συναρτήσει συνολικής παροχής της σε αέρα.



Εικόνα 7.17: Διάγραμμα Συνολικής κατανάλωσης Ηλεκτρικής ενέργειας από τη εγκατάσταση και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τη Α.Θ. συναρτήσει του μέγιστου ρυθμού παροχής νερού των κυκλοφορητών-αντλιών

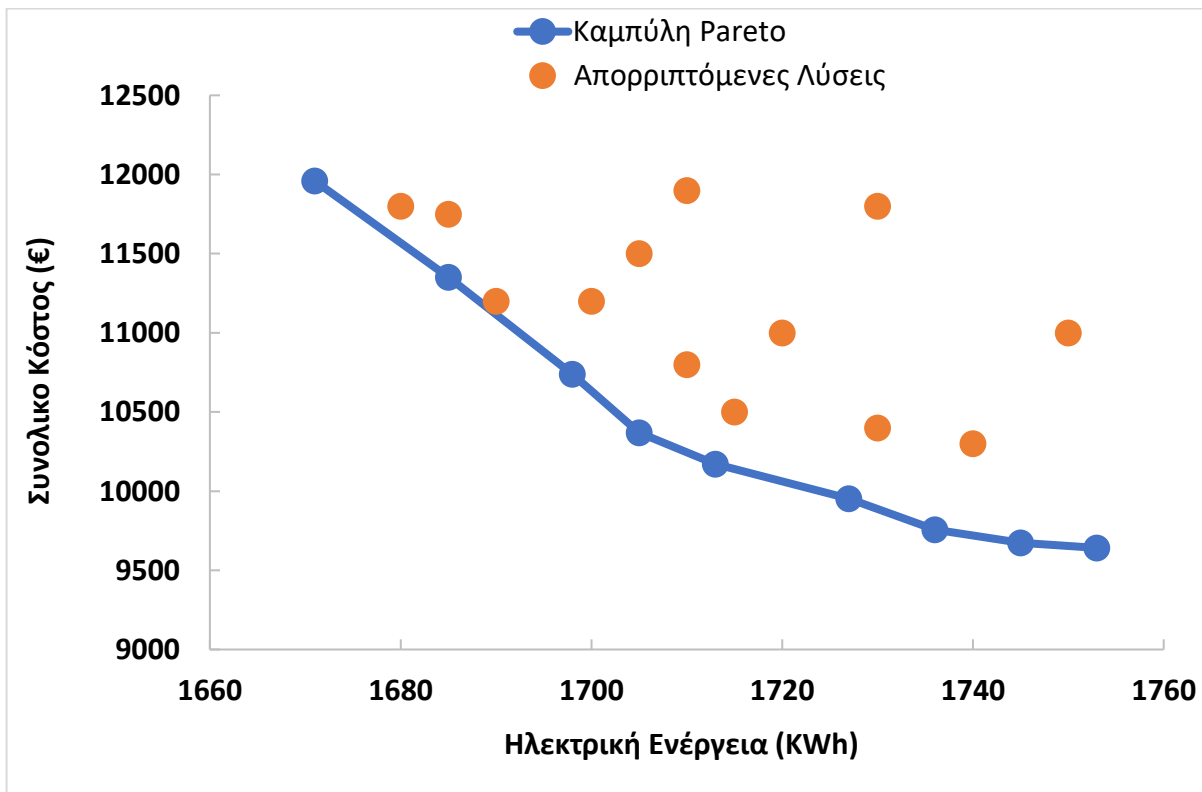
Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή του συντελεστή απόδοσης COP επιτυγχάνεται για παροχή αέρα (total air flow rate) ίση ή μεγαλύτερη των 500 l/s. Για αυτό, επιλέγεται παροχή αέρα ίση με 500 l/s.

Στη εικόνα 7.17, παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η παροχή του νερού στις δυο αντλίες (κυκλοφορητές) της εγκατάστασης, η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται. Εν τέλη, επιλέγεται παροχή ίση με 1000 kg/hr ώστε να η αντλία που θα επιλέξουμε να μην είναι πολύ μεγάλη και για να υπάρχει μικρή σχετικά κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

7.6 Βελτιστοποίηση του συστήματος με στόχο υψηλή ενεργειακή απόδοση και χαμηλό κόστος

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα μας, είναι ενδιαφέρον να μελετήσουμε και να βρούμε μια λύση ώστε να έχουμε χαμηλό συνολικό κόστος εγκατάστασης αλλά και αρκετά χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και δηλαδή μεγάλη ενεργειακή απόδοση (υψηλό COP). Αυτό αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, αφού έχει δυο στόχους. Όπως αποδείχθηκε παραπάνω, αυτοί οι 2 στόχοι είναι αντικρουόμενοι καθώς μια μείωση στο συνολικό κόστος επιφέρει αύξηση στο ποσό κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και το αντίθετο.

Για διάφορες τιμές της συλλεκτικής επιφάνειας A_c και του όγκου του δοχείου V κατασκευάστηκε το πιο κάτω διάγραμμα, γνωστό και ως διάγραμμα Pareto.

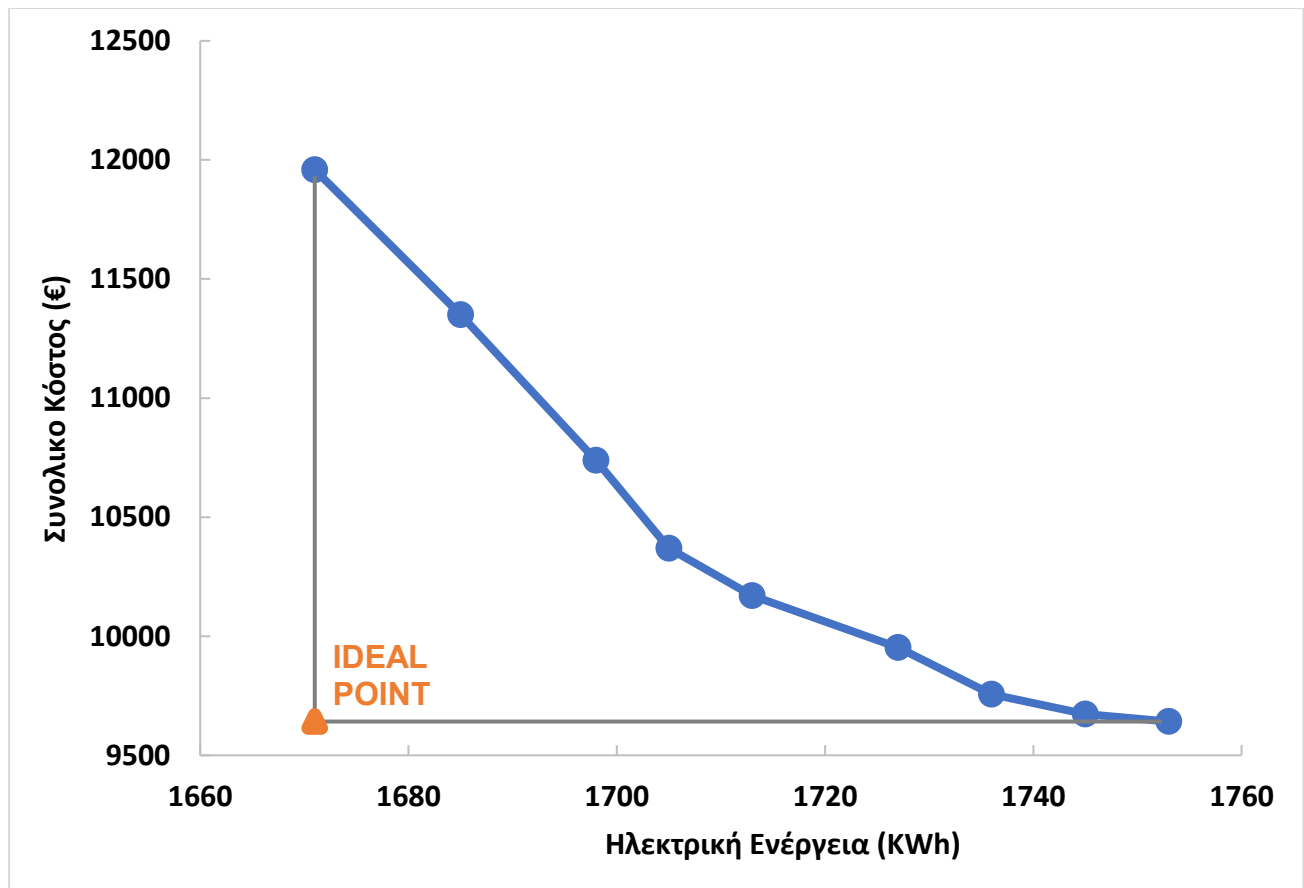


Εικόνα 7.18: Διάγραμμα Pareto και υποψήφιες λύσεις που απορρίφθηκαν

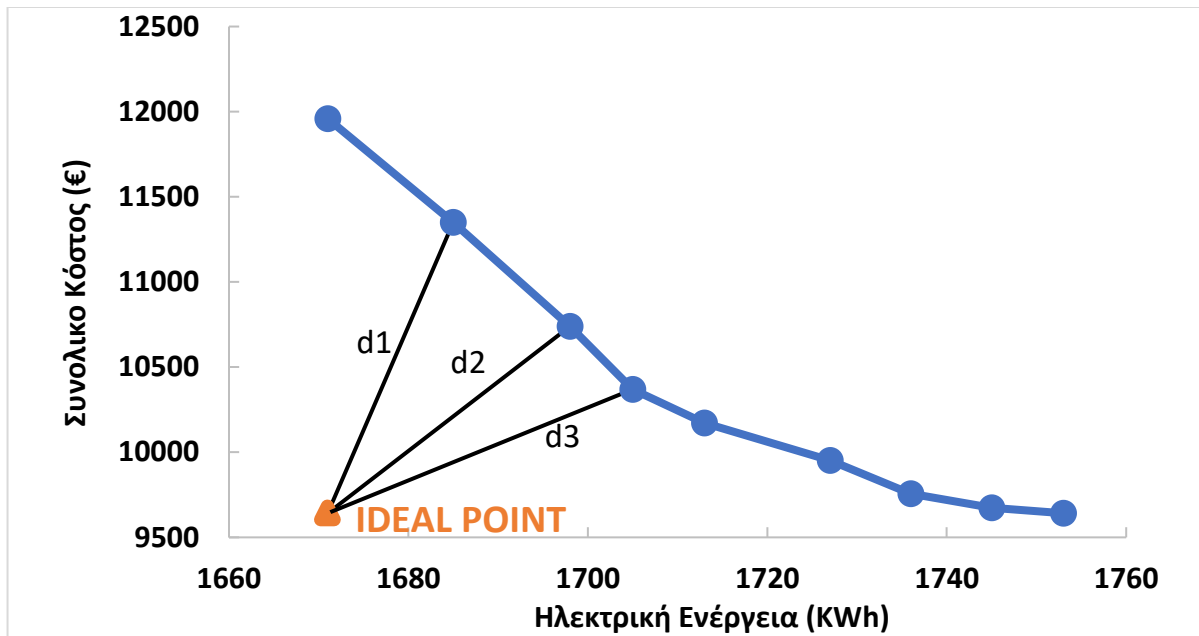
Όπως σε όλα τα διαγράμματα Pareto, έτσι και στη πιο πάνω εικόνα, υπάρχουν τα σημεία (ενώνονται με γραμμή) που είναι αυτά που “κυριαρχούν” και πλεονεκτούν έναντι όλων των άλλων σημείων και αποτελούν το σύνολο των βέλτιστων λύσεων για τους 2 αντικρουόμενους στόχους. Τα σημεία του Pareto φαίνονται στο πίνακα 7.5.

Το πρόβλημα του τρόπου επιλογής της καλύτερης λύσης από το σετ Pareto εξαρτάται από πολλούς παράγοντες π.χ. από τη σημασία των αντικειμενικής συνάρτησης, τη ζήτηση των επενδυτών κ.α. Πιο κάτω, θα αναφερθούν κάποιες μεθοδολογίες για προσδιορισμό λύσεων του συγκεκριμένου συστήματος μας.

Καταρχήν προσδιορίζεται το ιδανικό σημείο (ideal point), το οποίο είναι ένα βοηθητικό θεωρητικό σημείο που αντιστοιχεί σε τιμή ελάχιστου συνολικού κόστους και ελάχιστης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 7.19: Προσδιορισμός του ιδανικού σημείου από το μέτωπο Pareto



Εικόνα 7.20: Επιλογή βέλτιστης λύσης από διάγραμμα Pareto με τη βοήθεια του ιδανικού σημείου

Μέσω του πιο πάνω διαγράμματος, στόχος είναι να ευρεθεί το σημείο που έχει τη ελάχιστη απόσταση d από το βοηθητικό σημείο που ορίσαμε. Η αδιάστατη αυτή απόσταση είναι:

$$d = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (7.1)$$

$$\text{όπου } A = \frac{TC_i - TC_{\min}}{TC_{\max} - TC_{\min}} \text{ και } B = \frac{P_{el,i} - P_{el,\min}}{P_{el,\max} - P_{el,\min}}$$

TC είναι το συνολικό κόστος, P_{el} η ηλεκτρική ενέργεια και i η υποψήφια λύση

Τα σημεία στο πιο πάνω Pareto και οι αποστάσεις τους από το συγκεκριμένο σημείο, φαίνονται στο πίνακα που ακολουθεί.

Όγκος Δοχείου (m ³)	Εμβαδό Συλλεκτικής Επιφάνειας (m ²)	Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας (kWh)	Συνολικό Κόστος (€)	Απόσταση d (αδιάστατη)	Μέγεθος F (αδιάστατο)
1.85	24.00	1745	9673.07	0.903	0.600
1.65	26.00	1736	9756.42	0.794	0.540
1.60	28.00	1727	9952.28	0.696	0.495
1.60	30.00	1713	10170.84	0.561	0.413
1.55	32.00	1705	10369.66	0.520	0.377
1.55	35.00	1698	10738.94	0.577	0.374
1.55	40.00	1685	11350.45	0.757	0.356
1.55	45.00	1671	11959.01	1.000	0.330

Πίνακας 7.5: Αποτελέσματα για επιλογή βέλτιστης λύσης από σεν Pareto

Σύμφωνα με τη πιο πάνω μεθοδολογία, η βέλτιστη λύση είναι $A_c=32 \text{ m}^2$ και $V=1.55 \text{ m}^3$

Πιο κάτω δίνεται μια άλλη προσέγγιση, για τη λύση του προβλήματος, δίνοντας μεγαλύτερο “βάρος” στη μείωση της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας ($c_2 > c_1$). Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του πιο κάτω αδιάστατου μεγέθους F :

$$F = c_1 A + c_2 B \quad (7.2)$$

Για παράδειγμα, για $c_1=2/3$ και $c_2=1/3$ έχουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα στο πίνακα 7.5 και η βέλτιστη λύση σε αυτή τη περίπτωση είναι η συλλεκτική επιφάνεια ίση με 35 m^2 και όγκος αποθηκευτικού δοχείου να είναι 1.55 m^3 . Παρατηρείται, ότι η συλλεκτική επιφάνεια είναι μεγαλύτερη μόνο κατά 3 m^2 σε σχέση με τη προηγούμενη προσέγγιση, λόγω του ότι το συνολικό κόστος αυξάνεται απότομα σε τιμές της συλλεκτικής επιφάνειας μεγαλύτερες των 30 m^2 .

Τέλος, συμπεραίνουμε τα εξής για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση:

- Εάν στόχος είναι μόνο η ελαχιστοποίηση του κόστους, απαιτούνται $A_c=23\text{m}^2$ και $V=1.95 \text{ m}^3$. Σε τέτοια περίπτωση το συνολικό κόστος φτάνει κοντά στις €9 640 και ο COP είναι 4.9.
- Εάν στόχος είναι η υψηλή ενεργειακή απόδοση με ένα αποδεκτό συνολικό κόστος χωρίς να είναι πολύ μεγάλο, απαιτούνται γύρω στα 32m^2 επιφάνειας συλλέκτη και 1.55 m^3 όγκου δοχείου. Σε αυτή τη περίπτωση το συνολικό κόστος φτάνει €10 370 και ο COP είναι 5.12

7.7 Προσομοίωση Η.Υ.Α.Θ για 3 διαφορετικές περιπτώσεις σε κτιρίων

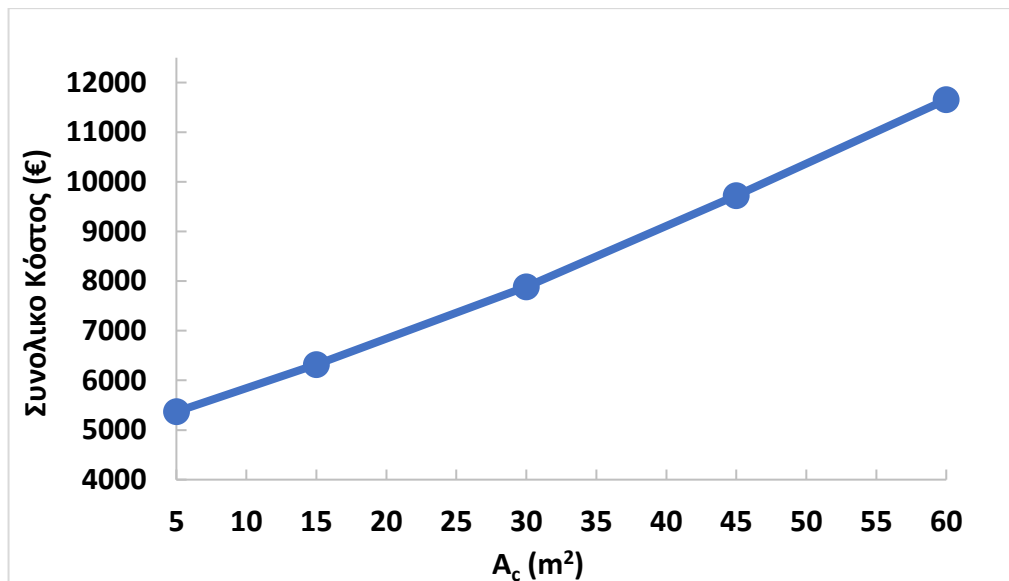
Το πιο πάνω σύστημα μελετήθηκε για τη περίπτωση της θέρμανσης για 3 διαφορετικές περιπτώσεις κτιρίων στη περιοχή της Αθήνας για τη περίοδο του χειμώνα, δηλαδή από Νοέμβριο μέχρι και Απρίλιο. Η θερμοκρασία που απαιτήθηκε να υπάρχει στο εσωτερικό και των τριών κτιρίων ήταν 22°C.

Η διάκριση των κτιρίων έγινε με βάση τις πραγματικές ανάγκες τους σε θέρμανση. Το ένα κτίριο θεωρήθηκε καλά θερμομονωμένο είχε πραγματικές θερμικές ανάγκες της τάξης των 5000 θερμικών κιλοβατώρων (kWh). Στο δεύτερο κτίριο που έγινε η μελέτη, θεωρήθηκε ότι είχε πραγματικές θερμικές ανάγκες της τάξης των 8500 kWh (όχι καλά θερμομονωμένο κτίριο) ενώ στο τρίτο κτίριο θεωρήθηκε ότι είχε πραγματικές θερμικές ανάγκες της τάξης των 10000 kWh (κακά θερμομονωμένο κτίριο).

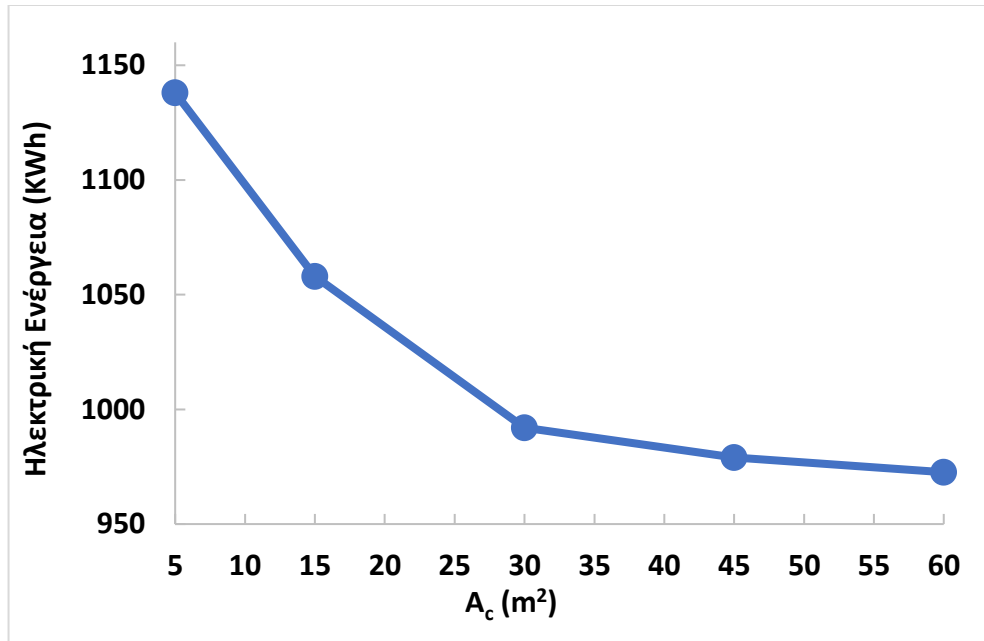
Για κάθε περίπτωση, έγινε παραμετρική μελέτη αλλάζοντας την συνολική επιφάνεια το ηλιακών συλλεκτών με σκοπό να γίνει βελτιστοποίηση του συνολικού κόστους να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

Παράλληλα, έγινε σύγκριση ως προς το COP και της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος της ηλιακά υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας σε σχέση με ποια αντλία θερμότητας αέρα-αέρα. Τα αποτελέσματα που βρέθηκαν φαίνονται πιο κάτω.

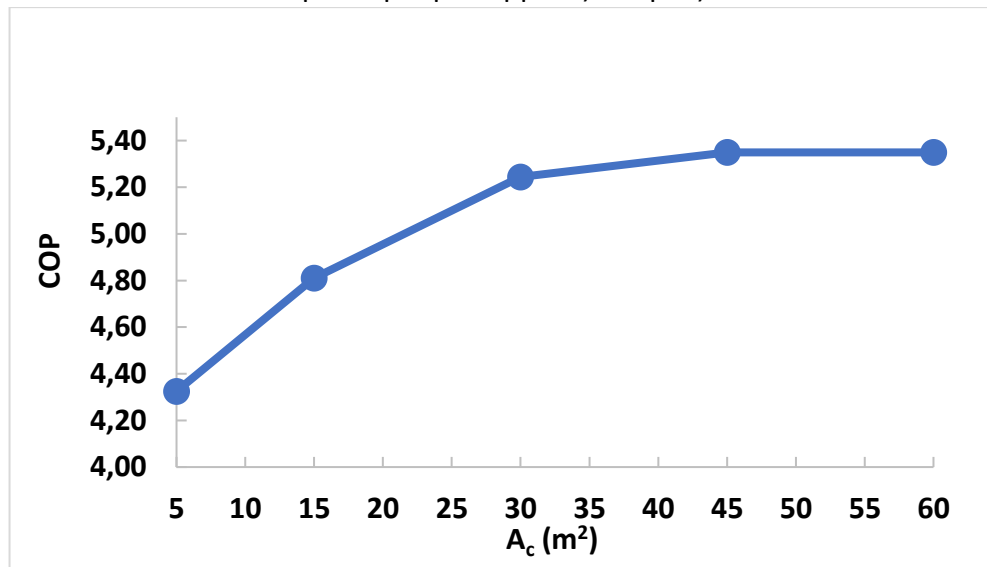
➤ Αποτελέσματα προσομοίωσης κτιρίου με θερμικές ανάγκες 5000 kWh_{th}



Εικόνα 7.21: Διάγραμμα συνολικού κόστους εγκατάστασης και επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών για κτίριο με θερμικές ανάγκες 5000 kWh_{th}



Εικόνα 7.22: Διάγραμμα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών για κτίριο με θερμικές ανάγκες 5000 kWh_{th}



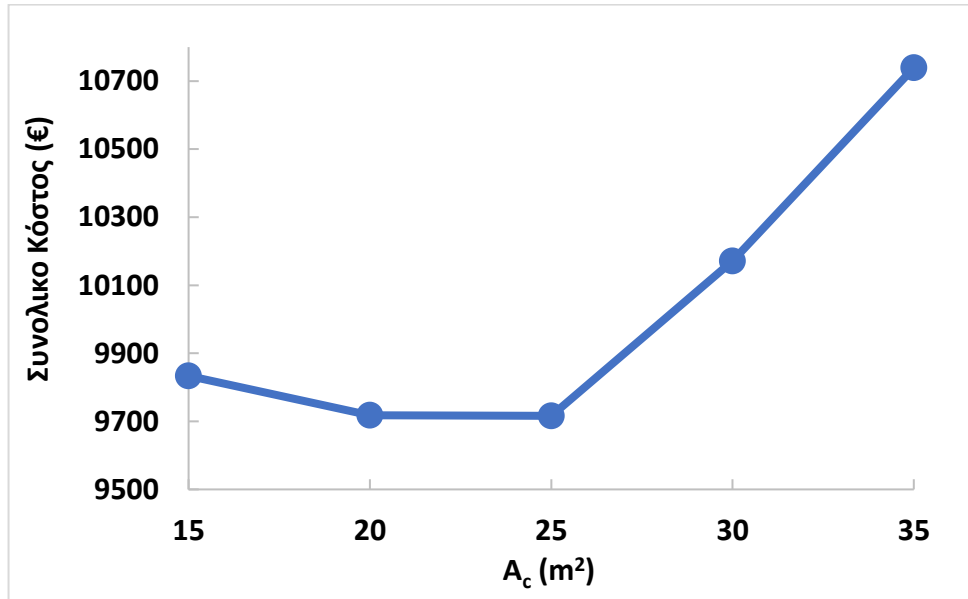
Εικόνα 7.23: Διάγραμμα συντελεστή απόδοσης COP αντλίας θερμότητας και επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών για κτίριο με θερμικές ανάγκες 5000 kWh_{th}

Από τη εικόνα 7.21 παρατηρούμε ότι καθώς η συλλεκτική επιφάνεια αυξάνεται, το συνολικό κόστος της εγκατάστασης αυξάνεται σχεδόν ανάλογα και με αρκετά μεγάλο ρυθμό χωρίς να παρουσιάζει ελάχιστο για κάποια τιμή της συλλεκτικής επιφάνειας.

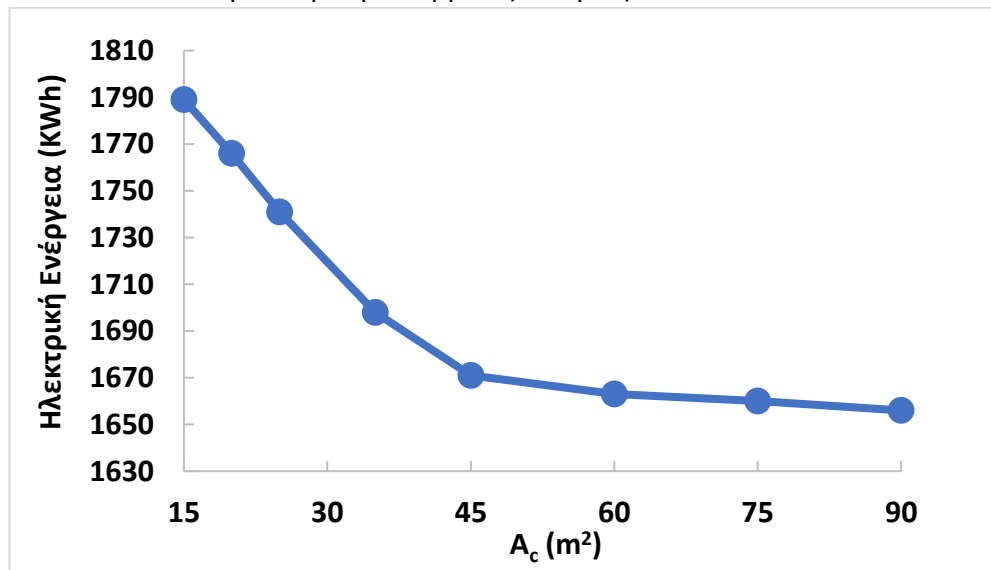
Ακόμη, παρατηρείται ότι καθώς η συλλεκτική επιφάνεια αυξάνεται μέχρι τα 30 m² ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP) αυξάνεται και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται σημαντικά. Για μεγαλύτερες τιμές της συλλεκτικής επιφάνειας οι τιμές των δύο αυτών μεγεθών παραμένουν σχεδόν σταθερές.

Επομένως, σε περίπτωση εγκατάστασης του συστήματος στο συγκεκριμένο κτίριο, μια προσεγγιστικά καλή τιμή συλλεκτικής επιφάνειας θα ήταν τα 25 m² διότι έτσι επιτυγχάνουμε COP σχεδόν ίσο με 5.10 που είναι μια αρκετά καλή τιμή σε σχέση με το αντίστοιχο συνολικό κόστος της εγκατάστασης.

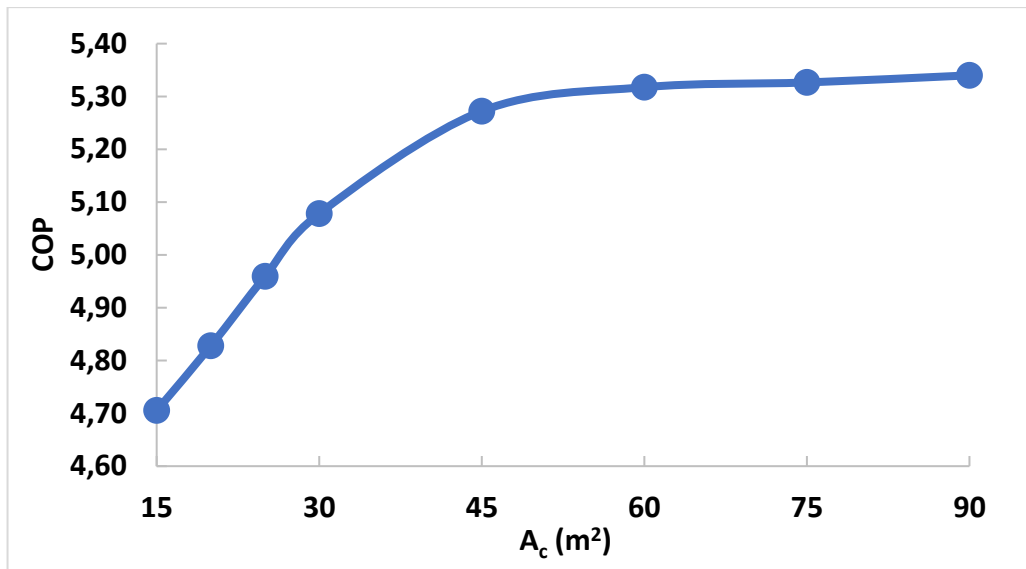
➤ Αποτελέσματα προσομοίωσης κτιρίου με θερμικές ανάγκες 8500 kWh_{th}



Εικόνα 7.24: Διάγραμμα συνολικού κόστους εγκατάστασης και επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών για κτίριο με θερμικές ανάγκες 8500 kWh_{th}



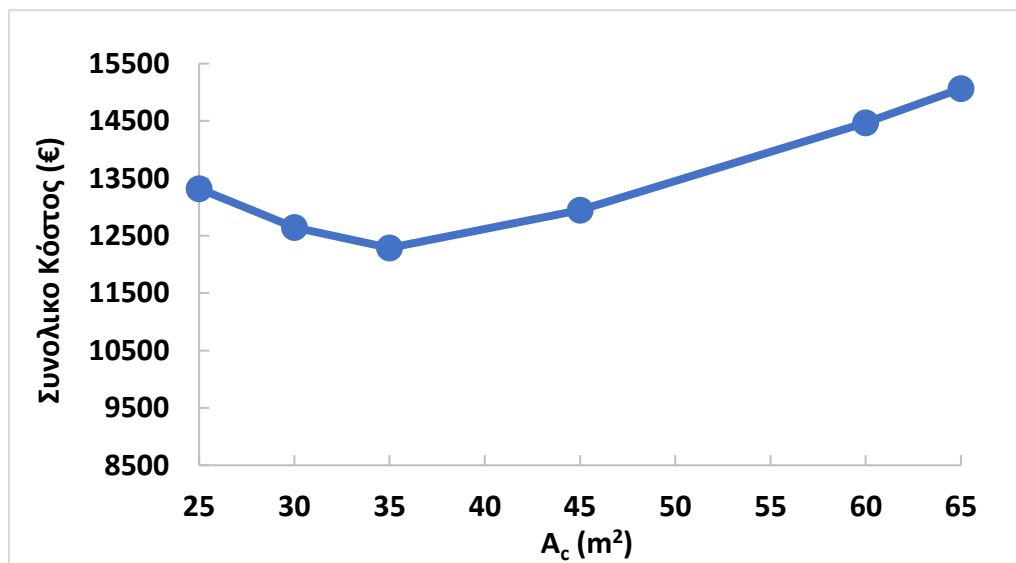
Εικόνα 7.25: Διάγραμμα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών για κτίριο με θερμικές ανάγκες 8500 kWh_{th}



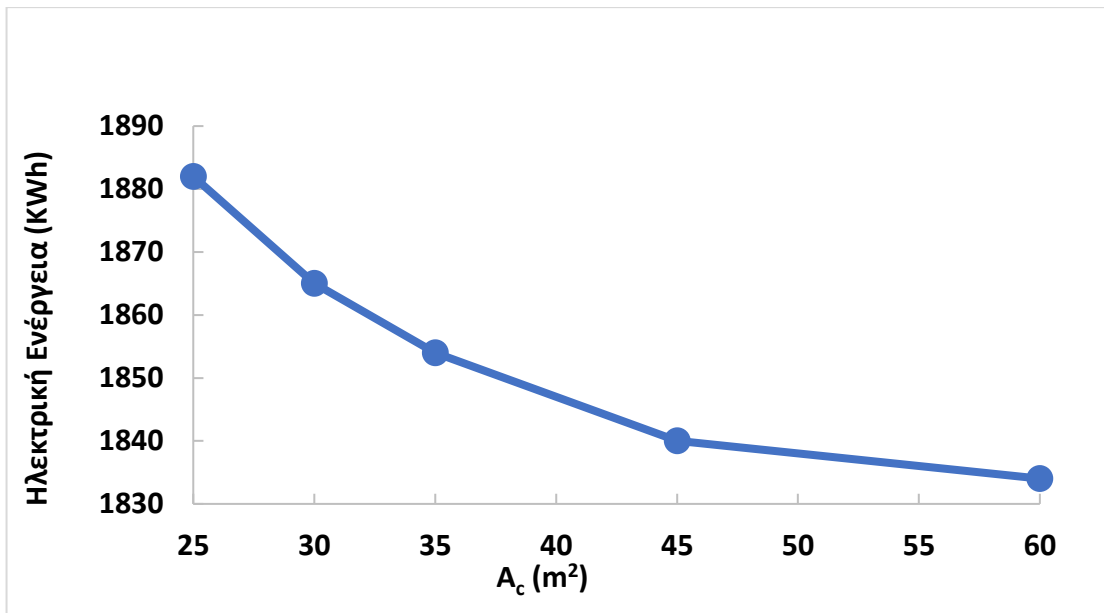
Εικόνα 7.26: Διάγραμμα συντελεστή απόδοσης COP αντλίας θερμότητας και επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών για κτίριο με θερμικές ανάγκες 8500 kWh_{th}

Στη πιο πάνω περίπτωση παρατηρούμε ότι η καμπύλη του συνολικού κόστους παρουσιάζει τοπικό ελάχιστο για συγκεκριμένη τιμή της συλλεκτικής επιφάνειας. Η τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς αυξάνεται και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ότι μειώνεται με μεγάλο ρυθμό για τιμές της συλλεκτικής επιφάνειας μέχρι τα 45 m². Η συγκεκριμένη περίπτωση είναι αυτή που μελετήθηκε ως προς τη βελτιστοποίηση στη προηγούμενη ενότητα.

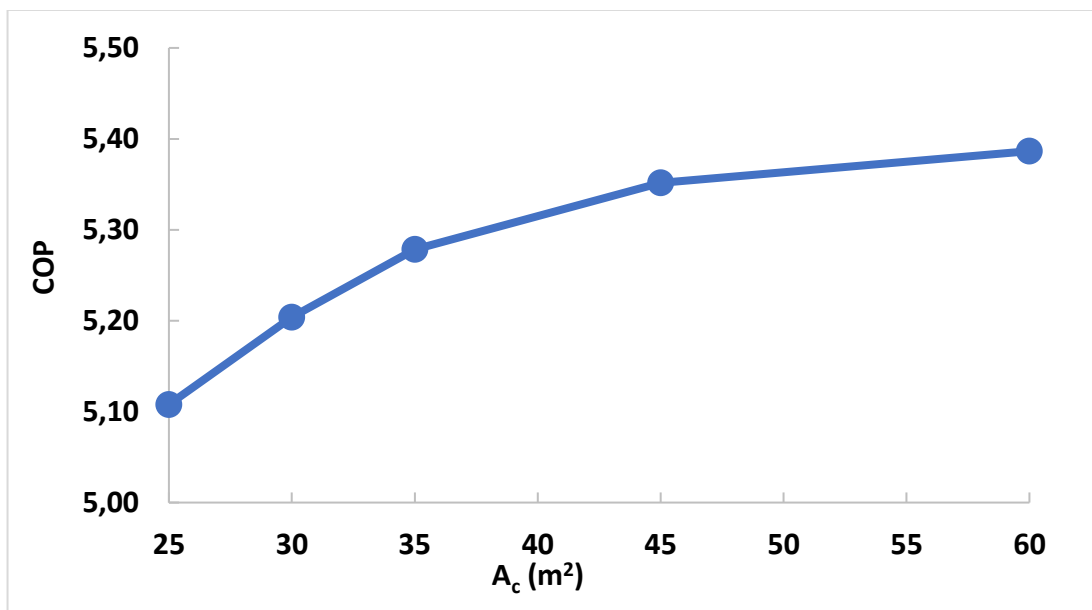
➤ **Αποτελέσματα προσομοίωσης κτιρίου με θερμικές ανάγκες 10000 kWh_{th}**



Εικόνα 7.27: Διάγραμμα συνολικού κόστους εγκατάστασης και επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών για κτίριο με θερμικές ανάγκες 10000 kWh_{th}



Εικόνα 7.28: Διάγραμμα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών για κτίριο με θερμικές ανάγκες 10000 kWh_{th}



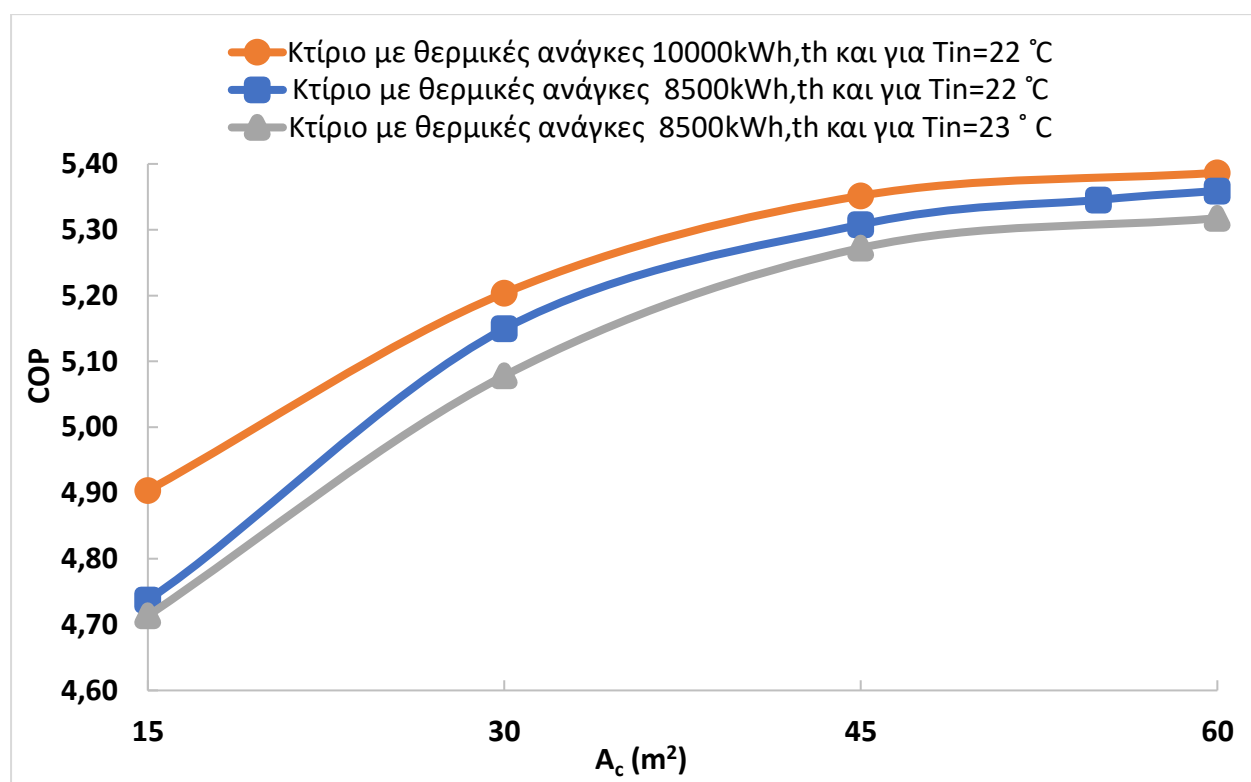
Εικόνα 7.29: Διάγραμμα συντελεστή απόδοσης COP αντλίας θερμότητας και επιφάνειας της συλλεκτικής επιφάνειας για κτίριο με θερμικές ανάγκες 10000 kWh_{th}

Σε αυτή τη περίπτωση, παρατηρείται ότι τα διαγράμματα είναι της ίδιας μορφής με της προηγούμενη περίπτωσης με τη διαφορά ότι το συνολικό κόστος ελαχιστοποιείται σε μεγαλύτερη τιμή της ηλιακής συλλεκτικής επιφάνειας.

➤ Σύγκριση και σχολιασμός των τριών πιο πάνω περιπτώσεων

Και στις 3 πιο πάνω περιπτώσεις, παρατηρούμε ότι από ένα σημείο και μετά όσο και αν αυξήσουμε το αριθμό των ηλιακών συλλεκτών, ο συντελεστής απόδοσης COP παραμένει σταθερός καθώς και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας το ίδιο.

Επιπλέον, παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερες πραγματικές θερμικές ανάγκες έχει το κτίριο, τόσο αυξάνεται και ο απαιτούμενος αριθμός ηλιακών συλλεκτών ώστε να πετυχαίνουμε κάθε φορά τη ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους και τη μείωση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 7.30: Συντελεστής απόδοσης Η.Υ.Α.Θ. ανάλογα με το κτίριο και με τη απαιτούμενη θερμοκρασία που απαιτείται στο εσωτερικό του

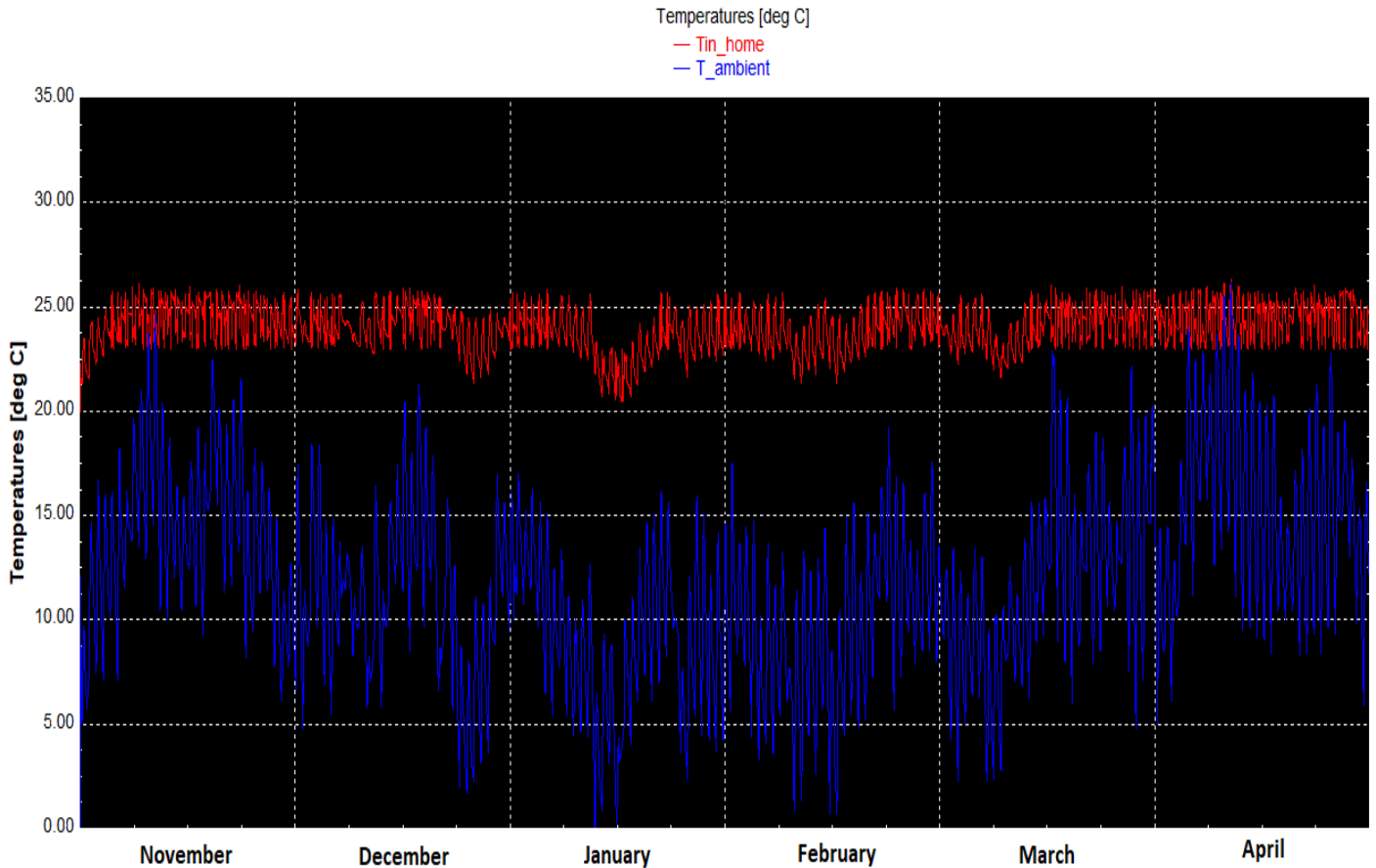
Πιο πάνω συγκρίνεται το ο συντελεστής απόδοσης για 3 διαφορετικές περιπτώσεις ανάλογα με το φορτίο θέρμανσης που χρειάζεται το κτίριο και ανάλογα με τη απαιτούμενη θερμοκρασία (T_{in}) που απαιτείται να υπάρχει στο εσωτερικό του κτιρίου.

Από το πιο πάνω διάγραμμα φαίνεται ότι για σταθερή τιμή της συλλεκτικής επιφάνειας, ο συντελεστής απόδοσης COP του συστήματος μας:

- Αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι θερμικές ανάγκες του κτιρίου
- Αυξάνεται καθώς μειώνεται η θερμοκρασία που απαιτείται να υπάρχει στο εσωτερικό του κτιρίου

7.8 Σύγκριση Η.Υ.Α.Θ με αντλία θερμότητας αέρα-αέρα

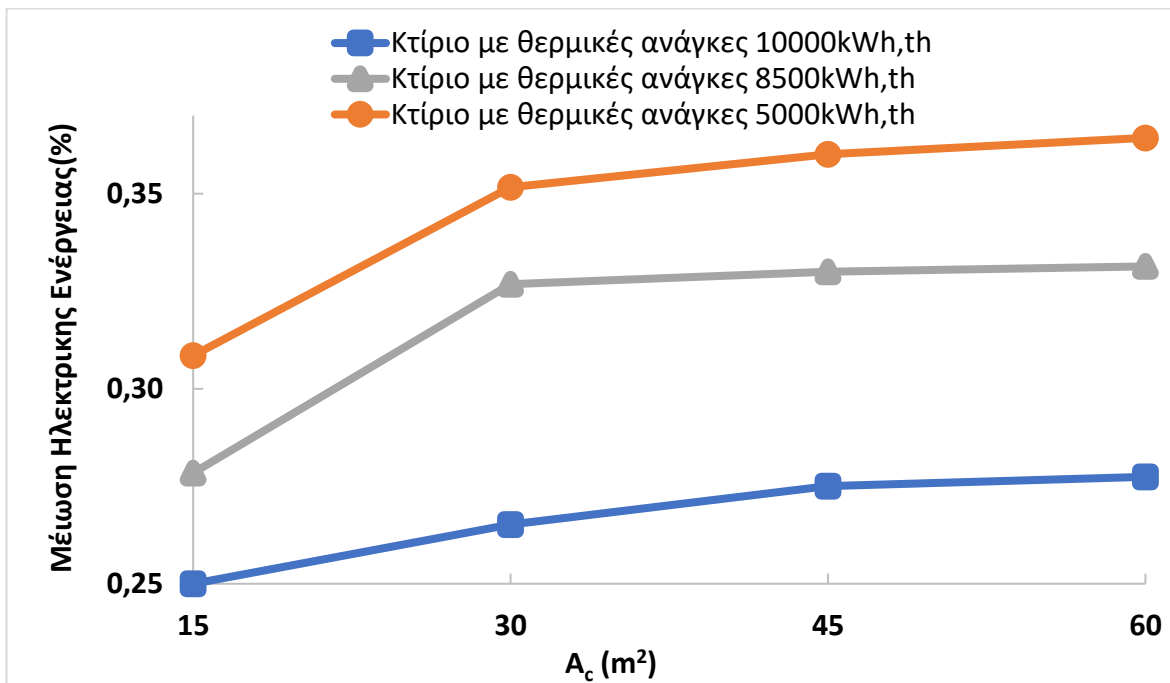
Σε αυτή τη ενότητα μελετάται περίπτωση αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα. Έπειτα, γίνεται σύγκριση της ενεργειακή απόδοσης της σε σχέση με τη Η.Υ.Α.Θ, για τις τρεις περιπτώσεις των κτιρίων που προαναφέρθηκαν για τη περίοδο από Νοεμβρίου έως Απρίλιο. Στη συνέχεια γίνεται οικονομική αξιολόγηση των δύο συστημάτων.



Εικόνα 7.31: Διάγραμμα θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου και θερμοκρασίας περιβάλλοντος ανά μήνα για λειτουργία αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα

Όπως φαίνεται από το πιο πάνω διάγραμμα, με τη λειτουργία αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα, η θερμοκρασία εντός του κτιρίου δεν μπορεί να διατηρηθεί σταθερή και πάνω από 22-23°C όπως θα ήταν επιθυμητό, τις μέρες του έτους όπου η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι κάτω από 5 °C.

➤ Σύγκριση ενεργειακής απόδοσης των δύο συστημάτων



Εικόνα 7.32: Ποσοστό μείωσης της ηλεκτρικής ενέργειας που επιτυγχάνεται στην Η.Υ.Α.Θ. σε σχέση με την αντλία θερμότητας αέρα-αέρα για 3 διαφορετικές περιπτώσεις κτιρίων

Από το πιο πάνω διάγραμμα, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Η μείωση στη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που επιτυγχάνεται σε Η.Υ.Α.Θ. σε σχέση με μια αντλία θερμότητας αέρα-αέρα είναι κοντά στο 30% και μπορεί να φτάει μέχρι και το 35%.
- Στο κτίριο με τις λίγες θερμικές ανάγκες (5000 kWh_{th}) έχουμε υψηλότερο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας σε σχέση με το κτίριο με τις υψηλότερες θερμικές ανάγκες (10000 kWh_{th}).
- Και στις 3 περιπτώσεις, μέχρι τα 30m² συλλεκτικής επιφάνειας έχουμε μια απότομη μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας με τη αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας ενώ για μεγαλύτερες τιμές παρατηρείται μια σταθερότητα.

Επίσης, παρατηρούμε ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς της Η.Υ.Α.Θ έχει τιμή κοντά στο 5, σε σχέση με αυτό της αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα που έχει μια τιμή κοντά στο 3.

➤ **Οικονομική σύγκριση των δύο εγκαταστάσεων**

Το συνολικό κόστος της εγκατάστασης αποτελείται από το αρχικό κόστος και το κόστος λειτουργίας για όλα τα χρόνια λειτουργίας της εγκατάστασης.

Για τους υπολογισμό του κόστους λειτουργίας, η διάρκεια ζωής των δυο εγκαταστάσεων θεωρήθηκε ίση με 25 χρόνια, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας θεωρήθηκε ίση με 0.17 €/kWh και το επιτόκιο αναγωγής ίσο με 3% . Τα έξοδα συντήρησης των εγκαταστάσεων θεωρήθηκαν μικρά για αυτό και αγνοήθηκαν.

Για το σύστημα της Η.Υ.Α.Θ. επιλέχθηκαν οι τιμές των παραμέτρων της η βέλτιστη λύσης που υπολογίστηκε σε προηγούμενη ενότητα. Η ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας είναι αντλία νερού-αέρα, για αυτό το κόστος της είναι λίγο μεγαλύτερο από τη αντλία αέρα-αέρα.

	Αντλία Θερμότητας (αέρα-αέρα)	Η.Υ.Α.Θ.
Κόστος Συλλεκτών (€)	-	3000
Κόστος Δοχείου αποθήκευσης (€)	-	1450
Κόστος Κυκλοφορητών (€)	-	550
Κόστος Αντλίας θερμότητας (€)	5500	6000
Συνολικό Αρχικό Κόστος Εγκατάστασης(€)	5500	11000
Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας (kWh/έτος)	2434	1753
Συνολική Κατανάλωση ενέργειας σε 25 χρόνια (kWh)	60850	43825
Συνολικό Κόστος Λειτουργίας σε 25 χρόνια (€)	7200	5200
Συνολικό Κόστος Εγκατάστασης (€)	12700	16200

Πίνακας 7.6: Υπολογισμός συνολικού κόστους των δυο εγκαταστάσεων

Παρατηρούμε ότι έστω και αν το κόστος λειτουργίας της αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα είναι μεγαλύτερο, το αρχικό της κόστος είναι αρκετά μικρότερο από αυτό της Η.Υ.Α.Θ και αυτό τη κάνει πιο οικονομικά συμφέρουσα. Παρ' όλα αυτά όπως φαίνεται στη συγκεκριμένη περίπτωση η Η.Υ.Α.Θ καταναλώνει συνολικά σχεδόν 17000 κιλοβατώρες ηλεκτρικού ρεύματος λιγότερες από ότι η αντλία θερμότητας αέρα-αέρα. Για αυτό, και η Η.Υ.Α.Θ. είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον.

8. Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το σύστημα υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας νερού-αέρα από ηλιακά. Αρχικά, με τη βοήθεια του TRNSYS έγινε παραμετρική μελέτη για να εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος ως προς τη λειτουργία και το κόστος του. Στη συνέχεια, έγινε βελτιστοποίηση του συστήματος για ελαχιστοποίηση του κόστους μέσω του προγράμματος GenOpt και βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. Στόχος ήταν η επιλογή κατάλληλου συνδυασμού, όγκου του δοχείου αποθήκευσης και επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις μας. Παράλληλα, μελετήθηκαν και άλλοι παράμετροι του συστήματος και στο τέλος έγινε σύγκριση της Η.Υ.Α.Θ με μια αντλία θερμότητας αέρα-αέρα. Πιο κάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά κάποια αποτελέσματα και αναφέρονται χρήσιμα συμπεράσματα που μπορούν να αποτελέσουν βάση για περαιτέρω μελέτη στο μέλλον.

- Για τη Η.Υ.Α.Θ. που επιλέχθηκε (με στόχο το ελάχιστο κόστος), ο συντελεστής απόδοσης COP είναι 4.9 ενώ ο συντελεστής COP της αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα είναι 3.04. Είναι προφανές λοιπόν ότι η Η.Υ.Α.Θ είναι πιο συμφέρουσα ενεργειακά.
- Για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος Η.Υ.Α.Θ. επιλέγεται επιφάνεια ηλιακού συλλέκτη ίση με 23 m^2 , όγκος δοχείου ίσος με 1.95 m^3 και εξοικονομούνται σχεδόν 17000 kWh ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με μια αντλία αέρα-αέρα για διάρκεια ζωής 25 χρόνων. Το κόστος όμως της Η.Υ.Α.Θ είναι μεγαλύτερο. Παρ' όλα αυτά, σύμφωνα με τη βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης που έγινε, εάν επιλεγθεί επιφάνεια 32 m^2 και όγκος δοχείου 1.55 m^3 μπορεί να γίνει εξοικονόμηση ακόμα 1700 κιλοβατώραν ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό όμως αυξάνει το συνολικό κόστος κατά 700 ευρώ σε σχέση με τη προηγούμενη επιλογή.
- Παρατηρούμε ότι η κλίση των συλλεκτών β επιλέχθηκε να είναι 54 μοίρες για τη μέγιστη ενεργειακή απόδοση της Η.Υ.Α.Θ στη Αθήνα ($\phi=38^\circ$). Αυτό επαληθεύει το πρακτικό κανόνα που λέει ότι η κλίση των ηλιακών συλλεκτών πρέπει να είναι περίπου 15° μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος της χώρας για μέγιστη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας το χειμώνα.
- Σε κτίρια με μεγάλες θερμικές ανάγκες αξιοποιείται μεγαλύτερο ποσό ηλιακής ενέργειας με αποτέλεσμα να γίνεται εξοικονόμηση μεγαλύτερου πόσου ηλεκτρικής ενέργειας. Βέβαια, σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτείται μεγάλη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών και έτσι το συνολικό κόστος αυξάνεται, χωρίς αυτό να αποτελεί απαραίτητα μειονέκτημα. Για παράδειγμα, σε κτίριο με ανάγκες $8500 \text{ kWh}_{\text{th}}$ η διαφορά συνολικού κόστους μεταξύ συστήματος Η.Υ.Α.Θ. και συμβατικής αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα είναι μικρότερη από ότι η αντίστοιχη διαφορά σε ένα κτίριο με ανάγκες $5000 \text{ kWh}_{\text{th}}$.

- Η βελτιστοποίηση του κόστους με τη επιλογή κατάλληλης επιφάνειας συλλεκτών και του δοχείου αποθήκευσης έγινε για να διατηρείται η θερμοκρασία εντός του κτιρίου για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα πάνω από 22 ° C. Ωστόσο, επειδή αρκετές μέρες του Ιανουαρίου ήταν αρκετά κρύες, η θερμοκρασία εντός κτιρίου ήταν δύσκολο να είναι πάνω από 22°C. Η απαίτηση αυτή για να ικανοποιηθεί, οδήγησε σε αύξηση της επιφάνειας των συλλεκτών και του όγκου του δοχείου, κάτι που αύξησε σημαντικά το αρχικό κόστος. Αντί αυτού, θα ήταν δυνατό λοιπόν, κατά τη βελτιστοποίηση να μην υπήρχε αυτή η απαίτηση για τις κρύες μέρες του χειμώνα, έτσι ώστε να το συνολικό κόστος της εγκατάστασης να ήταν λιγότερο. Σε αυτή τη περίπτωση, για τη λύση του συγκεκριμένου προβλήματος τις κρύες μέρες του χειμώνα το σύστημα μας θα μπορούσε να βοηθηθεί από ένα άλλο σύστημα θέρμανσης έτσι ώστε η θερμοκρασία εντός κτιρίου να διατηρείται υψηλή. Για παράδειγμα, τις μέρες με δυσμενείς συνθήκες και χωρίς ήλιο, το νερό με το οποίο τροφοδοτείται στη αντλία θερμότητας θα μπορούσε να ζεσταίνεται μέσω ηλεκτρικής αντίστασης
- Το σύστημα της Η.Υ.Α.Θ. μελετήθηκε για τη περίοδο του χειμώνα με στόχο τη θέρμανση του κτιρίου. Η εγκατάσταση θα μπορούσε να είναι οικονομικά πιο συμφέρουσα εάν εκτός από τη θέρμανση του κτιρίου γίνονταν και παροχή ζεστού νερού. Επίσης, για το καλοκαίρι θα ήταν εφικτό τα ηλιακά να συνδυαστούν με κάποιο σύστημα για τη ψύξη του κτιρίου (ψύξη με απορρόφηση ή προσρόφηση). Έτσι, συνδυάζοντας τα συστήματα αυτά καθόλη τη διάρκεια του έτους, η εγκατάσταση μας όχι μόνο θα ήταν ακόμη πιο ενεργειακά αποδοτική αλλά θα ήταν και πιο οικονομικά ανταγωνιστική με άλλα συστήματα κλιματισμού.
- Επειδή η συλλεκτική επιφάνεια μπορεί να πάρει μόνο συγκεκριμένες (διακριτές) τιμές και όχι συνεχείς, αυτό δημιουργεί ασυνέχειες στη συνάρτηση του συνολικού κόστους. Για αυτό, από το πρόγραμμα GenOpt μόνο συγκεκριμένες μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βρουν μια καλή λύση που να ελαχιστοποιεί το κόστος.
- Συμπεραίνουμε ότι οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης Particle Swarm Optimization (PSO) και υβριδικός αλγόριθμος είναι οι πιο ικανοί για τέτοιου είδους προβλήματα βελτιστοποίησης αφού δεν επηρεάζονται από τις ασυνέχειες και ούτε από τα τοπικά ακρότατα που έχει η συνάρτηση του συνολικού κόστους της εγκατάστασης. Ο υβριδικός αλγόριθμος χρειάστηκε περισσότερο χρόνο αλλά βρήκε μια πιο ακριβή λύση από ότι ο αλγόριθμος PSO IW.
- Αποδείχθηκε ότι το σύστημα της Η.Υ.Α.Θ. μπορεί να διατηρεί την εσωτερική θερμοκρασία του χώρου στα επιθυμητά επίπεδα ακόμα και τις πιο δύσκολες ημέρες του έτους (μέρες Ιανουαρίου) δηλαδή ακόμα και αν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι χαμηλή. Αντίθετα, η αντλία θερμότητας αέρα-αέρα δεν είναι ικανή να αποδώσει το ίδιο αποτελεσματικά σε τέτοιες συνθήκες, αφού τροφοδοτείται από τον αέρα του περιβάλλοντος.

- Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα, μια μικρή μεταβολή του όγκου του δοχείου αποθήκευσης παίζει σημαντικό ρόλο για να υπάρχει καλό θερμοκρασιακό προφίλ εντός του κτιρίου ακόμα και τις μέρες με δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος. Όσο αφορά τη εξοικονόμηση ενέργειας όμως, η αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας επιφέρει καλύτερη ενεργειακή απόδοση της αντλίας θερμότητας από ότι η αύξηση του όγκου του δοχείου αποθήκευσης, αυξάνοντας όμως σημαντικά το αρχικό κόστος.
- Η εγκατάσταση της Η.Υ.Α.Θ. μελετήθηκε για τη περιοχή της Αθήνας. Η εγκατάσταση αυτή ενδέχεται να είναι πιο αποδοτική και πιο οικονομικά συμφέρουσα σε άλλες περιοχές στις οποίες επικρατεί διαφορετικό κλίμα και είναι εξίσου δυνατή η εκμετάλλευση μεγάλου ποσού ηλιακής ενέργειας.

Τέλος, τα τελευταία χρόνια η τιμή της ηλεκτρικής κιλοβατώρας (kWh) αυξάνεται και αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται. Είναι γεγονός ότι τα μεγάλα περιβαλλοντικά προβλήματα όπως οι εκπομπές του CO₂ και ακολούθως το φαινόμενο του θερμοκηπίου οδήγησαν αρκετούς οργανισμούς να αναλάβουν δραστικά μέτρα για τη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και της ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, επειδή τα ηλιακά συστήματα είναι φιλικά προς το περιβάλλον και είναι μια τεχνολογία που αναπτύσσεται συνεχώς, οι κυβερνήσεις δίνουν επιχορηγήσεις για τη προώθηση τέτοιων επενδύσεων. Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, αναμένεται στα επόμενα χρόνια, μια τέτοια εγκατάσταση της ηλιακά υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας που έχει υψηλή ενεργειακή απόδοση, να γίνει και οικονομικά πιο συμφέρουσα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Ρυθμίσεις για τη ομαλή λειτουργία μεταξύ Trnsys και GenOpt

Σε αυτό το παράρτημα γίνεται περιγραφή για τις ρυθμίσεις που πρέπει να γίνουν στον Η/Υ ώστε να συνδεθεί το πρόγραμμα του GenOpt με τον Η/Υ και να μπορεί δηλαδή να λειτουργήσει.

Αρχικά, ελέγχουμε ότι το στοιχείο (component) TRNopt υπάρχει στη βιβλιοθήκη TESS του TRNSYS. Μέσω αυτού του στοιχείου συνδέεται το TRNSYS με το πρόγραμμα GenOpt

Για τη λειτουργία του προγράμματος GenOpt είναι πρέπει να υπάρχει εγκατεστημένη στον Η/Υ η Java έκδοσης jre-8u201 ή οποιαδήποτε άλλη έκδοση αρκεί να είναι πιο σύγχρονη από τη Java 2 Runtime Environment Version 1.4.2 .

Ανάλογα με τη έκδοση του TRNopt που έχουμε, χρειάζεται η κατάλληλη έκδοση του GenOpt για εγκατάσταση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για το TRNSYS 16 ενδείκνυται η έκδοση του GenOpt 2.0.0. Ενώ για το TRNSYS 18, χρειάστηκε η έκδοση του GenOpt 2.1.0

Πριν κάνουμε εγκατάσταση (install) το πρόγραμμα GenOpt, στη τοποθεσία C: δημιουργούμε ένα φάκελο με το όνομα “GenOpt” και μέσα στο φάκελο αυτό, δημιουργούμε ένα άλλο φάκελο με το όνομα “go_prg”.

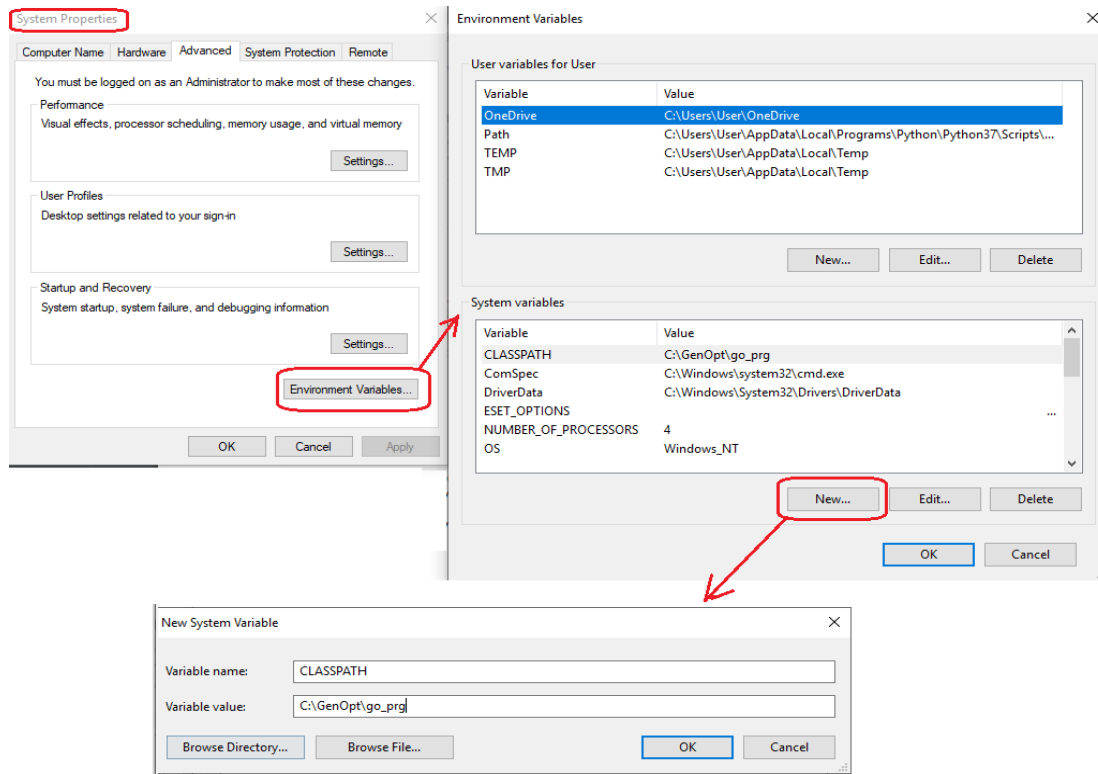
Είναι απαραίτητο η εγκατάσταση των λογισμικών GenOpt και Java να γίνει αντίστοιχα στις πιο κάτω τοποθεσίες και φακέλους του Η/Υ και όχι αλλού:

- C:\GenOpt\go_prg
- C:\Program Files\Java

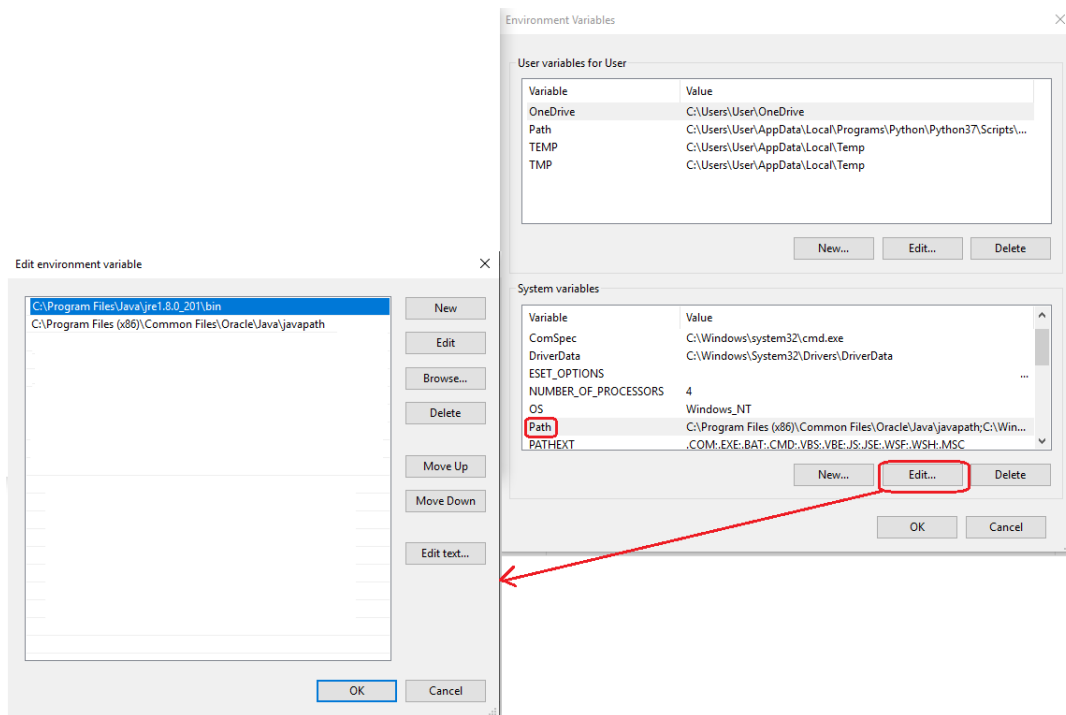
Στη συνέχεια ακολουθούμε τη πιο κάτω διαδικασία στο Η/Υ, για τη σωστή λειτουργία του GenOpt και της Java. Δεξί κλικ στο My computer και επιλέγουμε Properties ή πηγαίνουμε στη τοποθεσία “Control Panel\All Control Panel Items\System” και μετά επιλέγουμε τη καρτέλα που γράφει “Advance settings”. Επιλέγουμε το “Environment variables” όπως φαίνεται στη εικόνα I.1

Στη εικόνα I.1 πιο κάτω, εάν υπάρχει “CLASSPATH” μεταβλητή στη κατηγορία “system variables”, τότε πατάμε “edit” και στο “Variable value” συμπληρώνουμε “C:\ GenOpt\go_prg”. Εάν δεν υπάρχει η μεταβλητή “CLASSPATH” εκεί, τότε πατάμε “NEW” και συμπληρώνουμε “CLASSPATH” και “C:\GenOpt\go_prg” αντίστοιχα στα κουτιά όπως φαίνεται στη εικόνα I.1 πιο κάτω [I.1]

Με παρόμοιο τρόπο αλλάζουμε και το “Path” για τη Java όπως φαίνεται στη εικόνα I.2 [I.1]

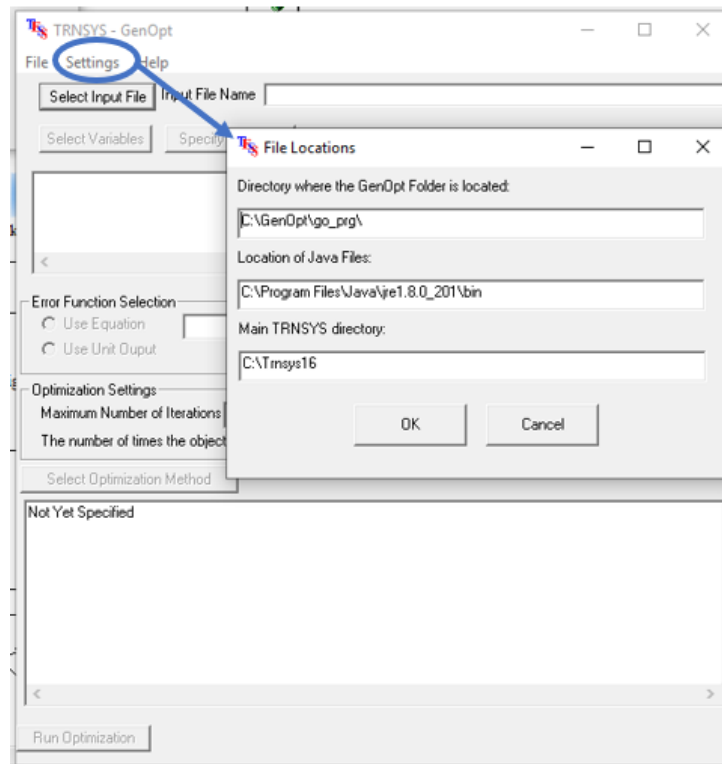


Εικόνα Ι.1: Σύνδεση Η/Υ με το πρόγραμμα GenOpt



Εικόνα Ι.2: Σύνδεση Η/Υ με το πρόγραμμα της Java

Τέλος, πάμε στη τοποθεσία C:\Trnsys16\Optimization που βρίσκεται εγκατεστημένο το TRNOpt. Αφού ανοίξουμε το TRNOpt (διπλό κλικ στο εικονίδιο) συμπληρώνουμε τα πιο κάτω:



Εικόνα 1.3: Σύνδεση του TRNSYS με το πρόγραμμα GenOpt

Βιβλιογραφία παραρτήματος

Michaël Kummert, USING GENOPT WITH TRNSYS 16 AND TYPE 56, University of Strathclyde, 2007