

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Προσομοίωση υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας από ηλιακά
συστήματα για θέρμανση κτιρίου**

Φοιτητής: Κωνσταντίνος Μόσχος

Επιβλέπων καθηγητής: Χρήστος Τζιβανίδης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επίκουρο καθηγητή Ε.Μ.Π., κ. Χρήστο Τζιβανίδη, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα, κ. Ευάγγελο Μπέλλο, για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες υποδείξεις του καθ' όλη την διάρκεια μελέτης της εργασίας, αλλά και γενικότερα των σπουδών μου. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους δικούς μου ανθρώπους, για την συνεχή στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια...

Στους γονείς μου, Γρηγόρη, Σωτηρία και στις αδερφές μου, Κατερίνα, Βίκυ, Μυρτώ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με δεδομένη την διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε όλες τις καθημερινές μας εκφάνσεις της ζωής, στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, για την θέρμανση ενός τυπικού κτιρίου επιφάνειας 100 m². Συγκεκριμένα για την επίτευξη της απαραίτητης θερμικής άνεσης του χώρου κατά τους μήνες Νοέμβριο – Απρίλιο, μελετάται κυρίως η τεχνολογία των θερμοφωτοβολταϊκών, αλλά και ακόμα τεσσάρων ακόμα συστημάτων συνδυαζόμενα πάντα με αντλία θερμότητας. Με τον τρόπο αυτό, τελικά μπορούν να εξαχθούν αποτελέσματα όχι μόνο για τα θερμοφωτοβολταϊκά, που είναι το ζητούμενο, αλλά να συγκριθούν και με άλλες τεχνολογίες με σκοπό την επιλογή του καλύτερου οικονομικά συστήματος θέρμανσης. Αναλυτικά τα πέντε συστήματα που προσομοιώθηκαν με τη χρήση του λογισμικού TRNSYS είναι:

- Αντλία θερμότητας νερού-αέρα υποβοηθούμενη από θερμοφωτοβολταϊκά
- Αντλία θερμότητας νερού-αέρα υποβοηθούμενη από θερμικά ηλιακά
- Αντλία θερμότητας νερού-αέρα υποβοηθούμενη από συνδυασμό θερμικών ηλιακών και φωτοβολταϊκών
- Αντλία θερμότητας αέρα-αέρα υποβοηθούμενη από φωτοβολταϊκά
- Αντλία θερμότητας συνδεδεμένη μόνο με το δίκτυο

Ειδικότερα, η δομή της εργασίας είναι κατανεμημένη σε 6 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σχετική εισαγωγή στην εργασία, καθώς παρουσιάζεται η σημερινή ενεργειακή κατάσταση στα κτίρια, η σημασία των δομικών στοιχείων του κτιρίου, τα κριτήρια θερμικής άνεσης, οι τρόποι μετάδοσης της θερμότητας και γίνεται αναφορά στις εγκαταστάσεις θέρμανσης αναλύοντας περισσότερο τον τρόπο λειτουργίας των αντλιών θερμότητας. Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελείται από την απαραίτητη θεωρία που χρησιμοποιήθηκε, σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία, τα διάφορα συστήματα απορρόφησης της ηλιακής ενέργειας καθώς και τις μελέτες με αντικείμενο τα θερμοφωτοβολταϊκά που έχουν δημοσιευθεί. Στη συνέχεια στο τρίτο κεφάλαιο εξηγούνται οι βασικές λειτουργίες του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις (TRNSYS 16). Ενώ, στο επόμενο κεφάλαιο, εξηγείται βήμα-βήμα η δημιουργία των πέντε συστημάτων θέρμανσης που χρησιμοποιήθηκαν, με τις τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν. Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και η ενεργειακή-οικονομική σύγκριση μεταξύ των εγκαταστάσεων. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα, τα οποία συνοψίζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και γίνονται προτάσεις με σχετικά θέματα που μπορούν να μελετηθούν στο μέλλον.

ABSTRACT

Taking into consideration the appearance and use of renewable energy sources in all of our daily aspects, the aim of this thesis is to study the use of solar energy to heat a typical building surface of 100 m². Specifically, for achieving the required thermal comfort of the space during November - April, the pv-thermals technology is mainly studied, apart from four other systems always associated with a heat pump. In this way, results can be extracted, not only for pv-thermals, but they can be compared with other technologies in order to select the best economic heating system. Below there is a list of the five systems simulated by the TRNSYS software:

- Water-Air heat pump assisted by pv-thermals
- Water-Air heat pump assisted by solar thermals
- Water-Air heat pump assisted by combination of solar thermals and photovoltaics
- Air-Air heat pump assisted by photovoltaics
- Air-Air heat pump connected only with the grid

Particularly, the structure of the work is divided into 6 chapters. In the first chapter there is a brief thesis introduction, presenting the current energy situation in the buildings, the importance of the structural elements of the building, the thermal comfort criteria and heat transfer modes. Moreover, in this chapter there is a presentation of heating facilities analyzing the operation of heat pumps. The second chapter consists of the necessary theory used studying the solar radiation, the various solar energy absorbing systems as well as published studies about the pv-thermals. Furthermore, the third chapter explains the basic functions of the software used for the simulations (TRNSYS 16). The next chapter gives a step by step explanation of the creation of the five heating systems used, as long as the values of the parameters selected. The fifth chapter presents the results of simulations and the energy-economic comparison between facilities. Finally, the sixth chapter lists the conclusions, summarizing the results of simulations and suggestions about relative issues and future work.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	4
Abstract.....	5
1. Εισαγωγή – Βασικές έννοιες.....	8
1.1. Ενέργεια και κτίριο σήμερα.....	8
1.2. Ενεργειακή απόδοση κτιρίων.....	8
1.3. Κανονισμός ενεργειακής απόδοσης κτιρίων.....	9
1.4. Η σημασία της θερμομόνωσης.....	10
1.5. Υαλοπίνακες.....	13
1.6. Ενεργειακά κουφώματα αλουμινίου.....	13
1.7. Θερμική άνεση.....	14
1.8. Θερμότητα.....	15
1.9. Εγκαταστάσεις θέρμανσης.....	16
1.10. Αντλίες θερμότητας.....	17
1.11. Ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας.....	23
2. Ηλιακή ενέργεια και τρόποι εκμετάλλευσής της.....	25
2.1. Εισαγωγή.....	25
2.2. Ηλιακή ακτινοβολία – χρήσιμες έννοιες και σχέσεις.....	25
2.3. Ηλιακή ενέργεια.....	27
2.4. Θερμικά ηλιακά συστήματα.....	28
2.5. Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	32
2.6. Θερμοφωτοβολταϊκά (PV-Thermal).....	36
3. Πρόγραμμα προσομοίωσης TRNSYS 16.....	42
3.1. Εισαγωγή στο TRNSYS.....	42
3.2. Simulation Studio – TRNEXE.....	42
3.3. Εφαρμογές TRNSED και TRNEdit.....	50
4. Παρουσίαση εγκαταστάσεων στο TRNSYS Simulation Studio.....	51
4.1. Εισαγωγή.....	51
4.2. Διαστάσεις κτιρίου στο Simulation Studio.....	51
4.3. Περιγραφή των δέκα βημάτων που ακολουθήθηκαν για τη δημιουργία του κτιρίου στο TRNSYS Studio.....	52
4.4. Επεξεργασία του κτιρίου.....	61
4.5. Παρουσίαση των εγκαταστάσεων και των στοιχείων (components) που χρησιμοποιήθηκαν.....	66
5. Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	98
5.1. Εισαγωγή.....	98
5.2. Ανάλυση κτιρίου.....	99

5.3.	Υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας νερού-αέρα από θερμοφωτοβολταϊκά (PVT).....	102
5.4.	Υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας νερού-αέρα από θερμικά ηλιακά (FPC).....	115
5.5.	Υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας αέρα-αέρα από φωτοβολταϊκά (PV).....	119
5.6.	Υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας νερού-αέρα από συνδυασμό θερμικών ηλιακών (FPC) και φωτοβολταϊκών (PV).....	123
5.7.	Αντλία θερμότητας αέρα-αέρα τροφοδοτούμενη μόνο από το δίκτυο.....	124
5.8.	Οικονομική σύγκριση εγκαταστάσεων.....	125
6.	Συμπεράσματα.....	131
7.	Βιβλιογραφία.....	133

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1 Ενέργεια και κτίριο σήμερα

Η ανάγκη του ανθρώπου να διαμορφώσει θερμοκρασιακές συνθήκες φιλικές σε αυτόν έχει ως συνέπεια την συνεχόμενη αύξηση της ενέργειας που απαιτείται για την θέρμανση ή την ψύξη ενός κτιρίου. Το σημαντικότερο όμως, είναι, αυτό να συνδιάζεται με τις επιταγές των καιρών, δηλαδή βάζοντας σε προτεραιότητα την εξοικονόμηση ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος. Οι ενέργειες προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν οδηγήσει στην εύρεση μεθόδων και στην εφαρμογή τεχνολογιών, όχι μόνο πάνω στα χαμηλών ενεργειακών αναγκών συστήματα θέρμανσης και ψύξης των κτιρίων, αλλά και πάνω στην ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών που αυτά έχουν.

1.2 Ενεργειακή απόδοση κτιρίων

Η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων προσδιορίζεται με βάση μεθοδολογία υπολογισμού της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας σύμφωνα με την οποία λαμβάνονται υπόψη, η χρήση του κτιρίου, τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής, τα γεωμετρικά δεδομένα και τα θερμικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους, καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων θέρμανσης, ψύξης, κλιματισμού, παραγωγής ζεστού νερού χρήσης και φωτισμού των χώρων [1].

Ο ενεργειακός σχεδιασμός κτιρίων και η ορθολογική χρήση της ενέργειας έχουν στόχο να διασφαλίσουν αποδεκτές εσωκλιματικές συνθήκες με τη σωστή θερμική συμπεριφορά του κτιρίου, καθ' όλη την διάρκεια του έτους και συνεπώς να περιορίσουν την κατανάλωση ενέργειας με όλα τα οφέλη που αυτό συνεπάγεται. Στην περίπτωση του βιοκλιματικού σχεδιασμού ο στόχος επιτυγχάνεται με καθαρά σχεδιαστικούς χειρισμούς ή με διάφορες τεχνικές στην κατασκευή του κτιρίου, περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο την εξάρτηση από το μηχανολογικό εξοπλισμό για την θέρμανση και ψύξη των κτιρίων. Έτσι καλύπτοντας τα κτίρια τις ανάγκες τους με ηλιακή ενέργεια και άλλες ατμοσφαιρικές πηγές καταναλώνουν πολύ λιγότερη ενέργεια απ' ότι οι αντίστοιχες συμβατικές κατασκευές. Εξοικονόμηση ενέργειας στις κατασκευές προκύπτει από το σωστό και ορθολογικό σχεδιασμό, ο οποίος επιτυγχάνεται μέσω της σωστής χωροθέτησης του κτιρίου στο περιβάλλον και τον προσανατολισμό του, της διάστασης και προσανατολισμού των ανοιγμάτων του, την προστασία του κελύφους από τις ατμοσφαιρικές εναλλαγές αλλά και από τη σωστή λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης και δροσισμού [2].

Για την εξοικονόμηση ενέργειας κατά την χειμερινή περίοδο απαιτείται περιορισμός των θερμικών απωλειών του κτιρίου και μεγιστοποίηση των θερμικών ηλιακών κερδών. Αντίθετα κατά την θερινή περίοδο θα πρέπει να επιδιώκεται ο φυσικός δροσισμός του κτιρίου με την ελαχιστοποίηση των θερμικών κερδών και τη θερμική αποφόρτιση του κτιρίου μέσω του αερισμού και των άλλων σχετικών μέτρων.

1.3 Κανονισμός ενεργειακής απόδοσης κτιρίων

Στην Ελλάδα τον Απρίλιο του 2010, εκδόθηκε ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.), με τον οποίο θεσμοθετείται ο ολοκληρωμένος ενεργειακός σχεδιασμός στον κτιριακό τομέα. Σκοπός του Κ.Εν.Α.Κ. είναι η διαμόρφωση του πλαισίου αρχών και ο καθορισμός των όρων και των προϋποθέσεων βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός του είναι η μείωση της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό, παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, με την ταυτόχρονη διασφάλιση συνθηκών άνεσης στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων [3].

Η μελέτη ενεργειακής απόδοσης εκπονείται για κάθε κτίριο μεγαλύτερο από 50 τ.μ. νέο ή υφιστάμενο που ανακαινίζεται ριζικά και βασίζεται σε μια συγκεκριμένη μεθοδολογία η οποία αναφέρεται:

α) στην απαίτηση κάλυψης ελάχιστων προδιαγραφών του κτιρίου όσον αφορά στο σχεδιασμό του, το κτιριακό κέλυφος και τις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις.

β) στην σύγκρισή του με κτίριο αναφοράς. Ως κτίριο αναφοράς θεωρείται ένα με ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, θέση, προσανατολισμό, χρήση και χαρακτηριστικά λειτουργίας με το εξεταζόμενο κτίριο που πληροί όμως ελάχιστες προδιαγραφές και έχει καθορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά [4].

Πιο αναλυτικά, τα βασικότερα σημεία του Κ.Εν.Α.Κ. είναι:

- Ορισμός μεθοδολογίας υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης και ενεργειακής κατάταξης των κτιρίων
- Καθορίζονται οι ελάχιστες απαιτήσεις (KWh/m²) για την ενεργειακή απόδοση και την ενεργειακή κατάταξη των νέων και ριζικώς ανακαινιζόμενων κτιρίων μέσω της μεθοδολογίας του κτιρίου αναφοράς
- Καθορίζονται οι ελάχιστες προδιαγραφές για τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους και οι τεχνικές προδιαγραφές των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων των υπό μελέτη κτιρίων, καθώς και των ανακαινιζόμενων
- Ορίζεται το περιεχόμενο της μελέτης ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων
- Καθορίζεται η μορφή του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης κτιρίου, καθώς και τα στοιχεία που αυτό θα περιλαμβάνει

- Καθορίζεται ο τρόπος εκπόνησης των ενεργειακών επιθεωρήσεων του κτιρίου, των λεβήτων και των κλιματιστικών [3]

Τα οφέλη από τον Κ.Εν.Α.Κ. είναι οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά. Τα οικονομικά οφέλη αφορούν κυρίως στον περιορισμό των λειτουργικών εξόδων συντήρησης των κτιρίων, αλλά και στην αναθέρμανση της οικοδομικής δραστηριότητας. Τα κοινωνικά οφέλη αφορούν στην δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και στη βελτίωση της ποιότητας ζωής, ενώ τα περιβαλλοντικά οφέλη αφορούν στον περιορισμό των εκπομπών ρύπων, κυρίως διοξειδίου του άνθρακα.

1.4 Η σημασία της θερμομόνωσης

Θερμομόνωση ενός δομικού στοιχείου ονομάζεται το σύνολο των μεθόδων και των υλικών που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό της ροής θερμότητας μεταξύ των χώρων εκατέρωθεν του στοιχείου. Η ροή θερμότητας οφείλεται στη θερμοκρασιακή διαφορά που παρατηρείται μεταξύ δύο χώρων, η οποία προκαλεί τη μετάδοση θερμότητας από το θερμότερο στο ψυχρότερο χώρο, μέσω του δομικού στοιχείου. Η μετάδοση θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος ενός κτιρίου γίνεται μέσω του κτιριακού κελύφους. Τις ψυχρές ημέρες του έτους, η ροή θερμότητας είναι από το ψυχρότερο εξωτερικό περιβάλλον, ενώ τις θερμές ημέρες η ροή είναι αντίθετη. Στην πρώτη περίπτωση, η θερμότητα που διαφεύγει εκτός του κτιρίου καλείται θερμικές απώλειες και στη δεύτερη περίπτωση ονομάζεται, εξωτερικά θερμικά κέρδη.

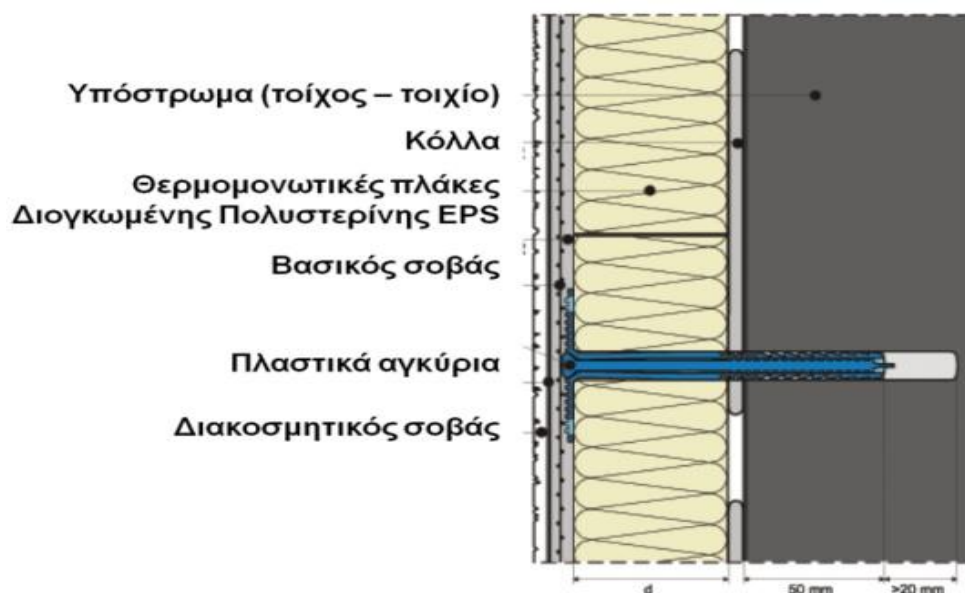
Σκοπός της θερμομόνωσης είναι να ελαχιστοποιήσει τη μετάδοση θερμότητας από το εσωτερικό στο εξωτερικό περιβάλλον και αντίστροφα, περιορίζοντας έτσι τα εξωτερικά θερμικά κέρδη το καλοκαίρι και τις θερμικές απώλειες το χειμώνα. Έτσι μειώνονται σημαντικά οι ανάγκες του κτιρίου για θέρμανση και ψύξη. Οι θερμικές απώλειες ενός κτιρίου είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, κάποιοι από τους οποίους είναι το κλίμα της περιοχής, οι διαστάσεις των εξωτερικών επιφανειών του, η επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία και το είδος των υλικών κατασκευής των δομικών στοιχείων του [5].

Η εξάρτηση των θερμικών απωλειών από το είδος των δομικών υλικών εκφράζεται από το συντελεστή θερμοπερατότητας U των δομικών στοιχείων του κελύφους. Ο συντελεστής αυτός αποτελεί κριτήριο της θερμομονωτικής ικανότητας του δομικού στοιχείου. Ένα μη μονωμένο στοιχείο έχει υψηλό συντελεστή θερμοπερατότητας, δηλαδή έχει μεγάλες απώλειες θερμότητας. Η μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας του στοιχείου απαιτεί τη χρήση θερμομονωτικών υλικών για την κατασκευή του στοιχείου.

Θερμομόνωση εφαρμόζεται σε όλα τα δομικά στοιχεία του κελύφους του κτιρίου. Η εφαρμογή της εξαρτάται άμεσα από το αν το κτίριο είναι υπό κατασκευή ή ανακαίνιση. Ασφαλώς στην πρώτη περίπτωση υπάρχει ευρύτερο φάσμα δυνατοτήτων και προοπτικών θερμομόνωσης και αναμένονται σαφώς καλύτερα τελικά αποτελέσματα σε σχέση με τη δεύτερη.

Εξωτερική θερμομόνωση

Στη μέθοδο αυτή το μονωτικό υλικό τοποθετείται στην εξωτερική πλευρά του τοίχου. Τα πλεονεκτήματά της είναι η κάλυψη των θερμογεφύρων στις πλάκες, τις κολώνες και τις δοκούς. Η θερμοχωρητικότητα του τοίχου είναι πλήρως εκμεταλλεύσιμη και η λειτουργία των εσωτερικών χώρων δεν παρεμποδίζεται. Μειονεκτήματα της μεθόδου, η αργή θέρμανση του χώρου, η έκθεση της στις εξωτερικές καιρικές συνθήκες και το αυξημένο κόστος.



Εικόνα 1.1: Εξωτερική θερμομόνωση κτιρίου [6]

Εσωτερική θερμομόνωση

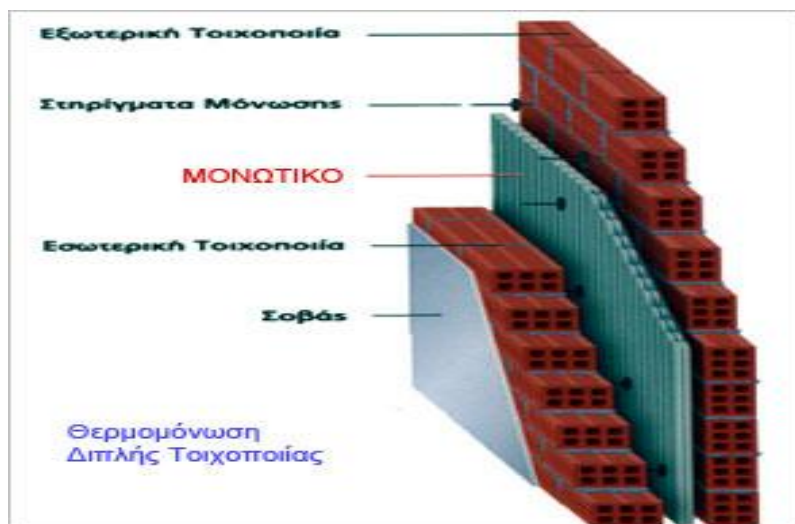
Σε αυτήν την μέθοδο το μονωτικό υλικό τοποθετείται στην εσωτερική πλευρά του τοίχου. Πλεονεκτήματά της η γρήγορη θέρμανση χώρου, η απλή κατασκευή και το κόστος της. Μειονεκτήματά της, η μείωση του διαθέσιμου χώρου στο εσωτερικό του κτιρίου, κίνδυνος επιφανειακής συμπύκνωσης υδρατμών και δυσκολία τοποθέτησης ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων.



Εικόνα 1.2: Εσωτερική θερμομόνωση κτιρίου [7]

Θερμομόνωση στον πυρήνα του τοίχου

Για καινούρια σπίτια η πιο συνήθης μόνωση που γίνεται είναι εσωτερικά με διπλή τοιχοποιία. Ενδιάμεσα του εσωτερικού και του εξωτερικού τοίχου παρεμβάλλεται κάποιο υλικό όπως ο πετροβάμβακας ή και πολυστερίνες και έτσι επιτυγχάνεται μια καλή μόνωση.



Εικόνα 1.3: Θερμομόνωση στον πυρήνα του τοίχου [8]

Μια επιτυχής θερμομόνωση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των λειτουργικών εξόδων για θέρμανση και ψύξη του κτιρίου, καθώς περιορίζει την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας. Επίσης μειώνει το κόστος εγκατάστασης συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, αφού η απαραίτητη εγκατεστημένη ισχύς και των δύο είναι μικρότερη. Ακόμη μειώνει σε μεγάλο βαθμό τη δημιουργία θερμογεφύρων και

πετυχαίνει καλύτερες συνθήκες θερμικής άνεσης στο εσωτερικό του κτιρίου. Η θερμομόνωση όμως, έχει αντίκτυπο στο κόστος κατασκευής του κτιρίου, το οποίο αυξάνεται. Συνεπώς οι τεχνικές θερμομόνωσης που θα εφαρμοστούν σε ένα κτίριο πρέπει να λαμβάνουν υπόψη και τον οικονομικό παράγοντα πέραν του τεχνικού-ενεργειακού παράγοντα.

1.5 Υαλοπίνακες

Ένα άλλο λεπτό σημείο στον υπολογισμό της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου είναι η επιλογή υαλοπινάκων. Αυτοί χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

Απλοί υαλοπίνακες: αυτοί όπως υποδηλώνει και η ονομασία τους αποτελούνται από ένα κρύσταλλο πάχους περίπου 5mm. Στο παρελθόν ήταν ο πιο συνηθισμένος τύπος υαλοπίνακα, αλλά πλέον η απόδοσή του τόσο ενεργειακή, όσο και από πλευράς ηχομόνωσης τον έχουν κάνει μη αποδεκτό. Η τιμή της θερμοπερατότητας τους είναι κοντά στα 5 W/m²K μια πολύ υψηλή τιμή.

Διπλοί υαλοπίνακες: οι υαλοπίνακες αυτοί αποτελούνται από δύο κρύσταλλα που ενώνονται μεταξύ τους με μια ειδική κόλλα να τα περιβάλλει και ένα διάκενο στο εσωτερικό τους 10-15 mm. Αυτή η τιμή του διακένου παίζει σημαντικό ρόλο στη συνολική θερμοπερατότητα που έχει ο υαλοπίνακας, κοντά στα 2,5 W/m²K. Στη συνέχεια τοποθετούνται στην εσοχή που κάνει το κούφωμα του αλουμινίου στο εσωτερικό του.

Ενεργειακοί διπλοί υαλοπίνακες: τα ενεργειακά τζάμια έχοντας μια ειδική επίστρωση στην μια πλευρά της επιφάνειάς τους λειτουργούν σαν καθρέφτες στο υπέρυθρο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της θερμικής ακτινοβολίας που διέρχεται μέσα από το τζάμι. Έτσι η θερμική ακτινοβολία του περιβάλλοντος δεν διέρχεται μέσα από τον υαλοπίνακα, αλλά και αντίστροφα η θερμική ακτινοβολία του εσωτερικού χώρου δεν διαφεύγει προς τα έξω. Παράλληλα το διάκενο μεταξύ των κρυστάλλων γεμίζεται με ειδικό αέριο, συνήθως αργό. Με τον τρόπο αυτό η θερμοπερατότητα του υαλοπίνακα κατεβαίνει κοντά στη μονάδα και γίνεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, κάτι που κάνει τον συγκεκριμένο τύπο τον πλέον επικρατέστερο.

1.6 Ενεργειακά κουφώματα αλουμινίου

Τα θερμοδιακοπτόμενα κουφώματα είναι ευρέως γνωστά στην αγορά ως ενεργειακά κουφώματα αλουμινίου. Στην ουσία αυτό που τα ξεχωρίζει σε σχέση με

τα συμβατικά προφίλ αλουμινίου είναι η χρήση ειδικού μονωτικού υλικού (συνήθως πολυαμιδίου, το οποίο είναι κακός αγωγός της θερμότητας) που ξεχωρίζει τα προφίλ των παραθύρων σε δύο μέρη, εξωτερικό και εσωτερικό. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται υψηλή θερμομόνωση και ηχομόνωση. Ο συνδυασμός τους με ενεργειακούς διπλούς υαλοπίνακες κάνουν το εκάστοτε άνοιγμα να έχει σχεδόν μηδενικές θερμικές απώλειες που είναι το ζητούμενο στα σύγχρονα κτίρια.

1.7 Θερμική άνεση

Όλα τα παραπάνω υπολογίζονται κατά τον ενεργειακό σχεδιασμό του κτιρίου με στόχο τη μείωση της απαραίτητης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε πριν καθοριστεί ο τρόπος θέρμανσης, τις συνθήκες που εξασφαλίζουν θερμική άνεση στους ανθρώπους του κτιρίου. Οι συνθήκες αυτές εξαρτιούνται από την θερμοκρασία αέρα του χώρου και από την σχετική υγρασία όπως φαίνεται στην εικόνα 1.4.



Εικόνα 1.4: Συνθήκες θερμικής άνεσης [27]

1.8 Θερμότητα

Η θερμότητα είναι μια μορφή ενέργειας, που όπως είναι γνωστό από το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα, μεταφέρεται μόνη της από ένα σώμα υψηλότερης σ' ένα σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας και ποτέ προς την αντίθετη κατεύθυνση. Ο μηχανικός πρέπει αυτό το φυσικό φαινόμενο να το εντείνει ή να το περιορίσει ανάλογα την περίπτωση. Το τελευταίο μπορεί να το πετύχει με τα μονωτικά υλικά

που χρησιμοποιούνται για παράδειγμα στις μονώσεις των κτιρίων και των ψυκτικών εγκαταστάσεων. Η προαγωγή όμως της μεταφοράς θερμότητας είναι ένα πεδίο σημαντικά πιο εκτεταμένο και πολύπλευρο λόγω της ευρείας εφαρμογής που έχει σ' ολόκληρη την τεχνολογία όπως οι εναλλάκτες θερμότητας σε διάφορες μηχανολογικές εγκαταστάσεις, οι συμπυκνωτές στα στοιχεία ατμοποίησης κ.α. Μονάδα μέτρησης της θερμότητας στο διεθνές σύστημα μονάδων S.I. είναι το Joule (J). Επίσης πολλές φορές χρησιμοποιείται και το calorie (cal) που η αντιστοιχία τους είναι $1 \text{ cal}=4,19 \text{ J}$, καθώς και το Btu στις αγγλοσαξονικές χώρες που η αντιστοιχία τους είναι $1 \text{ Btu}=1,06 \text{ KJ}$. Η θερμότητα μεταδίδεται με τρεις τρόπους:

Μεταφορά θερμότητας με αγωγή: οφείλεται κυρίως στη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των ατόμων ή των μορίων ενός σώματος ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται. Στα μέταλλα η θερμική ενέργεια μεταφέρεται μεταξύ των μικρών σωματιδίων με διάχυση των ηλεκτρονίων ενώ στα αέρια σχεδόν αποκλειστικά με διάχυση των μορίων. Στα υγρά παρατηρείται ο ίδιος μηχανισμός, οι αλληλεπιδράσεις όμως μεταξύ των μορίων είναι εντονότερες και συχνότερες απ' ότι στα αέρια. Για παράδειγμα, το χειμώνα παρατηρούνται σημαντικές απώλειες θερμότητας από τους θερμαινόμενους χώρους, οι οποίες οφείλονται κυρίως στην αγωγή από τους τοίχους, τους υαλοπίνακες, την οροφή κ.λπ. οικοδομικά στοιχεία τα οποία χωρίζουν τον χώρο από το ψυχρότερο περιβάλλον.

Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή: στον τρόπο αυτόν εκτός από τις τυχαίες κινήσεις των μορίων, τη διάχυση, μεταφέρεται θερμική ενέργεια και με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, κατά την οποία μετακινείται συλλογικά μεγάλος αριθμός μορίων. Η συναγωγή θερμότητας εμφανίζεται μεταξύ της επιφάνειας ενός σώματος και του ρευστού όταν οι θερμοκρασίες τους διαφέρουν.

Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία: στη θερμική ακτινοβολία η θερμότητα μεταφέρεται μεταξύ των σωμάτων με τη βοήθεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα στερεά σώματα, τα περισσότερα υγρά και αρκετά αέρια ακτινοβολούν θερμότητα συγχρόνως όμως απορροφούν και μέρος της ακτινοβολίας την οποία εκπέμπουν άλλα σώματα. Στη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία εμφανίζεται διπλή μετατροπή ενέργειας, ενώ στην αγωγή και συναγωγή απαιτείται η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου για τη μεταφορά θερμότητας, στην ακτινοβολία δε συμβαίνει αυτό. Η ακτινοβολία εμφανίζεται στο κενό και μάλιστα με εντονότερο ρυθμό [9].

1.8.1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι το μέγεθος που προσδιορίζει ουσιαστικά την ένταση θερμότητας ενός σώματος προς το περιβάλλον. Στην πραγματικότητα η

Θερμοκρασία αποτελεί την ένδειξη για την κίνηση των μορίων του σώματος. Μονάδα μέτρησης στο διεθνές σύστημα μονάδων είναι το 1 Kelvin. Επίσης χρησιμοποιείται η κλίμακα Celsius όπου 1 βαθμός Celsius ισούται με 1 βαθμό Kelvin. Το μηδέν της κλίμακας Kelvin αποτελεί το απόλυτο μηδέν, δηλαδή τη χαμηλότερη θερμοκρασία που μπορεί να υπάρξει όπου τα σωματίδια ενός υλικού παύουν να κινούνται.

1.8.2 Σχετική υγρασία

Σχετική υγρασία (%) είναι ο λόγος του ποσού υγρασίας που περιέχεται στον αέρα προς το μέγιστο ποσό υγρασίας που μπορεί να περιέχει ο αέρας στην ίδια θερμοκρασία και πίεση. Για παράδειγμα, αέρας με σχετική υγρασία 50% σημαίνει ότι ο αέρας φέρει το 50% από τη συνολική υγρασία που θα μπορούσε να έχει.

1.9 Εγκαταστάσεις θέρμανσης

Ο βασικός σκοπός μιας εγκατάστασης θέρμανσης, είναι να μην επιτρέπει στη θερμοκρασία ενός χώρου να κατεβαίνει κάτω από μια ελάχιστη τιμή. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, η εγκατάσταση θέρμανσης προσθέτει θερμότητα στο χώρο όποτε χρειάζεται. Η θερμότητα αυτή παράγεται είτε τοπικά είτε κεντρικά κάπου μακριά από το χώρο και μεταφέρεται σε αυτόν με ένα δίκτυο μεταφοράς. Αποτελείται από το σύνολο των συσκευών, μηχανισμών, κατασκευών κλπ. που απαιτούνται για την πρόσδοση θερμικής ενέργειας στους διαφόρους χώρους του κτιρίου.

Οι εγκαταστάσεις θέρμανσης κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με τα εξής κριτήρια:

- Τη θέση της πηγής παροχής θερμικής ενέργειας σε ένα κτίριο (τοπική, κεντρική θέρμανση)
- Την πηγή παροχής θερμικής ενέργειας (θέρμανση με υγρά καύσιμα, με ηλεκτρική ενέργεια, με ηλιακή ενέργεια κλπ)
- Το εργαζόμενο μέσο που παρέχει τη θερμική ενέργεια (συνήθως νερό, αέρας)
- Τον τρόπο μετάδοσης της θερμικής ενέργειας στο χώρο (με ακτινοβολία, με αγωγή)

Ανεξάρτητα από το σύστημα θέρμανσης που θα επιλεγεί για να καλύψει τις ανάγκες των χώρων του κτιρίου, η εγκατάσταση θέρμανσης θα πρέπει να

υπολογίζεται, να κατασκευάζεται και να λειτουργεί με τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται:

- Η ασφάλεια των ατόμων που τη χρησιμοποιούν καθώς και η ασφάλεια του κτιρίου
- Η άνεση των χρηστών της εγκατάστασης
- Η επάρκεια και η ορθή και απρόσκοπτη λειτουργία της εγκατάστασης, σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας της
- Κατά το δυνατό, η αυτόματη λειτουργία της και να λαμβάνονται τα απαραίτητα κάθε φορά μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας

1.10 Αντλίες θερμότητας

Οι αντλίες θερμότητας αποτελούν την απάντηση της τεχνολογίας στις αυξημένες ανάγκες των σύγχρονων καταναλωτών για περιορισμό του κόστους θέρμανσης και ψύξης, αλλά και σε αυτές του περιβάλλοντος για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη προστασία του.

Είναι μηχανές που αντλούν θερμότητα από το περιβάλλον, συνήθως τον ατμοσφαιρικό αέρα και την μεταφέρουν στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου. Για να το επιτύχουν αυτό χρησιμοποιούν ένα πολύ μικρό ποσό ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο και αποδίδουν στο πολλαπλάσιο σε θερμική, σε σχέση πάντα με αυτό που καταναλώνουν. Στην πράξη πρόκειται για σύστημα υψηλής απόδοσης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για τη ψύξη όσο και για θέρμανση κατοικιών αλλά και επαγγελματικών χώρων.

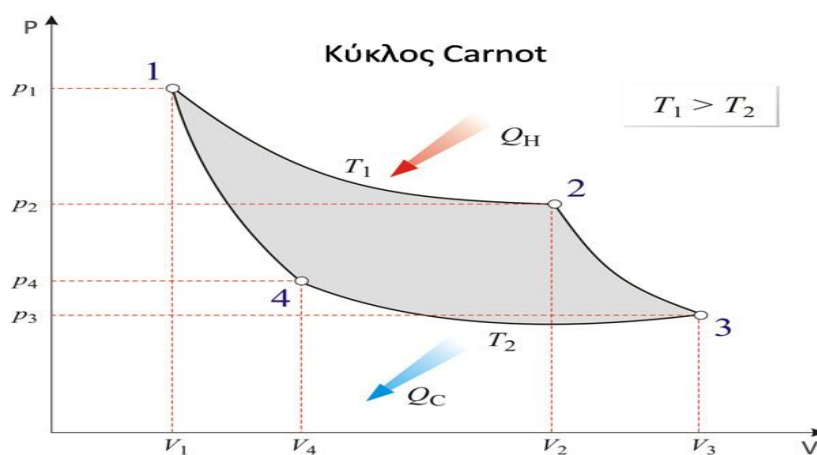
Βασικά μέρη

Τα βασικά μέρη που αποτελείται μια αντλία θερμότητας είναι:

- Το τμήμα συμπιεστή-συμπυκνωτή που απορρίπτει θερμότητα στο περιβάλλον
- Το τμήμα ανεμιστήρα-ατμοποιητή που απορροφά θερμότητα από τον εσωτερικό χώρο ή τον εξωτερικό
- Ο μηχανισμός αντιστροφής που αποτελείται από μια τετράοδη βαλβίδα, η οποία μετατρέπει τον ψυκτικό κύκλο, σε θερμαντικό και αντίστροφα
- Οι αυτοματισμοί για τον έλεγχο και την λειτουργία του συστήματος θέρμανσης ή ψύξης
- Η συμπληρωματική ηλεκτρική αντίσταση που αυξάνει τη θερμική απόδοση του συστήματος, όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι πολύ μικρή

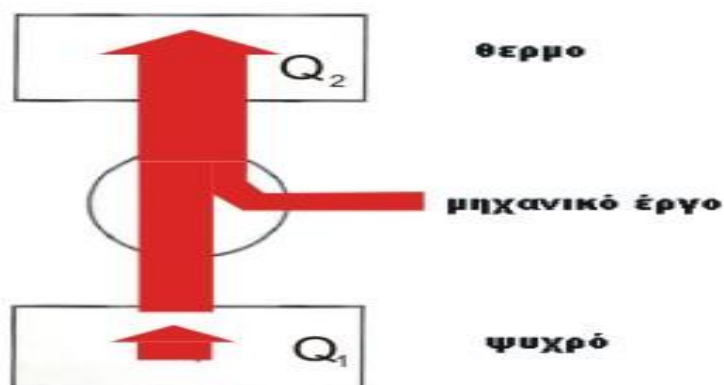
Τρόπος λειτουργίας

Η λειτουργία της βασίζεται στη λειτουργία της μηχανής Carnot (εικόνα 1.5.), που λειτουργεί όμως κατά τη φορά του ψυκτικού κύκλου. Η ποιότητα της αντλίας χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή συμπεριφοράς COP (Coefficient of Performance).



Εικόνα 1.5: Κύκλος Carnot [28]

Κατά την θέρμανση ενδιαφέρον παρουσιάζει το ποσό θερμότητας Q_2 όπως φαίνεται στην εικόνα 1.6. ενώ κατά την ψύξη το Q_1 . Ο ενεργειακός ισολογισμός δίνει: $Q_2=Q_1+W$



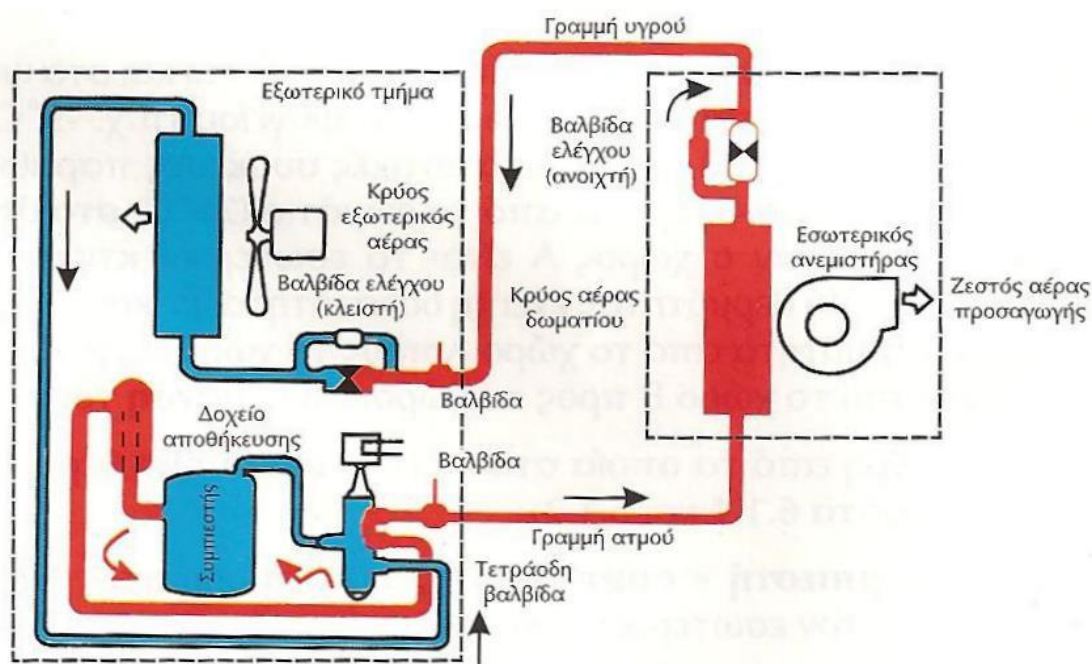
Εικόνα 1.6: Ενεργειακός ισολογισμός κύκλου αντλίας θερμότητας κατά την θέρμανση [28]

Ο COP δίνεται από την σχέση:

$$COP = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} \quad (1.1)$$

Κύκλος για θέρμανση χώρου

Περιλαμβάνει τα ίδια στάδια με τον κύκλο ψύξης μόνο που σε αυτή την περίπτωση το στοιχείο που εκτελούσε την ατμοποίηση εδώ εκτελεί την συμπύκνωση και το αντίστροφο. Η μετατροπή του ψυκτικού κύκλου σε κύκλο θέρμανσης γίνεται με τη βοήθεια της τετράοδης βαλβίδας, που οδηγεί το ψυκτικό υγρό μετά την έξοδό του από τον συμπιεστή και την εκτονωτική διάταξη στους εναλλάκτες θερμότητας ψυκτικού μέσου, ανάλογα με την επιλογή των απαιτήσεων μέσω διακόπτη.



Εικόνα 1.8: Κύκλος αντλίας θερμότητας για θέρμανση [10]

Βαθμός απόδοσης

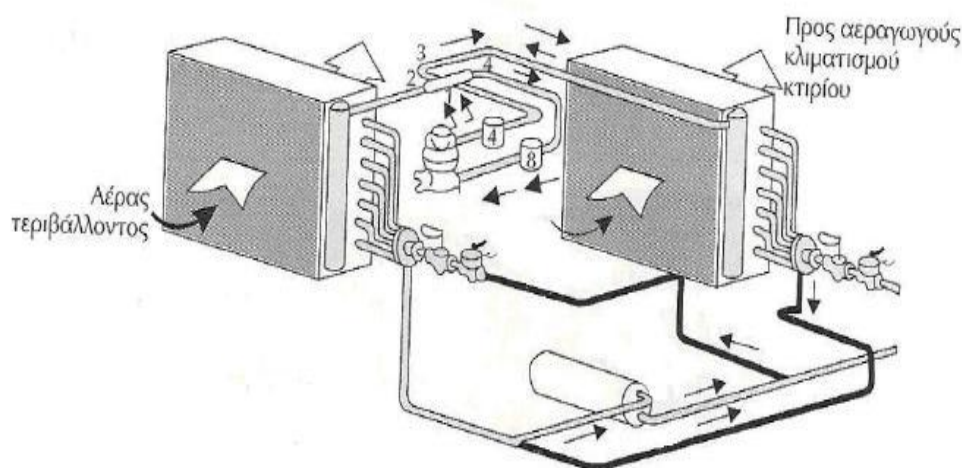
Η απόδοση της αντλίας θερμότητας επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος, διότι η ενθαλπία του αέρα είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του, επομένως στις χαμηλές θερμοκρασίες του αέρα θα έχουμε μικρά ποσά θερμότητας από την μία και από την άλλη προβλήματα σωστής λειτουργίας του συστήματος κατά τον χειμώνα [10].

Κατηγορίες αντλιών θερμότητας

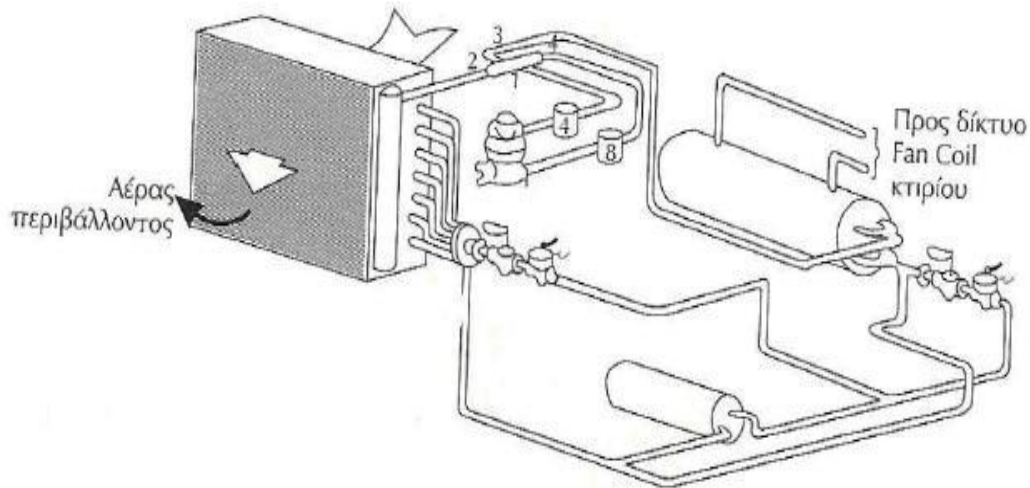
Η αρχή λειτουργίας των αντλιών θερμότητας είναι ίδια. Ανάλογα όμως με την επιλογή της πηγής "άντλησης" ενέργειας και το μέσο απόδοσης της ενέργειας διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Αντλίες θερμότητας αέρος - νερού:** εκμεταλλεύονται για την άντληση ενέργειας τον αέρα του περιβάλλοντος. Το θερμικό μέσο απόδοσης ενέργειας είναι συνήθως το νερό που μπορεί να κυκλοφορεί στο δίκτυο θέρμανσης (ενδοδαπέδια, σώματα ακτινοβολίας, fan coils) ή σε κάποιο εναλλάκτη από θερμοδοχείο με ενσωματωμένη αντλία θερμότητας (ζεστού νερού χρήσης). Είναι ιδανικές για κάθε είδους κατοικία και λειτουργούν τόσο σε υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες όσο και σε θερμοκρασίες μέχρι -20°C .
- **Αντλίες θερμότητας αέρος - αέρος:** είναι οι πιο συνηθισμένες στις σύγχρονες εγκαταστάσεις, έχουν ως πηγή άντλησης ενέργειας αλλά και ως μέσο απόδοσης της ενέργειας τον αέρα. Στην πρώτη περίπτωση τον εξωτερικό αέρα και στην δεύτερη τον εσωτερικό ή και ένα μέρος εξωτερικού για ταυτόχρονο εξαερισμό του χώρου.
- **Αντλίες θερμότητας νερού - νερού (γεωθερμική αντλία):** στην κατηγορία αυτή η πηγή άντλησης της ενέργειας προέρχεται από το έδαφος με οριζόντιους ή κάθετους εναλλάκτες οι οποίοι μεταφέρουν την θερμική ενέργεια του υπεδάφους στην αντλία. Το θερμικό μέσο απόδοσης της ενέργειας είναι και εδώ το νερό όπως και παραπάνω [11].

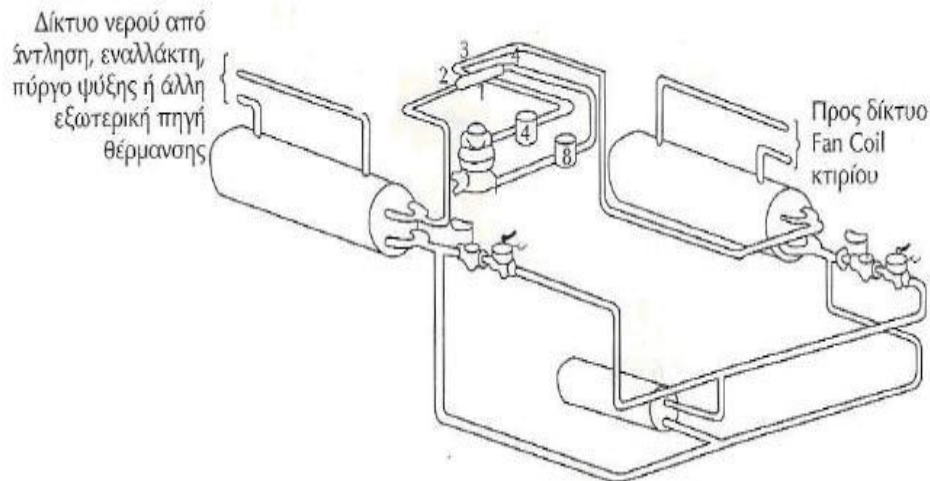
Ανάλογα με την εφαρμογή επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος αντλίας θερμότητας (αέρος, νερού, εδάφους) έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία και ταυτόχρονα η απόδοση θέρμανσης - ψύξης να είναι η υψηλότερη δυνατή με το χαμηλότερο δυνατό κόστος λειτουργίας.



Εικόνα 1.9: Αντλία θερμότητας αέρα - αέρα [10]



Εικόνα 1.10: Αντλία θερμότητας αέρα – νερού [10]



Εικόνα 1.11: Αντλία θερμότητας νερού – νερού [10]

Πλεονεκτήματα από τη χρήση τους

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της χρήση αντλιών θερμότητας νερού είναι:

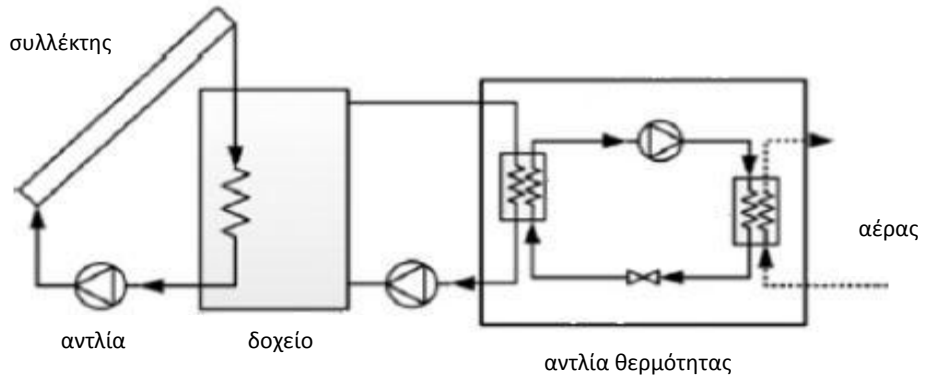
- **Εξοικονόμηση ενέργειας:** με τη χρήση μια αντλίας θερμότητας πετυχαίνουμε έως και 6 φορές μεγαλύτερες αποδόσεις σε σύγκριση με τους τρόπους θέρμανσης που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα. Έτσι έχουμε μικρότερο κόστος για την θέρμανση του χώρου που επιθυμούμε από 50% - 70% σε σχέση με το πετρέλαιο. Αυτό βέβαια εξαρτάται και από το κόστος του, το κόστος του ρεύματος, την θερμομόνωση της κατοικίας, και τις εξωτερικές θερμοκρασίες που επικρατούν στην περιοχή.

- **Προστασία του περιβάλλοντος:** με βάση την ευρωπαϊκή οδηγία 2009/28/EC/RES Direc., οι αντλίες θερμότητας με υψηλό ονομαστικό βαθμό απόδοσης κατατάσσονται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος. Αυτό γιατί έχουν πολύ χαμηλότερο "αποτύπωμα" CO₂ στο περιβάλλον, σε σχέση με τα υπόλοιπα συμβατικά καύσιμα αλλά και τις εκπομπές του εργοστασίου που παράγει την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν.
- **Ευκολία εγκατάστασης:** η εγκατάσταση δεν απαιτεί χώρο για λεβητοστάσιο, καμινάδα όπως συμβαίνει με τους υπάρχοντες τρόπους θέρμανσης. Τοποθετούνται εύκολα σε ελάχιστο χώρο και χρόνο και μπορούν να θερμάνουν ή να δροσίσουν με άνεση ολόκληρο σπίτι. Στην περίπτωση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας τα πράγματα γίνονται κάπως πιο περίπλοκα, καθώς απαιτείται ειδική μελέτη και εργασίες στον εξωτερικό χώρο για τη τοποθέτηση της.
- **Κόστος συντήρησης:** επειδή δεν χρησιμοποιούν καυστήρα δεν χρειάζονται κάθε χρόνο συντήρηση όπως συμβαίνει με τους λέβητες πετρελαίου και αερίου. Η λειτουργία τους μπορεί να συγκριθεί με αυτή ενός air condition και άρα έχει μηδαμινά έξοδα συντήρησης.
- **Ασφάλεια και αξιοπιστία:** οι αντλίες θερμότητας ανήκουν στα ασφαλέστερα συστήματα θέρμανσης και ψύξης. Δεν εκπέμπουν ρύπους τοπικά, δεν εμφανίζουν φλόγα ή άλλες καύσεις αφού δεν χρησιμοποιούν πετρέλαιο ή αέριο αλλά καθαρή ενέργεια από το περιβάλλον. Επίσης τα περισσότερα προϊόντα που βρίσκονται στην αγορά προέρχονται από εταιρίες με μεγάλη εμπειρία στο χώρο, κάτι που εγγυάται την αξιοπιστία τους.
- **Ευκολία συνδυασμών:** οι αντλίες θερμότητας μπορούν να εγκατασταθούν σε νέα ή παλιά κτίρια και μπορούν να συνδεθούν με υπάρχοντα θερμαντικά σώματα (καλοριφέρ), το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, καθώς και με σώματα fan coils για θέρμανση και ψύξη. Επίσης μπορούν να συνδυαστούν και με το υφιστάμενο λεβητοστάσιο ή με άλλες ανανεώσιμες πηγές, όπως είναι για παράδειγμα τα ηλιακά συστήματα για υποστήριξη της θέρμανσης όπως θα δούμε παρακάτω [12].

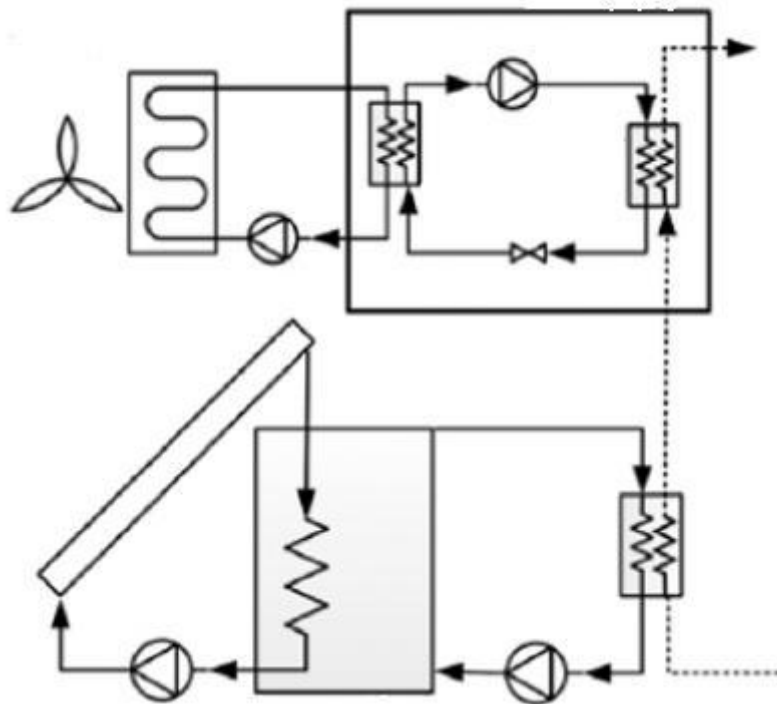
1.11 Ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας

Όπως αναφέρθηκε, στην περίπτωση της θέρμανσης, η αντλία θερμότητας μπορεί να ενταχθεί σε ένα δίκτυο συνδυαζόμενο με ηλιακούς συλλέκτες. Οι συλλέκτες αυτοί είτε θα είναι για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και διοχέτευση της στην αντλία αέρα – αέρα, είτε θα είναι για θέρμανση νερού και υποβοήθηση της αντλίας όπως φαίνεται στην εικόνα 1.12. Στην περίπτωση αυτή το ζεσταμένο

νερό αποθηκεύεται σε ένα δοχείο αδρανείας και αποτελεί την πηγή ενέργειας της αντλίας θερμότητας νερού - αέρα της εγκατάστασης.



Εικόνα 1.12α: Υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας νερού – αέρα [13]



Εικόνα 1.12β: Υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας νερού – αέρα μαζί με την εξωτερική μονάδα της αντλίας θερμότητας [13]

2 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΕΚΜΕΤΑΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ

2.1 Εισαγωγή

Με τις ανησυχίες για το περιβάλλον να αυξάνονται, την εξάντληση των συμβατικών καυσίμων να είναι ορατή και την ανάγκη για περισσότερη ενέργεια, δίνεται όλο και μεγαλύτερη προσοχή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Γι' αυτό το λόγο τα Ευρωπαϊκά κράτη αλλά και ολόκληρη η παγκόσμια κοινότητα δημιουργούν νομοθετικά πλαίσια και οικονομικά κίνητρα για την περαιτέρω διεξόδυση τους. Μία από τις ενέργειες αυτές είναι η ηλιακή ενέργεια. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι δυνατότητες της ενέργειας αυτής και οι τρόποι εκμετάλλευσης της με μεγαλύτερη αναφορά στις τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική.

2.2 Ηλιακή ακτινοβολία – χρήσιμες έννοιες και σχέσεις

Ηλιακή σταθερά G_{sc} : η μέση απόσταση γης-ηλίου είναι $1,495 \times 10^{11} \text{m}$ και μεταβάλλεται κατά 1,7%. Ηλιακή σταθερά είναι η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που δέχεται εκτός ατμόσφαιρας από τον ήλιο η μονάδα επιφανείας κάθετης στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, όταν η απόσταση γης-ηλίου λαμβάνει τη μέση τιμή της. Η τιμή αυτή είναι $G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$.

Γωνία ζενίθ, θ_z : είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ηλίου.

Αζιμούθιο επιφάνειας, γ : είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση.

Αζιμούθιο ηλίου, γ_s : είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης.

Κλίση επιπέδου, β : είναι η γωνία που σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο.

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 $0,25^\circ/\text{min}$.

Ηλιακή απόκλιση, δ : είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Ισχύει $-23,45 < \delta < 23,45$ με θετικές τιμές προς τον βορρά. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360(284+n)}{365} \right] \quad (2.1)$$

Όπου n είναι η ημέρα του έτους.

Άμεσος ακτινοβολία: είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη κατευθείαν από τον ήλιο χωρίς να μεσολαβεί διασκορπισμός μέσα στην ατμόσφαιρα. Η στιγμιαία τιμή της άμεσου ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται με G_b και του κεκλιμένου G_{bT} .

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

Ολική ακτινοβολία: είναι το άθροισμα της άμεσου και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας από παρακείμενες επιφάνειες. Με G συμβολίζεται η ολική ακτινοβολία του οριζοντίου επιπέδου ενώ G_T του κεκλιμένου.

Γωνία πρόσπτωσης, θ : της άμεσου ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια είναι η γωνία μεταξύ των προσπίπτουσών ηλιακών ακτινών και της καθέτου στην επιφάνεια. Για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο στραμμένες προς το νότο ισχύει:

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cos \omega \quad (2.2)$$

Επίσης ορίζεται ο λόγος της άμεσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεσο οριζοντίου επιπέδου:

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} \quad (2.3)$$

Για κεκλιμένες επιφάνειες στο βόρειο ημισφαίριο και στραμμένες προς το νότο ($\gamma=0^\circ$), όταν είναι γνωστή η άμεσος ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας G_b και θέλουμε να υπολογίσουμε την άμεσο ακτινοβολία κεκλιμένης επιφάνειας G_{bT} ορίζεται η σχέση:

$$R_b = \frac{\sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \omega}{\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega} \quad (2.4)$$

Όσον αφορά την επίδραση του προσανατολισμού και κλίσης της επιφάνειας, ως προς την μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ισχύουν πρακτικά οι παρακάτω κανόνες:

α) Για μέγιστη ετήσια ενέργεια απαιτείται κλίση συλλέκτη ίση με το γεωγραφικό πλάτος, $\beta = \phi$.

β) Για μέγιστη θερινή ενέργεια απαιτείται κλίση συλλέκτη κατά 15° μικρότερη του γεωγραφικού πλάτους, $\beta = \phi - 15^\circ$.

γ) Για μέγιστη χειμερινή ενέργεια απαιτείται κλίση συλλέκτη κατά 15° μεγαλύτερη του γεωγραφικού πλάτους, $\beta = \phi + 15^\circ$.

δ) Αποκλίσεις από τις παραπάνω τιμές προκαλούν μικρές μειώσεις ενέργειας, π.χ. απόκλιση του β κατά 15° μειώνει την ενέργεια μόνο κατά 5%.

ε) Ο βέλτιστος προσανατολισμός συλλέκτη είναι ο νότιος για το βόρειο ημισφαίριο και ο βόρειος για το νότιο ημισφαίριο, δηλαδή ο συλλέκτης πρέπει να είναι στραμμένος προς τον ισημερινό. Αποκλίσεις μέχρι 20° προκαλούν μικρές μειώσεις της προσπίπτουσας ενέργειας. [14]

2.3 Ηλιακή ενέργεια

Ηλιακή ενέργεια καλείται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον ήλιο, τέτοιες είναι το φως, η θερμότητα και διάφορες ακτινοβολίες. Χαρακτηρίζεται από πολλά πλεονεκτήματα όπως συμβαίνει βέβαια με όλες τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με τα πιο σημαντικά να είναι:

- Το μηδενικό κόστος πρώτης ύλης (ήλιος)
- Ελάχιστο κόστος συντήρησης
- Είναι ενέργεια φιλική προς το περιβάλλον
- Απεξάρτηση από τα συμβατικά καύσιμα και την κυμαινόμενη τιμή τους
- Τόνωση της τοπικής οικονομίας με την εγκατάσταση των συστημάτων
- Δυνατότητα αυτοπαραγωγής, αποφόρτισης των υποδομών και αποφυγής των απωλειών από μεγάλα δίκτυα μεταφοράς

Όμως πέρα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της, έχει και κάποια χαρακτηριστικά που καθιστούν την αξιοποίηση της δυσχερή.

- Επειδή ακριβώς οι μονάδες είναι διεσπαρμένες δεν υπάρχει η δυνατότητα να συγκεντρωθούν και να αποθηκευτούν σε μεγάλες ποσότητες ισχύος
- Η πυκνότητα ενέργειας και ισχύος που περιέχει είναι γενικά περιορισμένη και γι' αυτό για μεγάλες παραγωγές απαιτεί και μεγάλες εγκαταστάσεις
- Ο συντελεστής εκμετάλλευσής της είναι μικρός επειδή η διαθεσιμότητα της είναι περιορισμένη και με διακυμάνσεις
- Το κόστος επένδυσης είναι ακόμα σε υψηλά επίπεδα σε σχέση με αυτό των συμβατικών μορφών

Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία με δύο τρόπους:

- Τα θερμικά ηλιακά συστήματα, στα οποία χρησιμοποιούνται κατάλληλοι συλλέκτες για την δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας και την αποθήκευση της με τη μορφή θερμότητας σε κάποιο ρευστό
- Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, που μετατρέπεται η ηλιακή ενέργεια απ' ευθείας σε ηλεκτρική μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου

Κάθε όμως σύστημα μετατροπής και αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας περιλαμβάνει και κάποια υποσυστήματα:

- Το σύστημα συλλογής και μετατροπής
- Ένα σύστημα αποθήκευσης, καθώς δεν έχουμε τη συνεχόμενη παροχή ηλιακής ενέργειας, έτσι πρέπει να αποθηκεύουμε αυτό που συλλέγεται για να χρησιμοποιηθεί λίγο αργότερα
- Ένα σύστημα ελέγχου του όλου συστήματος και της καλής λειτουργίας
- Ένα σύστημα μεταφοράς και χρήσης ενέργειας

2.4 Θερμικά ηλιακά συστήματα

Εδώ αναφέρονται ουσιαστικά οι τύποι των ηλιακών συλλεκτών, που όπως σημειώθηκε η ιδιορρυθμία τους έγκειται πως αποτελούν μιας μορφής εναλλάκτη θερμότητας, που απορροφά ηλιακή ακτινοβολία από πολύ μακρινή πηγή (ήλιος) και μεταφέρει την ενέργεια στο εργαζόμενο μέσο το οποίο διαπερνά τον συλλέκτη. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς συλλέκτες που η μεταφορά γίνεται από ρευστό σε ρευστό και ο ρόλος της ακτινοβολίας δεν είναι σημαντικός. Υπάρχουν τρία βασικά είδη ηλιακών συλλεκτών:

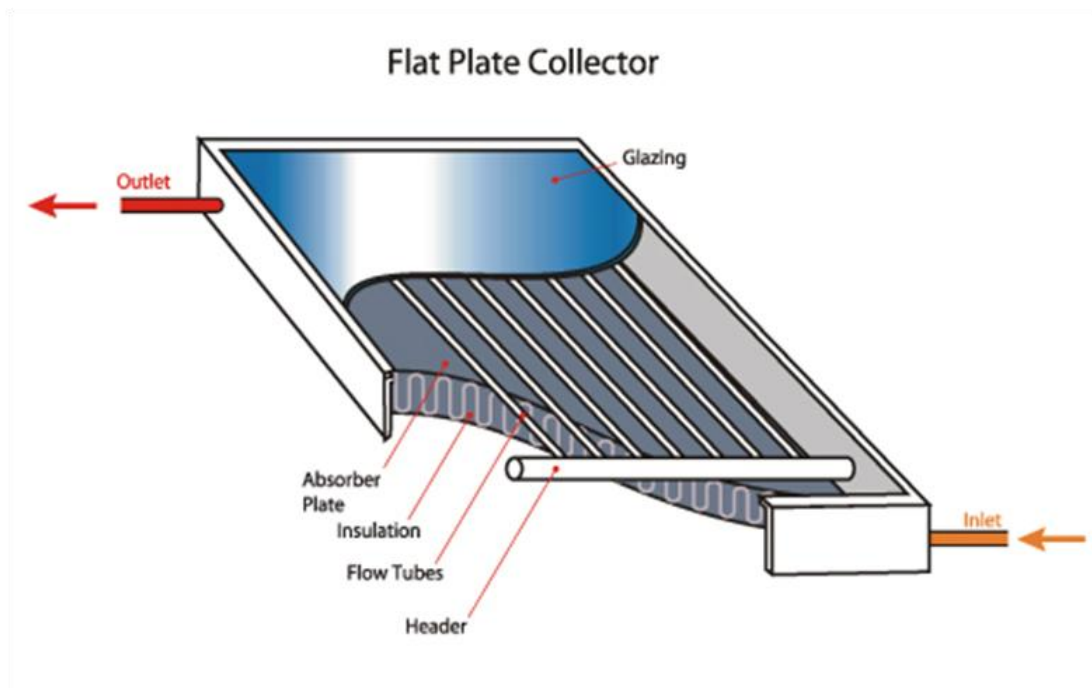
- Επίπεδοι συλλέκτες
- Συλλέκτες κενού
- Συγκεντρωτικοί συλλέκτες

2.4.1 Επίπεδοι συλλέκτες (Flat Plate Collectors)

Είναι η επικρατέστερη μορφή συλλέκτη που χρησιμοποιείται στα σπίτια κυρίως για θέρμανση νερού χρήσης, αλλά και άλλες εφαρμογές όπως κλιματισμό και παραγωγή θερμότητας για βιομηχανική χρήση.

Τα κύρια μέρη ενός επίπεδου συλλέκτη όπως φαίνονται και στην εικόνα 2.1 είναι:

- 1) Ο απορροφητήρας ή πλάκα απορρόφησης (absorber), δηλαδή μια μαύρη επίπεδη επιφάνεια που απορροφά την ακτινοβολία. Ο απορροφητήρας είναι εφοδιασμένος με σύστημα μεταφοράς της ενέργειας σε ρευστό, π.χ. σωλήνες (flow tubes) αν πρόκειται για συλλέκτη θέρμανσης υγρού ή αεραγωγούς αν πρόκειται για θερμαντήρα αέρα
- 2) Ένα ή περισσότερα διαφανή καλύμματα (glazing) πάνω από τον απορροφητήρα ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον
- 3) Μόνωση (insulation) της πίσω και των παράπλευρων επιφανειών ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες
- 4) Πλαίσιο που περιβάλλει τον συλλέκτη



Εικόνα 2.1: Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης [15]

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η συμπεριφορά του συλλέκτη περιγράφεται από την παρακάτω σχέση ισολογισμού ενέργειας που εκφράζει τον καταμερισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε ενέργεια, θερμικές απώλειες και οπτικές απώλειες:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_{f,o} - T_{f,i}) = A_c[S - U_L(T_{p,m} - T_a)] \quad (2.5)$$

όπου:

Q_u = Ωφέλιμη αποδιδόμενη ισχύς (W)

A_c = Επιφάνεια του συλλέκτη (m^2)

S = Απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και των οπτικών απωλειών (W/m^2)

U_L = Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, που εκφράζει τις θερμικές απώλειες από τον συλλέκτη στο περιβάλλον μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

$T_{p,m}$ = Μέση θερμοκρασία του απορροφητήρα ($^\circ C$)

T_a = Θερμοκρασία του περιβάλλοντος ($^\circ C$)

$T_{f,o}$ = Θερμοκρασία εξόδου του ρευστού ($^\circ C$)

$T_{f,i}$ = Θερμοκρασία εισόδου του ρευστού ($^\circ C$)

Επίσης: $U_L = U_t + U_b + U_e$ (2.6)

όπου:

U_t = Συντελεστής θερμικών απωλειών κορυφής

U_b = Συντελεστής θερμικών απωλειών πυθμένος

U_e = Συντελεστής πλευρικών θερμικών απωλειών

Όμως πολλές φορές παρουσιάζει δυσκολίες η μέτρηση της $T_{p,m}$ ανάλογα τον συλλέκτη και τις συνθήκες γι' αυτό το λόγο αντικαθίσταται η θερμοκρασία του απορροφητήρα με την θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στο συλλέκτη μέσω της εξίσωσης:

$$T_{p,m} = T_{f,i} + \frac{Q_u}{A_c U_L F_R} (1 - F_R) \quad (2.7)$$

F_R = παράγοντας θερμικής απολαβής του συλλέκτη

Οπότε με αντικατάσταση προκύπτει η σχέση:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_{f,i} - T_a)] \quad (2.8)$$

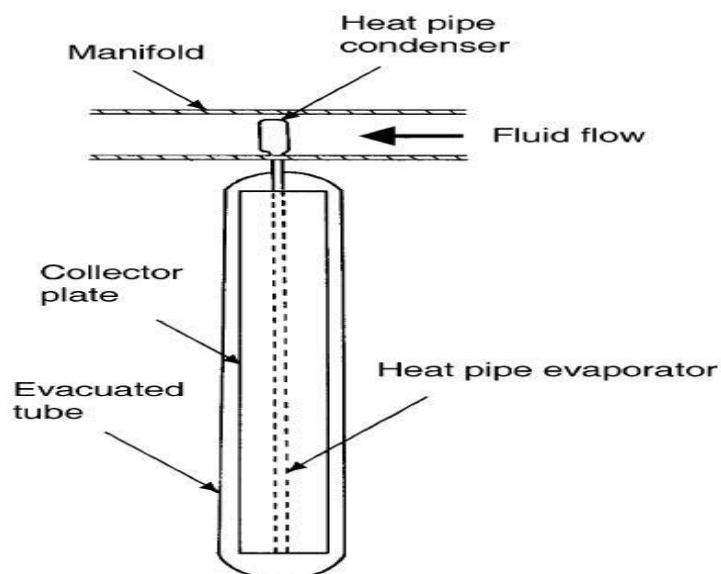
Όπου $S = (\tau\alpha)G_T$, με $(\tau\alpha)$: το μέσο και συγχρόνως το προσαυξημένο γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας

Σαν στιγμιαίος βαθμός απόδοσης του συλλέκτη (η_i), ορίζεται ο λόγος της αποδιδόμενης ισχύος (Q_u), ως προς την αντίστοιχη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ($A_c G_T$), οπότε προκύπτει:

$$n_i = \frac{Q_u}{A_c G_T} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{T_i - T_a}{G_T} \quad (2.9) \quad [14]$$

2.4.2 Συλλέκτες κενού (Evacuated Tube Collectors)

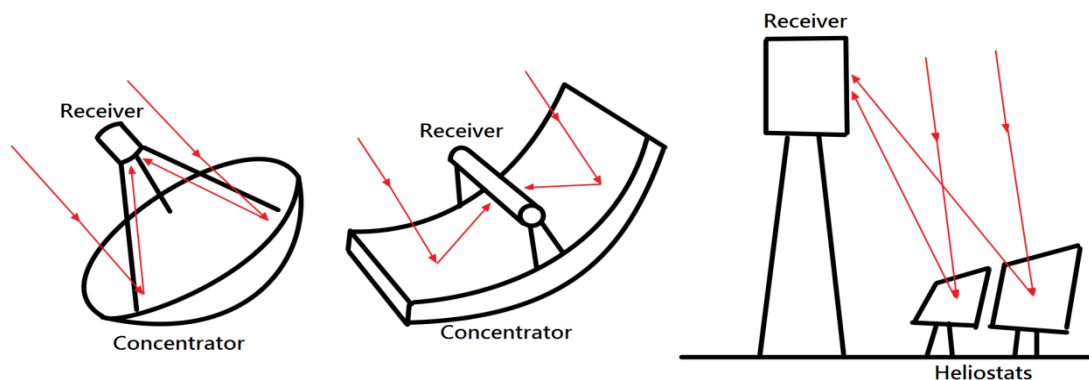
Όπως προαναφέραμε οι συμβατικοί επίπεδοι συλλέκτες έχουν αναπτυχθεί πολύ σε περιοχές με ζεστό κλίμα. Τα οφέλη τους όμως μειώνονται σημαντικά με το κρύο και τη συννεφιά. Επιπλέον, η επιρροή των καιρικών συνθηκών όπως η υγρασία έχουν ως συνέπεια την αλλοίωση των υλικών κατασκευής με αποτέλεσμα την πτώση της απόδοσης. Οι συλλέκτες κενού λειτουργούν αντίθετα από τους υπόλοιπους συλλέκτες της αγοράς. Αποτελούνται από διπλούς γυάλινους σωλήνες που μεταξύ τους υπάρχει κενό αέρος. Η εσωτερική είναι βαμμένη με θερμοαπορροφητικό υλικό και η εξωτερική με γυαλί μεγάλης σκληρότητας και αντοχής. Την θερμότητα που συλλέγει την μεταφέρει σε ένα χάλκινο αυλό (heat pipe), που περιέχει ένα ανόργανο μη τοξικό πτητικό ρευστό. Λόγω της θερμότητας που συλλέγει ο σωλήνας κενού το ρευστό μετατρέπεται σε υπέρθερμο ατμό, ανεβαίνει στην πάνω πλευρά του αυλού που είναι τοποθετημένος μέσα στον εναλλάκτη θερμότητας και ζεσταίνει το νερό χρήσης. Το ρευστό μεταφέροντας την θερμότητα στο νερό συμπυκνώνεται και κατεβαίνει στην κάτω πλευρά του αυλού όπου επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Για τους συλλέκτες αυτούς αποδεικνύεται, πως ο συνδυασμός επιλεκτικής επιφάνειας και αποτελεσματικής μεταφοράς προσδίδει καλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες. Το κενό μειώνει τις απώλειες μεταφοράς και αγωγιμότητας, οπότε μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες απ' τους επίπεδους. Επίσης, όπως οι επίπεδοι συλλέκτες έτσι και αυτοί απορροφούν τόσο άμεση όσο και διάχυτη ακτινοβολία όμως ο βαθμός απόδοσης λόγω του κυλινδρικού σχήματος είναι σαφώς υψηλότερος σε χαμηλές γωνίες πρόσπτωσης. Αυτό συγκριτικά τους δίνει ένα πλεονέκτημα κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Εικόνα 2.2: Συλλέκτης κενού [16]

2.4.3 Συγκεντρωτικοί συλλέκτες (Concentrating Collectors)

Όταν είναι επιθυμητή η απόδοση της ενέργειας σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές που επιτυγχάνονται με τους συνήθεις επίπεδους συλλέκτες, κυρίως για ηλεκτροπαραγωγή, μπορεί να γίνει χρήση των συγκεντρωτικών συλλεκτών. Σ' αυτούς, οι υψηλές θερμοκρασίες αναπτύσσονται με συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μικρή επιφάνεια απορρόφησης, μειώνοντας έτσι και τις θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Η συγκέντρωση επιτυγχάνεται με παρεμβολή μιας οπτικής ανακλαστικής ή διαθλαστικής συσκευής μεταξύ της πηγής της ακτινοβολίας (ήλιος) και της επιφάνειας απορρόφησης. Τα κύρια μέρη του συγκεντρωτικού συλλέκτη είναι ο συγκεντρωτής (concentrator) και ο δέκτης (receiver), ο οποίος περιλαμβάνει τον απορροφητήρα με το σύστημα μετατροπής της ακτινοβολίας σε άλλη μορφή ενέργειας και τα σχετικά καλύμματα καθώς και τη μόνωση.



Εικόνα 2.3: Βασικοί τύποι συγκεντρωτικών συλλεκτών, σημειακής εστίασης (αριστερά), γραμμικής εστίασης (μέση), με πύργο εστίασης (δεξιά) [17]

2.5 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική με σκοπό είτε την πώληση στον δίκτυο είτε την αυτοκατανάλωση. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ φωτοβολταϊκών στοιχείων ή κυψέλες μαζί με τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η παραγωγή της ηλιακής ενέργειας επιτυγχάνεται με τη χρήση ημιαγωγικών υλικών τα οποία έχουν την ιδιότητα να απορροφούν φωτόνια του ηλιακού φωτός και να απελευθερώνουν ηλεκτρόνια (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο). Η ροή των ελεύθερων αυτών ηλεκτρονίων συνεπάγεται τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος – ηλεκτρικής τάσης. Δύο τύποι πυριτίου χρησιμοποιούνται για την δημιουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων, το άμορφο και το κρυσταλλικό. Το κρυσταλλικό πυρίτιο διακρίνεται σε μονοκρυσταλλικό και πολυκρυσταλλικό. Το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο παρουσιάζουν τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα και κατά τη μελέτη του συστήματος γίνεται αξιολόγηση των ειδικών συνθηκών εφαρμογής (κατεύθυνση και διάρκεια ηλιοφάνειας, τυχόν σκιάσεις κλπ) ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη τεχνολογία. Μπορούν να τοποθετηθούν στις οροφές κτιρίων, σε οποιοδήποτε ανοιχτό ιδιόκτητο χώρο (φωτοβολταϊκά πάρκα), σε ανοιχτούς χώρους παρκινγκ ως σκίαστρα.

Στο εμπόριο διατίθενται φωτοβολταϊκά πάνελ σε διάφορες τιμές ονομαστικής ισχύος, ανάλογα με την τεχνολογία και τον αριθμό των φωτοβολταϊκών κυψελών που τα αποτελούν. Έτσι, για παράδειγμα ένα πάνελ 36 κυψελών μπορεί να έχει ονομαστική ισχύ 70-80W, ενώ μεγαλύτερα πάνελ μπορεί να φτάσουν και τα 250W. Εκτός από το πυρίτιο χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά για την κατασκευή των πάνελ όπως κάδμιο με τελλούριο (Cd-Te) και ο ινδοδισεληνιούχος χαλκός. Σε αυτές τις κατασκευές η μορφή του στοιχείου διαφέρει σημαντικά από αυτή του κρυσταλλικού πυριτίου και έχει συνήθως τη μορφή λωρίδας πλάτους μερικών χιλιοστών και μήκους αρκετών εκατοστών [20].

Πρακτικά ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ισχύος 1KW συνδεδεμένο με το δίκτυο παράγει 1300-1700 kWh ετησίως με ένα βαθμό απόδοσης 5-15 %, ανάλογα με την τεχνολογία του και τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής. Κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:

- Κατασκευή στήριξης
- Σύστημα μετατροπής ισχύος
- Ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου και προστασίας
- Μπαταρίες για περιπτώσεις αυτοκατανάλωσης



Εικόνα 2.4: Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σε στέγη [18]

2.5.1 Κατασκευή στήριξης

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια προκειμένου να τοποθετηθούν εφοδιάζονται με ειδικές κατασκευές στήριξης που πρέπει να πληρούν ορισμένα κριτήρια. Όπως αντοχή στο βάρος των πλαισίων και τους τοπικούς ανέμους, να μην προκαλούν σκίαση, να επιτρέπουν την προσέγγιση σε αυτά, αλλά ταυτόχρονα να διασφαλίζουν την ασφάλειά τους. Σε εφαρμογές όπου τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ενσωματώνονται σε κτίρια, τότε απαιτείται καλή συναρμογή με τα δομικά στοιχεία.



Εικόνα 2.5: Βάσεις στήριξης φωτοβολταϊκών πάνελ ανοιχτού χώρου [19]

2.5.2 Σύστημα μετατροπής ισχύος

Τα φωτοβολταϊκά παράγουν συνεχές ρεύμα ενώ τα φορτία καταναλώνουν εναλλασσόμενο ρεύμα. Για τη μετατροπή της ισχύος χρησιμοποιούνται μετατροπείς συνεχούς σε εναλλασσόμενο (DC/AC). Σκοπός των συστημάτων μετατροπής ισχύος είναι η κατάλληλη ρύθμιση των χαρακτηριστικών του παραγόμενου ρεύματος (f, v), ώστε να καταστεί δυνατή η τροφοδοσία των διάφορων καταναλώσεων.

Ο αντιστροφέας (inverter) είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη. Είναι δυνατόν να υπάρχει ως αυτόνομη ηλεκτρονική συσκευή ή ως βαθμίδα άλλης ηλεκτρονικής συσκευής. Ως αυτόνομη συσκευή χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις συστημάτων όπου χρειάζεται να μετατρέψουμε 12V ή 14V, σε εναλλασσόμενη 220 V, ενώ ως βαθμίδα χρησιμοποιείται στα UPS (συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος). Η κυριότερη διάκριση των αντιστροφέων όσον αφορά τη χρήση τους σε εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι σε αντιστροφείς διασυνδεδεμένων και αυτόνομων συστημάτων.

Τα σημαντικότερα κριτήρια για την επιλογή του αντιστροφέα αποτελούν η αξιοπιστία, η ενεργειακή απόδοση, οι αρμονικές παραμορφώσεις, το κόστος και η συμβατότητα με τις τεχνικές απαιτήσεις της ΔΕΗ. Σε ένα τυπικό σύστημα ο αντιστροφέας τοποθετείται σε απόσταση από τα φωτοβολταϊκά και σε στεγασμένο χώρο. Ωστόσο έχουν αναπτυχθεί πλαίσια με ενσωματωμένους αντιστροφείς με συνέπεια την αντικατάσταση των καλωδιώσεων, χαμηλότερο κόστος και μεγαλύτερη ασφάλεια.

2.5.3 Ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου και προστασίας

Το φωτοβολταϊκό σύστημα συμπληρώνουν οι ηλεκτρονικές διατάξεις ελέγχου, οι καλωδιώσεις (συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος) και σχετικό ηλεκτρολογικό υλικό, οι διατάξεις ασφαλείας, ο μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας και σύστημα παρακολούθησης της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος [20].

2.5.4 Μπαταρίες

Σε περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων είναι απαραίτητη η χρήση μπαταριών για την αποθήκευση ενέργειας και χρησιμοποίησης της λίγο αργότερα. Η επιλογή της σωστής μπαταρίας που να καλύπτει τις ανάγκες μας σε ρεύμα δεν είναι εύκολη υπόθεση. Για παράδειγμα, διαφορετικού τύπου μπαταρία πρέπει να

εγκαταστήσουμε σε αυτόνομο για μόνιμη κατοικία και διαφορετικού τύπου για εξοχικό σπίτι ή για φωτισμό. Η τιμή των μπαταριών κυμαίνεται ανάλογα με τον τύπο και τα χαρακτηριστικά τους. Επιλέγοντας λάθος μπαταρίες το αποτέλεσμα θα είναι να σπαταλήσουμε ενέργεια και παραπάνω χρήματα.

Στα αυτόνομα δίκτυα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης, οι οποίες διακρίνονται σε:

- Μπαταρίες ανοιχτού τύπου με υγρά. Σε αυτές ξεβιδώνοντας τα πώματα μπορούμε εύκολα να παρακολουθούμε την περιεκτικότητα σε ηλεκτρολύτη και να μετράμε την πυκνότητα του με πυκνόμετρο. Ο ρυθμιστής φόρτισης αναζωογονεί (equalization) την μπαταρία μια φορά τον μήνα παρέχοντας μεγάλη ποσότητα ρεύματος για μερικές ώρες. Με το equalization μειώνουμε τις πιθανότητες δημιουργίας κρυστάλλων στην επιφάνεια της πλάκας μολύβδου και της θείωσης, παράγοντες που μειώνουν την διάρκεια ζωής των μπαταριών. Κατά την φόρτιση και αποφόρτιση εκλύουν αέρια γι' αυτό τοποθετούνται σε χώρο που αερίζεται και η συντήρησή τους γίνεται τουλάχιστον ανά εξάμηνο καθώς τα υγρά των μπαταριών πρέπει να καλύπτουν τα στοιχεία (πλάκες) μολύβδου.
- Μπαταρίες κλειστού τύπου. Αυτές είναι ιδανικές όταν δεν έχουμε τον χρόνο να τις παρακολουθήσουμε καθώς δεν χρειάζονται συντήρηση. Το equalization δεν είναι δυνατό γιατί οι μπαταρίες είναι κλειστού τύπου και υπάρχει κίνδυνος ατυχήματος. Επίσης τα αέρια ανακυκλώνονται μέσα στην μπαταρία σε αντίθεση με τις μπαταρίες ανοιχτού τύπου.

2.6 Θερμοφωτοβολταϊκά (PV-Thermal)

Μια πιο καινούργια και εναλλακτική εκδοχή από τα κλασικά φωτοβολταϊκά αποτελούν τα θερμοφωτοβολταϊκά ή υβριδικά φωτοβολταϊκά (PVT).

2.6.1 Ιστορική αναδρομή

Οι ηλιακοί συλλέκτες ήταν γνωστοί και εμπορικά διαθέσιμοι από τον 19^ο αιώνα. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έγιναν ευρέως εμπορικά διαθέσιμα κατά τη δεκαετία του 1950, αλλά χρησιμοποιούνταν μόνο από την διαστημική βιομηχανία. Ωστόσο μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973, η έρευνα για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αυξήθηκαν ραγδαία όπου ενθαρρυνόταν έντονα από τις κυβερνήσεις. Αυτή ήταν η αρχή για να ξεκινήσει η έρευνα για τα θερμοφωτοβολταϊκά.

Η πρώτη εργασία έγινε από τον Martin Wolf το 1976 με επίπεδους συλλέκτες. Το συμπέρασμα της έρευνας ήταν ότι αυτό το είδος συστήματος είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτό. Η έρευνα για τα ΦΒ/Θ νερού συνεχίστηκε από διάφορες ομάδες και επιστήμονες. Μια από αυτές τις ομάδες ήταν από το MIT με τον καθηγητή Boer, που το 1978 εγκατέστησε 13 τέτοιους συλλέκτες στο σπίτι του. Το ίδιο έτος, στο εργαστήριο Lincoln του MIT κατάφεραν να αποκτήσουν τρεις πρωτότυπους επίπεδους συλλέκτες ΦΒ/Θ κανονικών διαστάσεων. Αυτοί οι τρεις συλλέκτες κατασκευάστηκαν από την ARCO και την Spectrolab.

Παρότι οι περισσότερες έρευνες γίνονταν στην Αμερική, κάποιες ερευνητικές προσπάθειες έγιναν και σε άλλα μέρη, όπως η Ιαπωνία, όπου η Sharp κατασκεύασε δύο πρωτότυπους ΦΒ/Θ συλλέκτες. Στην Γερμανία η Karl μαζί με την AEG – Telefunken ανέπτυξαν ΦΒ από κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) με γυάλινο κάλυμμα. Στις επόμενες μελέτες χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικά και πειραματικά μοντέλα, με λογισμικά προσομοίωσης και επιπλέον επικεντρώθηκαν στις διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση του συλλέκτη [21].

Πιο πρόσφατα, οι Τρυπαναγνωστόπουλος και Καλογήρου μοντελοποίησαν και προσομοίωσαν ένα ΦΒ/Θ σε τρεις διαφορετικές θέσεις Αθήνα, Λευκωσία και Μάντισον. Συμπέραναν ότι ένα μη υβριδικό σύστημα ΦΒ παράγει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια κατά 30% περίπου, αλλά το σύστημα ΦΒ/Θ καλύπτει ανάλογα με την θέση, ένα μεγάλο ποσοστό της εσωτερικής ανάγκης ζεστού νερού ενός σπιτιού. Ο Τρυπαναγνωστόπουλος και οι συνεργάτες του επίσης κατασκεύασαν και δοκίμασαν καλυμμένους και ακάλυπτους συλλέκτες ΦΒ/Θ νερού και αέρα. Χρησιμοποίησαν τους διασκορπισμένους ανακλαστήρες κατασκευασμένοι από επίπεδα φύλλα αλουμινίου και διαπίστωσαν ότι η απόδοση των συλλεκτών ήταν υψηλότερη. Για παράδειγμα σε ένα σύστημα PC-Si ΦΒ/Θ με ένα διάχυτο ανακλαστήρα που έχει μια αναλογία συγκέντρωσης $C=1,35$ μπορεί να οδηγήσει σε μια υψηλότερη ηλεκτρική απόδοση μέχρι και 19,2%. Τα αποτελέσματα για τα διεξαχθέντα πειράματα για τον υπολογισμό της θερμικής και ηλεκτρικής απόδοσης φαίνονται στους πίνακες 2.1 και 2.2.

SYSTEM	EFFICIENCY
(pc-Si) PV (a-Si) PV	$\eta_{el} = 0.1659 - 0.00094 T_{PV}$ $\eta_{el} = 0.0601 - 0.00011 T_{PV}$
(pc-Si) PVT/UNGL	$\eta_{el} = 0.1659 - 0.00094 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.55 - 11.99 (\Delta T/G)$
(pc-Si) PVT/GL	$\eta_{el} = 0.1457 - 0.00094 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.71 - 9.04 (\Delta T/G)$
(a-Si) PVT/UNGL	$\eta_{el} = 0.0601 - 0.00011 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.60 - 12.02 (\Delta T/G)$
(a-Si) PVT/GL	$\eta_{el} = 0.0485 - 0.00011 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.73 - 8.24 (\Delta T/G)$
THERMAL	$\eta_{th} = 0.78 - 7.5 (\Delta T/G)$

Πίνακας 2.1: Ηλεκτρική και θερμική απόδοση των δοκιμασθέντων συσκευών ΦΒ, ΦΒ/Θ και του θερμικού συστήματος [22]

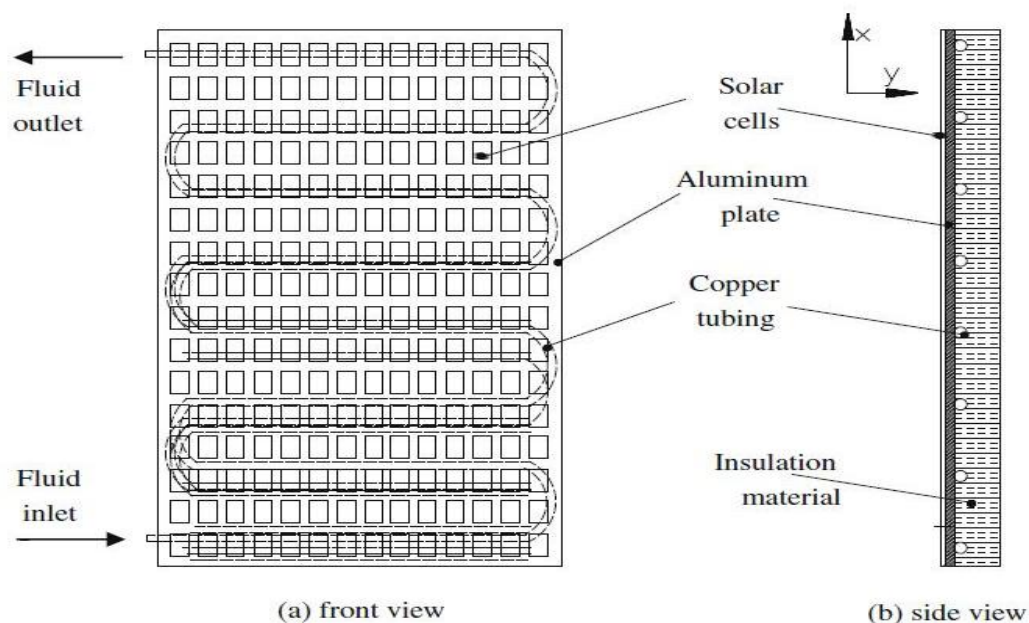
SYSTEM	EFFICIENCY
(pc-Si) PV+REF (a-Si) PV+REF	$\eta_{el} = 0.1773 - 0.00098 T_{PV}$ $\eta_{el} = 0.0698 - 0.00014 T_{PV}$
(pc-Si) PVT/UNGL+REF	$\eta_{el} = 0.1773 - 0.00098 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.61 - 11.74 (\Delta T/G)$
(pc-Si) PVT/GL+REF	$\eta_{el} = 0.1560 - 0.00096 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.78 - 9.67 (\Delta T/G)$
(a-Si) PVT/UNGL+REF	$\eta_{el} = 0.0698 - 0.00014 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.68 - 11.98 (\Delta T/G)$
(a-Si) PVT/GL+REF	$\eta_{el} = 0.0565 - 0.00015 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.82 - 8.41 (\Delta T/G)$
THERMAL+REF	$\eta_{th} = 0.92 - 8.18 (\Delta T/G)$

Πίνακας 2.2: Ηλεκτρική και θερμική απόδοση των δοκιμασθέντων συσκευών ΦΒ, ΦΒ/Θ και θερμικού συστήματος με 20% πρόσθετη ηλιακή ακτινοβολία από διάχυτο ανακλαστήρα [22]

2.6.2 Σχεδιασμός PVT

Η ιδιομορφία των PVT έγκειται στο γεγονός πως όχι μόνο χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρισμού αλλά παράλληλα παράγουν και θερμική ενέργεια. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας εργαζόμενο μέσο αέρα ή συνήθως νερό. Με τον τρόπο αυτό, όχι μόνο αυξάνεται η απόδοση του συστήματος λόγω της χρησιμοποίησης του μέσου για σκοπούς θέρμανσης, αλλά αυξάνεται και η απόδοση του φωτοβολταϊκού που με την απαγωγή θερμότητας μειώνεται η θερμοκρασία του. Η χρήση του νερού ως εργαζόμενο μέσο, είναι αποδοτική όλο το χρόνο κυρίως σε χώρες με ήπιο ή θερμό κλίμα, αντίθετα η κυκλοφορία αέρα

απαιτεί απλούστερη και φθηνότερη διάταξη αλλά η ψύξη του φωτοβολταϊκού είναι λιγότερο αποδοτική. Η θέρμανση του φωτοβολταϊκού οφείλεται στην απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια που δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό και η ψύξη τους θεωρείται αναγκαία για την καλή απόδοσή τους. Ο συνήθης τρόπος ψύξης του φωτοβολταϊκού με νερό είναι η κυκλοφορία του μέσω εναλλάκτη θερμότητας σε επαφή με το πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στη συνέχεια το ζεσταμένο νερό αποθηκεύεται σε κάποιο δοχείο για την εκμετάλλευσή του και αυτό με τη σειρά του τροφοδοτεί πάλι τα θερμοφωτοβολταϊκά και επαναλαμβάνεται ο κύκλος.



Εικόνα 2.6: Διάταξη PVT [23]

Ακόμα η προσθήκη ενός γυάλινου καλύμματος έχει υπολογιστεί πως αυξάνει σημαντικά την θερμική απόδοση σε ένα μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας, αλλά οι πρόσθετες οπτικές απώλειες μειώνουν την ηλεκτρική απόδοση του θερμοφωτοβολταϊκού. Όσον αφορά το βαθμό απόδοσης του, ο Zontag μελέτησε την απόδοση διαφορετικών τύπων θερμοφωτοβολταϊκά και έδειξε πως σε καλής ποιότητας συλλέκτες ο συνολικός βαθμός απόδοσης (θερμικός, ηλεκτρικός) μπορεί να ξεπεράσει το 70% και σε αυτούς με χαμηλότερη ποιότητα δεν πέφτει κάτω από το 60% [24].

Επίσης κατέληξε στην εξής σχέση που δείχνει την θερμοκρασιακή εξάρτηση του φωτοβολταϊκού με τον βαθμό απόδοσής του:

$$n_{el} = n_0 [1 - \beta(T - T_{amb})] \quad (2.10)$$

όπου:

n_{el} = ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης σε κανονικές συνθήκες

n_0 = ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού σε συνθήκες αναφοράς

T = θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου

T_{amb} = θερμοκρασία περιβάλλοντος

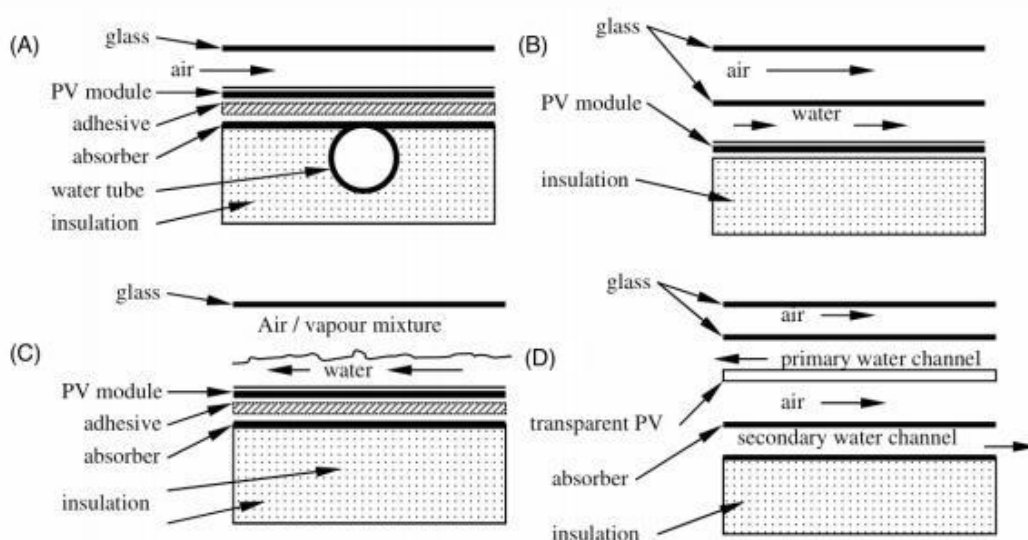
β = βαθμός απόδοσης κελιού (0,0045 τυπική τιμή)

Για τον θερμικό βαθμό απόδοσης του συλλέκτη και την θερμότητα που παράγει οι σχέσεις είναι όμοιες με αυτές των απλών θερμικών ηλιακών συστημάτων που είδαμε νωρίτερα. Προφανώς ο συνολικός βαθμός απόδοσης (n_{tot}) θα είναι:

$$n_{tot} = n_{el} + n_{th} \quad (2.11)$$

Η απόδοση του θερμοφωτοβολταϊκού έχει να κάνει με τον τύπο της μονάδας απαγωγής θερμότητας που χρησιμοποιείται γιατί η απόδοση στη συναλλαγή θερμικής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό καθορίζει την απόδοση μετατροπής του ηλεκτρισμού και της θερμότητας.

Τα θερμοφωτοβολταϊκά συστήματα νερού κατατάσσονται σε κατηγορίες σύμφωνα με τα πρότυπα ροής του νερού. Οι κατηγορίες είναι: οι επίπεδοι συλλέκτες - εικόνα 2.7A (flat plate collectors ή sheet and tube PVT collectors), οι συλλέκτες με κανάλια – εικόνα 2.7B (channel PVT collectors), οι ελεύθερης ροής συλλέκτες - εικόνα 2.7C (free flow PVT collectors) και οι συλλέκτες διπλής απορρόφησης - εικόνα 2.7D (two absorber PVT collectors).



Εικόνα 2.7: Τύποι θερμοφωτοβολταϊκών, A: επίπεδος συλλέκτης, B: συλλέκτης με κανάλια, C: συλλέκτης ελεύθερης ροής, D: συλλέκτης διπλής απορρόφησης [24]

Panel type	Thermal efficiency	Electrical efficiency
PV panel	–	0.097
Sheet and tube PV/T, no cover	0.52	0.097
Sheet and tube PV/T, 1 cover	0.58	0.089
Sheet and tube PV/T, 2 covers	0.58	0.081
PV/T collector with channel above PV	0.65	0.084
PV/T collector with channel below opaque PV	0.60	0.090
PV/T collector with channel below transparent PV	0.63	0.090
Free flow PV/T collector	0.64	0.086
Two-absorber PV/T collector (insulated type)	0.66	0.085
Two-absorber PV/T collector (noninsulated type)	0.65	0.084
Thermal collector	0.83	–

Εικόνα 2.8: Θερμικός και ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης διαφόρων τύπων PVT [24]

Α) Οι **επίπεδοι συλλέκτες** είναι οι πιο διαδεδομένοι και παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Η μόνη σημαντική διαφορά είναι ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ που είναι προσαρτημένα στην κορυφή της απορροφητικής πλάκας.

Β) Οι **συλλέκτες με κανάλια** έχουν περιορισμούς όσον αφορά το υγρό που θα χρησιμοποιηθεί. Το απορροφητικό φάσμα του υγρού θα πρέπει να είναι αρκετά διαφορετικό από το απορροφητικό φάσμα του φωτοβολταϊκού ώστε να επιτρέπει στο φωτοβολταϊκό να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία. Το μειονέκτημα αυτού του τύπου είναι ότι εάν χρησιμοποιηθεί αρκετά πλατύ κανάλι, το γυάλινο κάλυμμα θα πρέπει να είναι μεγάλο και αρκετά παχύ για να αντέξει την πίεση του νερού.

Γ) Στους **συλλέκτες ελεύθερης ροής** η ροή του νερού γίνεται πάνω από τον απορροφητή χωρίς περιορισμό. Σε σύγκριση με τους συλλέκτες με κανάλια δεν υπάρχει το επιπλέον γυάλινο κάλυμμα. Κατά συνέπεια η αντανάκλαση και το κόστος υλικών μειώνεται, ενώ το πρόβλημα αντοχής του επιπλέον γυαλιού εξαλείφεται. Το μειονέκτημα του όμως είναι οι απώλειες λόγω εξάτμισης με αποτέλεσμα θερμικές απώλειες.

Δ) Οι **συλλέκτες διπλής απορρόφησης** χρησιμοποιούν ένα διάφανο φωτοβολταϊκό φύλλο σαν κύριο απορροφητή και μια μαύρη μεταλλική πλάκα σαν δεύτερο απορροφητή. Το σύστημα έχει δύο κανάλια το ένα πάνω στο άλλο. Η εισαγωγή του νερού γίνεται από το πάνω κανάλι και η επιστροφή από το κάτω [21].

3 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ TRNSYS 16

3.1 Εισαγωγή στο TRNSYS

Το πρόγραμμα TRNSYS (Transient System Simulation Program) είναι ένα πολύ διαδεδομένο πρόγραμμα προσομοίωσης μεταβαλλόμενων συστημάτων στο χρόνο, αφού μπορεί να δώσει ασφαλή αποτελέσματα για έναν μεγάλο κύκλο εργασιών όπως:

- Συμβατικά συστήματα με ηλεκτρικό ρεύμα, πετρέλαιο, φυσικό αέριο
- Συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (φωτοβολταϊκά, θερμικά ηλιακά, αιολικά, γεωθερμικά, υδρογόνου)
- Συστήματα κλιματισμού (HVAC – Heating, Ventilating, Air Conditioning)
- Πολυζωνικά κτίρια κ.α.

Παράλληλα χρησιμοποιείται παγκοσμίως από πανεπιστήμια, ερευνητές και μηχανικούς για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των διαφόρων συστημάτων όχι μόνο για τον μεγάλο όγκο εργασιών που παρέχει, αλλά και για μια σειρά από άλλα πλεονεκτήματα που έχει. Το σημαντικότερο είναι πως ο κώδικας που αποτελείται το πρόγραμμα και τα μοντέλα του έχει τη δυνατότητα επεξεργασίας, δηλαδή δίνεται να το διαχειριστεί ο χρήστης σύμφωνα με τις ανάγκες του ή ακόμα και να δημιουργήσει νέα μοντέλα μέσω κοινών γλωσσών προγραμματισμού (C, C++, Pascal, Fortran). Με το δεδομένο αυτό είναι δυνατή η ανταλλαγή μοντέλων μεταξύ των χρηστών και η συνεχής υποστήριξη από την άποψη του λογισμικού με καινούριες εκδόσεις. Να αναφέρουμε εδώ πως το πακέτο του TRNSYS αποτελείται από το Simulation Studio, το TRNBuild, το TRNEXE και το TRNEdit και η χρησιμότητά του παρουσιάζεται παρακάτω.

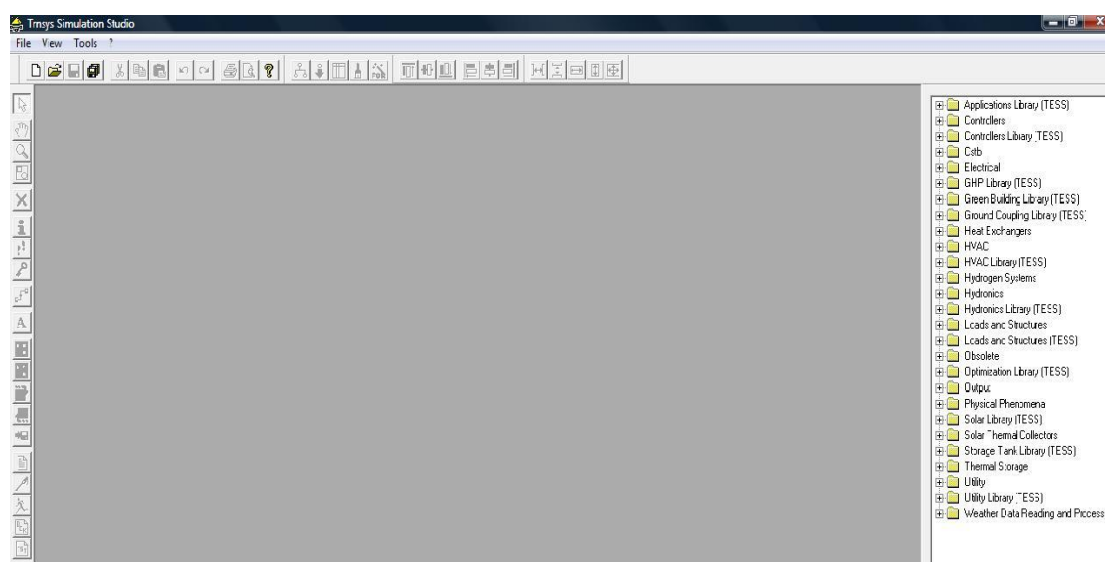
3.2 Simulation Studio - TRNEXE

Το στούντιο προσομοίωσης είναι το κεντρικό περιβάλλον εργασίας μόλις ανοίξουμε το TRNSYS. Δημιουργεί το αρχείο με τα δεδομένα του προγράμματος προσομοίωσης του χρήστη (*.trf). Επίσης δημιουργεί αρχείο εισόδου, το οποίο είναι ένα αρχείο κειμένου που περιέχει όλες τις πληροφορίες της προσομοίωσης. Το στούντιο προσομοίωσης περιλαμβάνει επίσης έναν διαχειριστή των εξόδων του προγράμματος, με τον οποίο ο χρήστης μπορεί να καθορίσει ποιες μεταβλητές θα συμπεριληφθούν στις εξόδους, ποιες θα εκτυπωθούν και ποιες θα χρησιμοποιηθούν στα διαγράμματα. Τέλος, περιλαμβάνει έναν καταγραφέα-

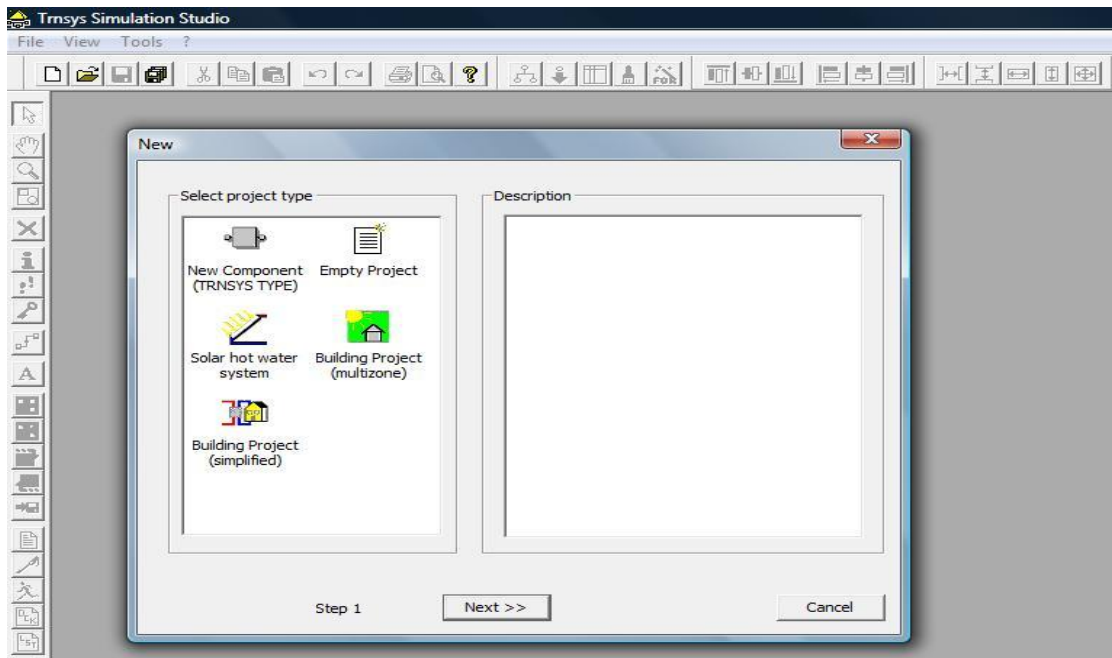
διαχειριστή σφαλμάτων , ο οποίος επιτρέπει την λεπτομερή μελέτη των γεγονότων κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Πολλές επιπρόσθετες εργασίες μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσα από το στούντιο προσομοίωσης, όπως η δημιουργία νέων υπολογιστικών μοντέλων προς εισαγωγή TRNSYS χρησιμοποιώντας την επιλογή Fortran wizard, καθώς επίσης η ανάγνωση των εξαγόμενων αρχείων, η επεξεργασία της περιγραφής ενός μοντέλου τροποποιώντας της παραμέτρους της εισόδου και της εξόδου του μοντέλου.

3.2.1 Βασικές επιλογές του Simulation Studio

Ανοίγοντας το TRNSYS, αφού δημιουργήσουμε μια νέα εργασία με το αντίστοιχο εικονίδιο πάνω αριστερά, έχουμε να επιλέξουμε ανάμεσα στις εξής βασικές επιλογές:

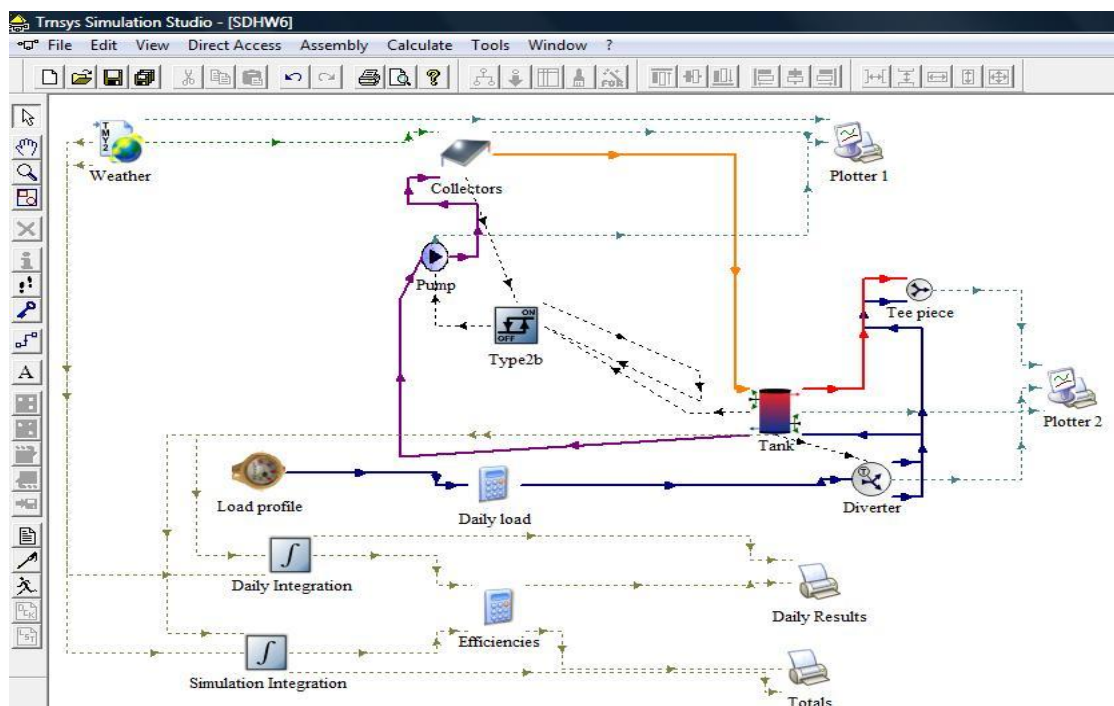


Εικόνα 3.1: Νέα εργασία στο Simulation Studio



Εικόνα 3.2: Βασικές επιλογές του Simulation Studio

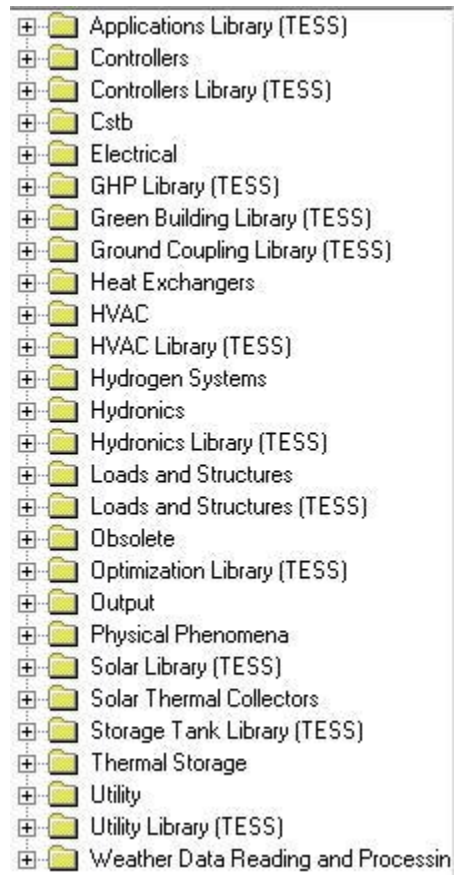
- Επιλογή δημιουργίας νέου στοιχείου (Component) με χρήση γλώσσας προγραμματισμού
- Επιλογή δημιουργίας πολυζωνικού κτιρίου όπου αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο
- Επιλογή δημιουργίας ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού



Εικόνα 3.3: Ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού

- Επιλογή ενός κενού θέματος όπου θα το επεξεργαστούμε εμείς στη συνέχεια ανάλογα με την εργασία που έχουμε

Αφού επιλέξουμε τη δημιουργία ενός κενού θέματος επανερχόμαστε στο βασικό περιβάλλον εργασίας. Στην δεξιά πλευρά υπάρχουν συγκεντρωμένα όλα τα στοιχεία που είναι διαθέσιμα σε δενδροειδή μορφή.



Τα πιο βασικά είναι:

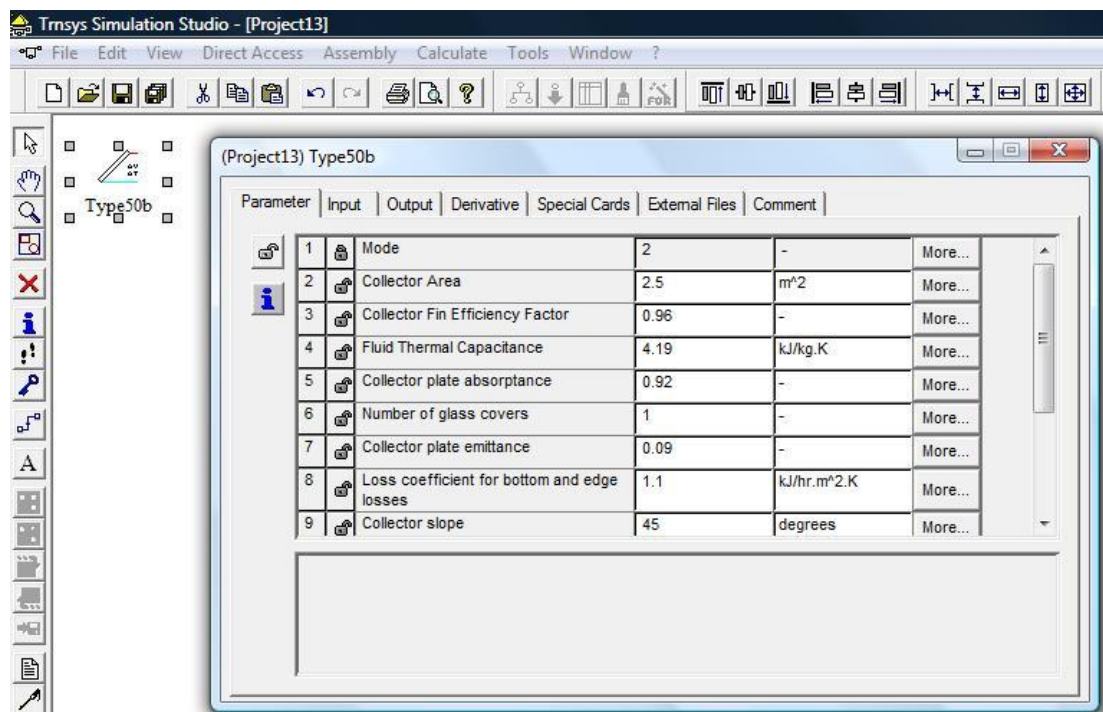
- Controllers: ελεγκτές γενικής χρήσης και θερμοστάτες
- Electrical: φωτοβολταϊκά, θερμοφωτοβολταϊκά, μπαταρίες, inverter
- Heat exchangers: εναλλάκτες θερμότητας, μοντέλα ανάκτησης θερμότητας
- HVAC: μοντέλα θέρμανσης, ψύξης, αερισμού, ψύκτες απορρόφησης
- Hydronics: ανεμιστήρες, αντλίες
- Output: εκτυπωτές, άμεσα διαγράμματα (online plotters)
- Physical Phenomena: ψυχομετρικοί χάρτες, υπολογιστής ηλιακής ακτινοβολίας
- Solar Thermal Collectors: επίπεδοι, συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες
- Thermal Storage: δεξαμενές με/χωρίς διαστρωμάτωση, εσωτερικούς εναλλάκτες

Εικόνα 3.4: Βιβλιοθήκη μοντέλων

- Utility: μετατροπείς μονάδων, χρονικά προγράμματα, data readers
- Weather Data Reading and Processing: μετεωρολογικά δεδομένα, επεξεργαστές ηλιακής ακτινοβολίας

3.2.2 Σύνδεση των στοιχείων

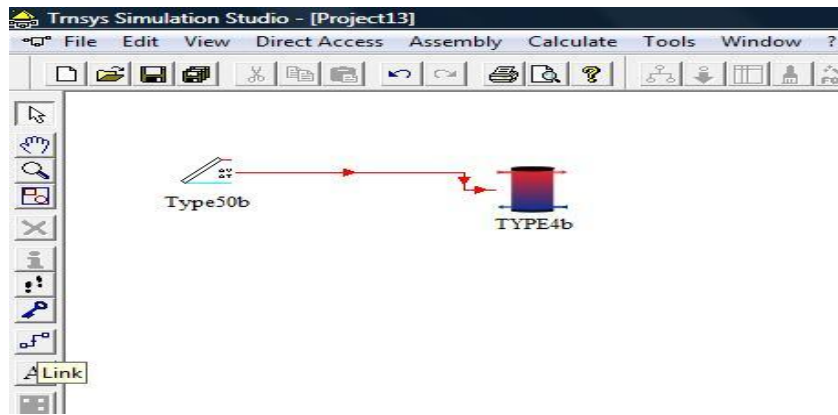
Αφού επιλέξουμε το component που μας ταιριάζει από την βιβλιοθήκη θα πάμε να επεξεργαστούμε τις παραμέτρους του.



Εικόνα 3.5: Επεξεργασία παραμέτρων στοιχείου

Αριστερά βρίσκεται το όνομα της παραμέτρου, στη συνέχεια η τιμή της και τέλος οι μονάδες μέτρησης που έχει. Το σημαντικό είναι πως οι παράμετροι που εισάγουμε δεν αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Αντιθέτως, τα Inputs αλλάζουν με τον χρόνο και παίρνουν τις τιμές που δίνει το στοιχείο που είναι συνδεδεμένο με αυτό. Όμοια τα Outputs αλλάζουν με τον χρόνο και είναι οι τιμές που με την σειρά του δίνει το στοιχείο σε αυτό που συνδέεται.

Αφού επεξεργαστούμε τις παραμέτρους των στοιχείων είμαστε έτοιμοι να τα συνδέσουμε με το αντίστοιχο εικονίδιο που βρίσκεται στην αριστερή γραμμή εργαλείων. Κάνουμε κλικ από το στοιχείο που θέλουμε και σέρνουμε το ποντίκι ως το στοιχείο που συνδέεται.



Εικόνα 3.6: Σύνδεση στοιχείων

Τώρα κάνοντας δεξί κλικ πάνω στην γραμμή έχουμε τις εξής επιλογές:

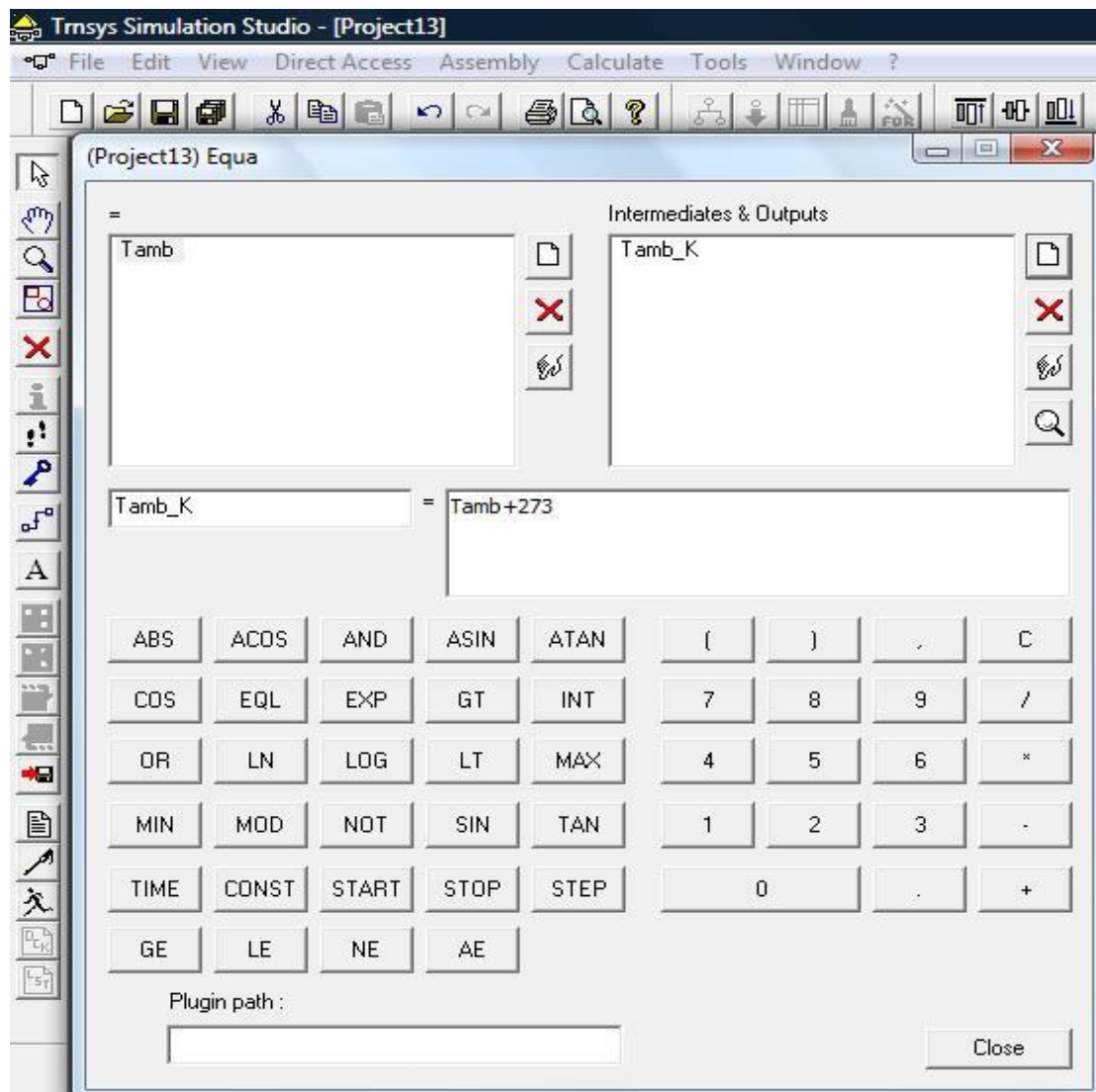
- Delete: για να διαγράψουμε την σύνδεση που κάναμε
- Connections: για να συνδέσουμε τα Outputs του πρώτου στοιχείου με τα Inputs του δεύτερου που έχουν συναλλαγή.
- Properties: για να επεξεργαστούμε τη γραμμή σύνδεσης (χρώμα, διακεκομμένη, πάχος)

Συνήθως επιλέγουμε κόκκινη γραμμή για ζεστό ρεύμα νερού ή αέρα, μπλε γραμμή για το κρύο, διακεκομμένη για τις πληροφορίες.

3.2.3 Εργαλεία Simulation Studio

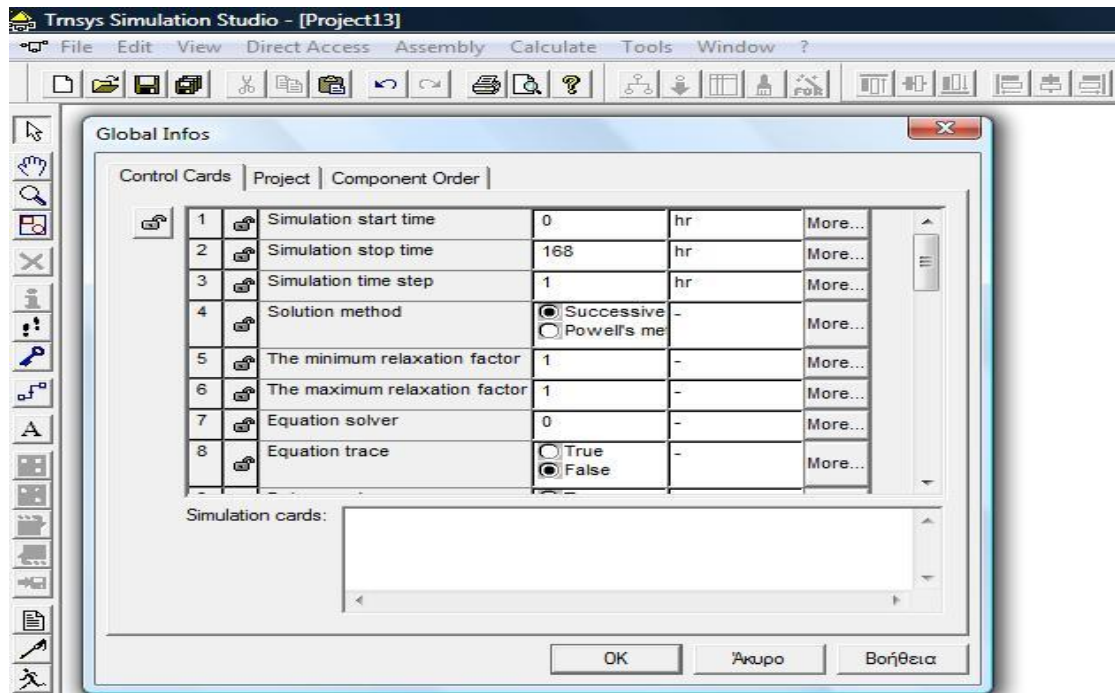
Μια άλλη ενέργεια που αξίζει να αναφέρουμε είναι το κλείδωμα/ξεκλείδωμα των στοιχείων. Η εντολή assembly /Lock –Unlock επιτρέπει στον δημιουργό μιας μελέτης να ‘κλειδώσει’ συγκεκριμένα στοιχεία στον πίνακα σύνταξης. Τα κλειδωμένα στοιχεία δεν μπορούν να διαγραφούν ή να τροποποιηθούν. Το αντίστοιχο εικονίδιο βρίσκεται στην αριστερή στήλη εργαλείων.

Ακόμα το TRNSYS δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής εξισώσεων μέσω του Assembly – Insert new equation. Στην αριστερή στήλη είναι το ένα μέλος της εξίσωσης και στην δεξιά το άλλο. Αυτά τα δύο μέλη πρέπει να συνδεθούν κατάλληλα με στοιχεία ώστε να εφαρμόζεται η εξίσωση. Για παράδειγμα, στην αριστερή στήλη να παίρνει τιμή από στοιχείο την θερμοκρασία περιβάλλοντος (Tamb) και να δίνει στο άλλο στοιχείο τη θερμοκρασία σε Kelvin. ($T_{amb_K}=T_{amb}+273$)



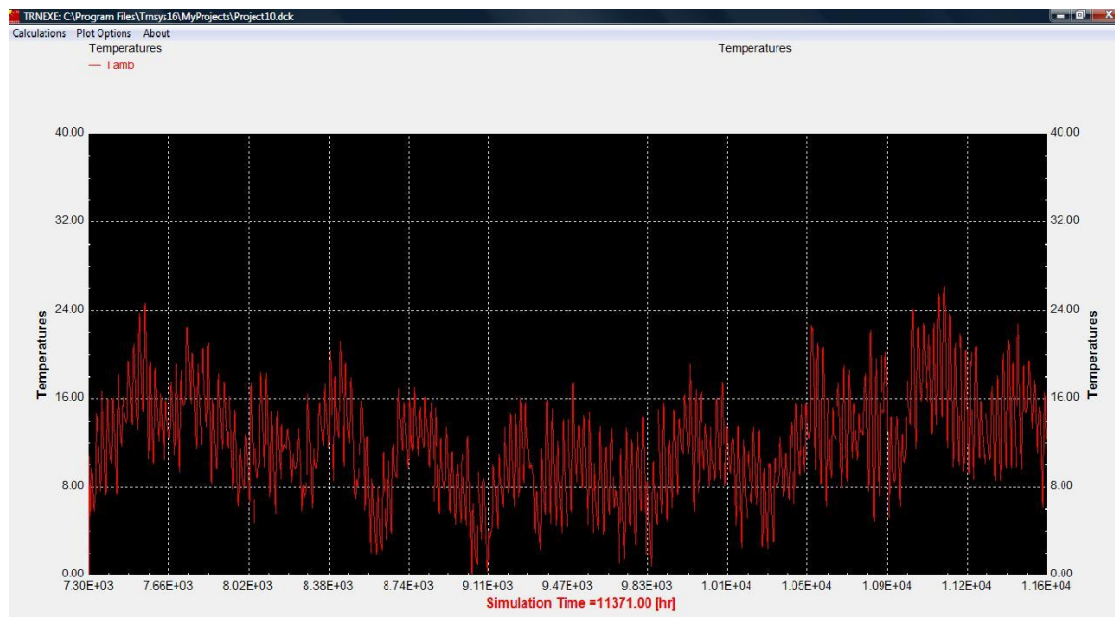
Εικόνα 3.7: Εισαγωγή εξίσωσης

Ακόμα από την αριστερή στήλη εργαλείων μπορούμε να επεξεργαστούμε διάφορα δεδομένα για τη προσομοίωση στην καρτέλα Control Cards, με κυριότερα την στιγμή αρχής και τερματισμού καθώς και το βήμα της προσομοίωσης.



Εικόνα 3.8: καρτέλες ελέγχου

Στη συνέχεια, αν έχουμε επιλέξει κάποιο στοιχείο άμεσου διαγράμματος ή εκτυπωτή μπορούμε να τρέξουμε την προσομοίωση με το εικονίδιο του Run ή απ' το Calculate-Run Simulation. Στο σημείο αυτό γίνεται μετάβαση στο TRNEXE, μετά το τέλος της προσομοίωσης μέσω της διαδρομής Calculate – Open – External Files μπορούμε να πάρουμε τα αποτελέσματά της για κάθε χρονική στιγμή.



Εικόνα 3.9: Μετάβαση στο TRNEXE

3.3 Εφαρμογές TRNSED και TRNEdit

Το πρόγραμμα TRNEdit είναι ένας εξειδικευμένος επεξεργαστής, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροποποίηση των αρχείων εισόδου του TRNSYS. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία αυτόνομων εφαρμογών οι οποίες είναι γνωστές ως TRNSED εφαρμογές. Οι εφαρμογές αυτές μπορούν να διανεμηθούν ελεύθερα μεταξύ των χρηστών που δεν έχουν άδεια χρήσης του TRNSYS με σκοπό να του παραχθεί ένα απλοποιημένο εργαλείο προσομοίωσης. Το πρόγραμμα TRNEdit παρέχεται με ένα κατάλληλο γραφικό περιβάλλον στο οποίο ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει το αρχείο εισόδου του TRNSYS εισάγοντας ειδικές εντολές ώστε, να προστεθούν στο πρόγραμμα που κατασκευάζεται στοιχεία όπως πολλαπλά παράθυρα και ενεργές εικόνες. Το περιβάλλον TRNEdit αποτελείται από δύο καρτέλες. Στην πρώτη φαίνεται ο κώδικας του αρχείου εισαγωγής και στην άλλη το γραφικό αποτέλεσμα που αποτελεί την TRNSED εφαρμογή.

4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΣΤΟ TRNSYS SIMULATION STUDIO

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η προσομοίωση της εγκατάστασης. Αρχικά με τον σχεδιασμό του κτιρίου μέσω του Trnsys Simulation Studio και στην συνέχεια με την ανάλυση της συνδεσμολογίας των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν (components).

4.2 Διαστάσεις κτιρίου στο Simulation Studio

Για την προσομοίωση επιλέχθηκε ένα τυπικό κτίριο με τις εξής διαστάσεις και ανοίγματα:

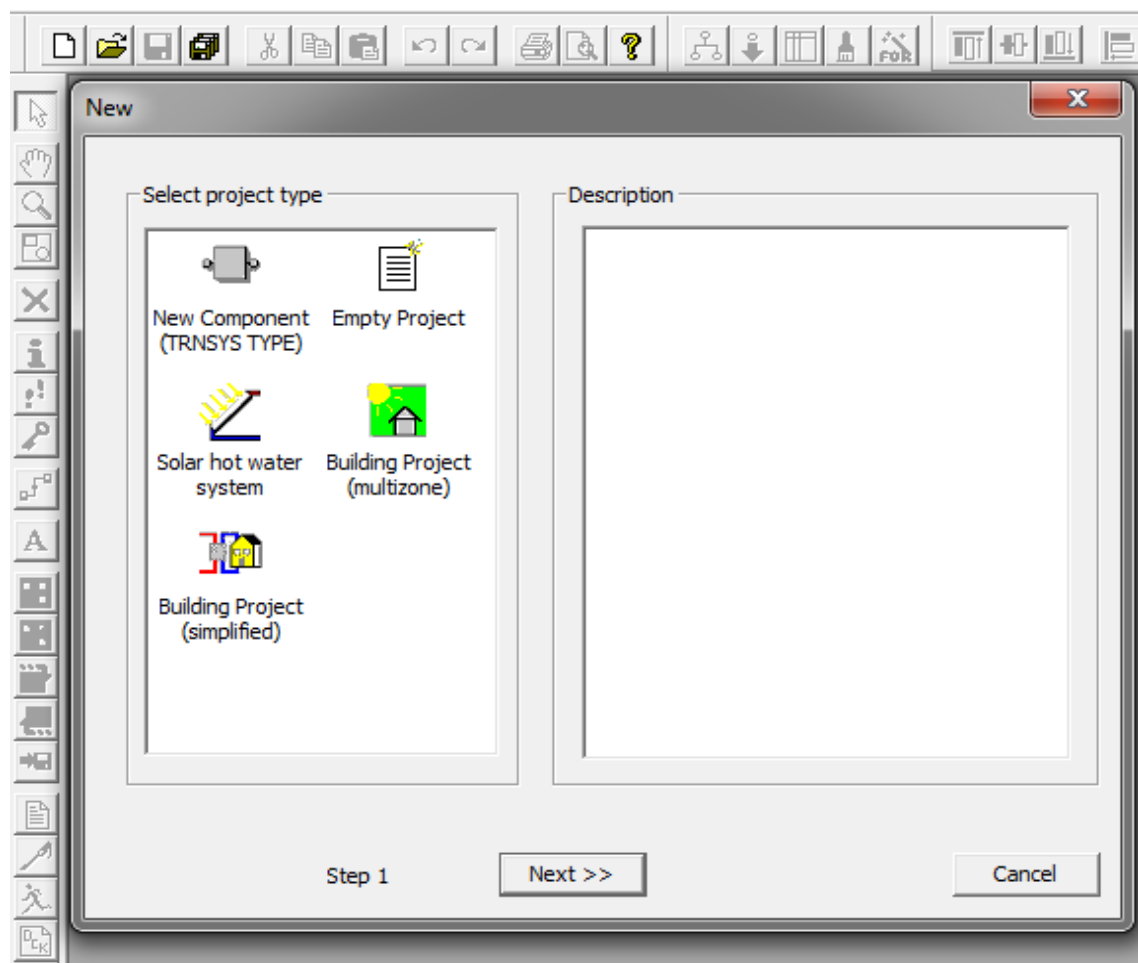
- Μήκος: 10m
- Πλάτος: 10m
- Ύψος: 3m

- Βορράς: 0m²
- Νότος: 6m²
- Ανατολή: 3m²
- Δύση: 3m²

4.3 Περιγραφή των δέκα βημάτων που ακολουθήθηκαν για τη δημιουργία του κτιρίου στο TRNSYS Studio

Βήμα 1^ο

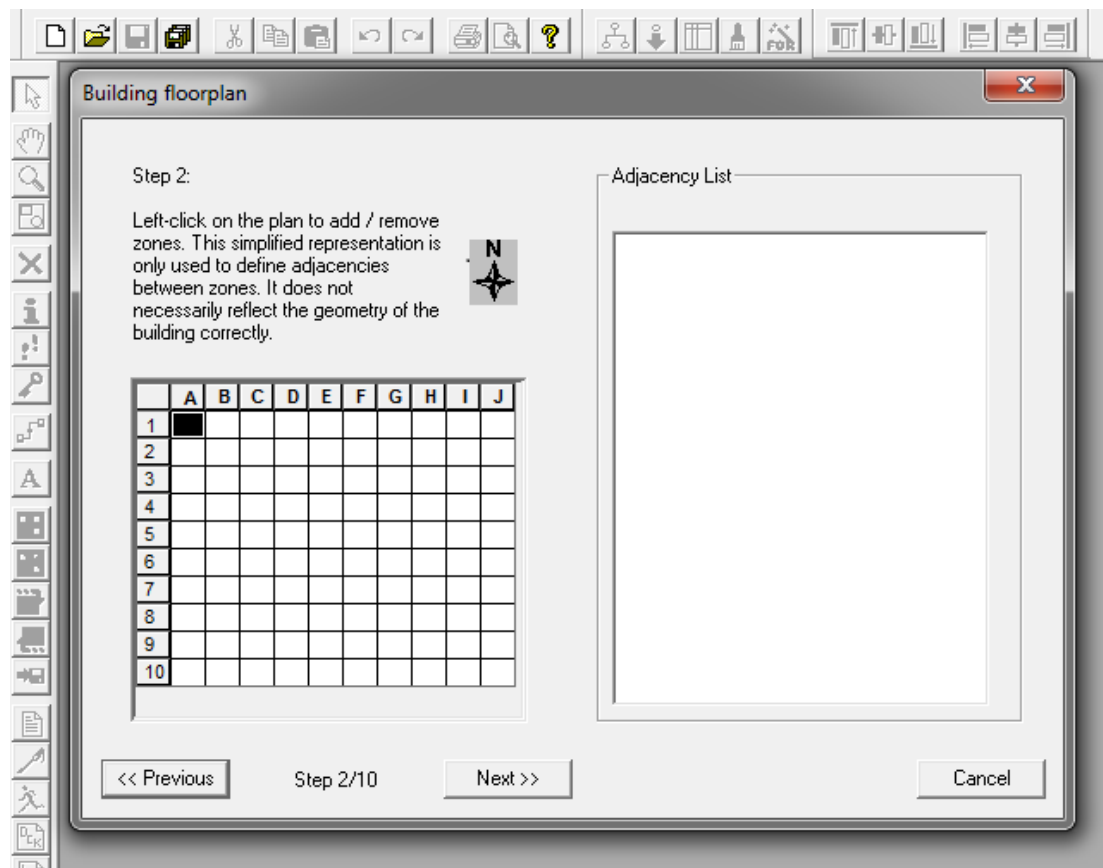
Ανοίγουμε το Trnsys Studio, πατάμε το εικονίδιο δημιουργίας new project και στη συνέχεια το εικονίδιο Building Project (multizone).



Εικόνα 4.1: Δημιουργία Building Project (multizone)

Βήμα 2^ο

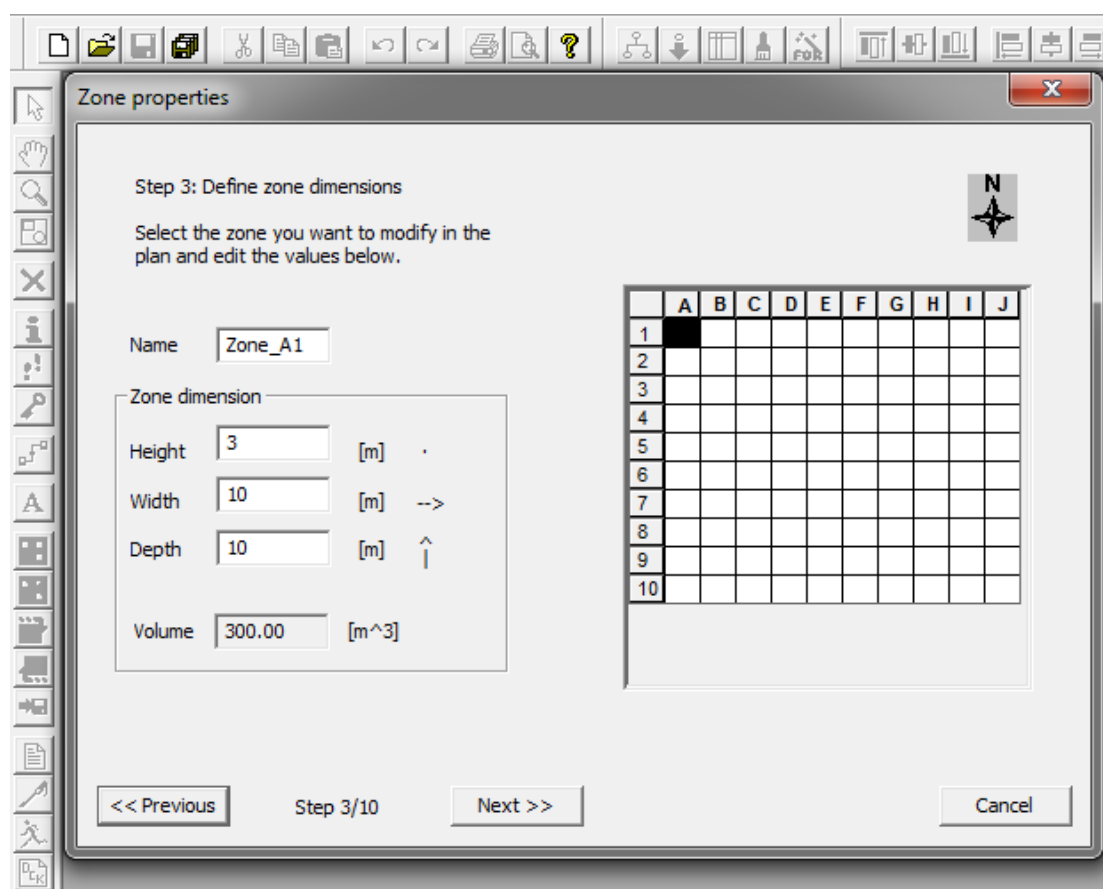
Επιλογή αριθμού ζωνών για το κτίριο, εδώ έχουμε επιλέξει ένα κτίριο με μια ενεργειακή ζώνη.



Εικόνα 4.2: Επιλογή αριθμού ζωνών κτιρίου

Βήμα 3°

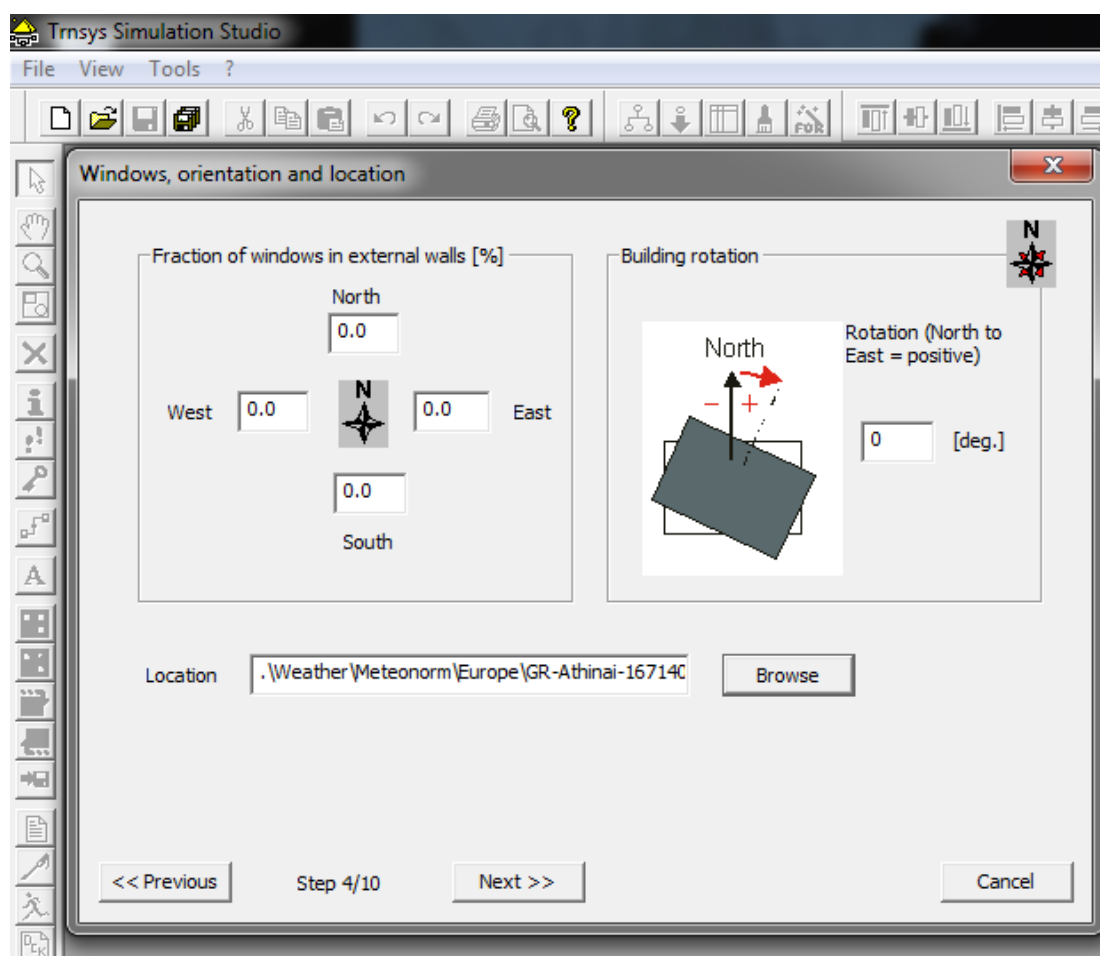
Στο βήμα αυτό γίνεται η εισαγωγή των διαστάσεων ανά ζώνη κτιρίου. Αρχικά ζητείται το όνομα, στη συνέχεια οι διαστάσεις του (ύψος, πλάτος, μήκος) και στο τέλος ο συνολικός όγκος του κτιρίου. Εμείς έχουμε μια ζώνη με διαστάσεις που έχουν αναφερθεί παραπάνω, οπότε:



Εικόνα 4.3: Επιλογή διαστάσεων ζωνών του κτιρίου

Βήμα 4^ο

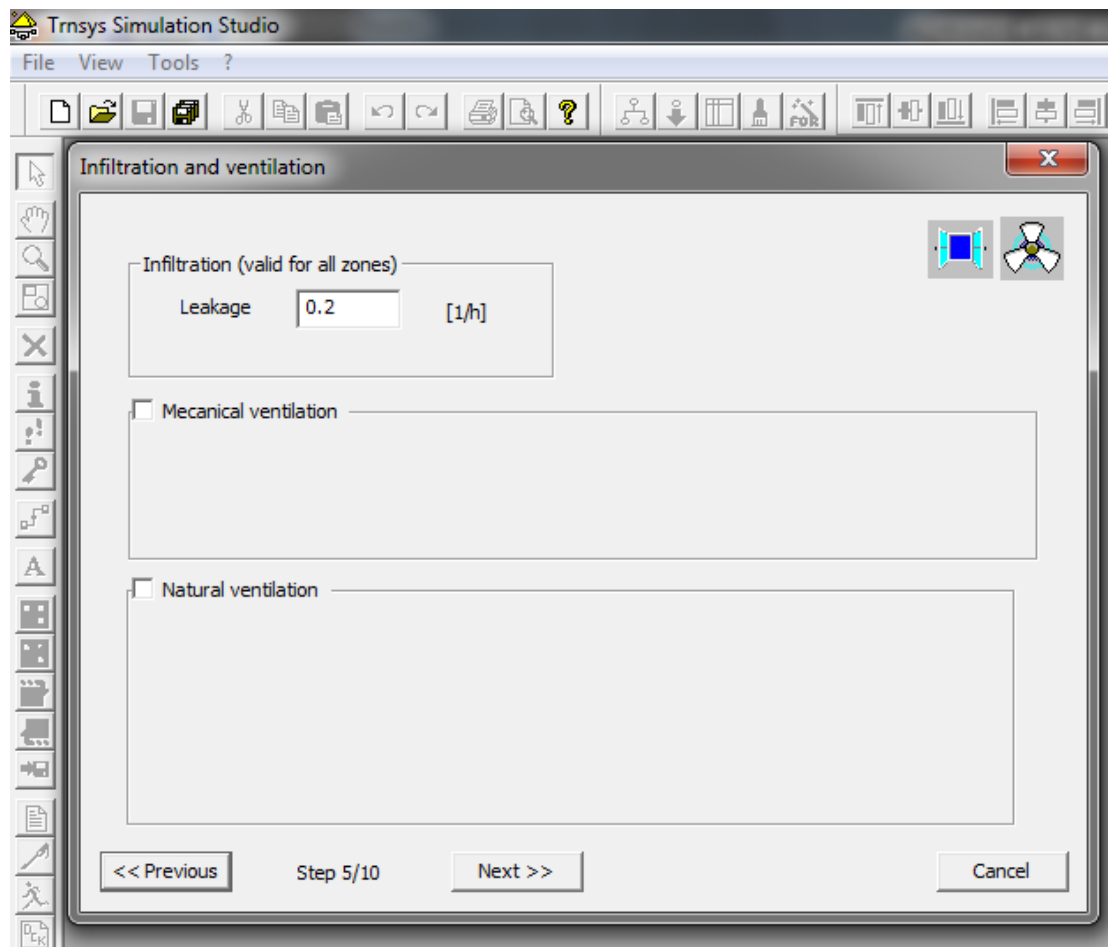
Εισαγωγή του ποσοστού που έχουν τα ανοίγματα (πόρτες, παράθυρα) σε σχέση με το εμβαδόν του τοίχου και της τοποθεσίας για την εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων. Επιλέγουμε την πόλη της Αθήνας όπου θα γίνουν οι μετρήσεις και η επεξεργασία των ανοιγμάτων θα γίνει στη συνέχεια. Επίσης στην εικόνα 4.4 βλέπουμε πως μπορούμε να επιλέξουμε τον προσανατολισμό του κτιρίου, όπου δεν έγινε κάποια επεξεργασία, έμεινε ως έχει.



Εικόνα 4.4: Επιλογή ανοιγμάτων, προσανατολισμού, μετεωρολογικών δεδομένων κτιρίου

Βήμα 5^ο

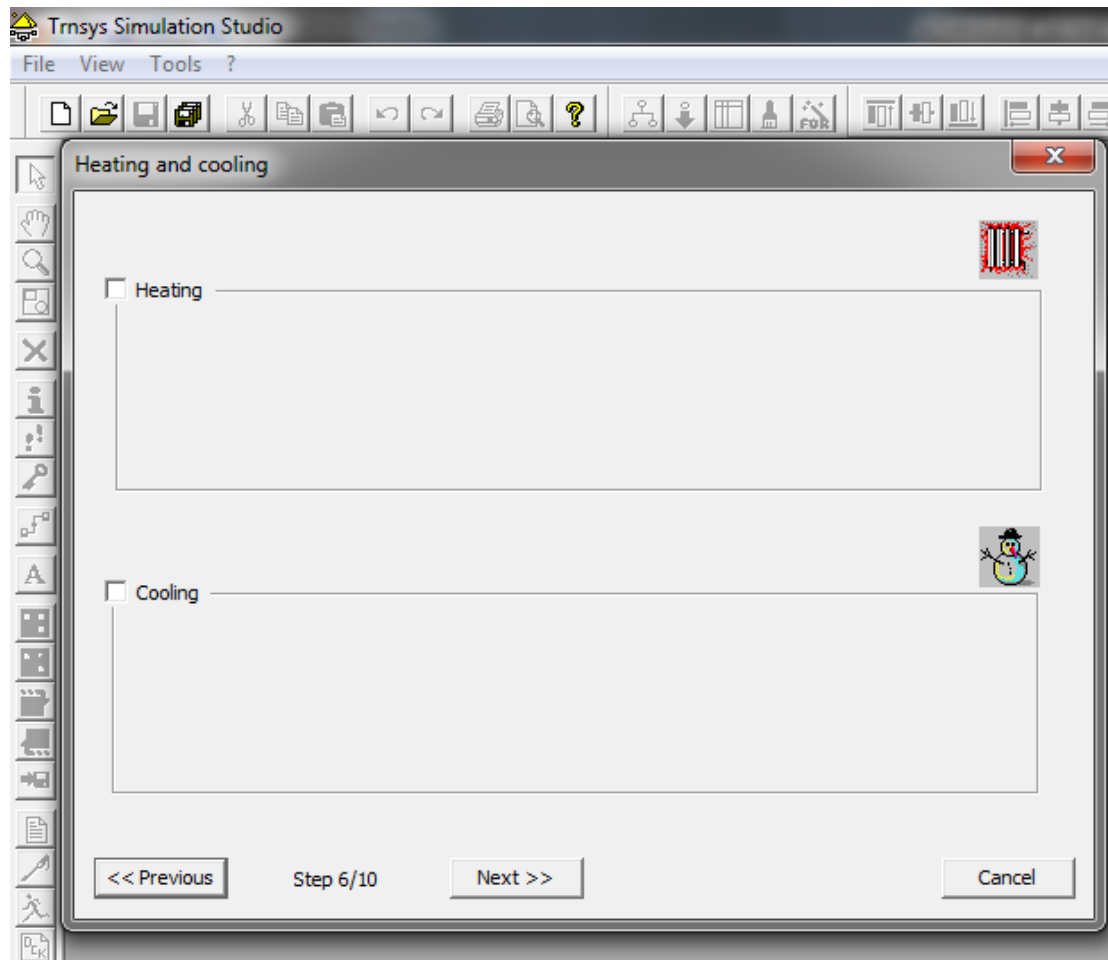
Επιλογή παραμέτρων για τον αερισμό του χώρου. Εδώ δεν επιλέχθηκε φυσικός ή μηχανικός αερισμός, επιλέγουμε μια τυπική τιμή για τη διείσδυση του αέρα 0,2 1/hr.



Εικόνα 4.5: Επιλογή παραμέτρων αερισμού χώρου

Βήμα 6°

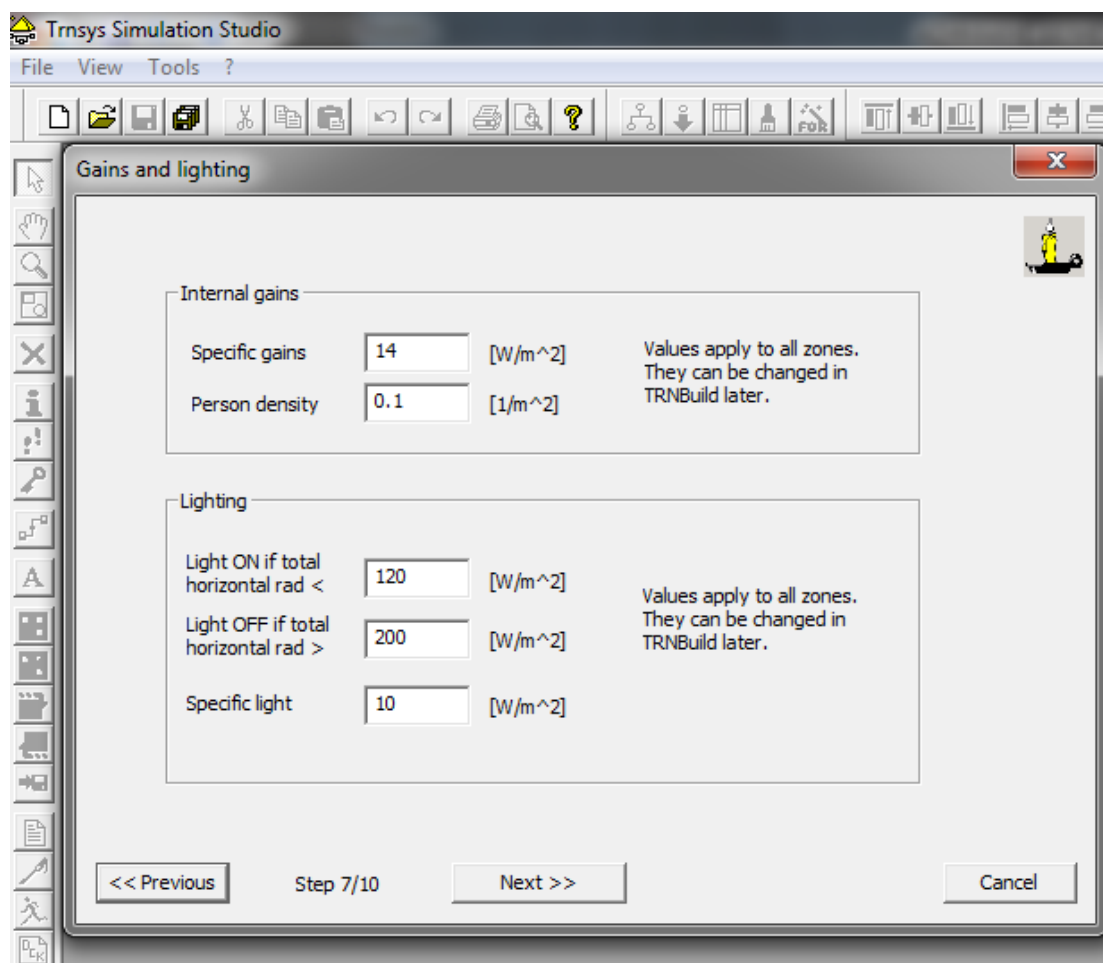
Εδώ μπορούμε να επιλέξουμε αν το κτίριο θα θερμαίνεται ή θα ψύχεται και για ποια θερμοκρασία το επιθυμούμε. Δεν θα επιλέξουμε τίποτα καθώς θα ορίσουμε συγκεκριμένο σύστημα θέρμανσης του κτιρίου στην συνέχεια.



Εικόνα 4.6: Επιλογή θέρμανσης ή ψύξης κτιρίου

Βήμα 7^ο

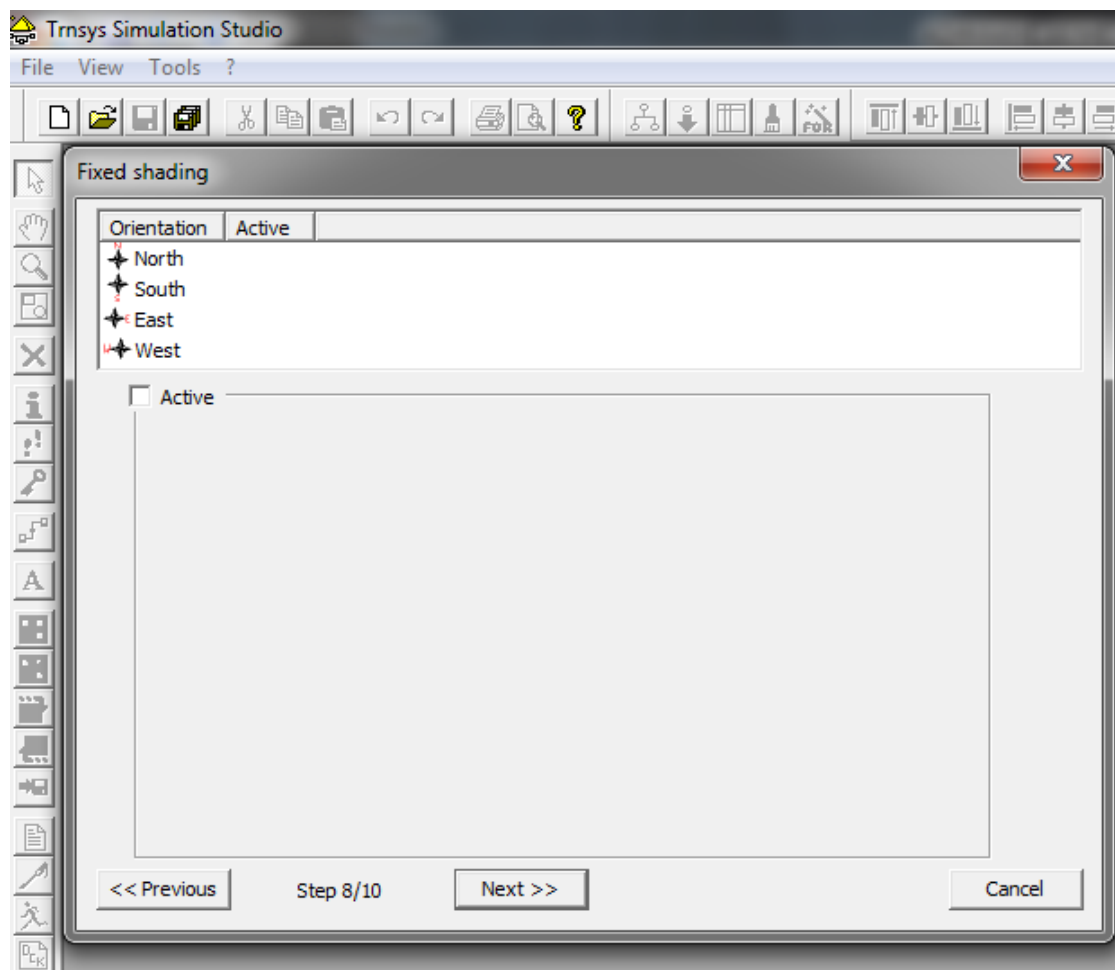
Στο βήμα αυτό μπορούμε να εισάγουμε κάποια φορτία που έχουμε από την παρουσία ανθρώπων στο κτίριο και το φωτισμό του. Πήραμε τις τυπικές τιμές που μας παρέχει το πρόγραμμα και δεν ασχοληθήκαμε περαιτέρω με αυτό. Θα μπορούσαμε ανάλογα και με την χρήση του κτιρίου να εισάγουμε στην συνέχεια και άλλα θερμικά κέρδη (μηχανήματα, ηλεκτρονικοί υπολογιστές).



Εικόνα 4.7: Επιλογή θερμικών κερδών κτιρίου από ανθρώπους, φωτισμό και συσκευές

Βήμα 8^ο-9^ο

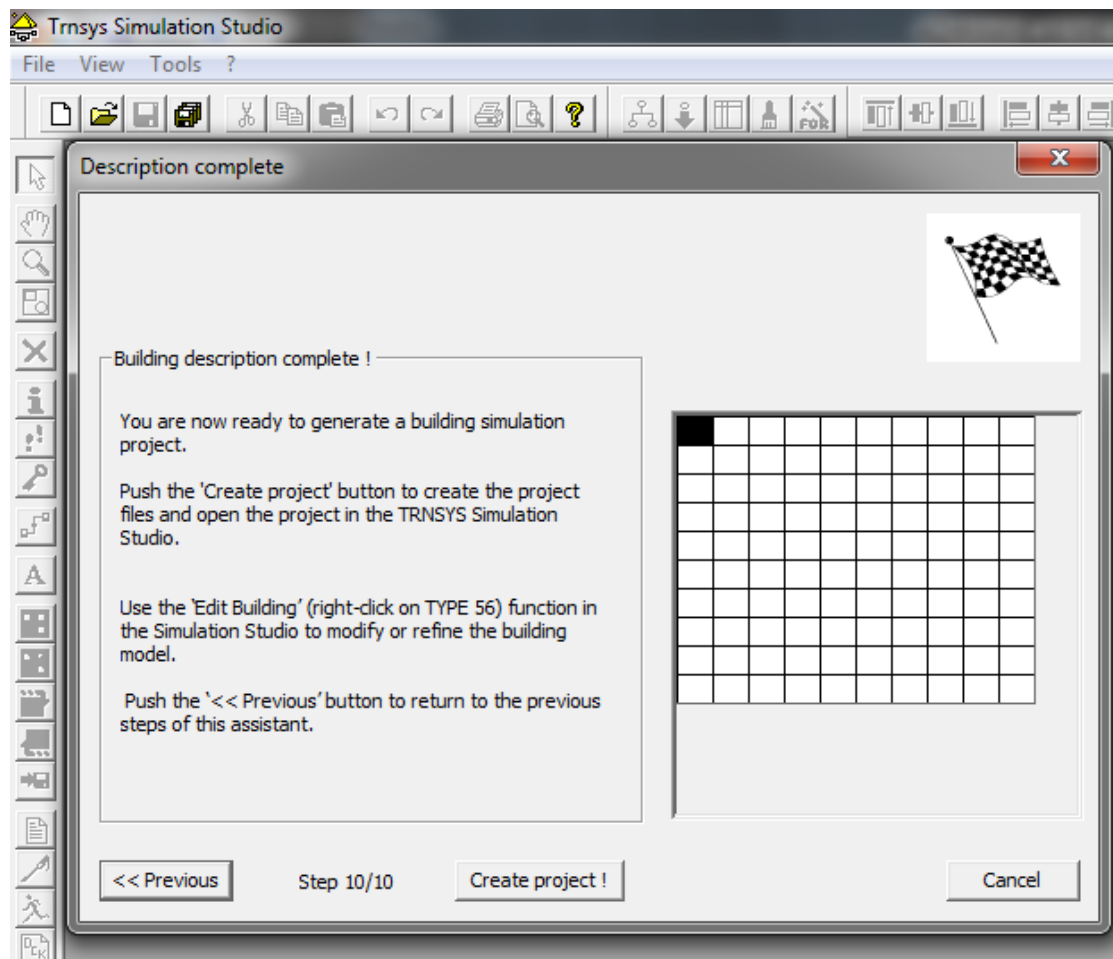
Σε αυτά τα βήματα υπάρχει η επιλογή εσωτερικής και εξωτερικής σκίασης του κτιρίου και με ποιόν προσανατολισμό γίνεται. Δεν θα επιλέξουμε κάτι εδώ, καθώς στην επεξεργασία του κτιρίου όπως θα δούμε στην συνέχεια έχουμε βάλει έναν συντελεστή σκίασης στα παράθυρα 0,6.



Εικόνα 4.8: Επιλογή σκίασης κτιρίου

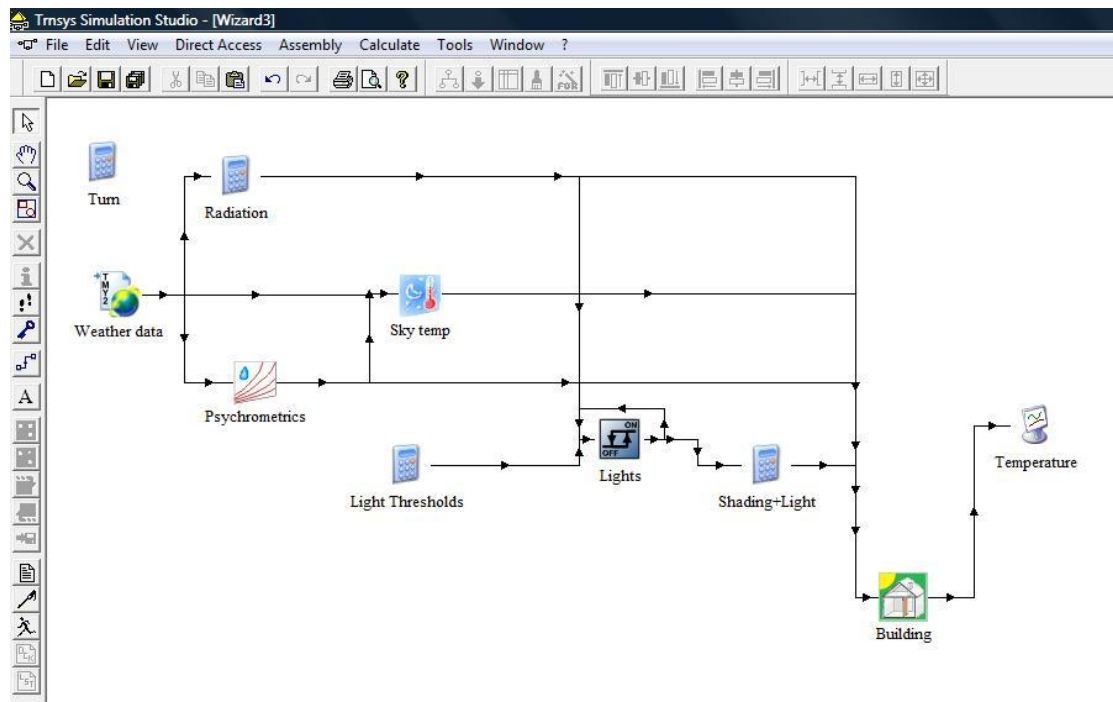
Βήμα 10^ο

Στο τελευταίο βήμα απλώς επιλέγουμε το create project και με τον τρόπο αυτό ολοκληρώνεται το πρώτο κομμάτι της δημιουργίας του κτιρίου μας.



Εικόνα 4.9: Ολοκλήρωση σχεδιασμού κτιρίου

Στη συνέχεια εμφανίζεται το κτίριο που δημιουργήσαμε.

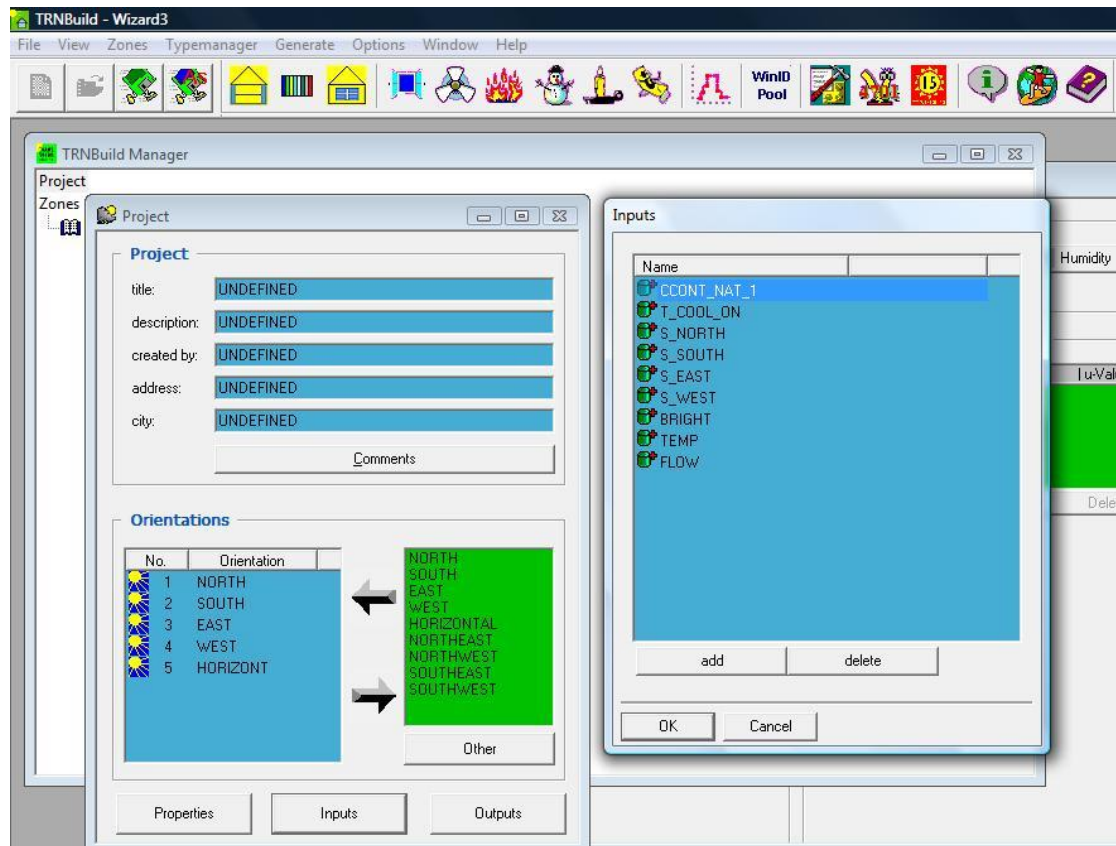


Εικόνα 4.10: Το κτίριο συνδεδεμένο με τα components του Simulation Studio

4.4 Επεξεργασία του κτιρίου

Πηγαίνοντας στο εικονίδιο Building τώρα, με δεξί κλικ επιλέγουμε το Edit Building για να κάνουμε ο,τι τροποποιήσεις είναι απαραίτητες για το κτίριο μας. Έτσι εισαγόμαστε στο πρόγραμμα TRNBuild.

Στο παράθυρο Project του TRNBuild πατώντας το Inputs προσθέτουμε τις μεταβλητές εισόδου στο κτίριο. Συγκεκριμένα την μεταβλητή TEMP για την θερμοκρασία και την μεταβλητή FLOW για την παροχή.

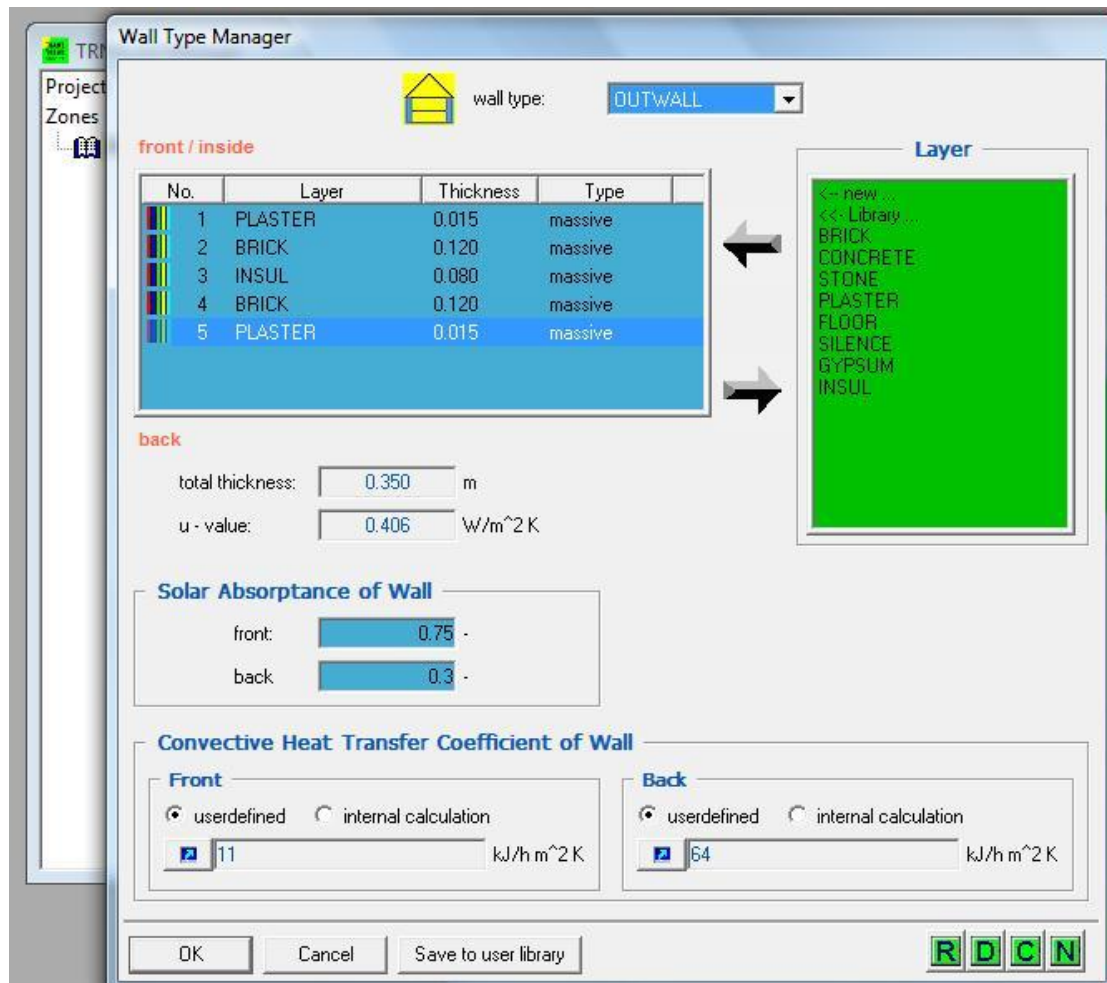


Εικόνα 4.11: Εισαγωγή μεταβλητών εισόδου στο κτίριο

Στη συνέχεια πατώντας στο παράθυρο ZONE_A1 θα επεξεργαστούμε όλες τις λεπτομέρειες του κτιρίου. Αρχικά θα εισάγουμε τα υλικά που αποτελείται ο τοίχος, το δάπεδο και η οροφή του κτιρίου.

Για τους εξωτερικούς τοίχους επιλέξαμε:

- Σοβάς: 15mm
- Τούβλο: 120mm
- Μόνωση: 80mm
- Τούβλο: 120 mm
- Σοβάς: 15mm

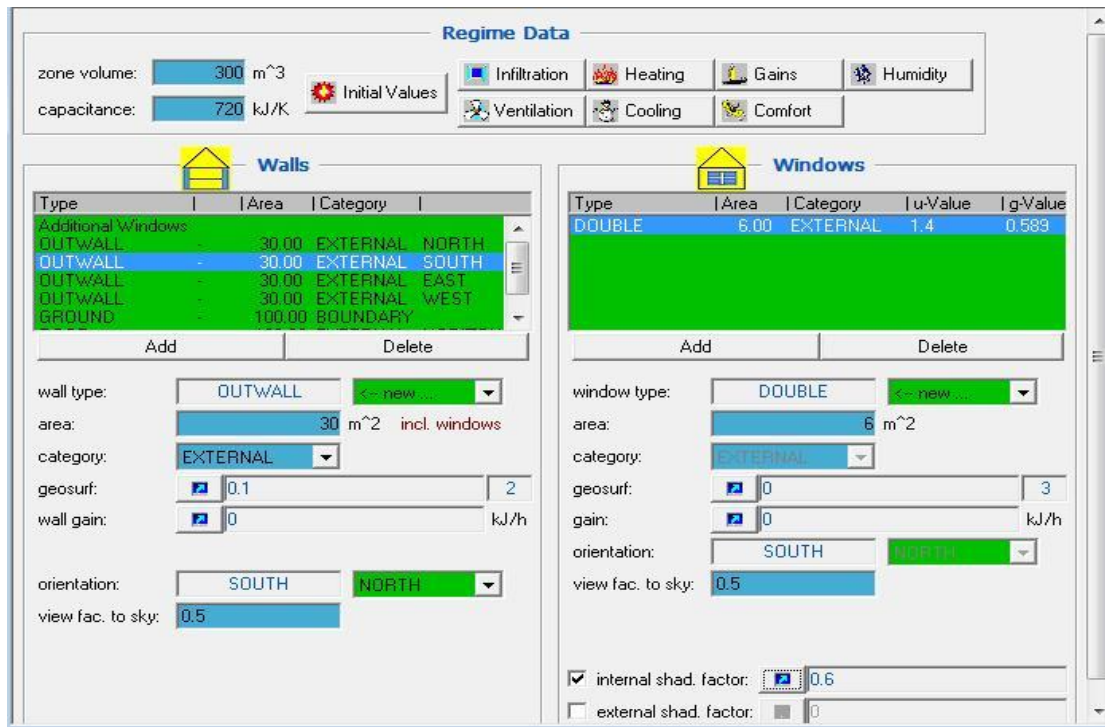


Εικόνα 4.12: Εισαγωγή υλικών τοίχου

Για την οροφή επιλέξαμε:

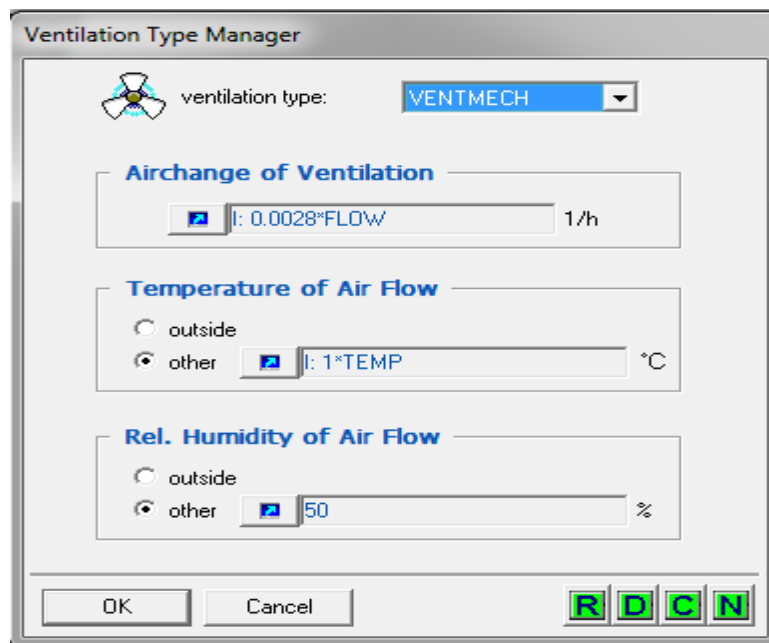
- Οπλισμένο σκυρόδεμα: 200mm
- Μόνωση: 100mm
- Σοβάς: 15mm

Στην συνέχεια θα επεξεργαστούμε τα ανοίγματα του κτιρίου. Επιλέγοντας στην αριστερή στήλη τον τοίχο που θέλουμε, στην δεξιά εισάγουμε το αντίστοιχο εμβαδόν του ανοίγματος που οι τιμές τους έχουν σημειωθεί στην αρχή του κεφαλαίου. Επίσης χρησιμοποιήσαμε έναν συντελεστή εσωτερικής σκίασης ίσο με 0.6, υαλοπίνακες για τα ανοίγματα διπλά και προσανατολισμό για την στέγη οριζόντιο.



Εικόνα 4.13: Επεξεργασία υαλοπινάκων

Πατώντας τώρα το εικονίδιο του Ventilation θα ρυθμίσουμε τον αερισμό του χώρου.



Εικόνα 4.14: Ρύθμιση αερισμού χώρου

Μας ζητείται ο αριθμός εναλλαγών του αέρα που προφανώς θα συνδέεται με την μεταβλητή εισόδου FLOW που ορίσαμε νωρίτερα, δηλαδή την παροχή του συστήματος θέρμανσης που θα επιλεγεί για το κτίριο, στην συγκεκριμένη περίπτωση την αντλία θερμότητας.

Εναλλαγές του αέρα:

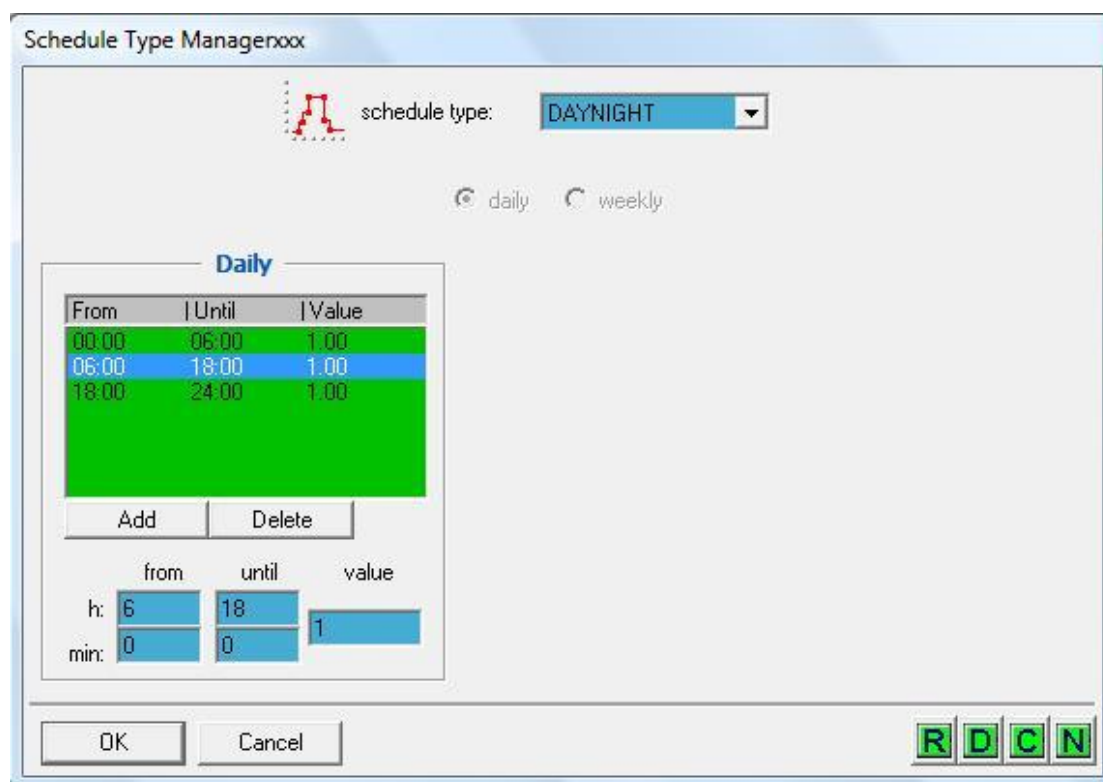
$$\frac{1}{hr} = \frac{\dot{V} \left[\frac{m^3}{hr} \right]}{V [m^3]} = \frac{\dot{m}}{\rho V} = \frac{\dot{m}}{1,18 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \times 300 [m^3]} = 0,0028 \times \dot{m}$$

Όπου $\dot{m} = FLOW \left[\frac{kg}{hr} \right]$ η παροχή αέρα της αντλίας θερμότητας.

Όμοια για την μεταβλητή TEMP που αφορά την θερμοκρασία του αέρα της αντλίας θερμότητας.

Θεωρήσαμε ακόμα μια λογική τιμή για την σχετική υγρασία ίση με 50%.

Στη συνέχεια ρυθμίσαμε το ωράριο λειτουργίας του κτιρίου σε 24 ώρες το 24ωρο από το εικονίδιο του Schedule Type Manager.

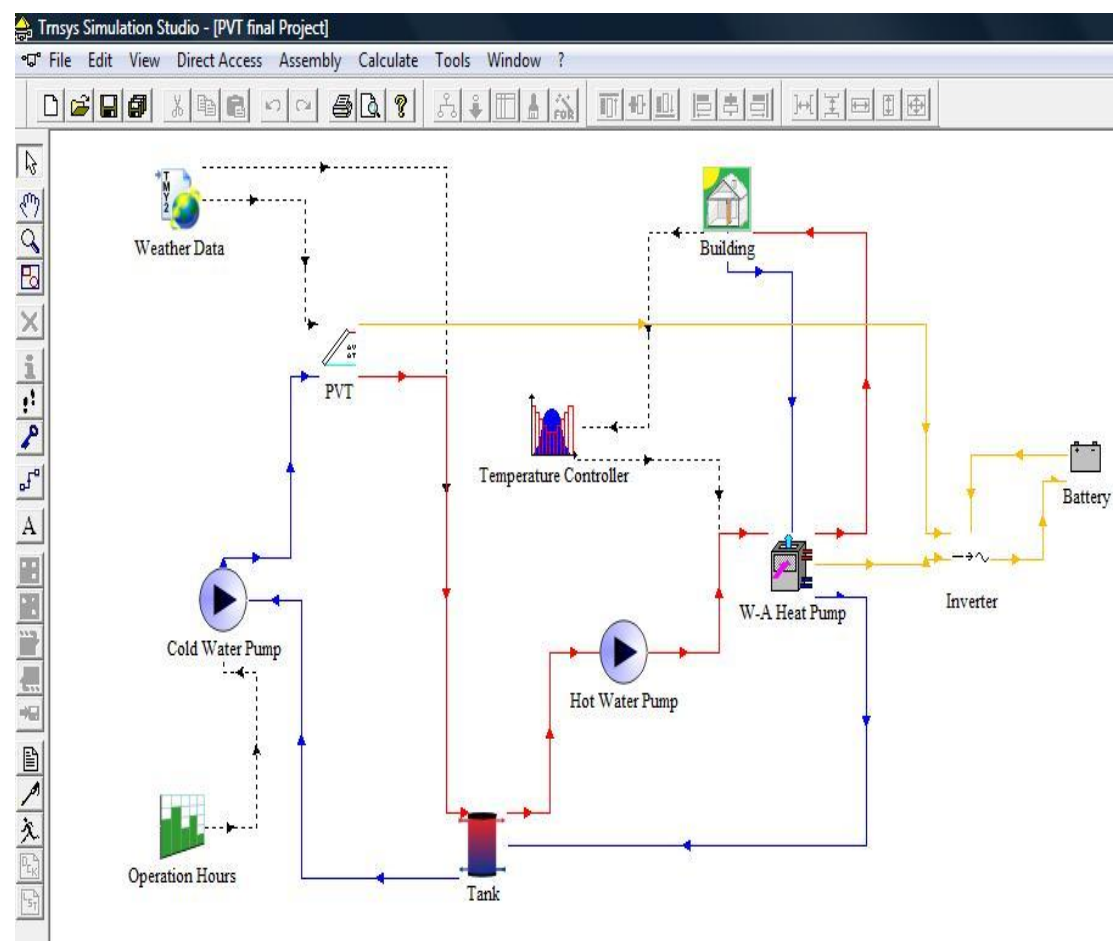


Εικόνα 4.15: Ρύθμιση ωραρίου λειτουργίας του κτιρίου

Σε αυτό το σημείο τελειώσαμε με την επεξεργασία του κτιρίου, αφού αποθηκεύσουμε τις αλλαγές κλείνουμε το TRNBuild και μεταφερόμαστε εκ νέου στο Simulation Studio.

4.5 Παρουσίαση των εγκαταστάσεων και των στοιχείων (components) που χρησιμοποιήθηκαν

-Βασική περίπτωση: υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας νερού – αέρα από θερμοφωτοβολταϊκά (PVT)



Εικόνα 4.16: Εγκατάσταση θερμοφωτοβολταϊκού – αντλίας θερμότητας

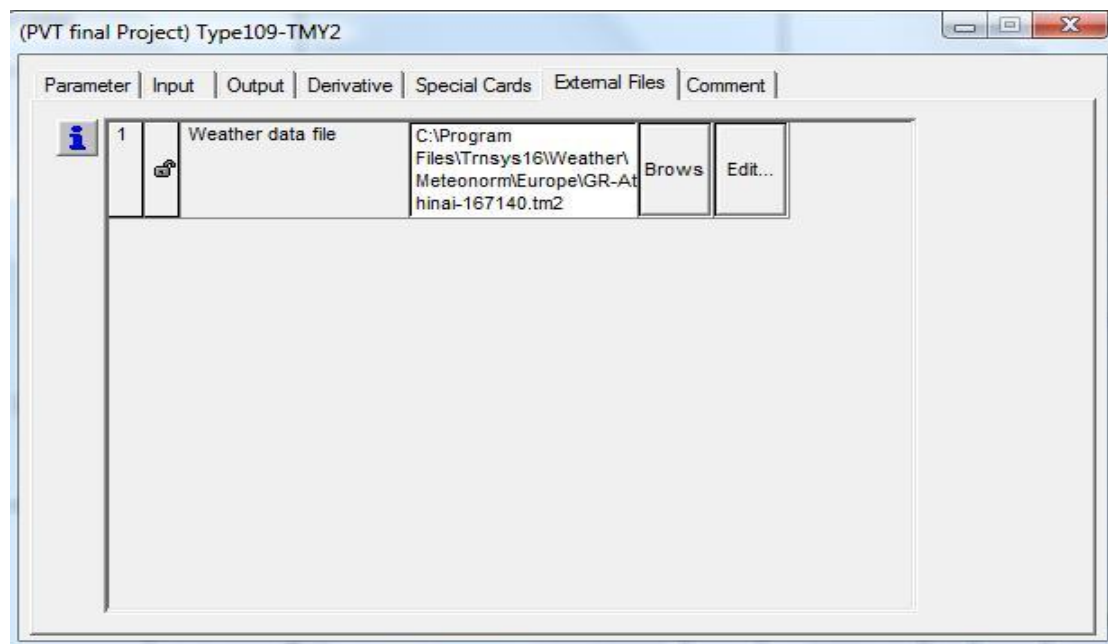
Μετά από δοκιμές στις διάφορες παραμέτρους έγινε βελτιστοποίηση των επιμέρους στοιχείων της εγκατάστασης. Αρχικά θα δούμε τη συνδεσμολογία των στοιχείων και στη συνέχεια θα δείξουμε πως προέκυψε η διαστασιολόγηση.

- Σύνδεση μετεωρολογικών δεδομένων – θερμοφωτοβολταϊκού

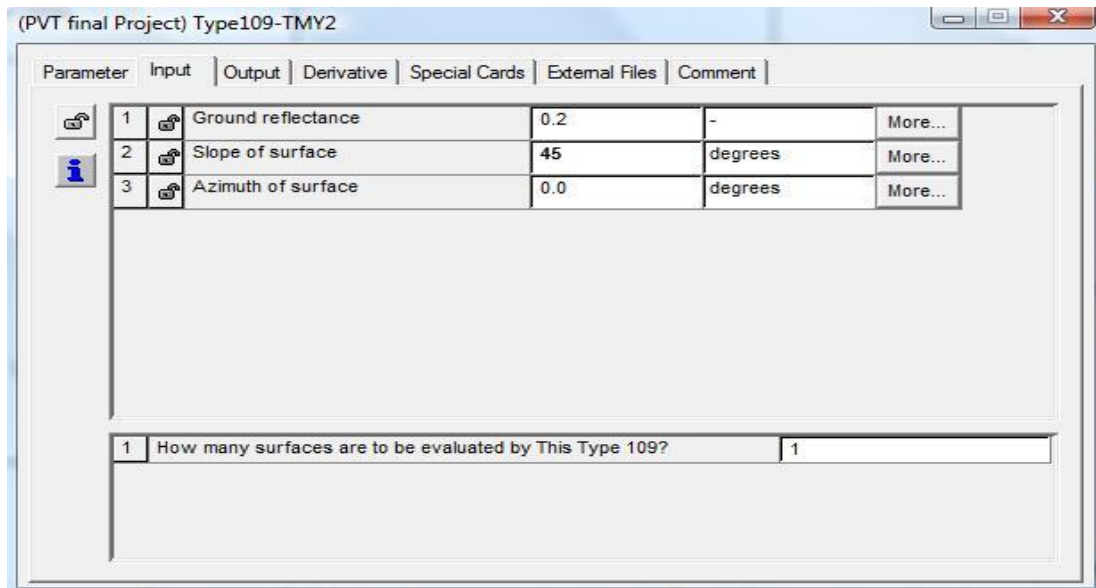


Εικόνα 4.17: Σύνδεση Weather data - PVT

Επιλέγουμε στα External Files του Type109-TMY2 τα μετεωρολογικά δεδομένα της πόλης των Αθηνών και στα Input, κλίση επιφάνειας 45° . Στο επόμενο κεφάλαιο εξηγείται η επιλογή της συγκεκριμένης κλίσης.

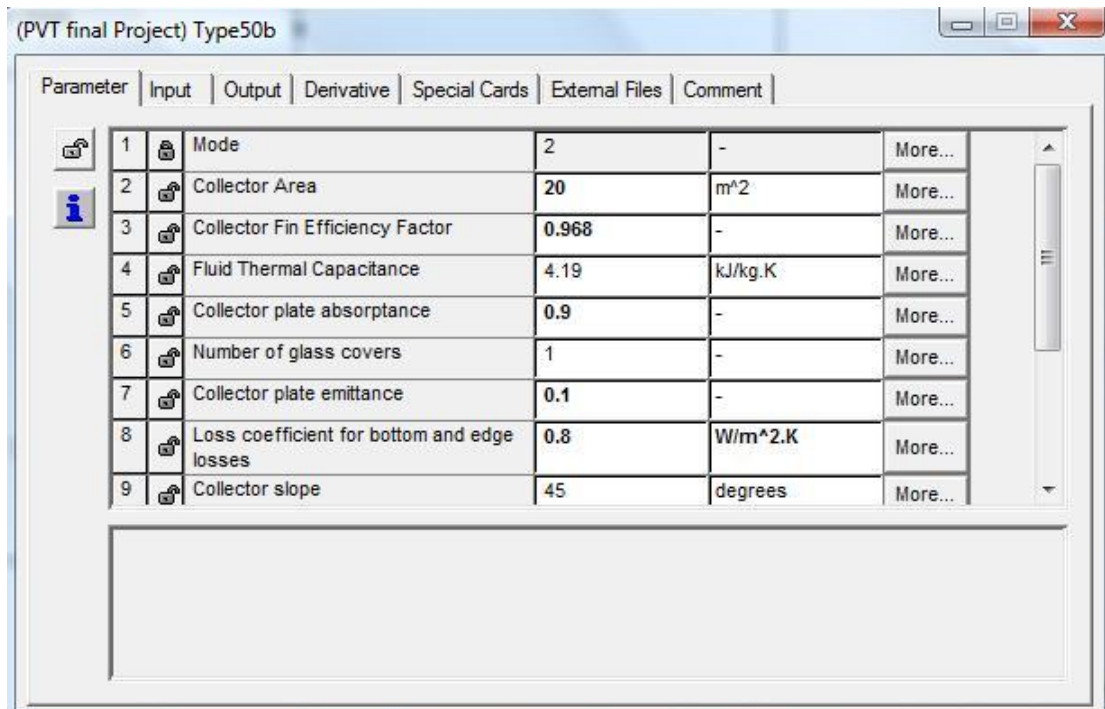


Εικόνα 4.18: Εισαγωγή τοποθεσίας



Εικόνα 4.19: Εισαγωγή γωνίας κλίσης ακτινοβολίας

Για το στοιχείο Type50b επεξεργαζόμαστε τις παραμέτρους του σύμφωνα με τιμές που πήραμε από δημοσιεύσεις, ως εξής:



Εικόνα 4.20α: Επεξεργασία παραμέτρων θερμοφωτοβολταϊκού [25] [26]

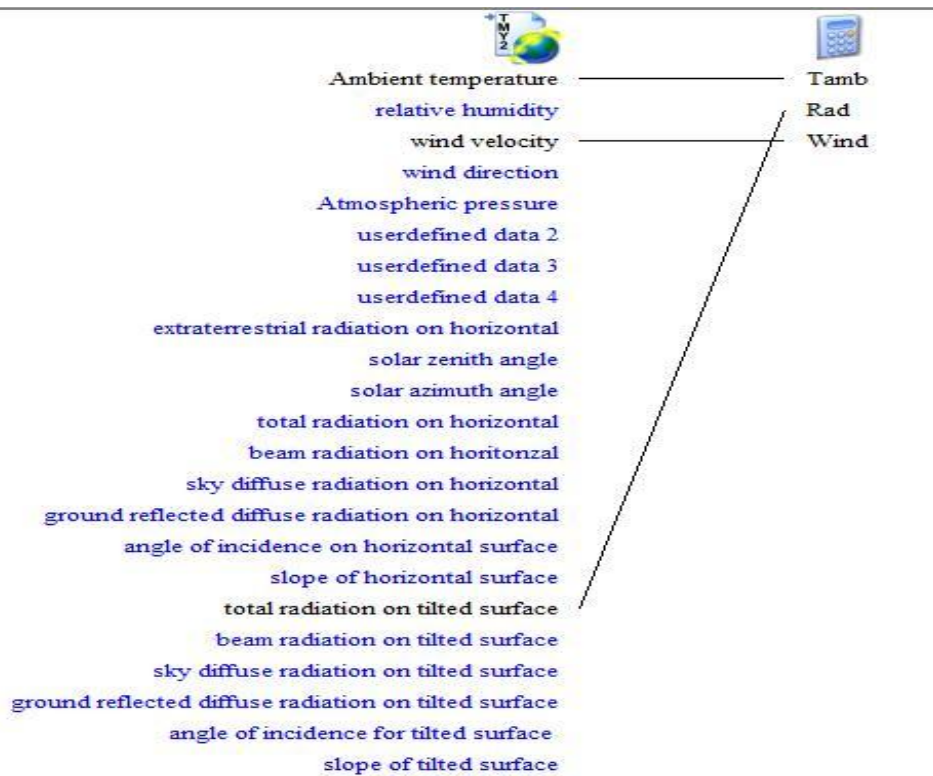
(PVT final Project) Type50b

Parameter | Input | Output | Derivative | Special Cards | External Files | Comment

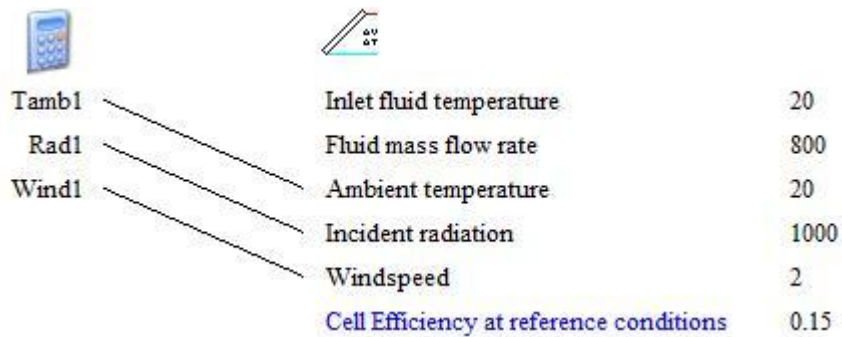
6	Number of glass covers	1	-	More...
7	Collector plate emittance	0.1	-	More...
8	Loss coefficient for bottom and edge losses	0.8	W/m ² .K	More...
9	Collector slope	45	degrees	More...
10	Transmittance	0.95	-	More...
11	Temperature coefficient of PV cell efficiency	0.0045	any	More...
12	Temperature for cell reference efficiency	25	C	More...
13	Packing factor	0.9	-	More...

Εικόνα 4.20β: Επεξεργασία παραμέτρων θερμοφωτοβολταϊκού [25] [26]

Για την συνδεσμολογία των δύο στοιχείων χρειάστηκε να εισάγουμε ένα κομπιουτεράκι που να εξάγει πολύ απλά (χωρίς πράξεις) τα μετεωρολογικά δεδομένα που παίρνει (θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου, συνολική ακτινοβολία) καθώς δεν ήταν εφικτή η σύνδεση τους αρχικά απ' το πρόγραμμα. Έτσι πήραμε την ακόλουθη συνδεσμολογία:



Εικόνα 4.21: Σύνδεση μετεωρολογικών δεδομένων - κομπιουτεράκι

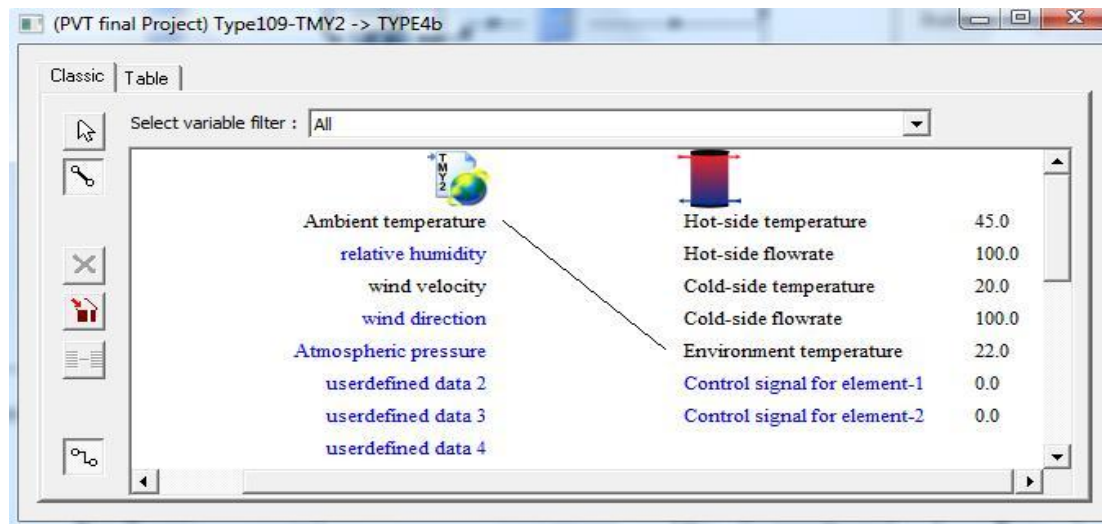


Εικόνα 4.22: Σύνδεση κομπιουτεράκι - θερμοφωτοβολταϊκού

- Σύνδεση μετεωρολογικών δεδομένων – δοχείου αδρανείας



Εικόνα 4.23: Σύνδεση Weather Data – Tank



Εικόνα 4.24: Συνδεσμολογία μετεωρολογικών δεδομένων – δοχείου αδρανείας

Για το δοχείο αδρανείας ύστερα από βελτιστοποίηση επιλέχθηκε όγκος 1 m^3 και 5 ενεργειακές ζώνες των 0,2 m για την καλύτερη απόδοση του.

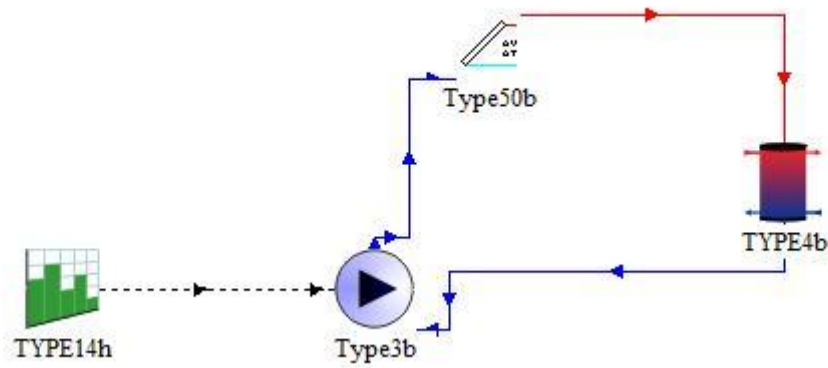
The screenshot shows a software window titled '(PVT final Project) TYPE4b' with a 'Parameter' tab selected. It contains a table of parameters for the tank model. Below the table, there is a question: 'How many temperature levels (nodes) should be used in the tank?' with the answer '5' entered in the adjacent field.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Fixed inlet positions	1	-	More...		
2	Tank volume	1	m^3	More...		
3	Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K	More...		
4	Fluid density	1000.0	kg/m^3	More...		
5	Tank loss coefficient (-)	-0.833333	$\text{W/m}^2.\text{K}$	More...		
6	Height of node-1	0.2	m	More...		
7	Height of node-2	0.2	m	More...		
8	Height of node-3	0.2	m	More...		
9	Height of node-4	0.2	m	More...		

1 | How many temperature levels (nodes) should be used in the tank? | 5

Εικόνα 4.25: Επεξεργασία παραμέτρων δοχείου αδρανείας

- Σύνδεση θερμοφωτοβολταϊκού – δοχείου αδρανείας



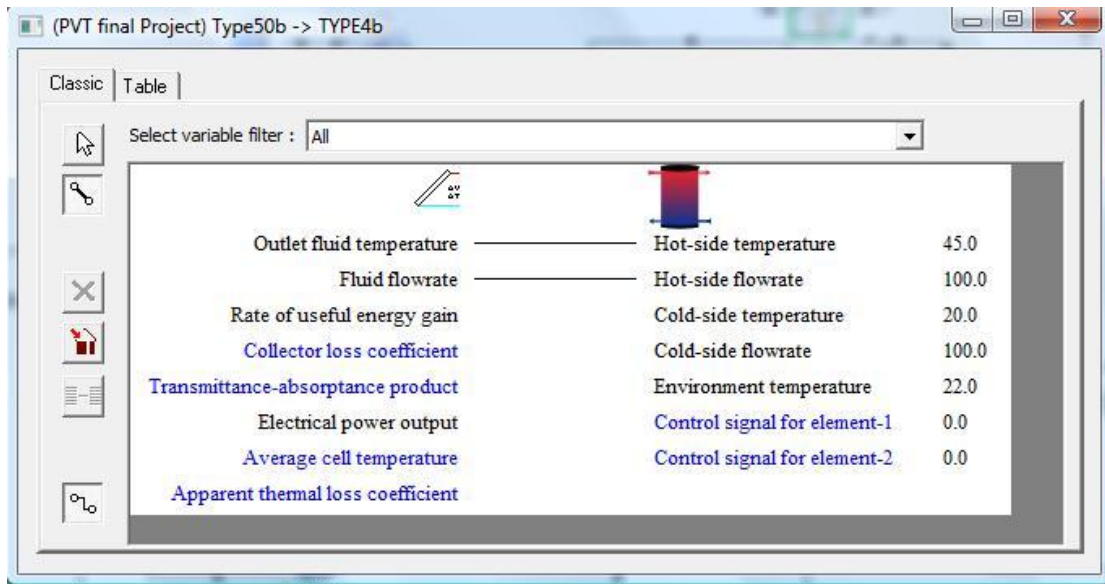
Εικόνα 4.26: Σύνδεση PVT - Tank

Η παροχή για τον κυκλοφορητή ύστερα από δοκιμές προέκυψε ίση με 800 Kg/hr με μια τυπική τιμή ισχύος τα 100 Watt.

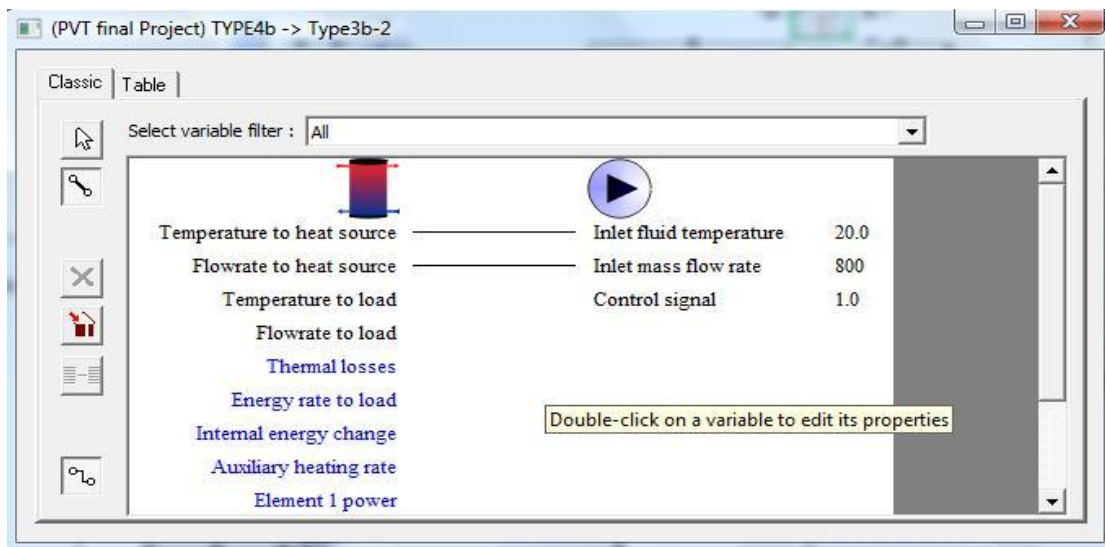
(PVT final Project) Type3b

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Maximum flow rate	800	kg/hr	More...		
2	Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K	More...		
3	Maximum power	100	W	More...		
4	Conversion coefficient	0.05	-	More...		
5	Power coefficient	0.5	-	More...		
1	How many coefficients in the polynomial relating pump power to fluid flow rate?	1				

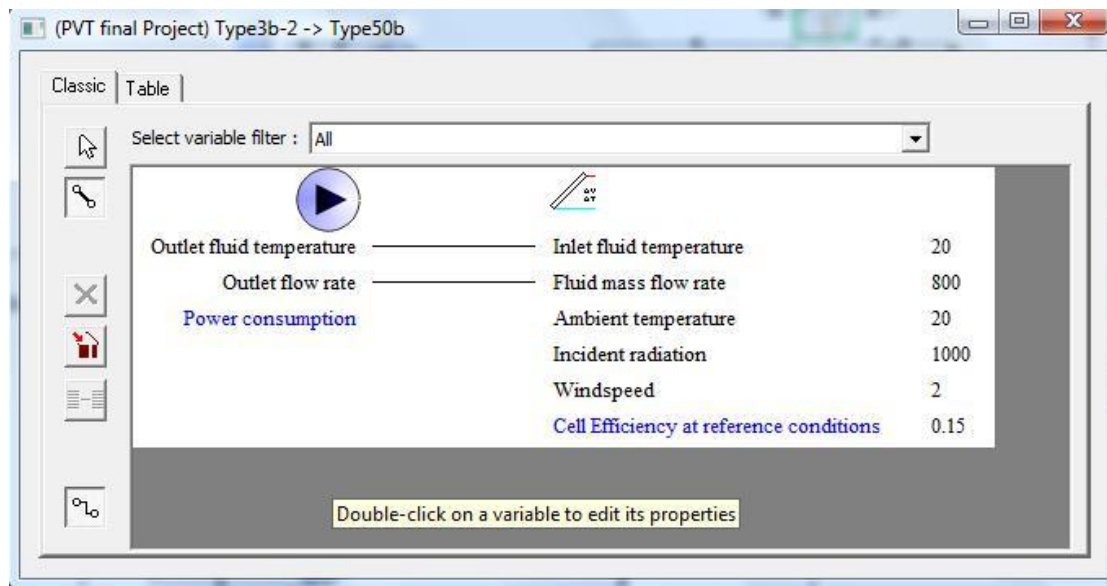
Εικόνα 4.27: Επεξεργασία παραμέτρων κυκλοφορητή



Εικόνα 4.28: Συνδεσμολογία θερμοφωτοβολταϊκού – δοχείου αδρανείας

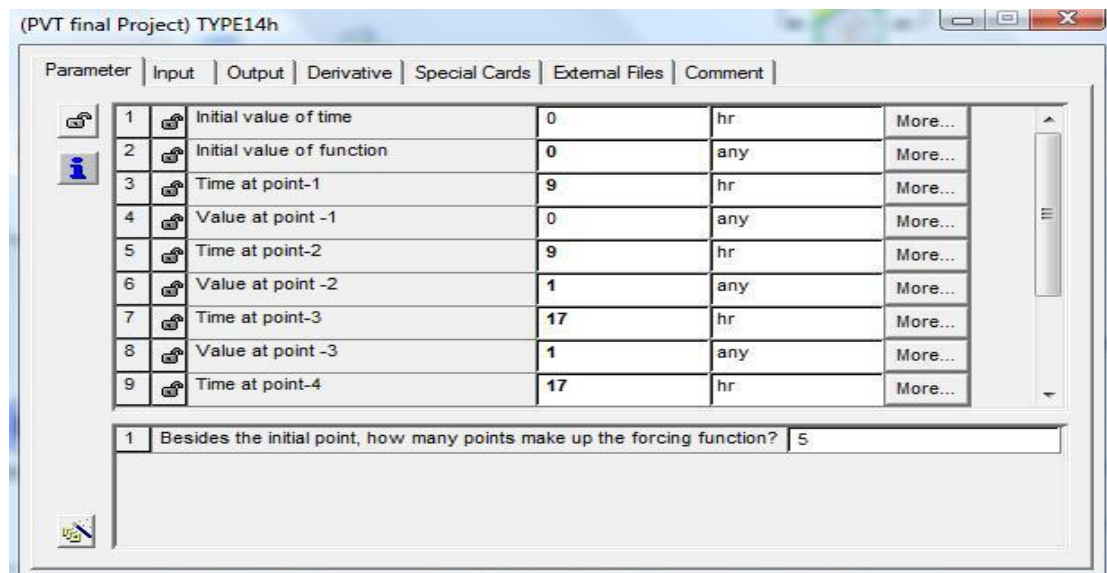


Εικόνα 4.29: Συνδεσμολογία δοχείου αδρανείας - κυκλοφορητή



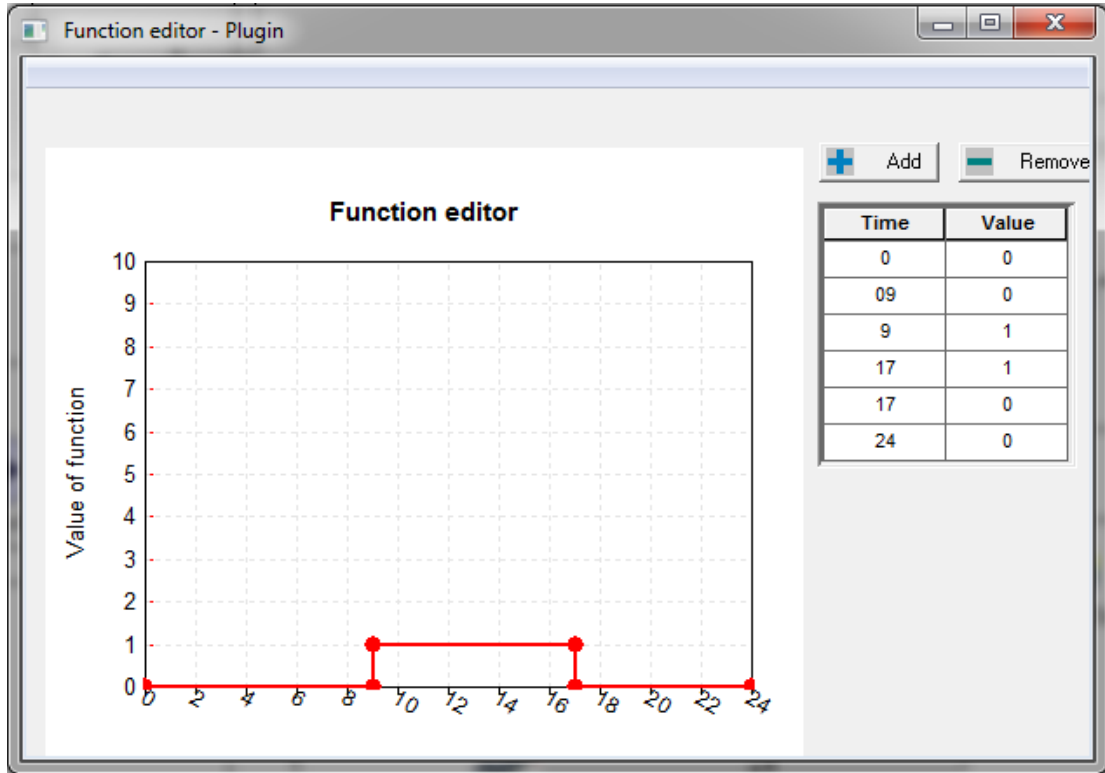
Εικόνα 4.30: Συνδεσμολογία κυκλοφορητή - θερμοφωτοβολταϊκού

Για την καλύτερη απόδοση του κύκλου προσθέσαμε το στοιχείο TYPE14h ώστε η εγκατάσταση να λειτουργεί μόνο την ημέρα (09:00 – 17:00). Έτσι όταν η τιμή του στοιχείου είναι 1 τότε δίνει σήμα στην αντλία να λειτουργήσει, αντιθέτως όταν δίνει σήμα 0 μένει κλειστή.

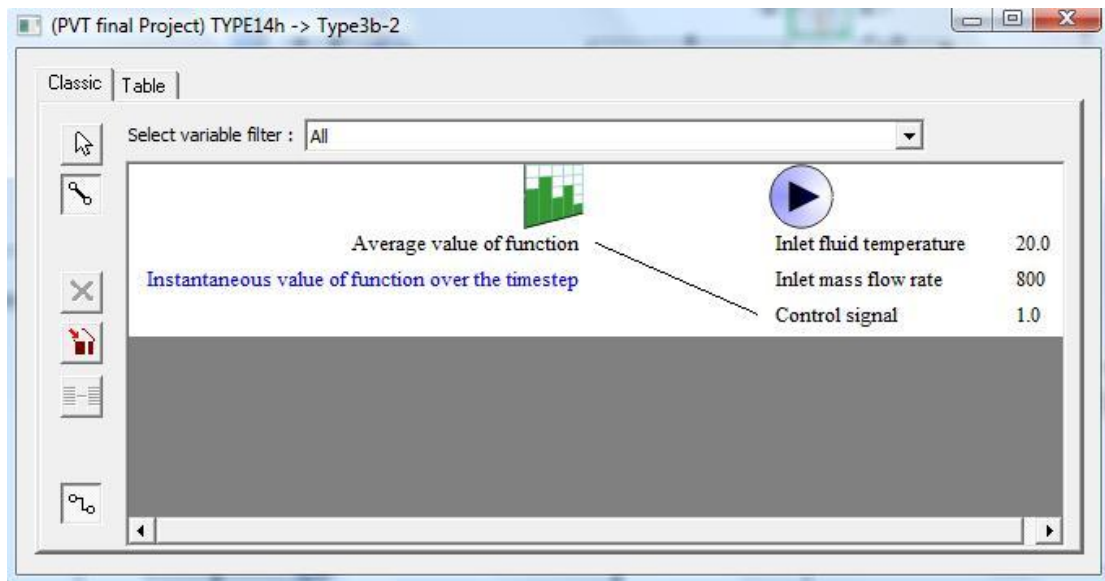


Εικόνα 4.31: Ρύθμιση ωρών λειτουργίας του κύκλου

Πατώντας το εικονίδιο κάτω αριστερά εμφανίζεται το παράθυρο που δείχνει την εντολή που έχουμε δώσει:

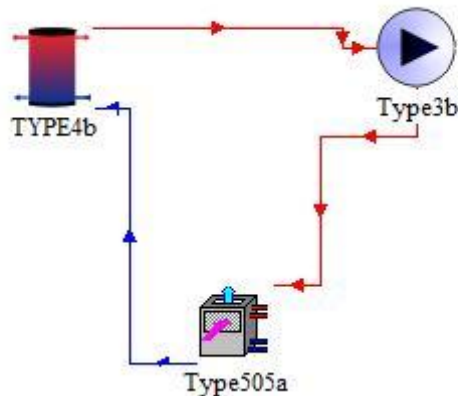


Εικόνα 4.32: ώρες λειτουργίας κύκλου



Εικόνα 4.33: Συνδεσμολογία ωραρίου λειτουργίας – κυκλοφορητή

- Σύνδεση δοχείου αδρανείας – αντλίας θερμότητας



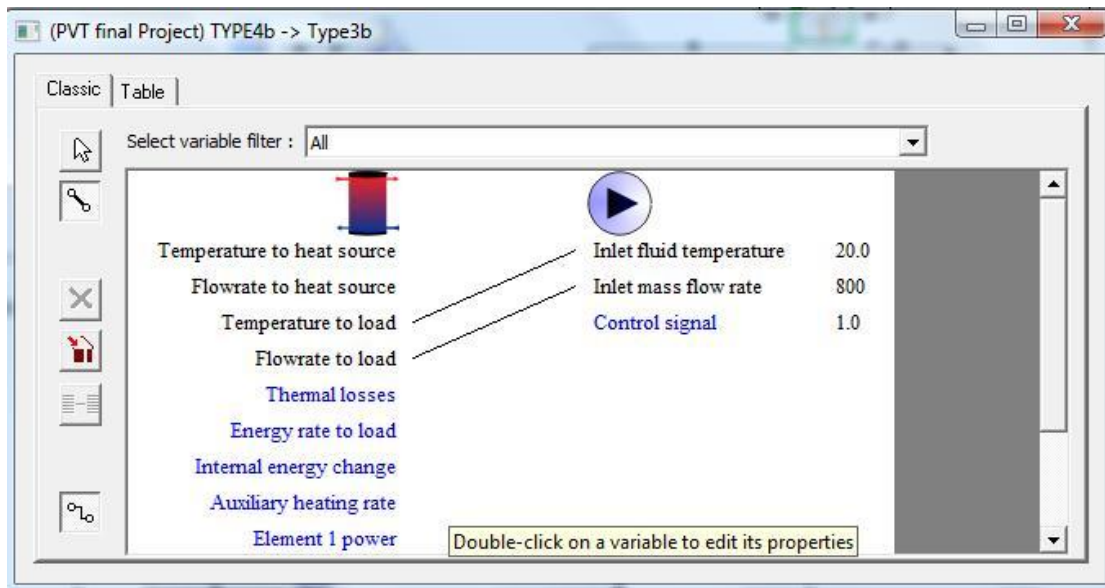
Εικόνα 4.34: Σύνδεση Tank – Heat Pump

Μελετήσαμε την αντλία θερμότητας για θέρμανση μόνο, οπότε στα Inputs του Type505a αφαιρέσαμε της πρόσθετες λειτουργίες ψύξης και ζεστού νερού χρήσης. Για να μας καλύπτει τις ανάγκες θέρμανσης η αντλία ορίσαμε στις παραμέτρους της μια παροχή ίση με $0,7 \text{ m}^3/\text{sec}$.

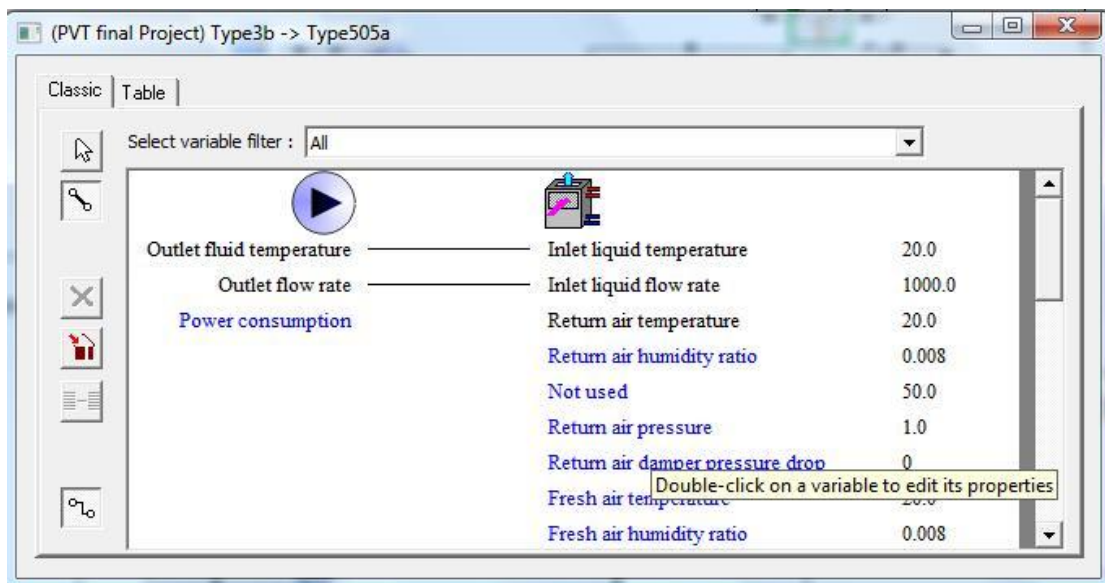
(PVT final Project) Type505a

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
14	Inlet DHW flow rate	0	kg/hr	More...		
15	Cooling control signal	0	-	More...		
16	Heating control signal	1	-	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	0.15	Fraction	More...		
21	Cooling desuperheater temperature	60.0	C	More...		
22	Heating desuperheater temperature	55.0	C	More...		

Εικόνα 4.35: Επεξεργασία αντλίας θερμότητας



Εικόνα 4.36: Συνδεσμολογία δοχείου αδρανείας - κυκλοφορητή



Εικόνα 4.37: Συνδεσμολογία κυκλοφορητή – αντλίας θερμότητας

(PVT final Project) Type505a -> TYPE4b

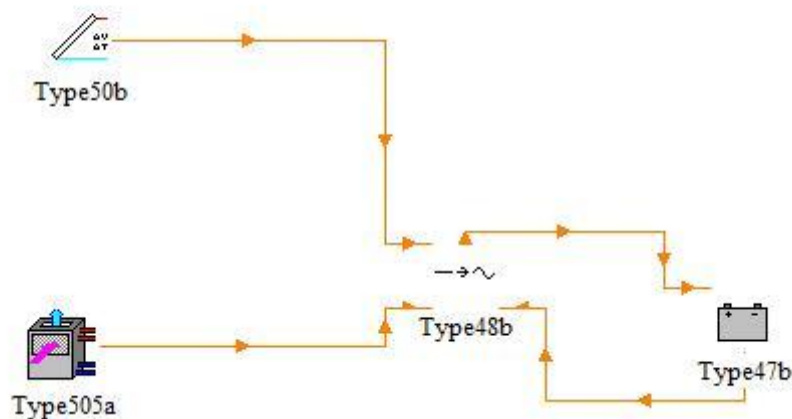
Classic | Table

Select variable filter : All

Exiting fluid temperature	Hot-side temperature	45.0
Exiting fluid flow rate	Hot-side flowrate	100.0
Outlet air temperature	Cold-side temperature	20.0
Outlet air humidity ratio	Cold-side flowrate	100.0
Outlet air %RH	Environment temperature	22.0
Outlet air flow rate	Control signal for element-1	0.0
Outlet air pressure	Control signal for element-2	0.0
Exiting DHW temperature		
Exiting DHW flow rate		

Εικόνα 4.38: Συνδεσμολογία αντλίας θερμότητας – δοχείου αδρανείας

- Σύνδεση αντλίας θερμότητας, θερμοφωτοβολταϊκού με το σύστημα inverter – μπαταρία



Εικόνα 4.39: Σύνδεση Heat Pump, PVT – Inverter, Battery

Για το Inverter οι δοκιμές έδειξαν πως μας καλύπτει ένα των 1,5KW και για τις μπαταρίες επιλέξαμε 6 σε σειρά χωρητικότητας 120 Ah.

(PVT final Project) Type48b

Parameter | Input | Output | Derivative | Special Cards | External Files | Comment

1	Mode	1	-	More...
2	Regulator efficiency	0.85	-	More...
3	Inverter efficiency	0.95	-	More...
4	High limit on fractional state of charge (FSOC)	1	-	More...
5	Low limit on FSOC	0	-	More...
6	charge to discharge limit on FSOC	0.85	-	More...
7	Inverter output power capacity	1.5	kW	More...

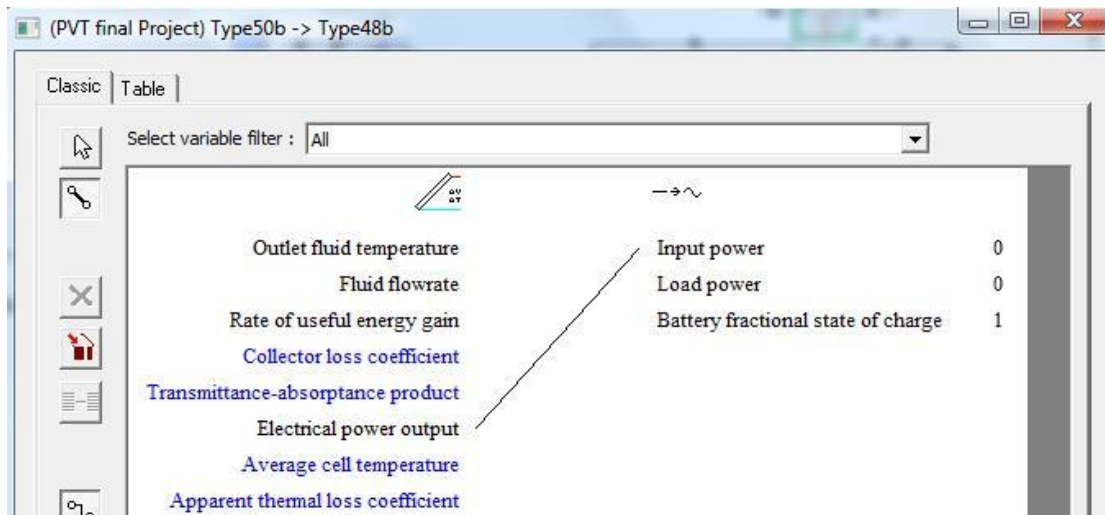
Εικόνα 4.40: Επεξεργασία παραμέτρων Inverter

(PVT final Project) Type47b

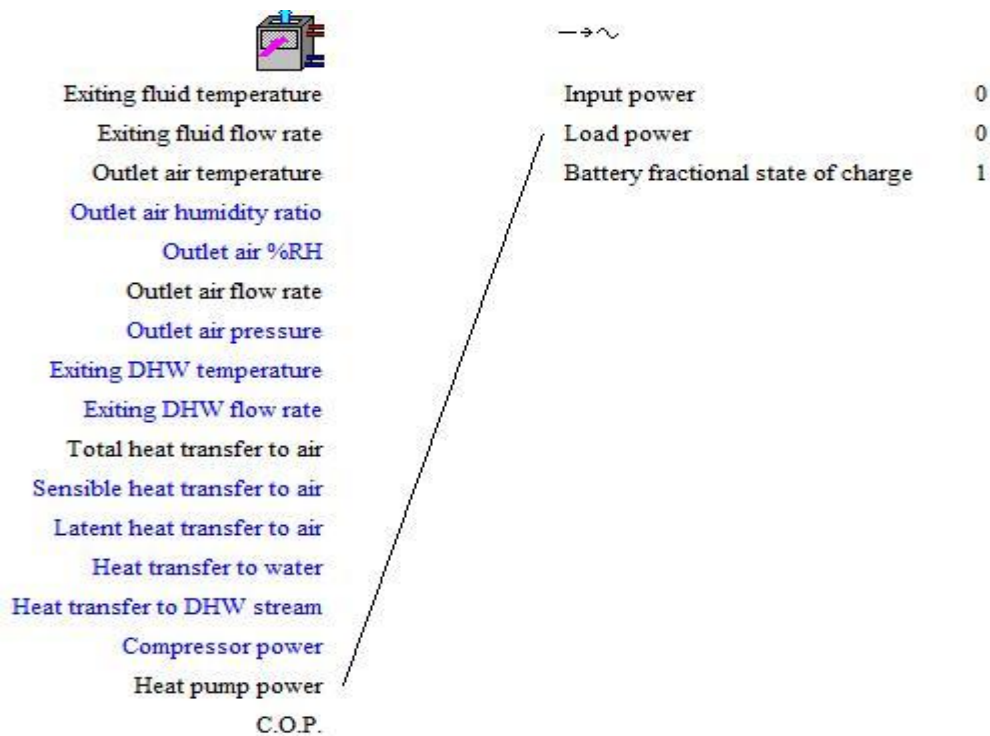
Parameter | Input | Output | Derivative | Special Cards | External Files | Comment

1	Mode	2	-	More...
2	Cell Energy Capacity	120	Ah	More...
3	Cells in parallel	1	-	More...
4	Cells in series	6	-	More...
5	Charging efficiency	0.9	-	More...
6	Max. current per cell charging	3.33	amperes	More...
7	Max. current per cell discharge	-3.33	amperes	More...
8	Max. charge voltage per cell	2.5	V	More...
9	Calculate discharge cutoff voltage	-1	-	More...

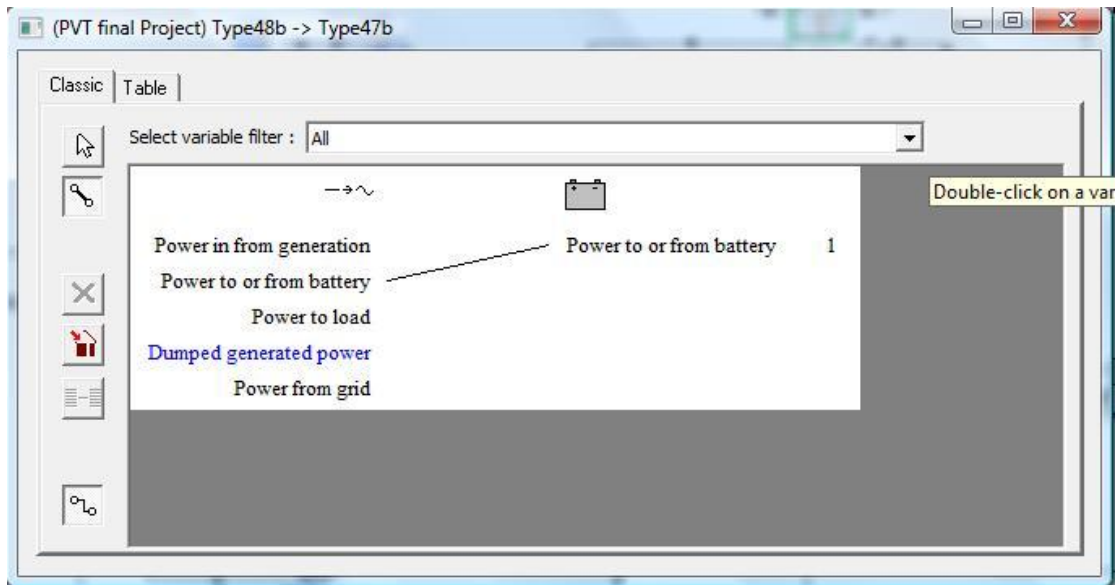
Εικόνα 4.41: Επεξεργασία παραμέτρων μπαταρίας



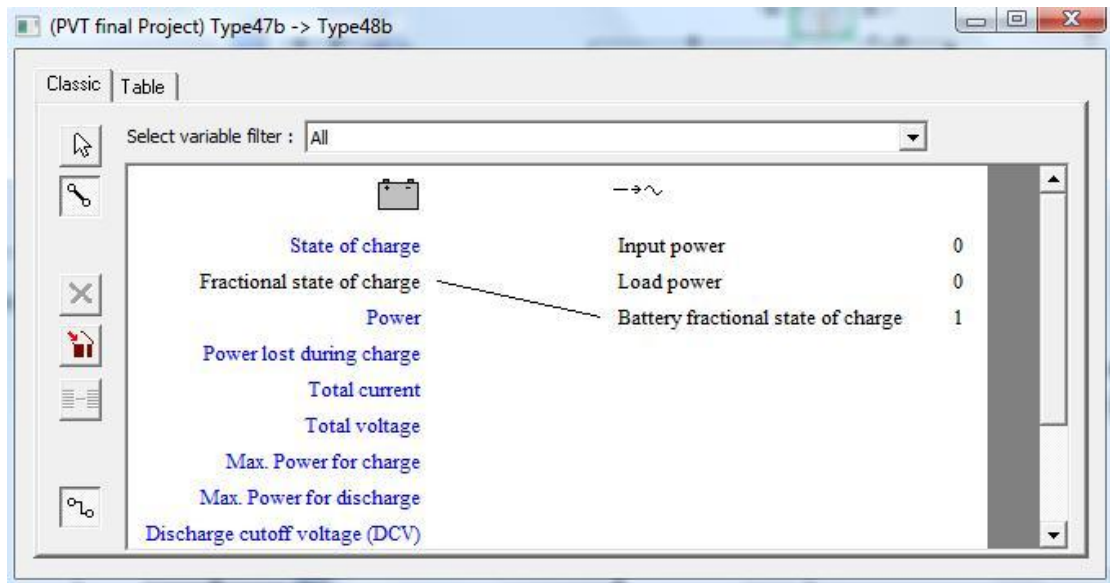
Εικόνα 4.42: Συνδεσμολογία θερμοφωτοβολταϊκού - inverter



Εικόνα 4.43: Συνδεσμολογία αντλίας θερμότητας - inverter

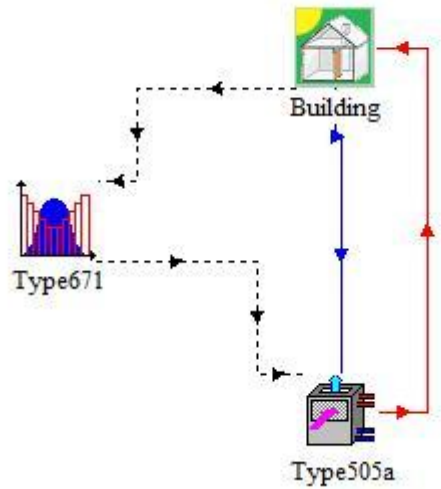


Εικόνα 4.44: Συνδεσμολογία inverter - μπαταρίας



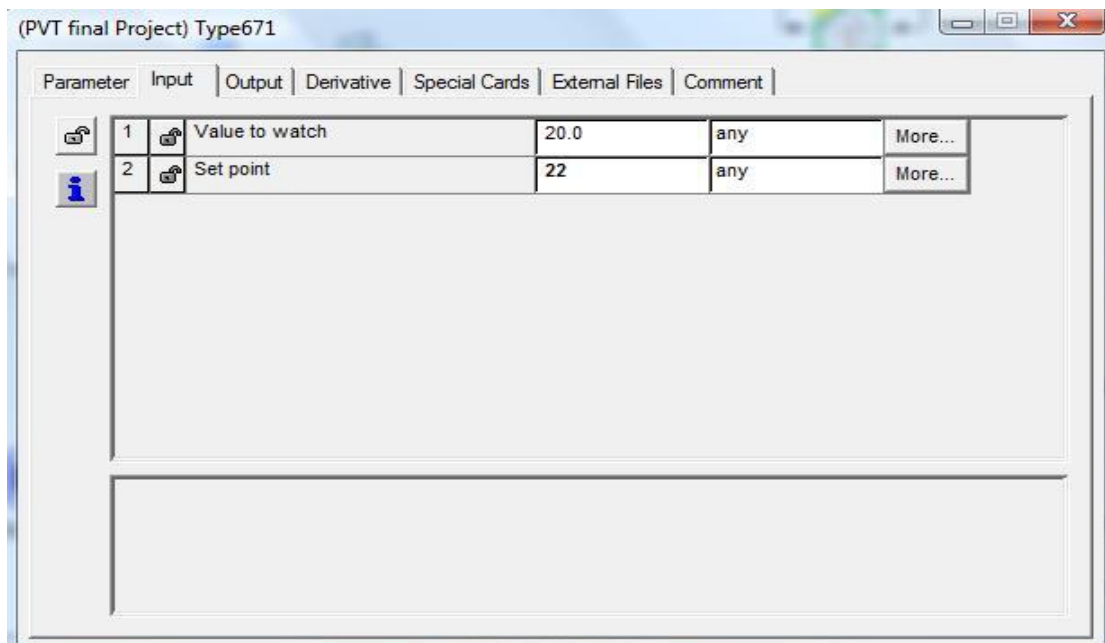
Εικόνα 4.45: Συνδεσμολογία μπαταρίας - inverter

- Σύνδεση κτιρίου – αντλίας θερμότητας

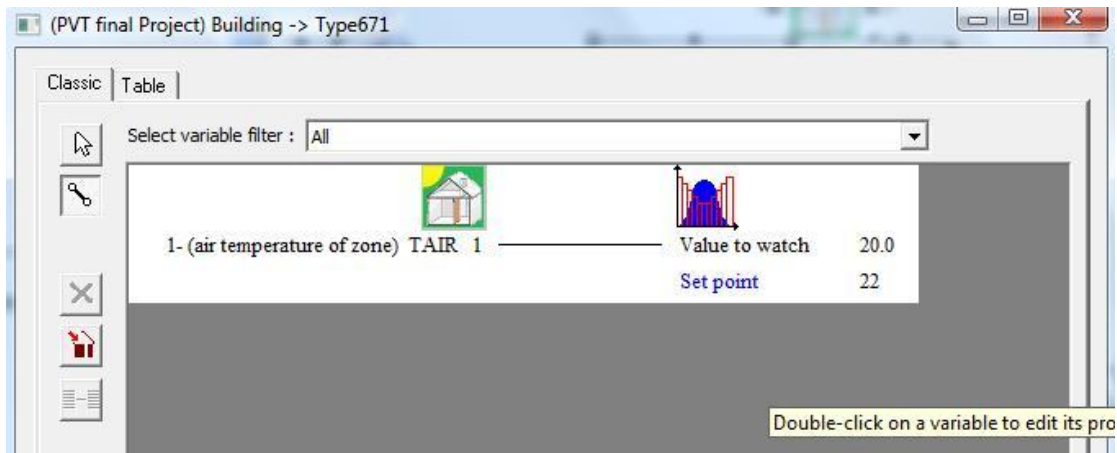


Εικόνα 4.46: Σύνδεση Building – Heat Pump

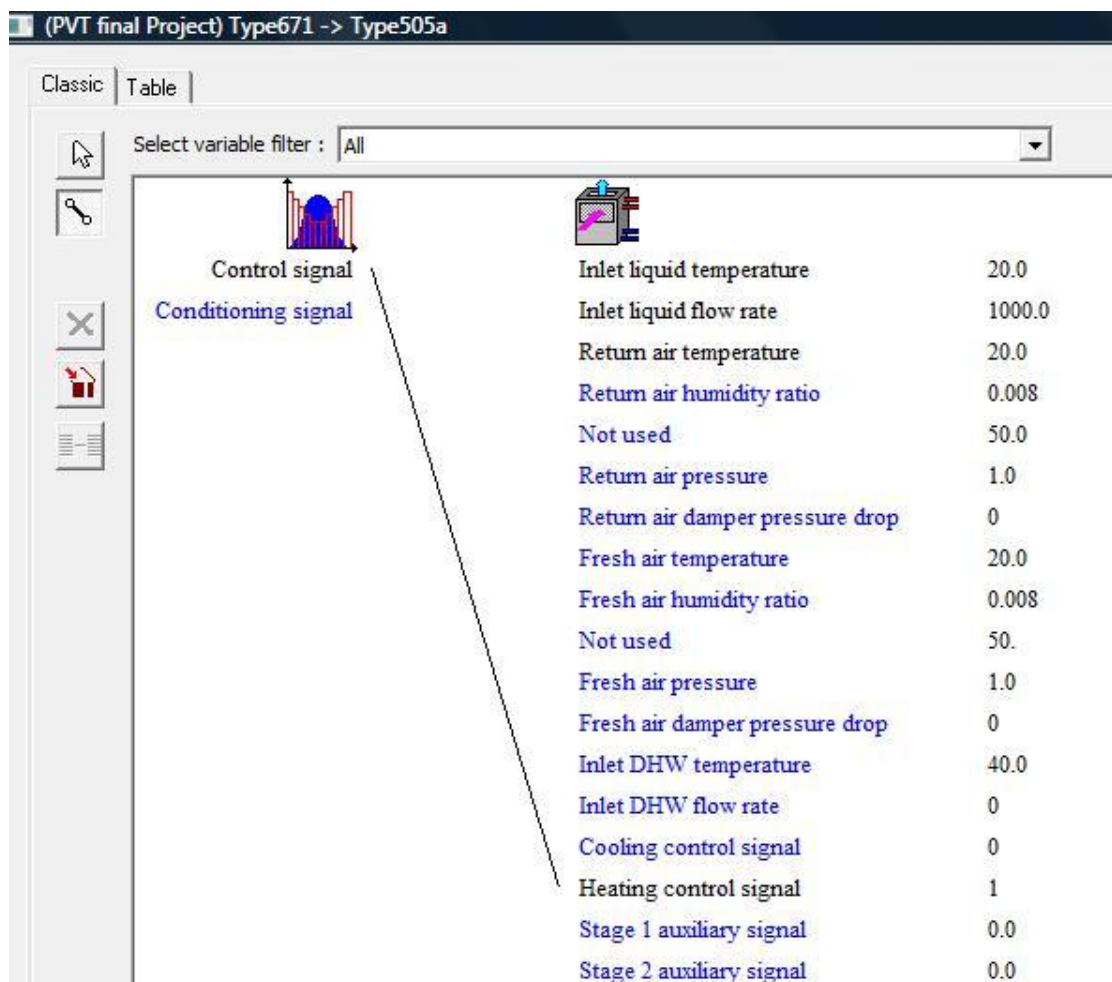
Στη σύνδεση αυτή προσθέσαμε έναν θερμοστάτη (Type671) ώστε να ορίσουμε σε ποιά θερμοκρασία θα ξεκινά η θέρμανση του κτιρίου από την αντλία θερμότητας. Το σημείο που ορίσαμε (set point) ήταν οι 22°C.



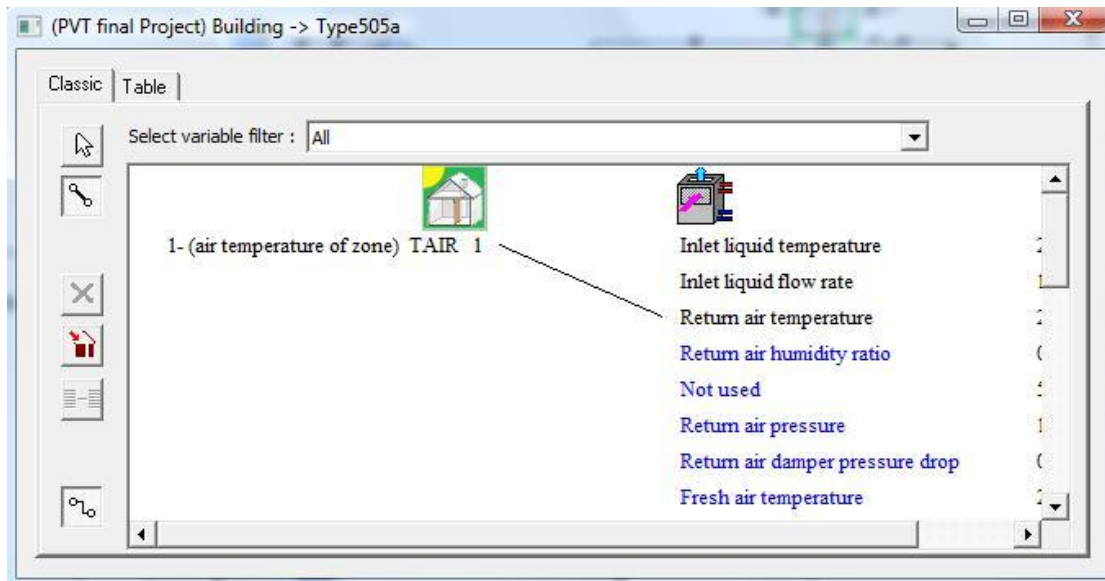
Εικόνα 4.47: Ρύθμιση θερμοστάτη



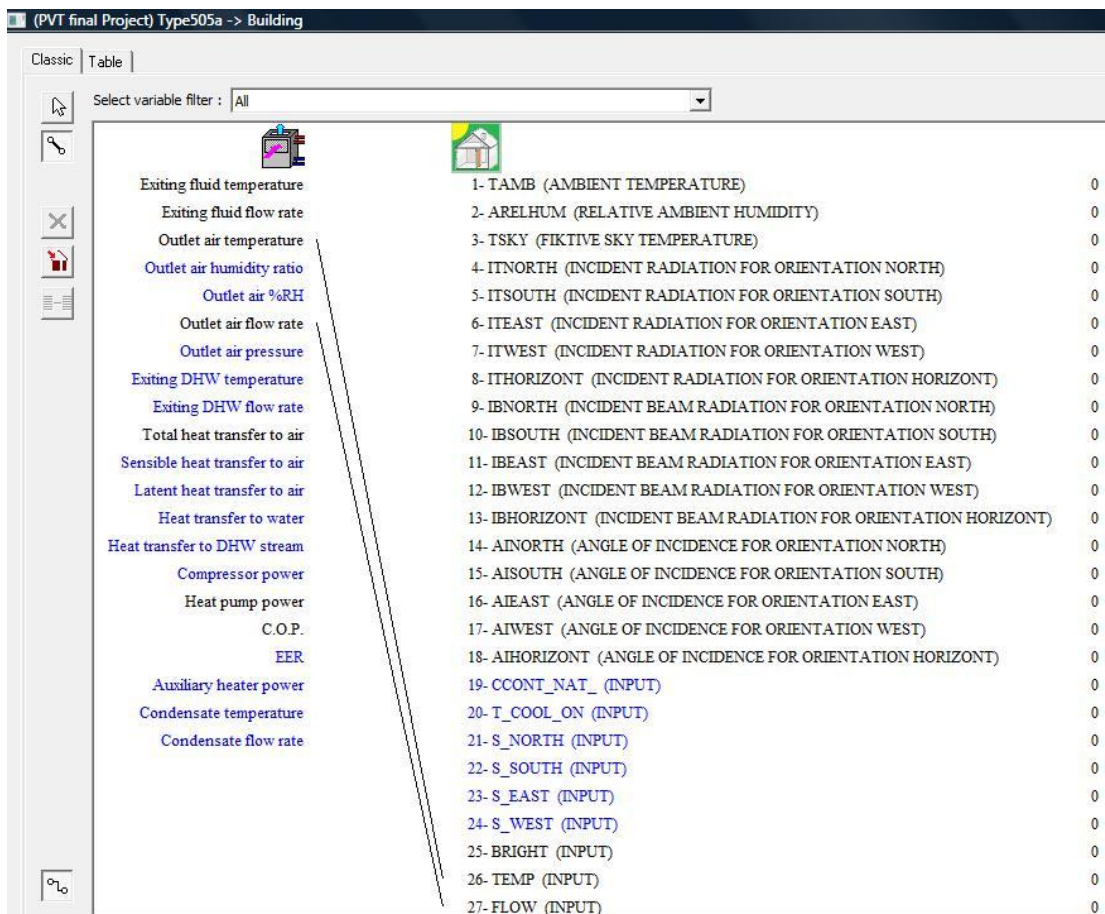
Εικόνα 4.48: Συνδεσμολογία κτιρίου - θερμοστάτη



Εικόνα 4.49: Συνδεσμολογία θερμοστάτη – αντλίας θερμότητας

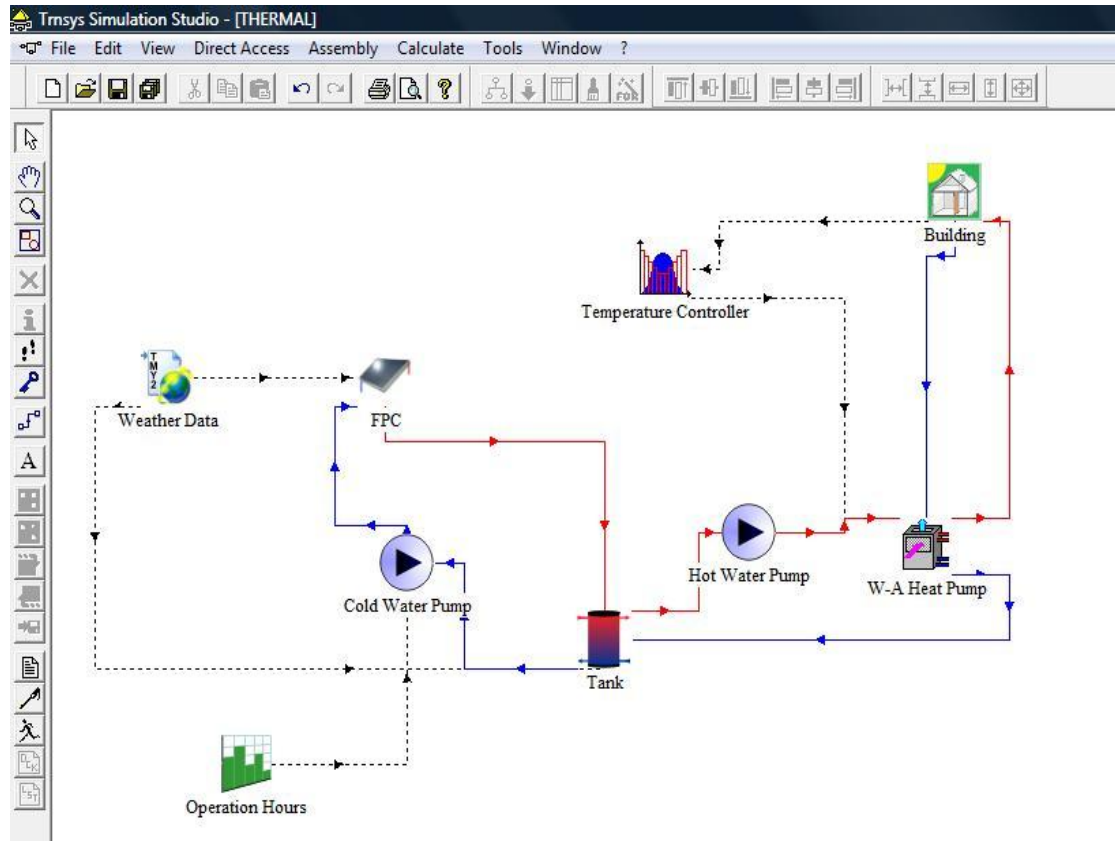


Εικόνα 4.50: Συνδεσμολογία κτιρίου – αντλίας θερμότητας



Εικόνα 4.51: Συνδεσμολογία αντλίας θερμότητας - κτιρίου

-Δεύτερη περίπτωση: υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας νερού – αέρα από θερμικά ηλιακά (FPC)



Εικόνα 4.52: Εγκατάσταση θερμικού ηλιακού – αντλίας θερμότητας

- Σύνδεση μετεωρολογικών δεδομένων – θερμικού ηλιακού



Εικόνα 4.53: Σύνδεση Weather Data - FPC

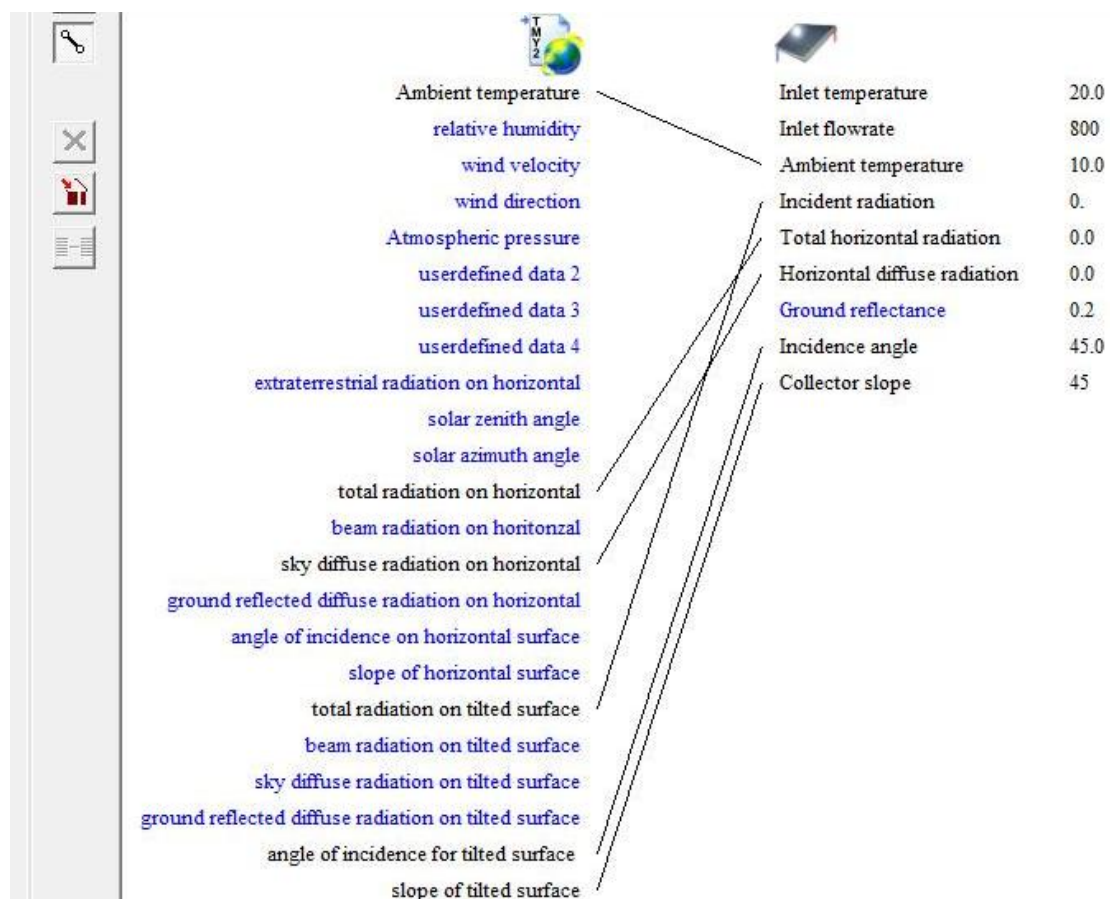
Για τον συλλέκτη επιλέξαμε στην καρτέλα parameter επιφάνεια 20m^2 και στην καρτέλα Input κλίση 45° όπως φαίνεται στο παρακάτω παράθυρο:

(THERMAL) Type1b

Parameter | Input | Output | Derivative | Special Cards | External Files | Comment

1	Number in series	1	-	More...
2	Collector area	20	m ²	More...
3	Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K	More...
4	Efficiency mode	1	-	More...
5	Tested flow rate	40.0	kg/hr.m ²	More...
6	Intercept efficiency	0.80	-	More...
7	Efficiency slope	13.0	kJ/hr.m ² .K	More...
8	Efficiency curvature	0.05	kJ/hr.m ² .K ²	More...
9	Optical mode 2	2	-	More...

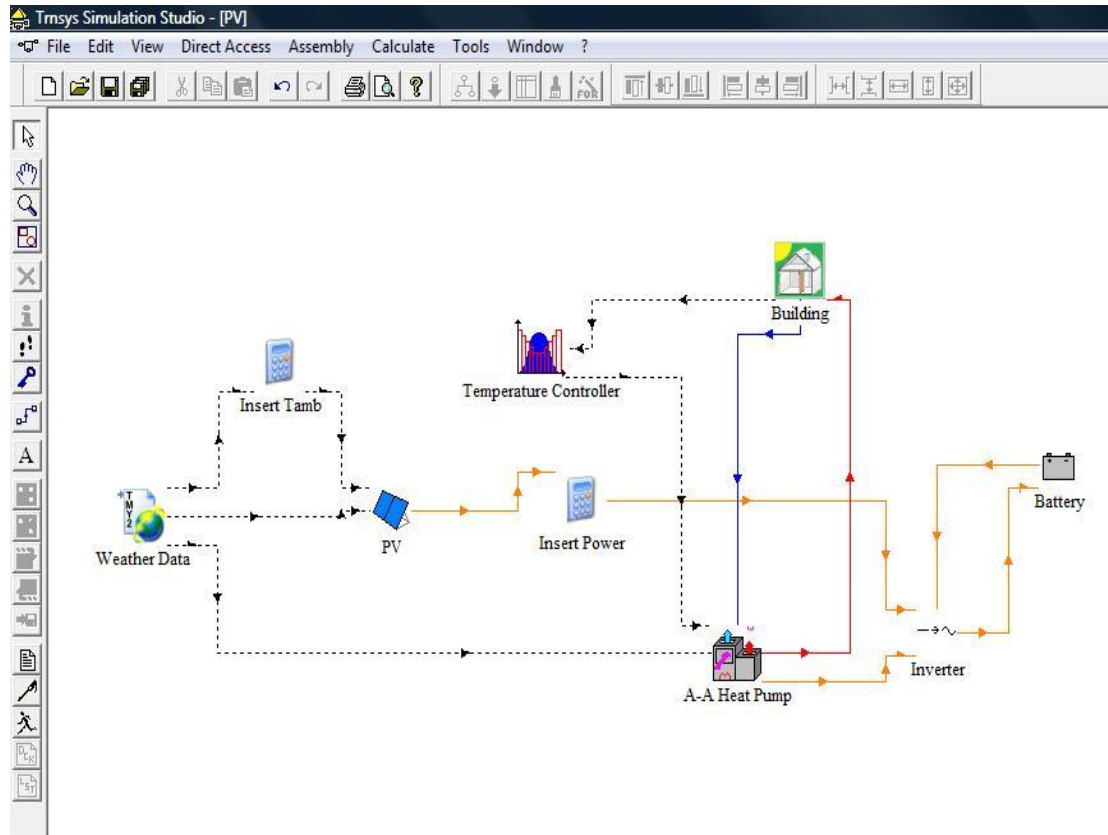
Εικόνα 4.54: Επεξεργασία παραμέτρων θερμικού ηλιακού



Εικόνα 4.55: Συνδεσμολογία μετεωρολογικών δεδομένων – θερμικού ηλιακού

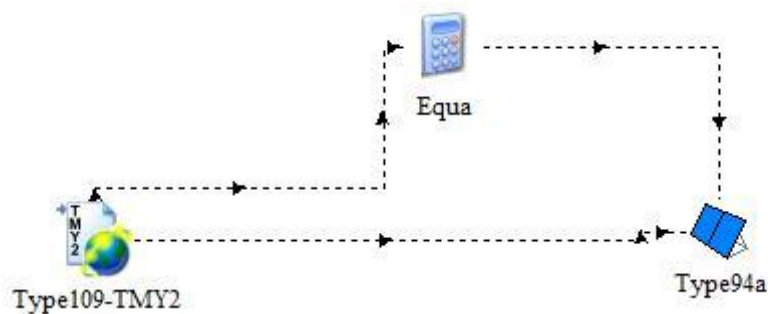
Τα υπόλοιπα στοιχεία της εγκατάστασης είναι όμοια με την προηγούμενη περίπτωση.

-Τρίτη περίπτωση: υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας αέρα - αέρα από φωτοβολταϊκά (PV)



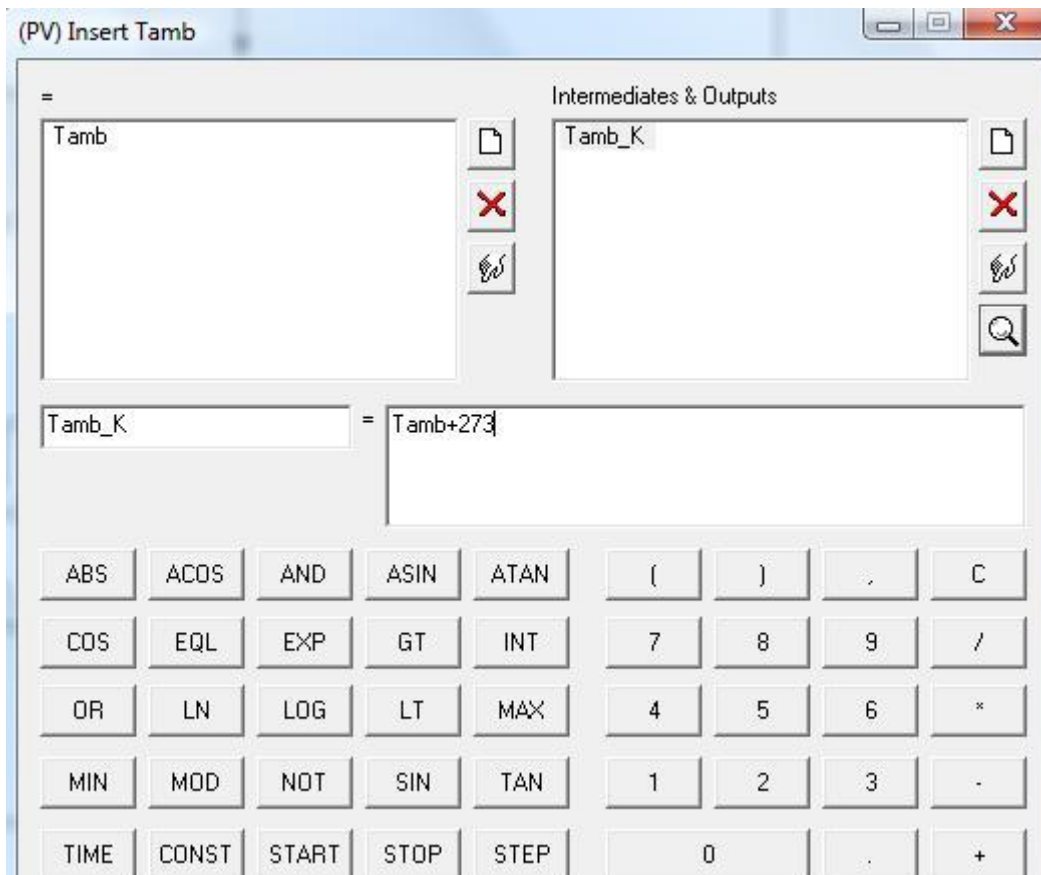
Εικόνα 4.56: Εγκατάσταση φωτοβολταϊκού – αντλίας θερμότητας

- Σύνδεση μετεωρολογικών δεδομένων – φωτοβολταϊκού

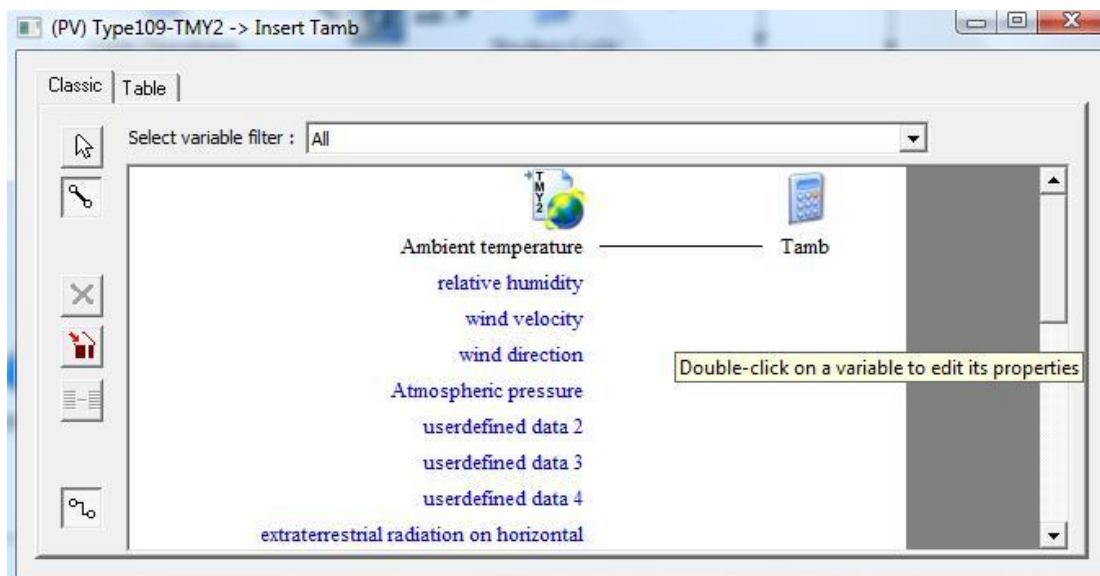


Εικόνα 4.57: Σύνδεση Weather Data - PV

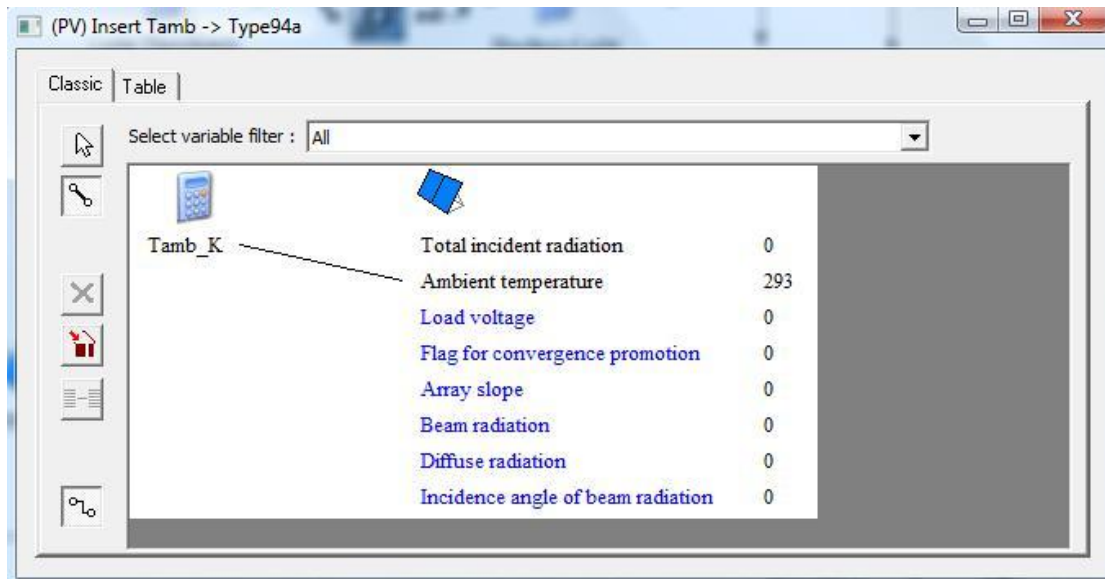
Ο συλλέκτης αυτός δέχεται τη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε Kelvin επομένως χρησιμοποιήσαμε ένα κομπιουτεράκι για τη μετατροπή των μονάδων.



Εικόνα 4.58: Μετατροπή μονάδων για την θερμοκρασία περιβάλλοντος



Εικόνα 4.59: Συνδεσμολογία μετεωρολογικών δεδομένων - κομπιουτεράκι

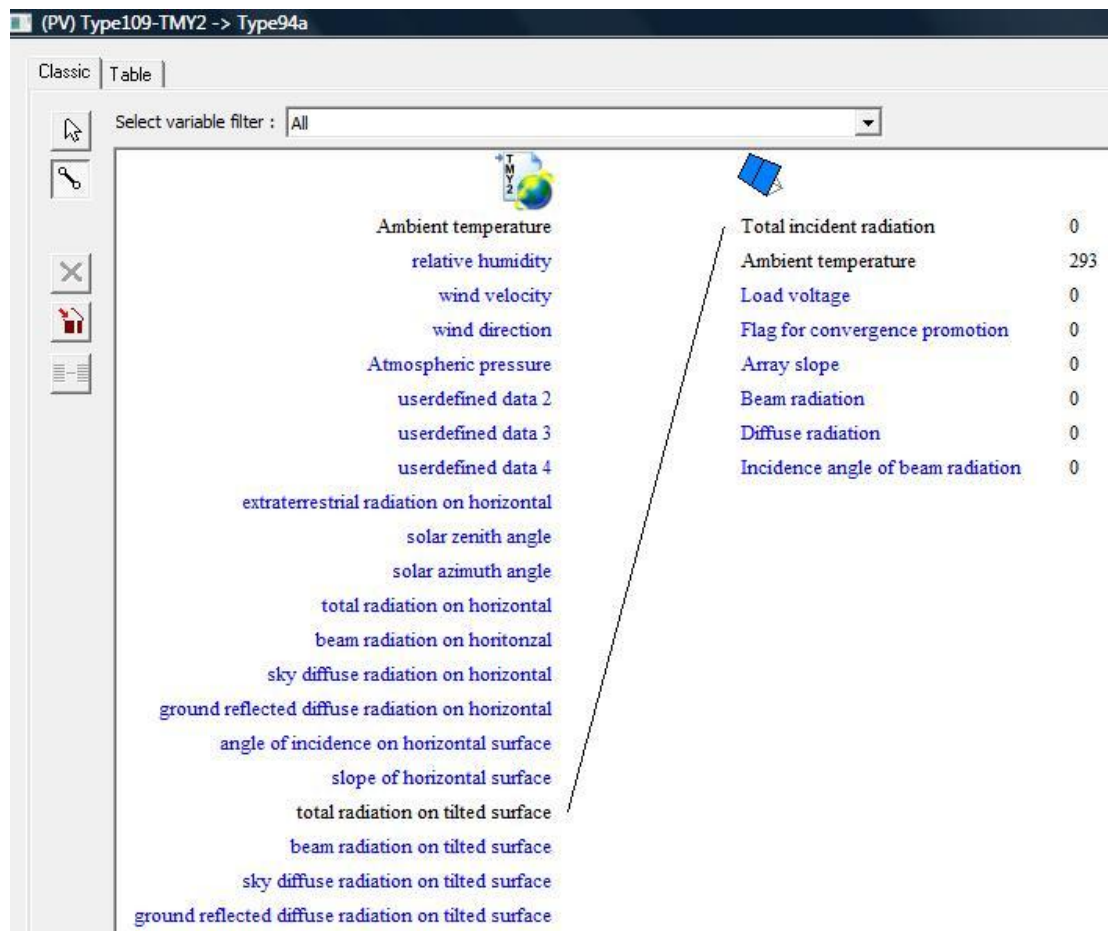


Εικόνα 4.60: Συνδεσμολογία κομπιουτεράκι - φωτοβολταϊκού

Για τα φωτοβολταϊκά επιλέξαμε συνολικά 20 συλλέκτες, 5 σε σειρά και 4 παράλληλα όπως φαίνεται παρακάτω:

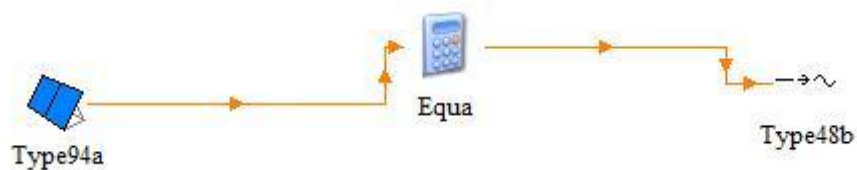
Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
10	☞					More...
11	☞					More...
12	☞					More...
13	☞					More...
14	☞					More...
15	☞					More...
16	☞					More...
17	☞					More...
18	☞					More...

Εικόνα 4.61: Επεξεργασία παραμέτρων φωτοβολταϊκού



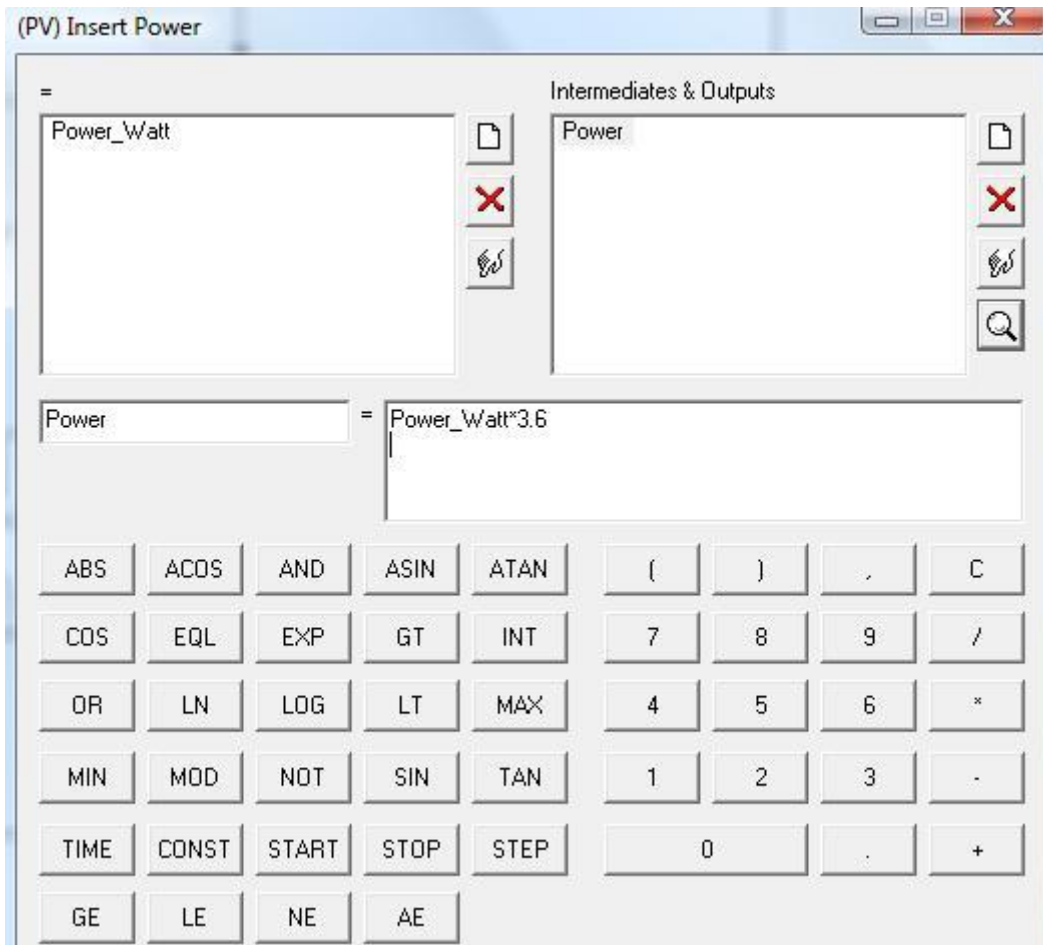
Εικόνα 4.62: Συνδεσμολογία μετεωρολογικών δεδομένων – φωτοβολταϊκού

- Σύνδεση φωτοβολταϊκού – inverter

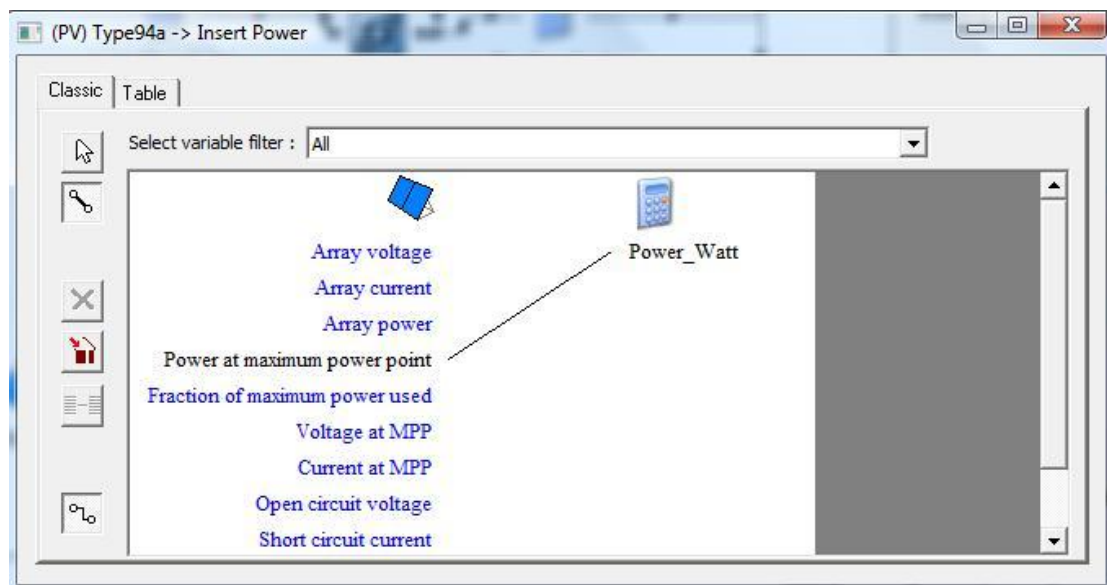


Εικόνα 4.63: Σύνδεση PV – Inverter

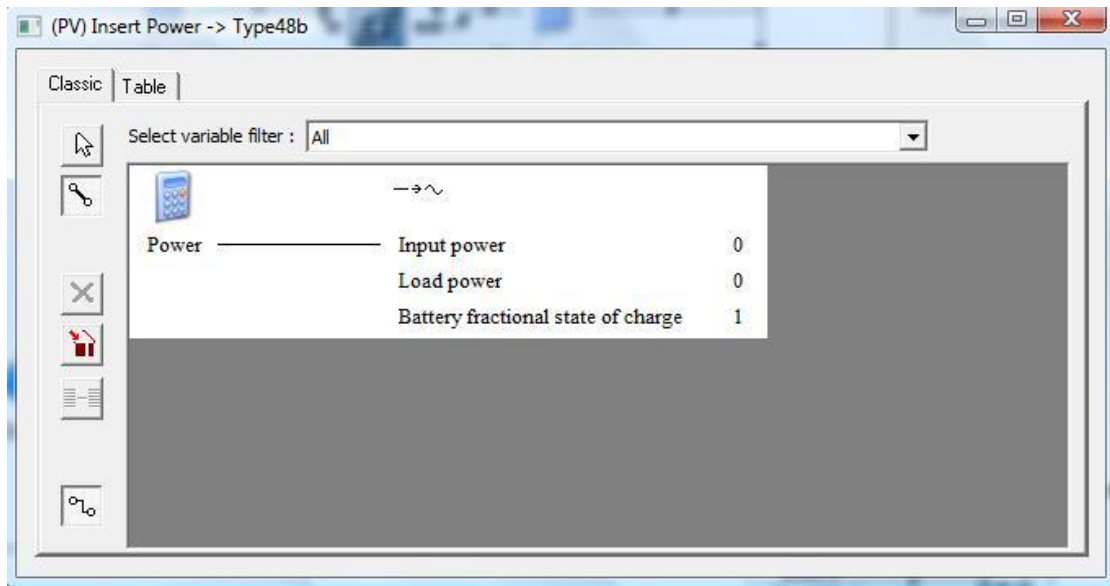
Το φωτοβολταϊκό δίνει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει σε Watt, ενώ το inverter δέχεται KJ/hr, έτσι χρησιμοποιήσαμε ένα κομπιουτεράκι για την μετατροπή των μονάδων.



Εικόνα 4.64: Μετατροπή Watt σε KJ/hr

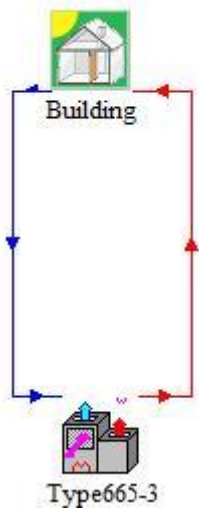


Εικόνα 4.65: Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκού - κομπιουτεράκι



Εικόνα 4.66: Συνδεσμολογία κομπιουτεράκι - inverter

- Σύνδεση αντλίας θερμότητας – κτιρίου



Εικόνα 4.67: Σύνδεση Building – Heat Pump

Για την αντλία θερμότητας επιλέξαμε στην καρτέλα parameter παροχή αέρα 0,7 m³/sec και ενεργοποιήσαμε την λειτουργία θέρμανσης.

(PV) Type665-3

Parameter | Input | Output | Derivative | Special Cards | External Files | Comment

10	Specific heat of air stream	1.007		kJ/kg.K	More...
11	Scale factor for heat pump	1.0		-	More...
12	Total air flow rate	0.7		m ³ /s	More...
13	Rated indoor fan power	0.186417		kW	More...
14	Rated outdoor fan power	0.207139		kW	More...
15	Auxiliary heat mode	1		-	More...
16	Capacity - stage 1 heater	16200		kJ/hr	More...
17	Capacity - stage 2 heater	16200.		kJ/hr	More...

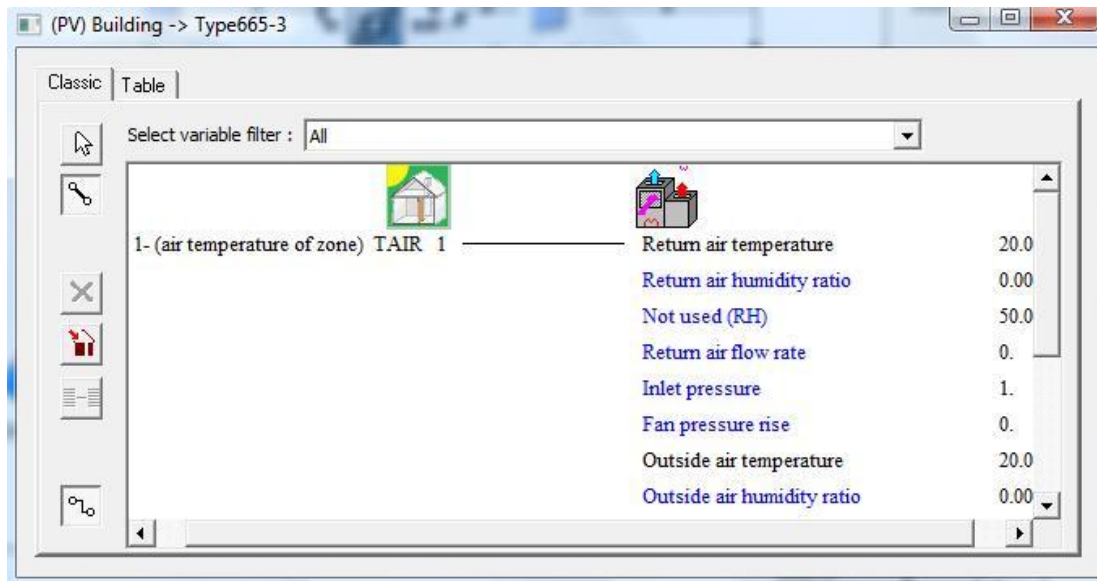
Εικόνα 4.68α: Επεξεργασία παραμέτρων αντλίας θερμότητας

(PV) Type665-3

Parameter | Input | Output | Derivative | Special Cards | External Files | Comment

9	Not used (%RH)	50.0		% (base 100)	More...
10	Ambient (sink) temperature	20.0		C	More...
11	Cooling control signal	0.		-	More...
12	Heating control signal	1		-	More...
13	Fan control signal	0.0		-	More...
14	Outside air damper position	0		-	More...
15	Stage 1 supplemental control signal	0		-	More...
16	Stage 2 supplemental control signal	0		-	More...

Εικόνα 4.68β: Επεξεργασία Inputs αντλίας θερμότητας



Εικόνα 4.69: Συνδεσμολογία κτιρίου – αντλίας θερμότητας



Εικόνα 4.70: Συνδεσμολογία αντλίας θερμότητας – κτιρίου

Επίσης για το inverter αυξήσαμε την ισχύ του σε 3KW και για τις μπαταρίες χρειαστήκαμε 6 σε σειρά, χωρητικότητας 70 Ah.

The screenshot shows a software window titled "(PV) Type48b" with a tabbed interface. The "Parameter" tab is active, displaying a table of inverter settings. The table has columns for a parameter ID, a name, a value, a unit, and a "More..." link. The parameters are:

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Mode	1	-			More...
2	Regulator efficiency	0.85	-			More...
3	Inverter efficiency	0.95	-			More...
4	High limit on fractional state of charge (FSOC)	1	-			More...
5	Low limit on FSOC	0	-			More...
6	charge to discharge limit on FSOC	0.85	-			More...
7	Inverter ouput power capacity	3	kW			More...

Εικόνα 4.71: Επεξεργασία παραμέτρων inverter

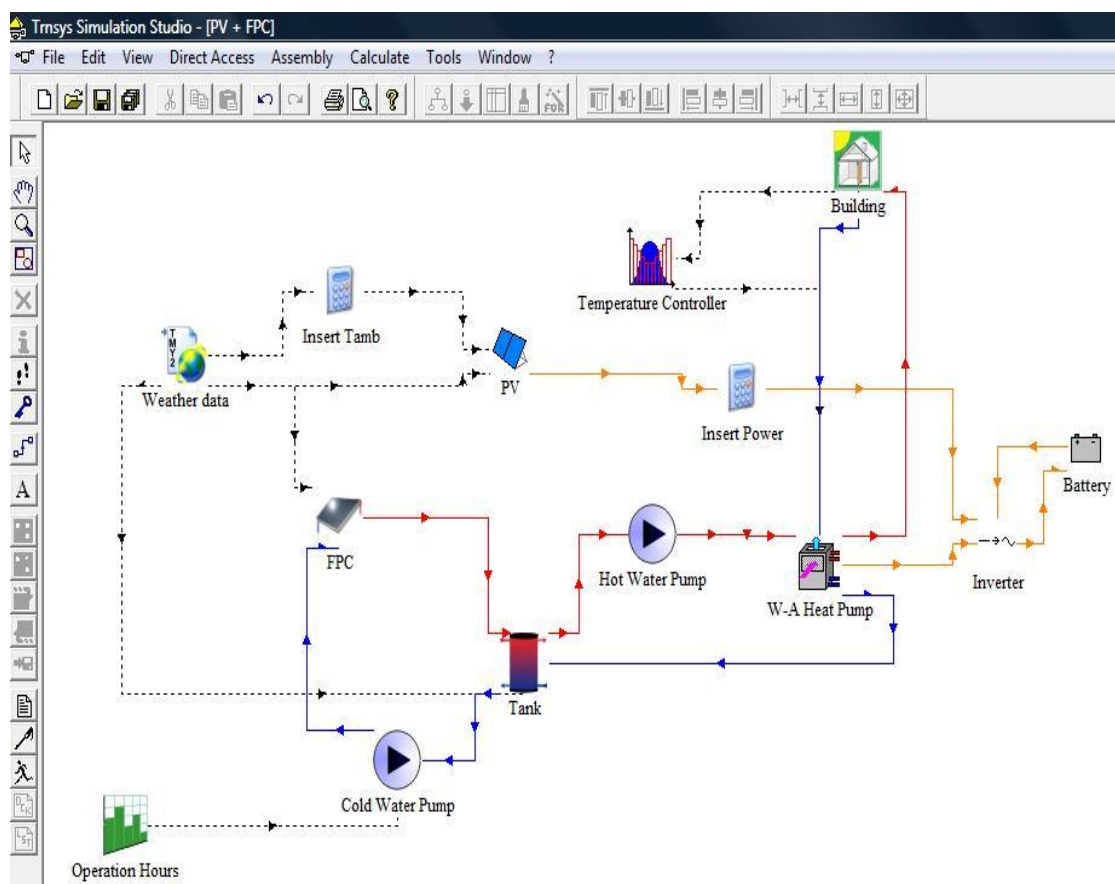
The screenshot shows a software window titled "(PV) Type47b" with a tabbed interface. The "Parameter" tab is active, displaying a table of battery settings. The table has columns for a parameter ID, a name, a value, a unit, and a "More..." link. The parameters are:

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Mode	2	-			More...
2	Cell Energy Capacity	70	Ah			More...
3	Cells in parallel	1	-			More...
4	Cells in series	6	-			More...
5	Charging efficiency	0.9	-			More...
6	Max. current per cell charging	3.33	amperes			More...
7	Max. current per cell discharge	-3.33	amperes			More...
8	Max. charge voltage per cell	2.5	V			More...
9	Calculate discharge cutoff voltage	-1	-			More...

Εικόνα 4.72: Επεξεργασία παραμέτρων μπαταρίας

Οι μπαταρίες είναι 6 σε σειρά χωρητικότητας 70 Ah. Οι υπόλοιπες συνδέσεις με τα διάφορα στοιχεία της εγκατάστασης είναι όμοια με την πρώτη περίπτωση.

-Τέταρτη περίπτωση: υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας νερού – αέρα από συνδυασμό θερμικών ηλιακών (FPC) και φωτοβολταϊκών (PV)



Εικόνα 4.73: εγκατάσταση συνδυασμού FPC, PV – αντλίας θερμότητας

Για τα θερμικά ηλιακά πήραμε επιφάνεια 20 m^2

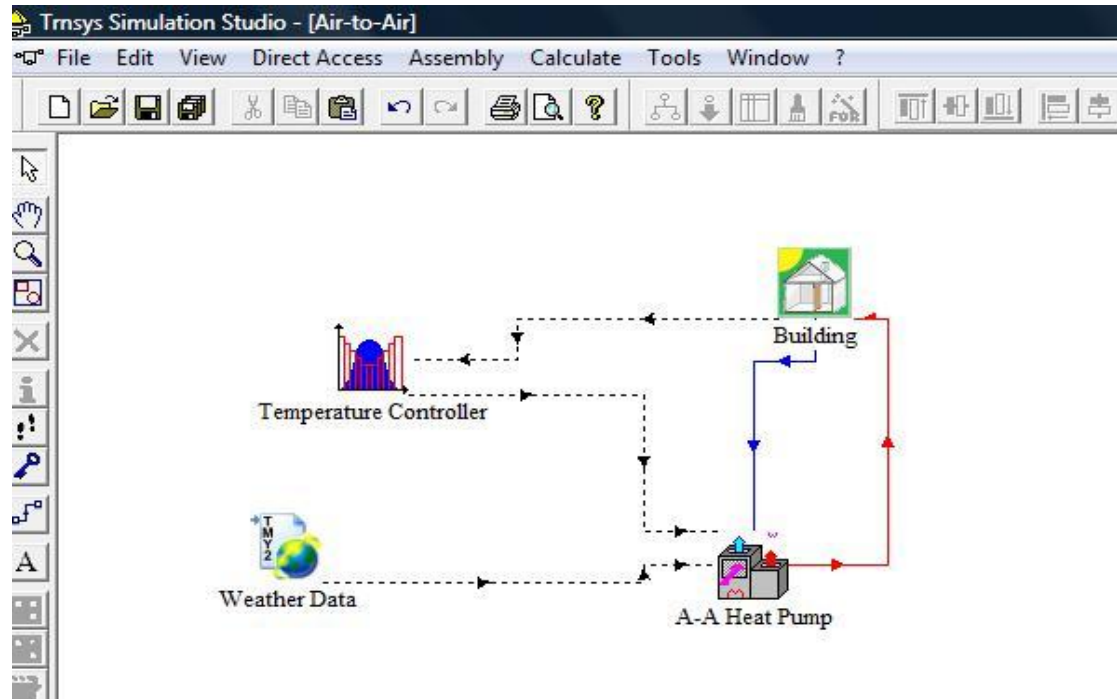
Για τα φωτοβολταϊκά πήραμε επιφάνεια 10 m^2

Το δοχείο αδρανείας είναι όγκου 1 m^3

Το inverter είναι ισχύος 3 KW

Οι μπαταρίες είναι 6 σε σειρά χωρητικότητας 16,7 Ah. Τα υπόλοιπα στοιχεία και η συνδεσμολογία τους είναι όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις.

-Πέμπτη περίπτωση: αντλία θερμότητας αέρα – αέρα συνδεδεμένη μόνο με το δίκτυο



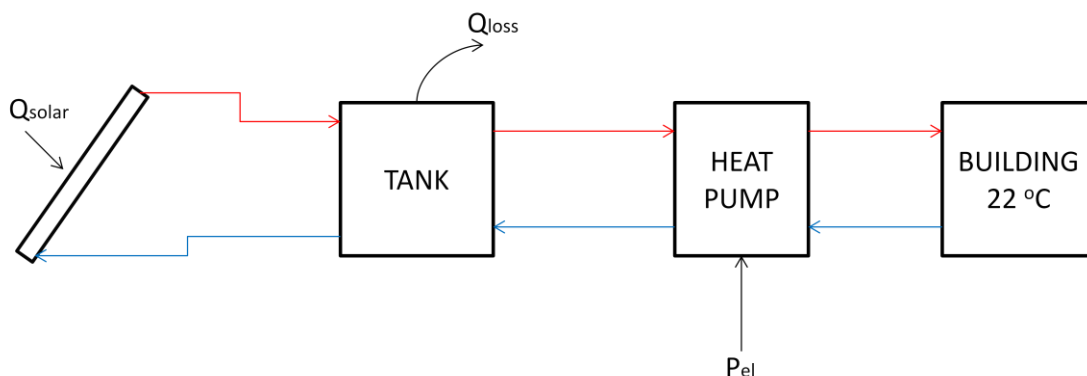
Εικόνα 4.74: Εγκατάσταση αντλίας θερμότητας

Όπου τα στοιχεία και η συνδεσμολογία τους έχουν παρουσιαστεί στις προηγούμενες περιπτώσεις.

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που έγινε στο TRNSYS. Η προσομοίωση αφορά εναλλακτικούς τρόπους θέρμανσης καθ' όλη την διάρκεια του Χειμώνα και συγκεκριμένα από το μήνα Νοέμβριο έως και τον Απρίλιο, όπου οι κλιματολογικές συνθήκες στην Ελλάδα και ιδιαίτερα στην Αθήνα που έγιναν οι προσομοιώσεις, επιβάλλουν τη χρησιμοποίηση κάποιας πηγής θέρμανσης. Σε όλες τις περιπτώσεις η εγκατάσταση περιελάμβανε αντλία θερμότητας (heat pump) που όπως αναλύσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο αποτελεί το πλέον διαδεδομένο τρόπο θέρμανσης σχεδόν σε όλα τα σύγχρονα κτίρια. Η βασική ιδέα ήταν μέσω διαφόρων τύπων ηλιακών συλλεκτών να τροφοδοτήσουμε ένα δοχείο (tank) συγκέντρωσης νερού, που αυτό με την σειρά του θα βοηθούσε την αντλία θερμότητας, ώστε αυτή να μην αναρροφά αέρα κατευθείαν από το περιβάλλον αλλά θερμότερο μέσω της συναλλαγής της με το δοχείο (εικόνα 5.1). Με αυτόν τον τρόπο μειώνουμε την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για θέρμανση (P_{el}) και αυξάνουμε τον συντελεστή συμπεριφοράς (COP). Η διαστασιολόγηση όλων των στοιχείων της εγκατάστασης τελικά, έγινε αφενός με ενεργειακά κριτήρια και αφετέρου με κριτήρια ελαχιστοποίησης του κόστους. Αρχικά αναλύονται τα ενεργειακά δεδομένα του κτιρίου όπως αυτά διαμορφώθηκαν με τα δομικά υλικά και γενικότερα την μορφή του (ανοίγματα, σκίαση κλπ). Ενώ στην συνέχεια παρουσιάζεται η βασική περίπτωση της εργασίας, η υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας από θερμοφωτοβολταϊκό. Ακολουθούν οι υπόλοιπες πιθανές εγκαταστάσεις και σχετική αξιολόγησή τους, ώστε να βρεθεί τελικά ο οικονομικότερος τρόπος θέρμανσης μέσα από την σύγκρισή τους.



Διάγραμμα 5.1: Υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας από ηλιακό συλλέκτη

5.2 Ανάλυση κτιρίου

Παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο οι τροποποιήσεις που έγιναν μέσα στο κτίριο για την καλύτερη συμπεριφορά του από πλευράς θέρμανσης. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά οι ιδιότητες όλων των δομικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν όπως αυτές δίνονται από το πρόγραμμα.

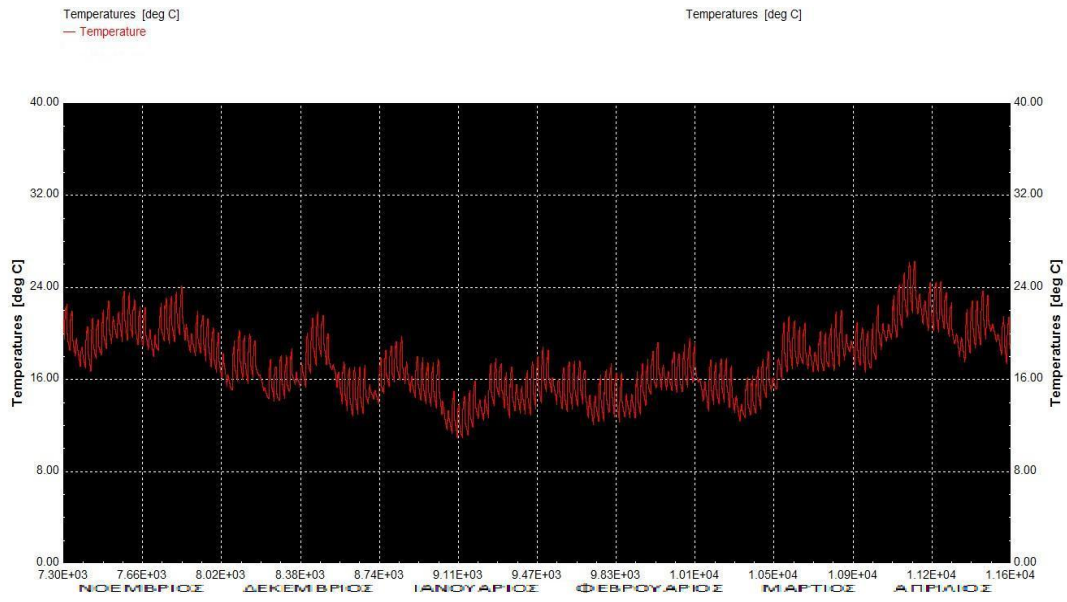
Είδος υλικού	K (W/m K)	C _p (KJ/kg K)	ρ (kg/m ³)
Μόνωση	0,04	0,8	40
Σοβάς	1,389	1,0	2000
Σκυρόδεμα	2,1	0,8	2400
Τούβλο	0,889	1,0	1800
Γύψος	0,21	1,0	1200
Πάτωμα	0,07	1,0	800
Πέτρα	1,389	1,0	2000

Πίνακας 5.1: Ιδιότητες δομικών υλικών (συντ. θερμικής αγωγιμότητας, ειδική θερμοχωρητικότητα, πυκνότητα)

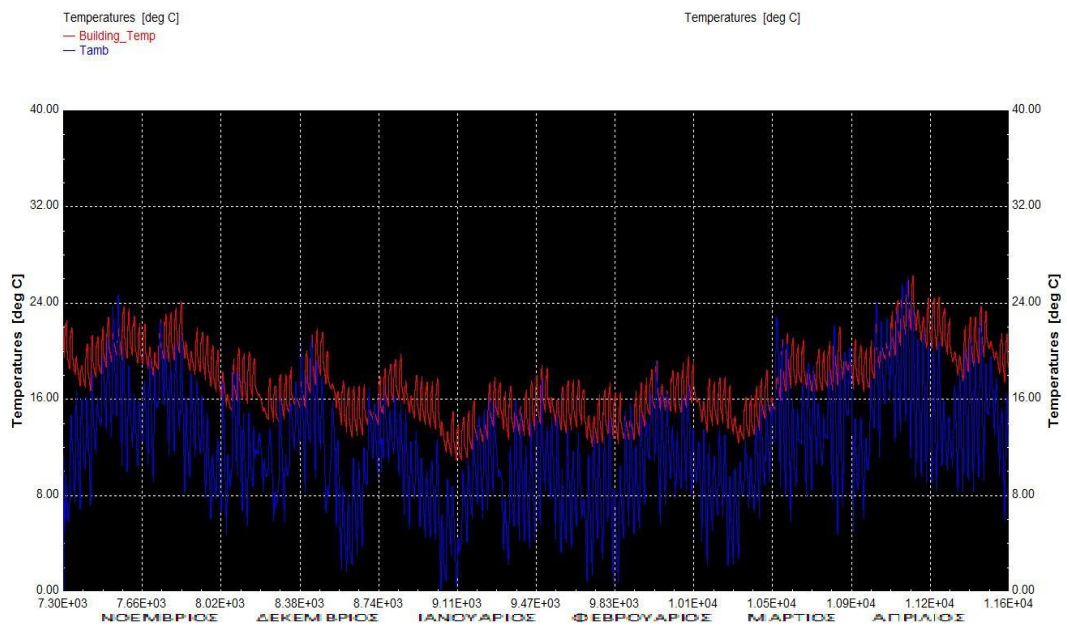
Έτσι διαμορφώθηκε η ολική θερμική διαπερατότητα για την οροφή, το δάπεδο και τους εξωτερικούς χώρους. Συγκεκριμένα:

- Η οροφή που αποτελείται από σκυρόδεμα, μόνωση και σοβά έχει ένα τελικό πάχος ίσο με 0,315m και ολική θερμική διαπερατότητα $U=0,36 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
- Το δάπεδο που αποτελείται από πάτωμα, πέτρα, σκυρόδεμα και μόνωση έχει ένα τελικό πάχος ίσο με 0,425m και $U=0,313 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
- Οι εξωτερικοί τοίχοι που αποτελούνται από σοβά, τούβλο και μόνωση έχουν ένα τελικό πάχος ίσο με 0,35m και $U=0,406 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Με τις επεξεργασίες αυτές μπορούμε τώρα να δούμε το θερμοκρασιακό προφίλ του κτιρίου κατά την διάρκεια του χειμώνα (διάγραμμα 5.2) χωρίς την επιλογή συστήματος θέρμανσης και το θερμοκρασιακό προφίλ του κτιρίου συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, που έχει μεγάλο ενδιαφέρον καθώς φαίνεται ξεκάθαρα η συμβολή των χαρακτηριστικών που έχουμε επιλέξει στην μείωση των αναγκών του κτιρίου για θέρμανση (διάγραμμα 5.3).



Διάγραμμα 5.2: Χειμερινό προφίλ θερμοκρασίας κτιρίου



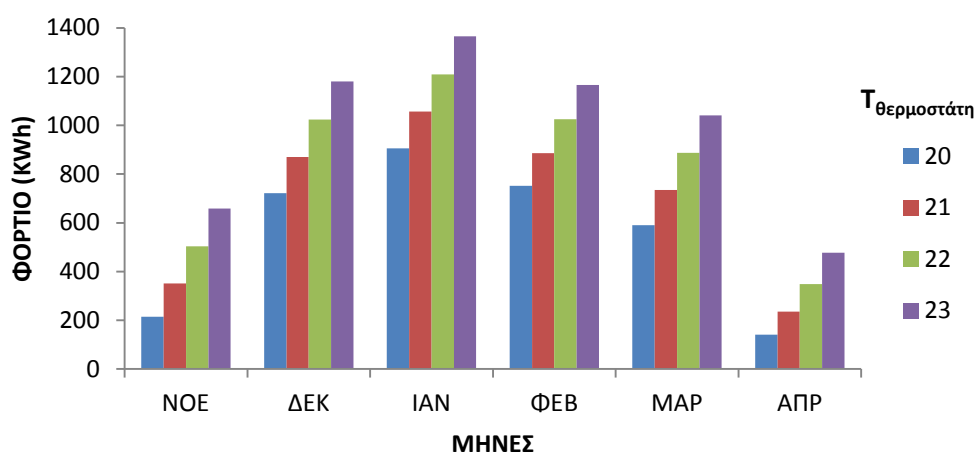
Διάγραμμα 5.3: Χειμερινό προφίλ θερμοκρασίας κτιρίου (Building_Temp) συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Tamb)

Το επόμενο βήμα ήταν να επιλέξουμε την οριακή θερμοκρασία όπου το σύστημα θέρμανσης θα ξεκινά την λειτουργία του. Δοκιμάστηκαν τέσσερις πιθανές θερμοκρασίες και διαπιστώσαμε κάτι αναμενόμενο, δηλαδή ότι όσο αυξάνουμε την ελάχιστη θερμοκρασία του κτιρίου τόσο αυξάνεται και το απαραίτητο φορτίο για θέρμανση του χώρου (πίνακας 5.2). Οι μετρήσεις έγιναν για τις θερμοκρασίες 20,21,22,23 °C, συγκρίνοντας και τα αποτελέσματα ανά μήνα (διάγραμμα 5.4), όπου φάνηκε πως ο πιο απαιτητικός μήνας από άποψη συνολικού φορτίου είναι ο Ιανουάριος ενώ αυτός με την μικρότερη επιβάρυνση είναι ο Απρίλιος.

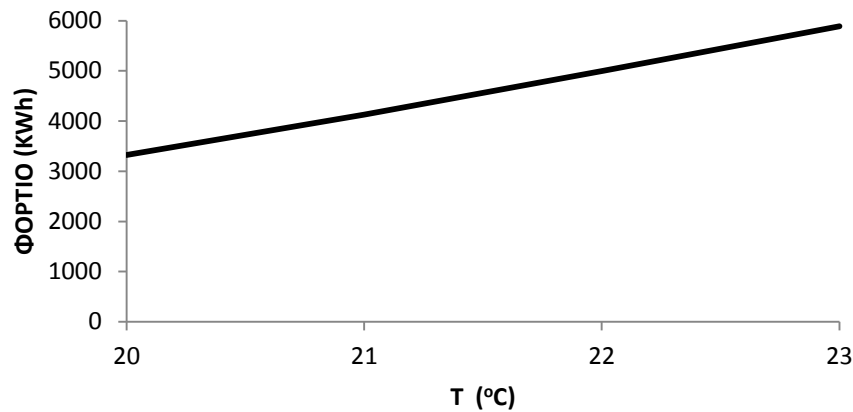
Τελικά επιλέχθηκε ο θερμοστάτης μας να δίνει εντολή για θέρμανση μόλις η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου πέφτει κάτω από 22 °C, η οποία είναι μια τιμή που καλύπτει τα κριτήρια θερμικής άνεσης. Ακολουθεί ο πίνακας με τα αντίστοιχα διαγράμματα.

ΜΗΝΕΣ (kWh)	ΘΕΡΜΟΣΤΑΤΗΣ (°C)			
	20	21	22	23
ΝΟΕ	214	351	503	658
ΔΕΚ	721	870	1024	1180
ΙΑΝ	906	1056	1209	1365
ΦΕΒ	752	886	1025	1165
ΜΑΡ	590	735	887	1041
ΑΠΡ	141	235	349	477
ΣΥΝΟΛΟ	3326	4130	4998	5886

Πίνακας 5.2: Μηνιαίο φορτίο θέρμανσης κτιρίου συναρτήσει της οριακής θερμοκρασίας



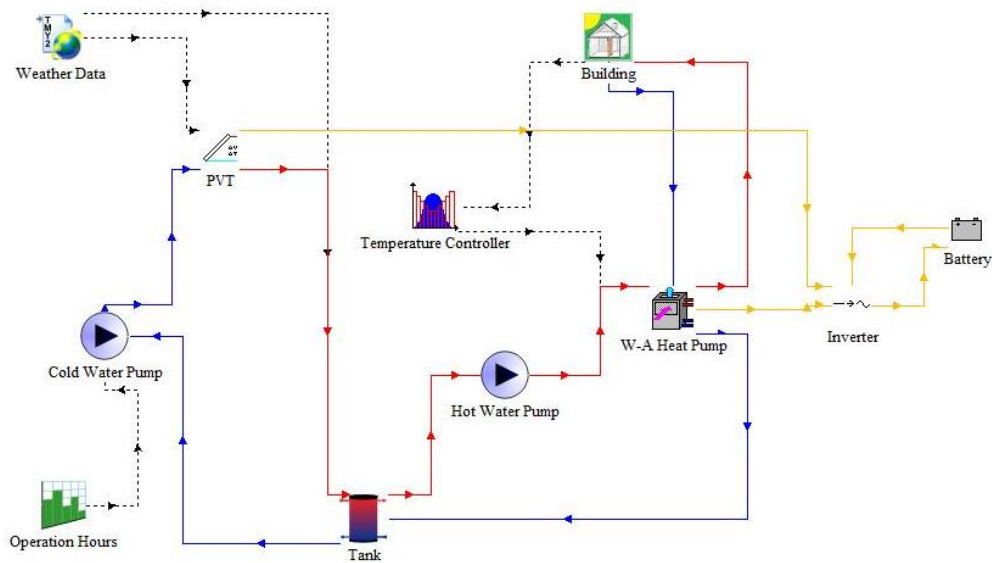
Διάγραμμα 5.4: Μηνιαίο φορτίο θέρμανσης κτιρίου για διάφορες οριακές θερμοκρασίες



Διάγραμμα 5.5: Ετήσιο φορτίο θέρμανσης κτιρίου για διάφορες οριακές θερμοκρασίες

5.3 Υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας νερού-αέρα από θερμοφωτοβολταϊκά (PVT)

Στην εισαγωγή του κεφαλαίου παρουσιάστηκε η γενική ιδέα που στηρίζεται η υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας από ηλιακούς συλλέκτες. Σε αυτήν την περίπτωση, θα αναλύσουμε την υποστήριξη της συγκεκριμένα από θερμοφωτοβολταϊκά που αποτελεί το βασικό αντικείμενο μελέτης της εργασίας. Η αντλία θερμότητας νερού-αέρα που έχει επιλεγεί ως σύστημα θέρμανσης, όχι μόνο θα συναλλάσει θερμότητα με το δοχείο αδρανείας της εγκατάστασης και θα μειώνει την ηλεκτρική της κατανάλωση, αλλά θα προσπαθήσουμε να εκμηδενίσουμε το κόστος λειτουργίας της. Αυτό θα επιτευχθεί αξιοποιώντας τα χαρακτηριστικά των ΦΒ/Θ, δηλαδή αφενός θερμαίνοντας το δοχείο αδρανείας της εγκατάστασης και αφετέρου δίνοντας στην αντλία θερμότητας την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν. Παρακάτω φαίνεται η εγκατάσταση όπως αυτή σχεδιάστηκε στο TRNSYS Simulation Studio.



Εικόνα 5.1: Διάταξη αντλίας θερμότητας – ΦΒ/Θ στο TRNSYS

Αρχικά ασχοληθήκαμε με το στοιχείο (component) του ΦΒ/Θ (type50b) μόνο του για να δούμε τη συμπεριφορά που έχει. Στο προηγούμενο κεφάλαιο δόθηκαν οι τιμές των παραμέτρων του στοιχείου, να σημειώσουμε όμως πως καθοριστική για τους υπολογισμούς είναι η τιμή του βαθμού απόδοσης του κελιού (cell efficiency at reference conditions) που την πήραμε ίση με 0,15, μια τυπική τιμή που δίνει θερμικό και ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης ικανοποιητικό.

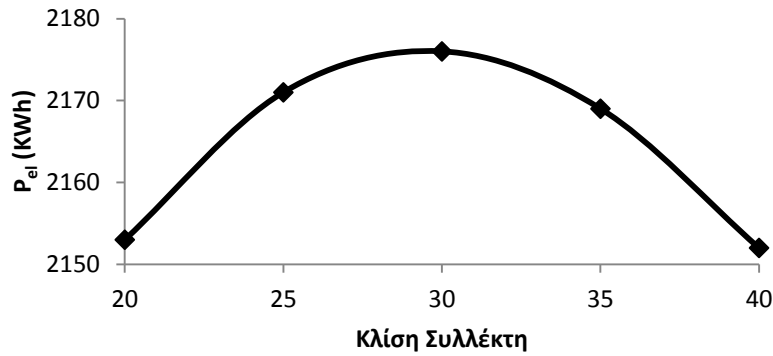
Αφού καθορίστηκαν οι παράμετροι, υπολογίσαμε την βέλτιστη γωνία κλίσης του συλλέκτη από πλευράς απόδοσης. Με δεδομένα:

Επιφάνεια συλλέκτη $A_c = 10m^2$ και παροχή μάζας $\dot{m} = 400 \text{ kg/hr}$

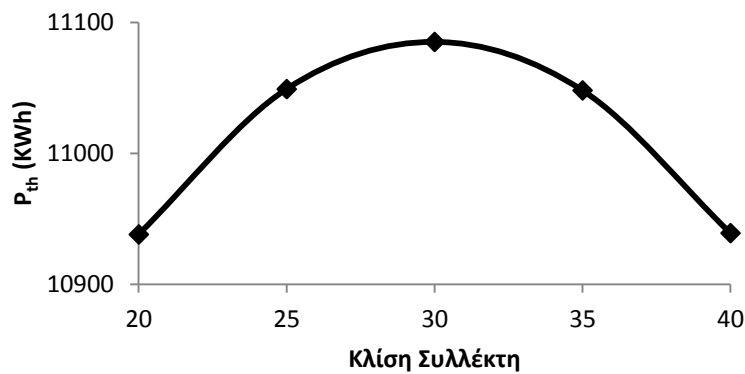
Μεταβάλλοντας την κλίση του συλλέκτη ανά 5° πήραμε τα αποτελέσματα για την ηλεκτρική (P_{el}) και την θερμική ενέργεια (P_{th}) που παράγει ώστε να δούμε που έχουμε βέλτιστη απόδοση.

P_{el} (KWh)	P_{th} (KWh)	Κλίση Συλλέκτη ($^\circ$)
2153	10938	20
2171	11049	25
2176	11085	30
2169	11048	35
2152	10939	40

Πίνακας 5.3: Ετήσια ηλεκτρική και θερμική ενέργεια συλλέκτη για διάφορες γωνίες κλίσης



Διάγραμμα 5.6: Ετήσια ηλεκτρική ενέργεια συλλέκτη συναρτήσει της γωνίας κλίσης

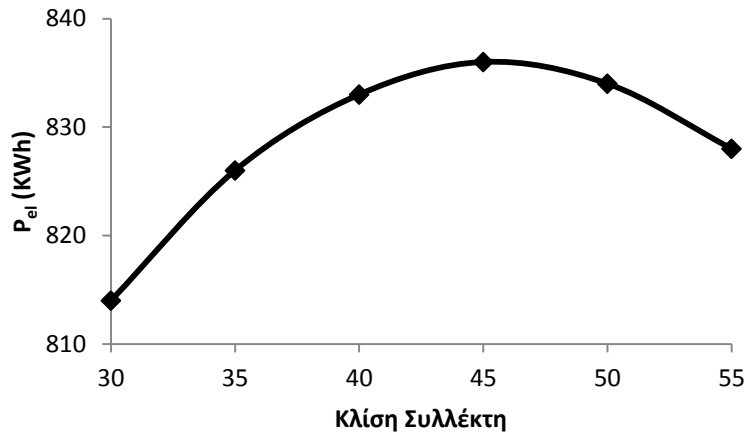


Διάγραμμα 5.7: Ετήσια θερμική ενέργεια συλλέκτη συναρτήσει της γωνίας κλίσης

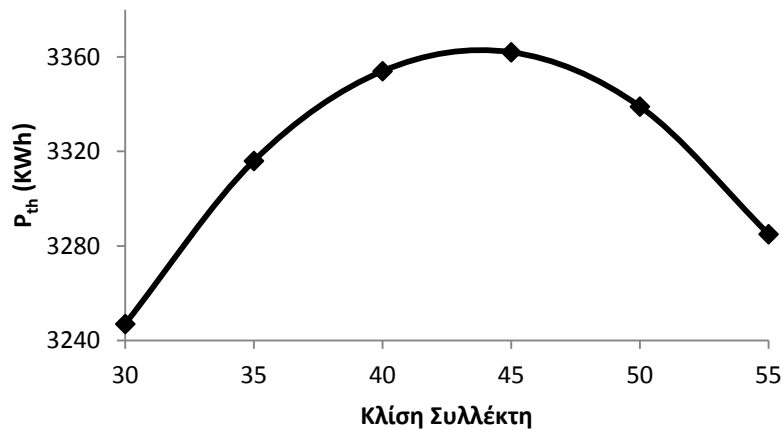
Από τα διαγράμματα 5.6 και 5.7 συμπεραίνουμε πως τόσο η ηλεκτρική ενέργεια όσο και η θερμική γίνονται μέγιστες ετησίως όταν η κλίση του συλλέκτη είναι 30° . Αυτό που μας ενδιαφέρει όμως, στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η γωνία που προσφέρει μέγιστη απόδοση όταν λειτουργεί το σύστημα θέρμανσης (αντλία θερμότητας) δηλαδή από το Νοέμβριο έως και τον Απρίλιο. Επομένως τρέξαμε την προσομοίωση σε αυτό το χρονικό διάστημα και πήραμε τα εξής αποτελέσματα:

P_{el} (KWh)	P_{th} (KWh)	Κλίση Συλλέκτη ($^\circ$)
814	3247	30
826	3316	35
833	3354	40
836	3362	45
834	3339	50
828	3285	55

Πίνακας 5.4: Συνολική ηλεκτρική και θερμική ενέργεια συλλέκτη από Νοέμβριο έως Απρίλιο



Διάγραμμα 5.8: Ηλεκτρική ενέργεια συλλέκτη από Νοέμβριο έως Απρίλιο ανάλογα με την κλίση του



Διάγραμμα 5.9: Θερμική ενέργεια συλλέκτη από Νοέμβριο έως Απρίλιο ανάλογα με την κλίση του

Απ' τα διαγράμματα 5.8 και 5.9 παρατηρούμε πώς η βέλτιστη γωνία κλίσης για το θερμοφωτοβολταϊκό την χειμερινή περίοδο είναι οι 45° , αυτή θα είναι και η γωνία που θα χρησιμοποιήσουμε.

Στην συνέχεια το επόμενο που κάναμε για να μελετήσουμε την συμπεριφορά του ΦΒ/Θ ήταν να δοκιμάσουμε για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου (T_{in}) τι αποτελέσματα δίνει. Δεδομένα που πήραμε:

- Συλλεκτική επιφάνεια ίδια με πριν: $A_c = 10m^2$
- Στιγμιαία τιμή ολικής ακτινοβολίας σταθερή ίση με: $G_T = 1000 W/m^2$
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος: $T_{amb} = 20^\circ C$
- Παροχή μάζας: $\dot{m} = 400 kg/hr$
- Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης:

$$n_{el} = \frac{Q_{el}}{A_c \cdot G_T} \quad (5.1)$$

- Θερμικός βαθμός απόδοσης:

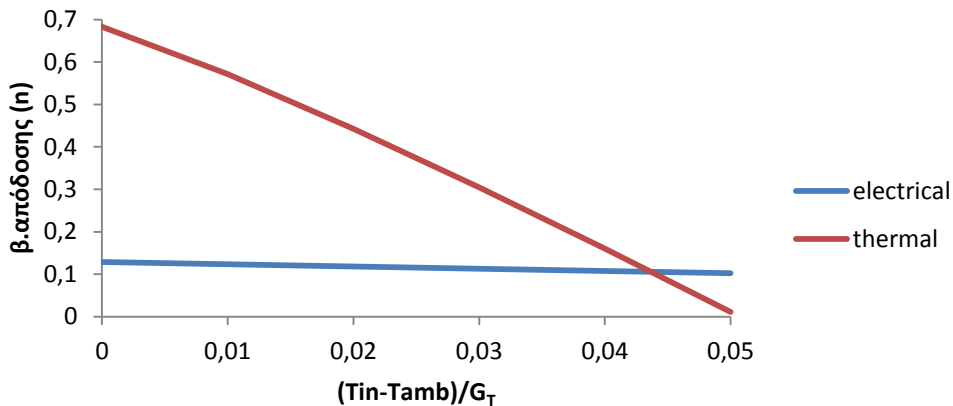
$$n_{th} = \frac{Q_{th}}{A_c \cdot G_T} \quad (5.2)$$

- $x = \frac{T_{in} - T_{amb}}{G_T} \quad (5.3)$

- T_{in} : θερμοκρασία εισόδου στο ΦΒ/Θ
- T_{out} : θερμοκρασία εξόδου απ' το ΦΒ/Θ
- T_{cell} : θερμοκρασία κελιού

$T_{in}(C^\circ)$	$Q_{el} (W)$	$Q_{th} (W)$	$T_{out} (C^\circ)$	T_{cell}	n_{el}	n_{th}	x
20	1285	6831	24,08	24,61	0,1285	0,6831	0
30	1234	5714	33,41	33,38	0,1234	0,5714	0,01
40	1181	4425	42,64	42,51	0,1181	0,4425	0,02
50	1129	3046	51,81	51,68	0,1129	0,3046	0,03
60	1075	1605	60,96	60,87	0,1075	0,1605	0,04
70	1022	114	70,07	70,06	0,1022	0,0114	0,05

Πίνακας 5.5: Απόδοση του ΦΒ/Θ για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου (T_{in})



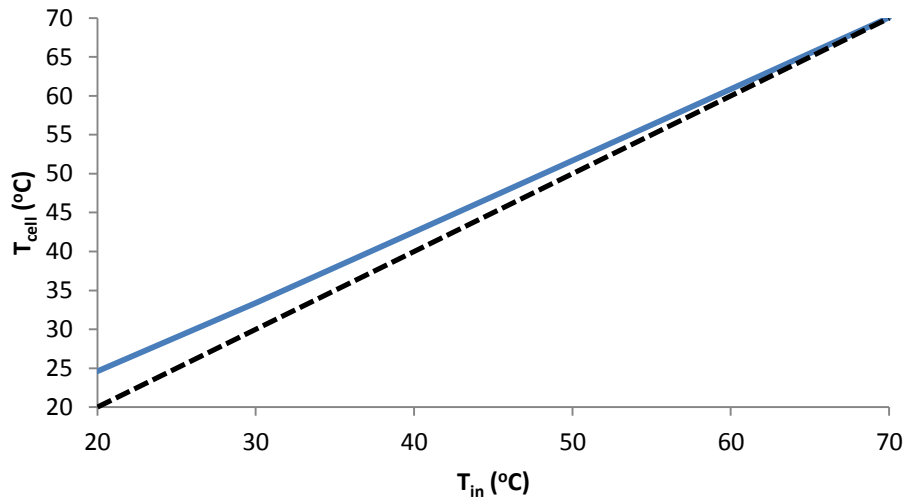
Διάγραμμα 5.10: Θερμικός και ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συλλέκτη συναρτήσει του μεγέθους x

Είναι φανερό πως όσο αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου (T_{in}), μειώνεται ο ηλεκτρικός και κυρίως ο θερμικός βαθμός απόδοσης, που μάλιστα για την τιμή $x=0,045$ φτάνει να γίνεται μικρότερος και απ' τον αντίστοιχο ηλεκτρικό.

-Υπολογίσθηκε πως ο θερμικός βαθμός απόδοσης ακολουθεί την εξίσωση ευθείας:
 $\gamma = -13,152x + 0,7$ με $R^2 = 0,9976$

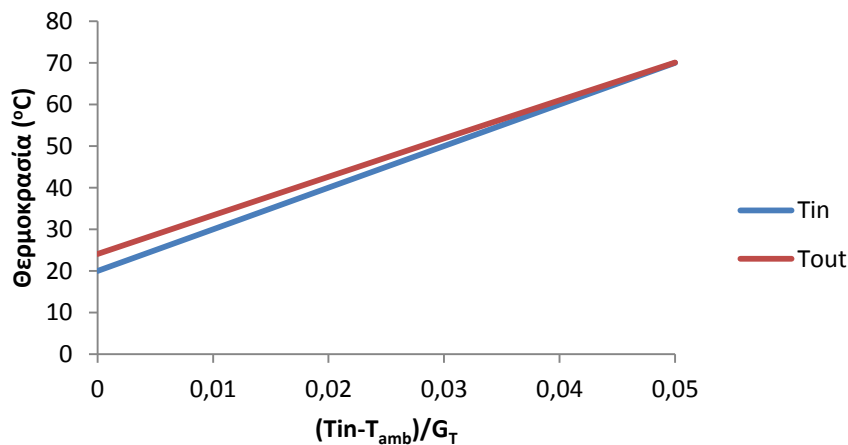
-και ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης ακολουθεί την εξίσωση ευθείας:
 $\gamma = -0,5269x + 0,1286$ με $R^2 = 0,999$

Επίσης στο διάγραμμα 5.11 φαίνεται το πως μεταβάλλεται η θερμοκρασία κελιού (T_{cell}) με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου (T_{in}). Βοηθητικά φέραμε την ευθεία $y=x$ για να είναι εμφανές πως πάντα ισχύει $T_{cell} > T_{in}$



Διάγραμμα 5.11: Θερμοκρασία κελιού συναρτήσει θερμοκρασίας εισόδου συλλέκτη

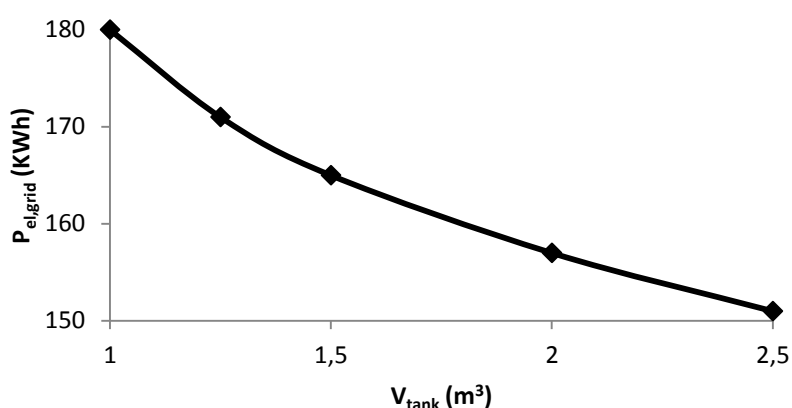
Όμοια συμπεριφορά με την T_{cell} έχει και η θερμοκρασία εξόδου του συλλέκτη (T_{out}) όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.12 σε σύγκριση με τη T_{in} συναρτήσει του μεγέθους x και πάλι.



Διάγραμμα 5.12: Θερμοκρασίες εισόδου, εξόδου του συλλέκτη συναρτήσει του x

Αφού εξετάσαμε την συμπεριφορά του συλλέκτη, προχωρήσαμε στην προσομοίωση συνολικά της εγκατάστασης. Η προσομοίωση όπως προαναφέραμε έγινε για όλο το διάστημα που απαιτείται θέρμανση στο κτίριο (Νοέμβριος – Απρίλιος). Για την διαστασιολόγηση της εγκατάστασης πέρα απ' τις διάφορες τιμές της συλλεκτικής επιφάνειας έπρεπε να επιλέξουμε τι δοχείο αδρανείας χρειάζεται σε κάθε μια από αυτές. Διαπιστώσαμε πως το μέγεθος του δοχείου αλλάζει ελάχιστα τις επιπλέον ανάγκες της αντλίας για ηλεκτρισμό, ως εκ τούτου

Θεωρήσαμε μια τυπική τιμή για το δοχείο $V_{\text{tank}}=1\text{m}^3$ για τις μικρές επιφάνειες, ενώ σταδιακά αυξήσαμε τον όγκο του για μεγαλύτερες. Βέβαια το δοχείο δεν θα μπορούσε να είναι και πολύ μικρό καθώς δεν θα υπήρχε επαρκής ποσότητα για την λειτουργία της αντλίας. Στο παρακάτω διάγραμμα 5.13 φαίνεται πως μεταβάλλεται η ηλεκτρική ενέργεια που παίρνει απ' το δίκτυο ($P_{\text{el,grid}}$) η αντλία θερμότητας, συναρτήσει του μεγέθους του δοχείου αδρανείας. Παρατηρούμε πως σε συλλεκτική επιφάνεια $A_c=20\text{ m}^2$, για αύξηση του δοχείου κατά $1,5\text{ m}^3$ το επιπλέον ρεύμα που απορροφά η αντλία από το δίκτυο είναι μόλις 30 KWh ετησίως, πράγμα ασύμφορο οικονομικά. Επομένως $V_{\text{opt}}=1\text{ m}^3$ για $A_c=20\text{ m}^2$.



Διάγραμμα 5.13: Απορρόφηση ηλεκτρικής ενέργειας απ' το δίκτυο συναρτήσει του όγκου του δοχείου αδρανείας για συλλεκτική επιφάνεια 20 m^2

Στη συνέχεια αλλάζοντας κάθε φορά τη συλλεκτική επιφάνεια ανά 5 m^2 και μεγαλώνοντας την παροχή μάζας, με κατάλληλους εκτυπωτές στους συλλέκτες, την αντλία θερμότητας και το inverter πήραμε αποτελέσματα για την συνολική παραγόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια του θερμοφωτοβολταϊκού (Q_{el} , Q_{th}), την επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται απ' το δίκτυο ($P_{\text{el,grid}}$), τέλος την ενέργεια που καταναλώνει η αντλία θερμότητας και το φορτίο που αποδίδει. Έτσι συμπληρώθηκε ο πίνακας 5.6.

$A_{\text{coll}} \text{ (m}^2\text{)}$	$V_{\text{opt}} \text{ (m}^3\text{)}$	$Q_{\text{th}} \text{ (KWh)}$	$Q_{\text{el}} \text{ (KWh)}$	n_{th}	n_{el}	n_{tot}	$P_{\text{el,grid}} \text{ (KWh)}$	COP	f	COP_{real}
10	1	4146	857	0,6267	0,1296	0,7563	466	3,9252	0,6681	11,826
15	1	5021	1190	0,506	0,12	0,626	286	4,5258	0,7732	19,954
20	1	5650	1518	0,4271	0,115	0,5421	180	5,005	0,8456	32,422
25	1,5	6221	1850	0,3761	0,1118	0,4879	105	5,4578	0,9037	56,657
30	1,5	6616	2170	0,3333	0,1093	0,4426	76	5,6309	0,9284	78,684
35	1,5	6984	2489	0,3016	0,1075	0,4091	65	5,7297	0,9379	92,292
40	1,75	7340	2811	0,2774	0,1062	0,3836	57	5,804	0,945	105,49
45	1,75	7667	3128	0,2576	0,105	0,3626	55	5,8267	0,947	109,44
50	1,75	7987	3444	0,2415	0,1041	0,3456	52	5,841	0,9496	115,81

Πίνακας 5.6: Συνολικά αποτελέσματα προσομοίωσης για διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες

Όπου χρησιμοποιήθηκαν οι εξής σχέσεις:

- $n_{th} = \frac{Q_{th}}{Q_{solar}}$ (5.4)

με Q_{solar} να είναι η συνολική ενέργεια που δέχεται ο συλλέκτης από τον ήλιο

- $n_{el} = \frac{Q_{el}}{Q_{solar}}$ (5.5)

- $n_{tot} = n_{el} + n_{th}$ (5.6)

Όπου n_{tot} συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης

- $COP = \frac{Q_{heating}}{P_{el,total}}$ (5.7)

Όπου, $Q_{heating}$ το συνολικό φορτίο που αποδίδει η αντλία θερμότητας $P_{el,total}$ η συνολική ενέργεια που χρειάζεται για να λειτουργήσει, με ένα μεγάλο μέρος της να προέρχεται απ' τις μπαταρίες του συστήματος και το υπόλοιπο απ' το δίκτυο ($P_{el,grid}$).

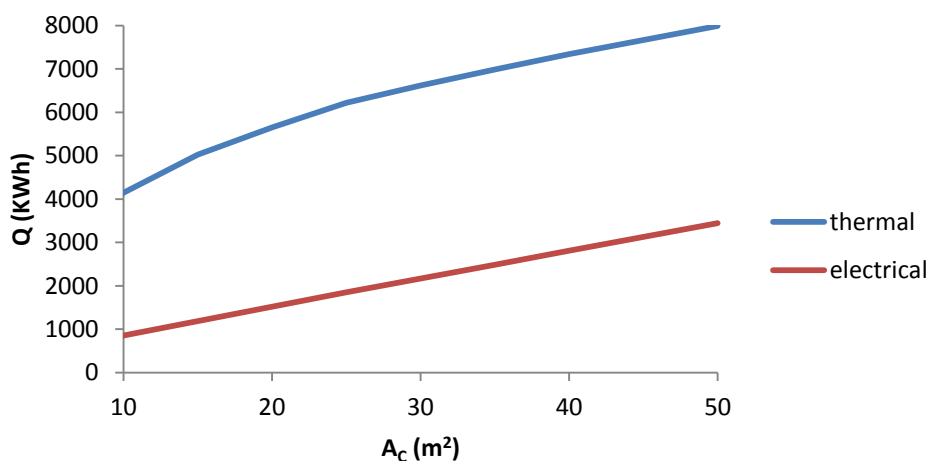
- $f = 1 - \frac{P_{el,grid}}{P_{el,total}}$ (5.8)

Όπου f το ποσοστό κάλυψης των αναγκών του συστήματος από τα ΦΒ/Θ

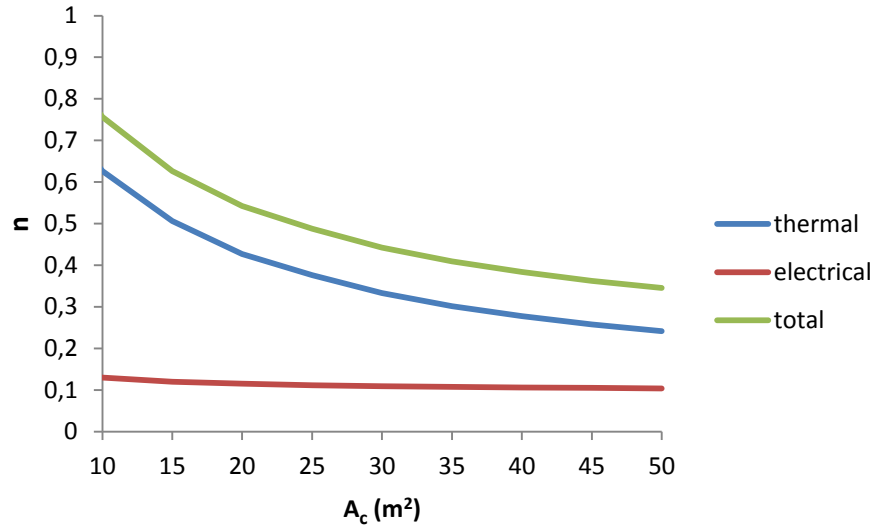
- $COP_{real} = \frac{Q_{heating}}{P_{el,grid}}$ (5.9)

Όπου COP_{real} ο πραγματικός συντελεστής συμπεριφοράς

Στη συνέχεια, σύμφωνα με τον πίνακα 5.6 πραγματοποιήσαμε μια σειρά από διαγράμματα για πιο εμφανή αποτελέσματα.



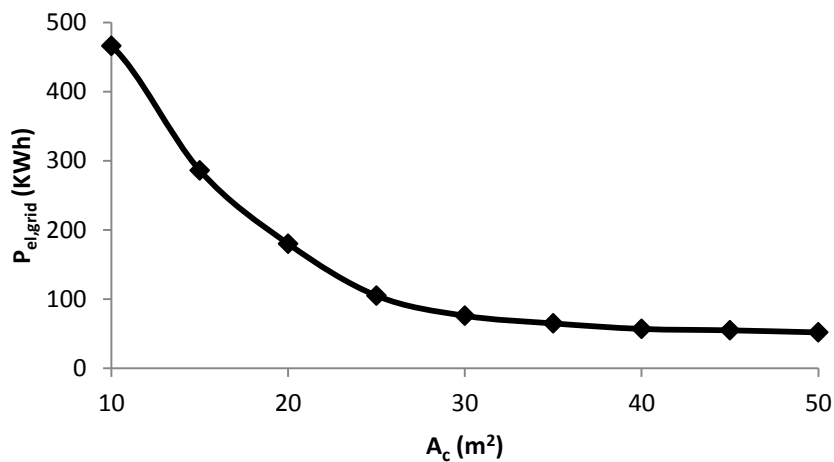
Διάγραμμα 5.14: Συνολικά αποδιδόμενη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια συστήματος συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας



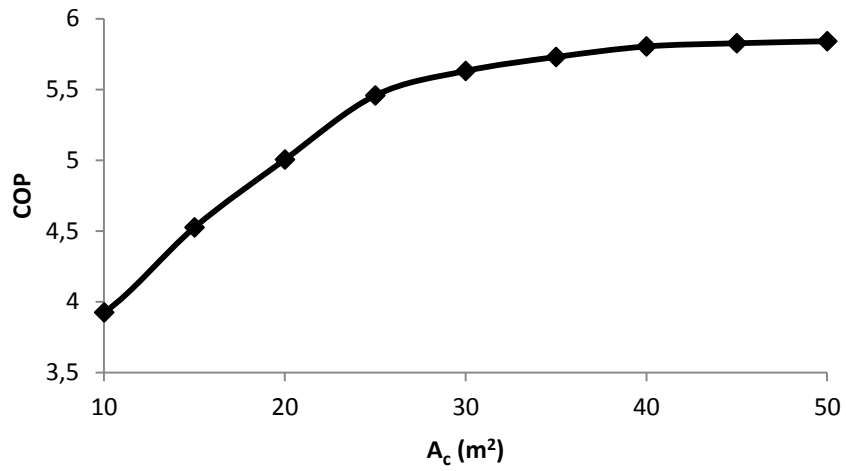
Διάγραμμα 5.15: Ηλεκτρικός, θερμικός και συνολικός βαθμός απόδοσης συστήματος συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας

Παρατηρούμε πως για μικρές συλλεκτικές επιφάνειες η απόδοση του συστήματος είναι σε αρκετά καλό επίπεδο, ενώ μειώνεται σημαντικά στη συνέχεια.

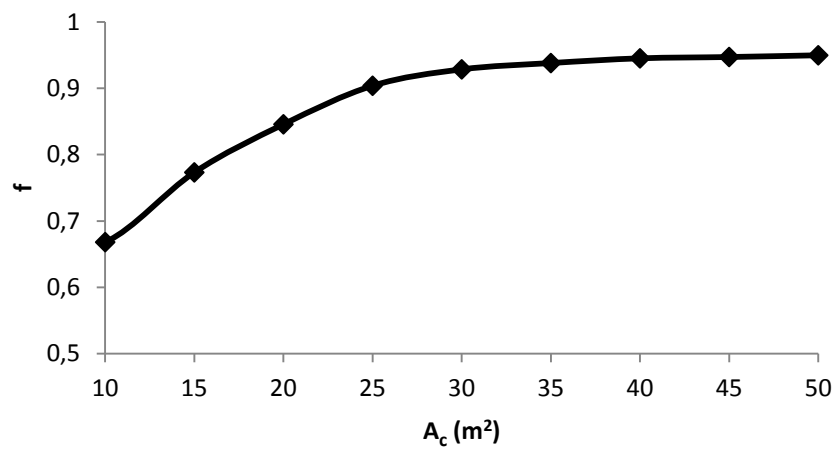
Το διάγραμμα που δείχνει τις ανάγκες για επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια της εγκατάστασης φαίνεται στο 5.16 και είναι φανερό πως μετά 30 m² συλλεκτικής επιφάνειας η καμπύλη γίνεται σχεδόν ευθεία γραμμή. Πρακτικά, αυτό σημαίνει πως όσο και να αυξήσουμε την συλλεκτική επιφάνεια της εγκατάστασης το κέρδος θα είναι αμελητέο. Επομένως, μπορούμε να πούμε πως από ενεργειακής απόψεως η εγκατάσταση βελτιστοποιείται για την επιφάνεια των 30 m², κάτι που φαίνεται εξάλλου και στα διαγράμματα, του συντελεστή συμπεριφοράς (5.17) και του ποσοστού κάλυψης (5.18).



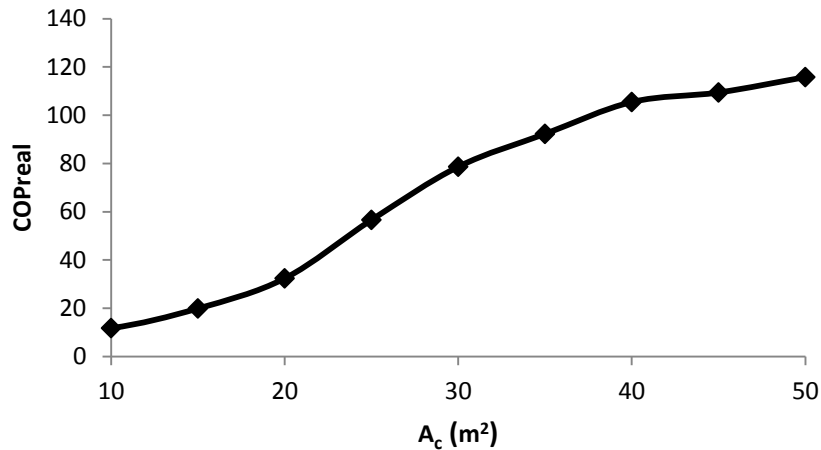
Διάγραμμα 5.16: Επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια



Διάγραμμα 5.17: Συντελεστής συμπεριφοράς εγκατάστασης ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια



Διάγραμμα 5.18: Ποσοστό κάλυψης της εγκατάστασης ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια

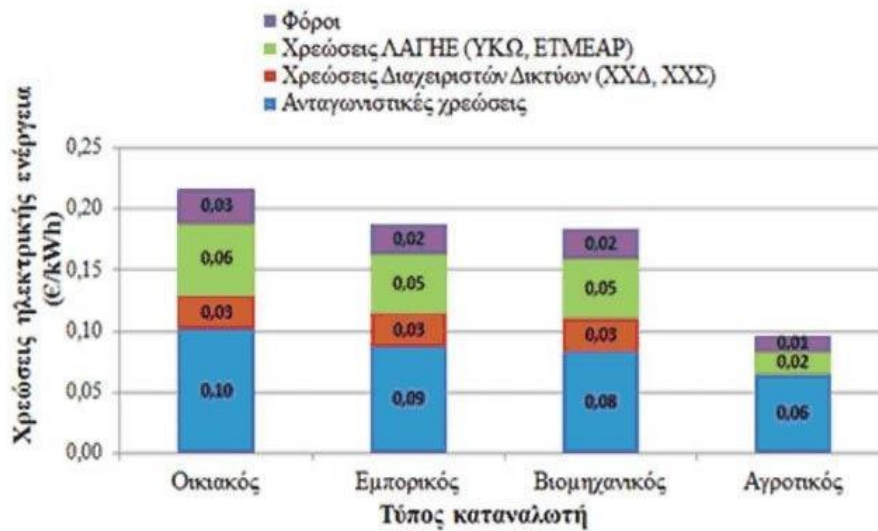


Διάγραμμα 5.19: Πραγματικός συντελεστής συμπεριφοράς της εγκατάστασης ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια

Έτσι αναλύθηκε η ενεργειακή συμπεριφορά του συστήματος. Για να γίνει όμως η τελική επιλογή της συλλεκτικής επιφάνειας που θα τοποθετηθεί υπολογίσαμε και τα αντίστοιχα οικονομικά δεδομένα.

Κοστολόγηση εγκατάστασης:

- Κόστος θερμοφωτοβολταϊκών: 200 €/m²
- Κόστος συσσωρευτών: 1296 €
Όπου χρησιμοποιήθηκαν 6 μπαταρίες σε σειρά χωρητικότητας 120 Ah, με κόστος 0,9 €/Ah και θεωρήσαμε πως σε βάθος 20ετίας θα χρειαστούν μια αλλαγή στα 10 χρόνια
- Κόστος δοχείου αδρανείας: 500 €/m³
- Κόστος αντλίας θερμότητας: 7500 €
- Κόστος inverter (ισχύος 1,5 KW): 1000 €
- Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας: 0,20 €/KWh (μεσοσταθμική σημερινή τιμή ρεύματος σύμφωνα με το Διάγραμμα 5.20)

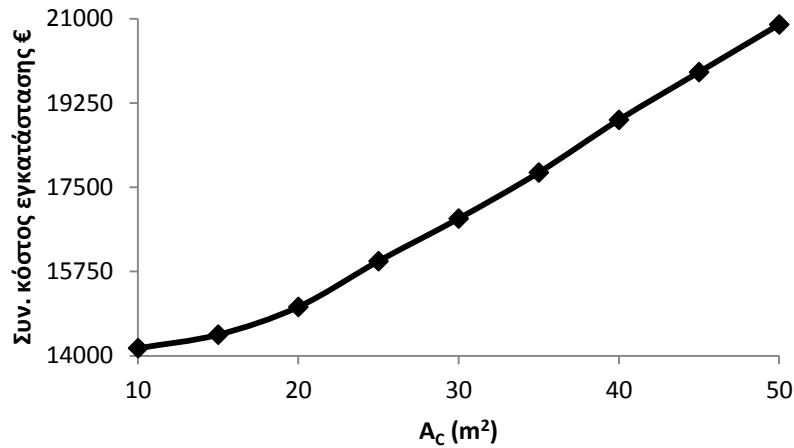


Διάγραμμα 5.20: Σημερινό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας σε €/kWh [12]

Επομένως, κατασκευάσαμε τον ακόλουθο πίνακα για τις διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες και το αντίστοιχο διάγραμμα:

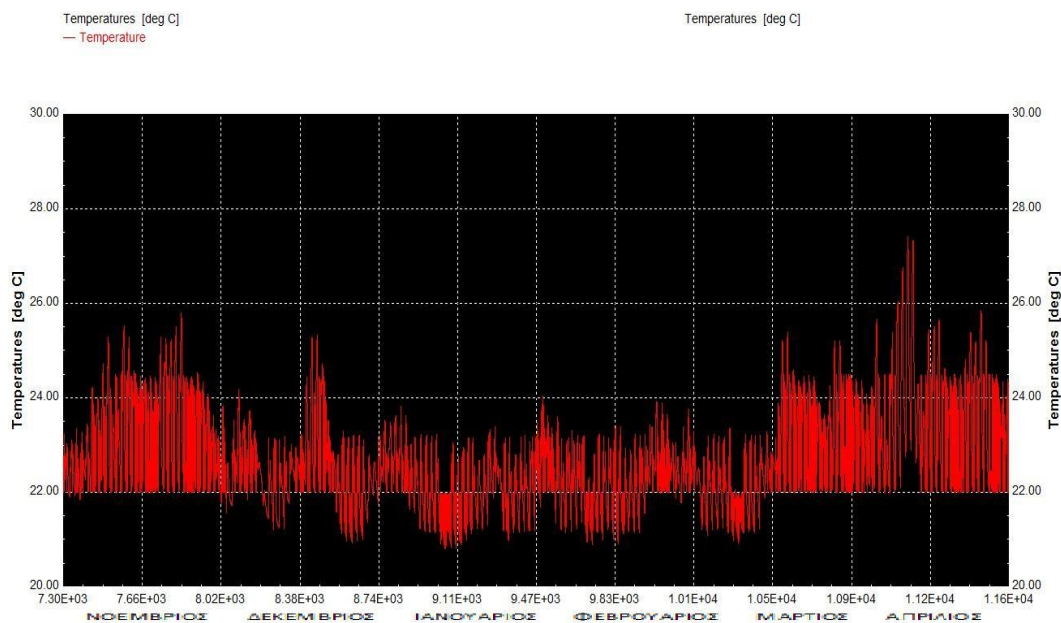
A_{coll} (m^2)	Συνολικό κόστος εγκατάστασης σε €
10	14160
15	14440
20	15016
25	15966
30	16850
35	17806
40	18899
45	19891
50	20879

Πίνακας 5.7: Συνολικό κόστος εγκατάστασης για 20 χρόνια για τις διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες



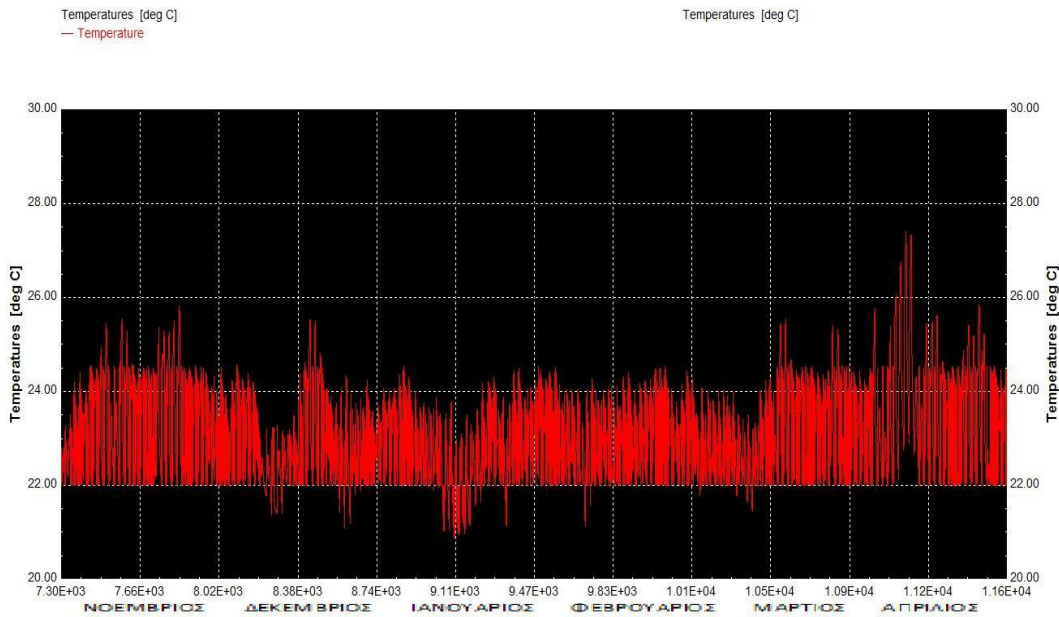
Διάγραμμα 5.21: Συνολικό κόστος εγκατάστασης για 20 χρόνια ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια

Όπου γίνεται εμφανές πως λόγω της ακριβής τιμής των συλλεκτών σε σχέση με το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, η πλέον βιώσιμη λύση από οικονομικής πλευράς είναι η χρησιμοποίηση μικρής συλλεκτικής επιφάνειας στο σύστημα. Το πρόβλημα σε αυτό όμως είναι πως το σύστημα θέρμανσης δεν έχει την κατάλληλη υποβοήθηση από τα ΦΒ/Θ. Συγκεκριμένα για μικρή συλλεκτική επιφάνεια οι προσομοιώσεις έδειξαν πως η μέση θερμοκρασία του δοχείου ήταν πιο χαμηλή αλλά κυρίως το θερμοκρασιακό προφίλ στο εσωτερικό του κτιρίου ήταν σε σημαντικό μέρος του χειμώνα κάτω απ' το όριο των 22 °C που έχουμε ορίσει. Στο Διάγραμμα 5.22 φαίνεται ένα μη αποδεκτό προφίλ θερμοκρασίας του κτιρίου για επιφάνεια 10 m².



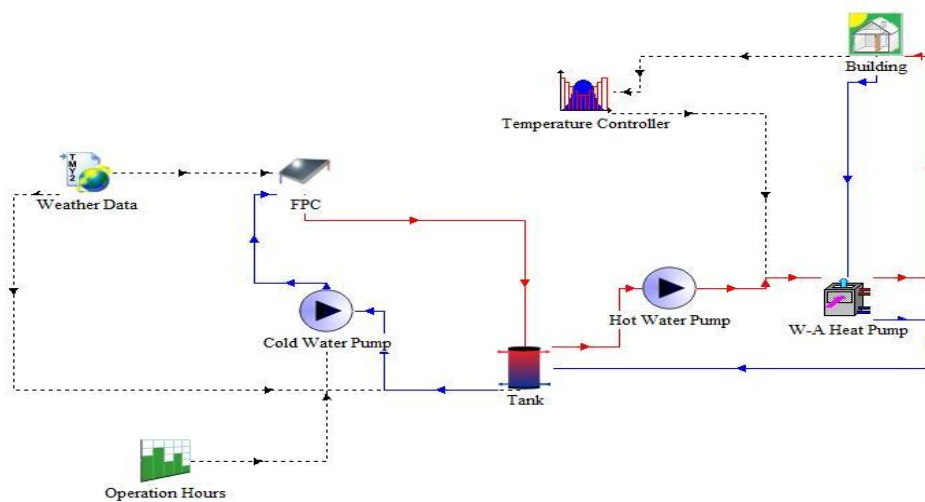
Διάγραμμα 5.22: Προφίλ θερμοκρασίας κτιρίου για συλλεκτική επιφάνεια 10 m²

Τρέξαμε την προσομοίωση για μεγαλύτερες συλλεκτικές επιφάνειες και καταλήξαμε πως για να είναι αποδεκτό το επίπεδο θερμοκρασίας εντός του κτιρίου με βάση τα κριτήρια θερμικής άνεσης πρέπει αυτές να καλύπτουν επιφάνεια τουλάχιστον 20 m². Τελικά η συγκεκριμένη επιφάνεια είναι αυτή που επιλέγεται με βάση και τα οικονομικά κριτήρια της εγκατάστασης. Παρακάτω φαίνεται το προφίλ θερμοκρασίας για την επιφάνεια αυτή.



Διάγραμμα 5.23: Προφίλ θερμοκρασίας κτιρίου για συλλεκτική επιφάνεια 20 m²

5.4 Υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας νερού-αέρα από θερμικά ηλιακά (FPC)



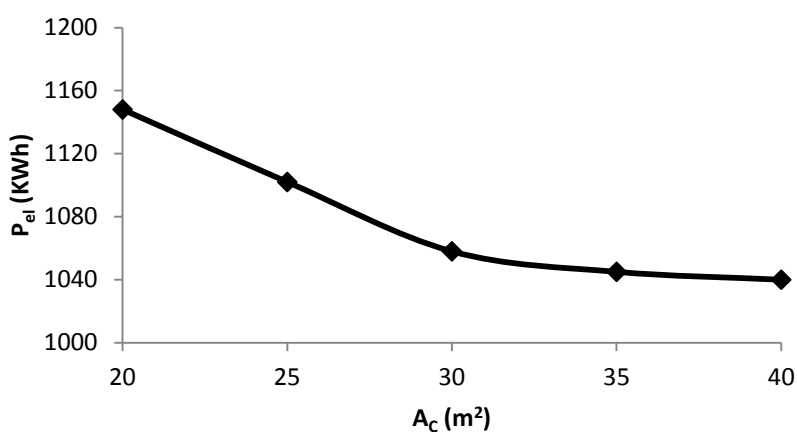
Εικόνα 5.2: Διάταξη αντλίας θερμότητας – θερμικού ηλιακού στο TRNSYS

Η εγκατάσταση αυτή είχε κοινά χαρακτηριστικά με την προηγούμενη περίπτωση, βέβαια δεν χρησιμοποιήθηκε inverter και μπαταρίες κάτι που μείωσε σημαντικά το αρχικό κόστος επένδυσης. Στον αντίποδα, η πολλαπλά αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο κάνει την εγκατάσταση πιο ευάλωτη στις διακυμάνσεις τιμολόγησης απ' το πάροχο.

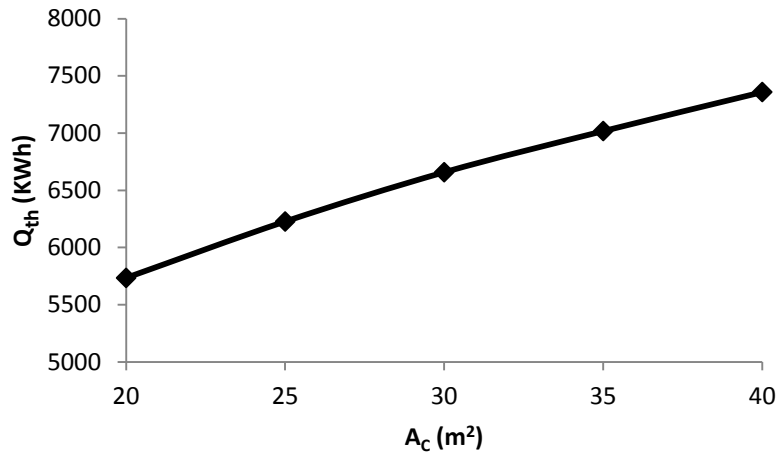
Με όμοιο τρόπο εργαστήκαμε και επιλέχθηκε όγκος δοχείου αδρανείας για κάθε συλλεκτική επιφάνεια. Αποδείχθηκε και πάλι πως για την αποδεκτή λειτουργία της αντλίας χρειάστηκε συλλεκτική επιφάνεια τουλάχιστον 20 m². Ακολουθεί ο πίνακας με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες.

A_c (m ²)	V_{opt} (m ³)	Q_{th} (KWh)	n_{th}	$Q_{heating}$ (KWh)	P_{el} (KWh)	COP	f	Συν. Κόστος εγκατάστασης (€)
20	1	5734	0,4334	5859	1148	5,1037	0,80406	15592
25	1	6227	0,3765	5929	1102	5,3802	0,81413	16158
30	1,5	6658	0,3355	5986	1058	5,6578	0,82325	16982
35	1,5	7018	0,3031	6002	1045	5,7435	0,82589	17680
40	1,5	7359	0,2781	6008	1040	5,7769	0,8269	18410

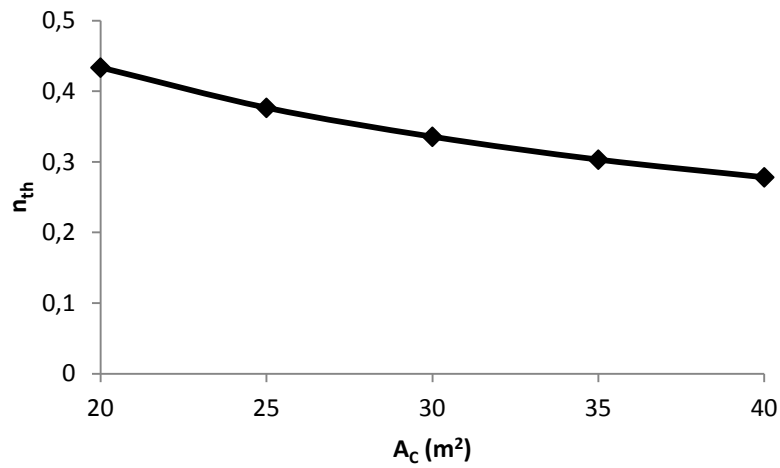
Πίνακας 5.8: Συνολικά αποτελέσματα προσομοίωσης για διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες



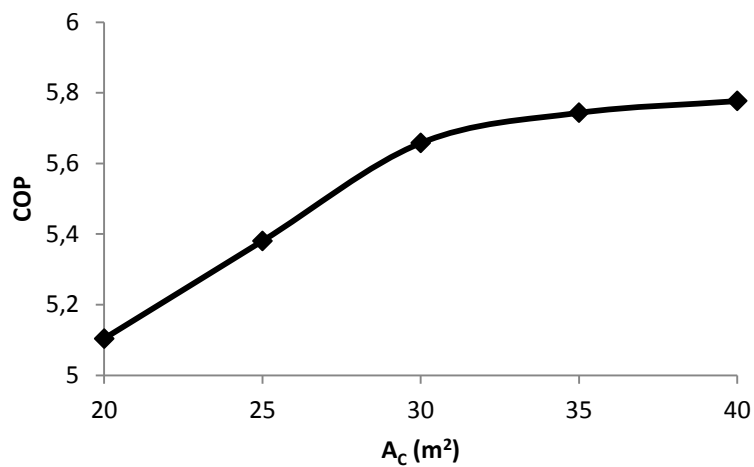
Διάγραμμα 5.24: Ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια



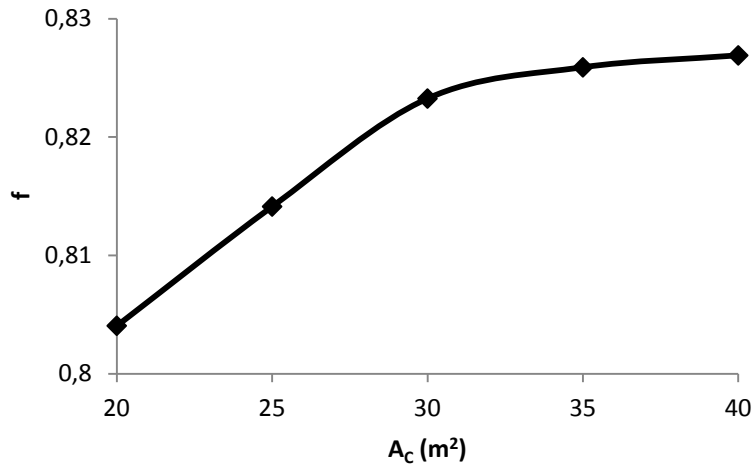
Διάγραμμα 5.25: Ετήσια παραγόμενη θερμική ενέργεια ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια



Διάγραμμα 5.26: Βαθμός απόδοσης εγκατάστασης ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια



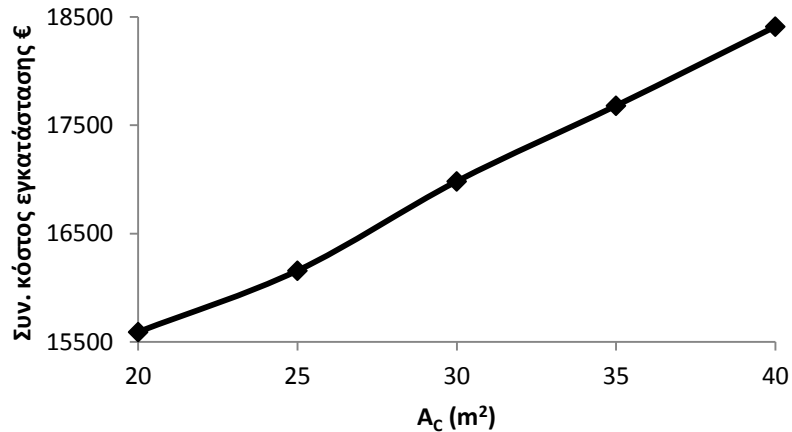
Διάγραμμα 5.27: Συντελεστής συμπεριφοράς εγκατάστασης ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια



Διάγραμμα 5.28: Ποσοστό κάλυψης της εγκατάστασης ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια

Κοστολόγηση εγκατάστασης:

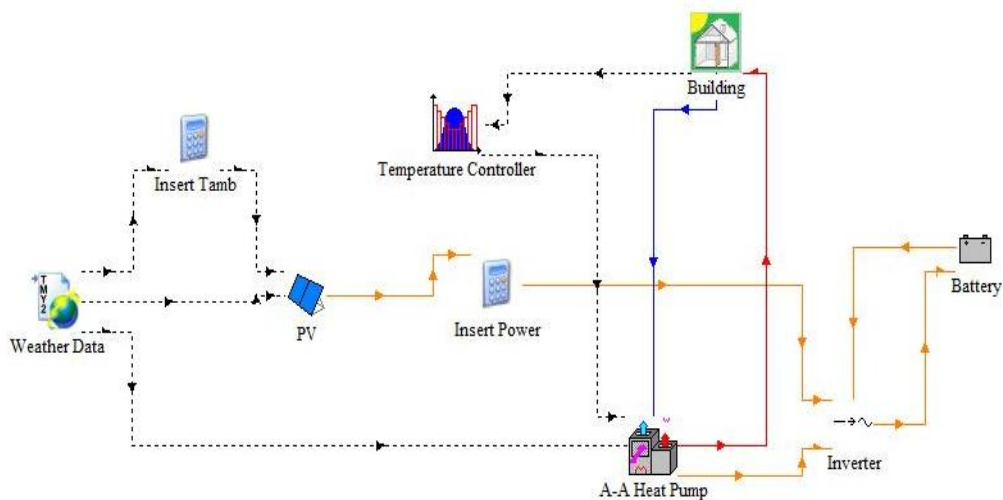
- Κόστος θερμικών ηλιακών: 150 €/m²
- Κόστος δοχείου αδρανείας: 500 €/m³
- Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας: 0,2 €/KWh για 20 χρόνια
- Κόστος αντλίας θερμότητας: 7500 €



Διάγραμμα 5.29: Συνολικό κόστος εγκατάστασης για 20 χρόνια ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια

Όμοια με την προηγούμενη περίπτωση τα μεγέθη των διαγραμμάτων δείχνουν από ενεργειακής απόψεως μια βελτιστοποίηση της απόδοσης στην επιφάνεια των 30 m². Για οικονομικούς λόγους και πάλι τελικά επιλέγουμε 20 m² θερμικούς ηλιακούς συλλέκτες.

5.5 Υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας αέρα-αέρα από φωτοβολταϊκά (PV)

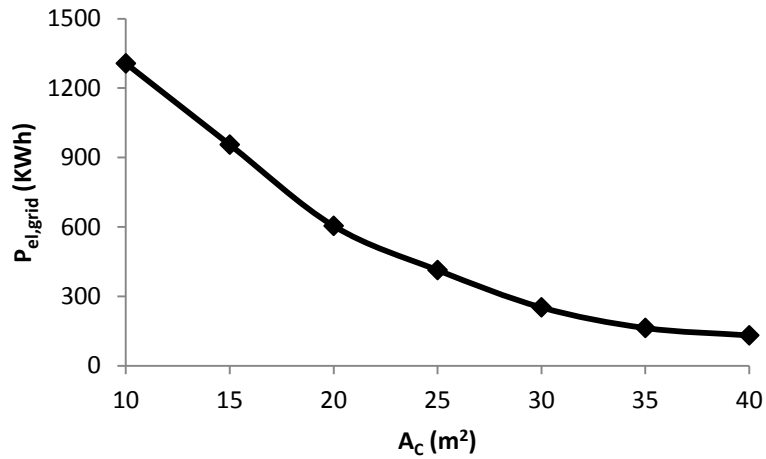


Εικόνα 5.3: Διάταξη εγκατάστασης αντλίας θερμότητας – φωτοβολταϊκού

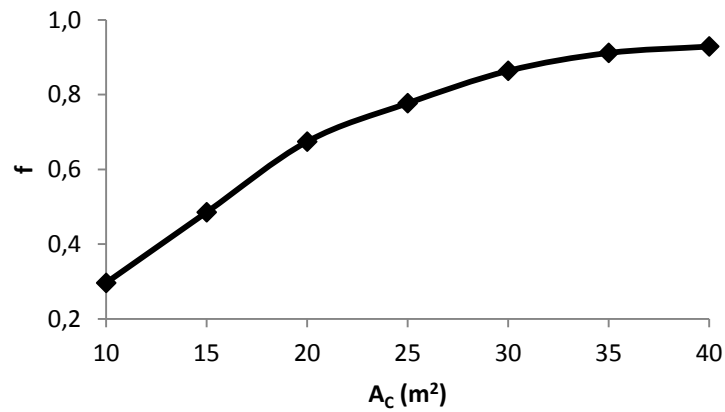
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις διάφορες επιφάνειες φωτοβολταϊκών φαίνονται στον πίνακα 5.9, χρησιμοποιώντας και σχέσεις που αναφέρθηκαν νωρίτερα.

A_{coll} (m^2)	Q_{el} (KWh)	η_{el}	$P_{el,grid}$ (KWh)	$P_{el,total}$ (KWh)	COP	COP_{real}	f
10	681,345	0,103	1307	1858	3,0140	4,2846	0,2966
15	1022,018	0,103	956	1858	3,0140	5,8577	0,4855
20	1362,69	0,103	605	1858	3,0140	9,2562	0,6744
25	1703,363	0,103	414	1858	3,0140	13,5266	0,7772
30	2044,035	0,103	253	1858	3,0140	22,1344	0,8638
35	2384,708	0,103	164	1858	3,0140	34,1463	0,9117
40	2725,38	0,103	132	1858	3,0140	42,4242	0,9290

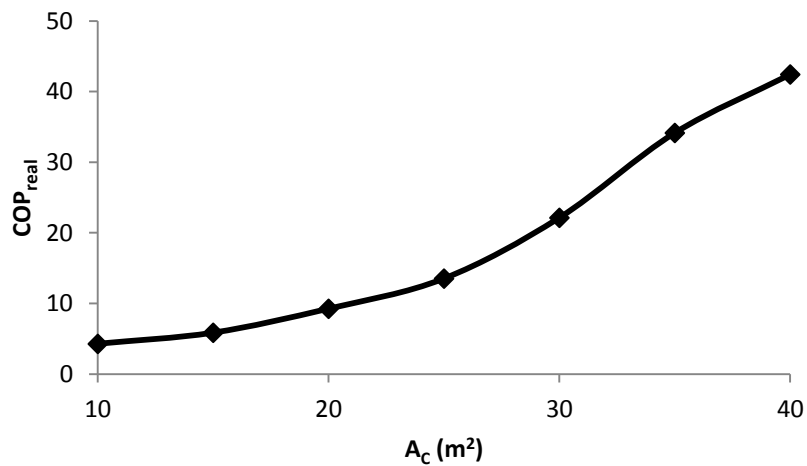
Πίνακας 5.9: Συνολικά αποτελέσματα εγκατάστασης για τις διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες



Διάγραμμα 5.30: Ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται απ' το δίκτυο ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια



Διάγραμμα 5.31: Ποσοστό κάλυψης της εγκατάστασης ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια



Διάγραμμα 5.32: Πραγματικός συντελεστής συμπεριφοράς εγκατάστασης ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια

Κόστος εγκατάστασης:

- Κόστος φωτοβολταϊκών: 150 €/m²
- Κόστος inverter (ισχύος 3KW): 1500 €
- Κόστος αντλίας θερμότητας: 7500 €
- Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας: 0,2 €/KWh για 20 χρόνια
- Κόστος συσσωρευτών ανάλογα με την χωρητικότητά τους, με μια αλλαγή στα 10 χρόνια και συνολικά 6 σε σειρά, όπως φαίνεται στον πίνακα 5.10

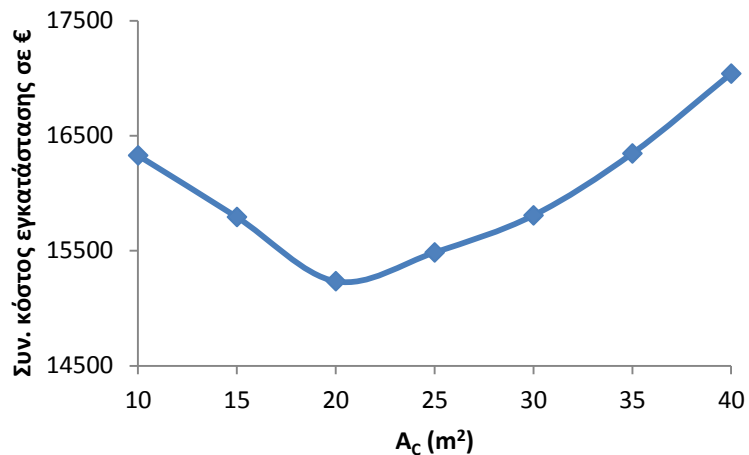
A _{coll} (m ²)	Χωρητικότητα μπαταρίας (Ah)	Κόστος συσσωρευτών σε €
10	16,7	601
15	40	720
20	70	816
25	90	1080
30	120	1296
35	150	1440
40	180	1512

Πίνακας 5.10: Κόστος συσσωρευτών για τις διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες

Επομένως το συνολικό κόστος εγκατάστασης για τα χρόνια λειτουργίας της, διαμορφώνεται ως εξής:

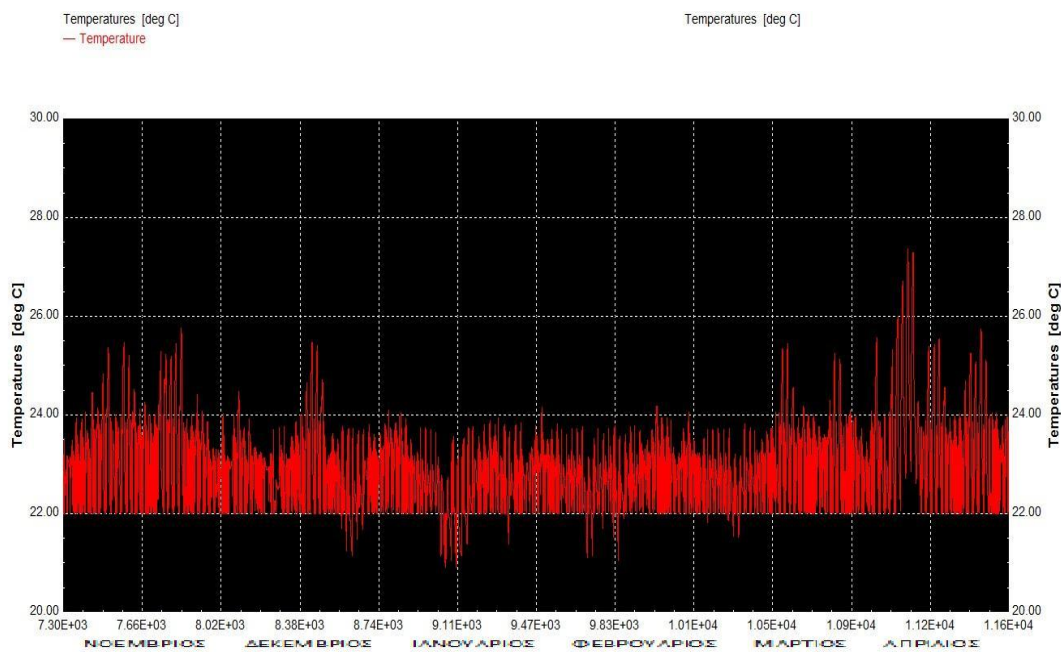
A _{coll} (m ²)	Συνολικό κόστος εγκατάστασης σε €
10	16329
15	15794
20	15236
25	15486
30	15808
35	16346
40	17040

Πίνακας 5.11: Συνολικό κόστος εγκατάστασης για 20 χρόνια ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια



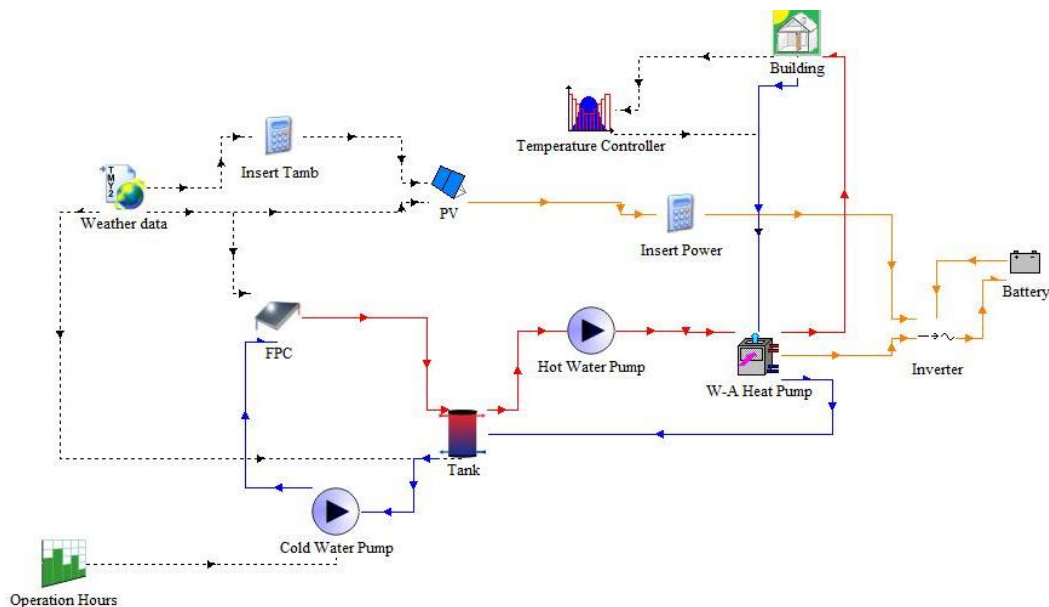
Διάγραμμα 5.33: Συνολικό κόστος εγκατάστασης για 20 χρόνια ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια

Όπου απ' το διάγραμμα 5.33 διαστασιολογήθηκε η επιφάνεια των συλλεκτών στα $20 m^2$ δηλαδή στην τιμή που η καμπύλη παρουσιάζει ελάχιστο. Με το αντίστοιχο προφίλ θερμοκρασίας κτιρίου για την εγκατάσταση να φαίνεται στο διάγραμμα 5.34. Υπάρχουν και σε αυτήν την περίπτωση κάποιες ώρες κυρίως τον Ιανουάριο όπου η θερμοκρασία πέφτει λίγο κάτω απ' το όριο των $22^\circ C$ λόγω των αυξημένων αναγκών θέρμανσης.



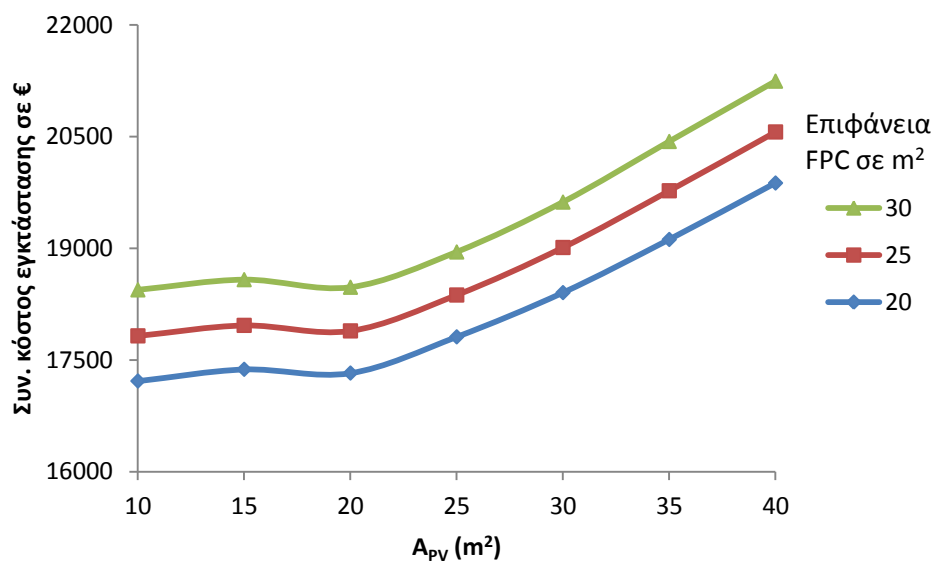
Διάγραμμα 5.34: Θερμοκρασιακό προφίλ για την αντλία αέρα-αέρα

5.6 Υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας νερού-αέρα από συνδυασμό θερμικών ηλιακών (FPC) και φωτοβολταϊκών (PV)



Εικόνα 5.4: Διάταξη αντλίας θερμότητας – με συνδυασμό FPC και PV

Σε αυτήν την περίπτωση εργαστήκαμε σύμφωνα με τα παραπάνω, δηλαδή θεωρήσαμε επιφάνεια θερμικών ηλιακών τουλάχιστον 20 m^2 και δοκιμάσαμε διάφορες επιφάνειες για φωτοβολταϊκά από 10 m^2 έως και 40 m^2 . Οι προσομοιώσεις έδειξαν πως ήταν σαφώς η δυσμενέστερη επιλογή οικονομικά, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 5.35 το συνολικό κόστος για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς υπερβαίνει αυτό των προηγούμενων περιπτώσεων κρατώντας σταθερό τον τρόπο κοστολόγησης.

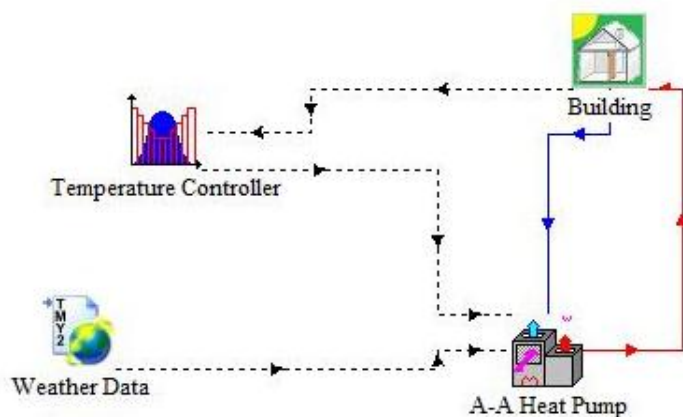


Διάγραμμα 5.35: Συνολικό κόστος εγκατάστασης για διάφορους συνδυασμούς συλλεκτικής επιφάνειας θερμικών ηλιακών και φωτοβολταϊκών

Τελικά, επιλέχθηκε η τελευταία τιμή του διαγράμματος που αντιστοιχεί σε επιφάνεια 20 m² θερμικών ηλιακών συλλεκτών και 10 m² φωτοβολταϊκών και συνολικό κόστος εγκατάστασης για τα 20 χρόνια 17.217 €, όπου δίνει τα παρακάτω μεγέθη:

- Συνολικά παραγόμενη θερμική ενέργεια: $Q_{th}=5734$ KWh
- Συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια: $Q_{el}=681$ KWh
- Απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο: $P_{el,grid}=779$ KWh
- Συνολική ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται: $P_{el,total}=1149$ KWh
- Συντελεστής συμπεριφοράς: $COP=5,10$
- Πραγματικός συντελεστής συμπεριφοράς: $COP_{real}=7,522$
- Συντελεστής κάλυψης: $f=0,322$

5.7 Αντλία θερμότητας αέρα-αέρα τροφοδοτούμενη μόνο από το δίκτυο



Εικόνα 5.5: Διάταξη αντλίας θερμότητας συνδεδεμένη μόνο με το δίκτυο

Τελευταία περίπτωση ήταν η πλέον διαδεδομένη μορφή, αντλία θερμότητας αέρα-αέρα συνδεδεμένη μόνο με το δίκτυο. Αυτή η διάταξη έχει το μεγάλο πλεονέκτημα να απαιτεί το μικρότερο αρχικό κόστος εγκατάστασης σε σύγκριση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, αφού δεν χρησιμοποιούνται κάποιας μορφής συλλέκτες. Εκεί όμως εντοπίζεται και το μειονέκτημά της καθώς η βιωσιμότητα της επένδυσης εξαρτάται αποκλειστικά από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο.

Οι προσομοιώσεις για τους μήνες θέρμανσης έδειξαν πως για λειτουργία της αντλίας απαιτούνται 1790 KWh ετησίως.

Επομένως, συνολικό κόστος εγκατάστασης:

$$1790 \text{ KWh} \times 0,20 \text{ €/KWh} \times 20 \text{ χρόνια} + 7500\text{€} = 14.660 \text{ €}$$

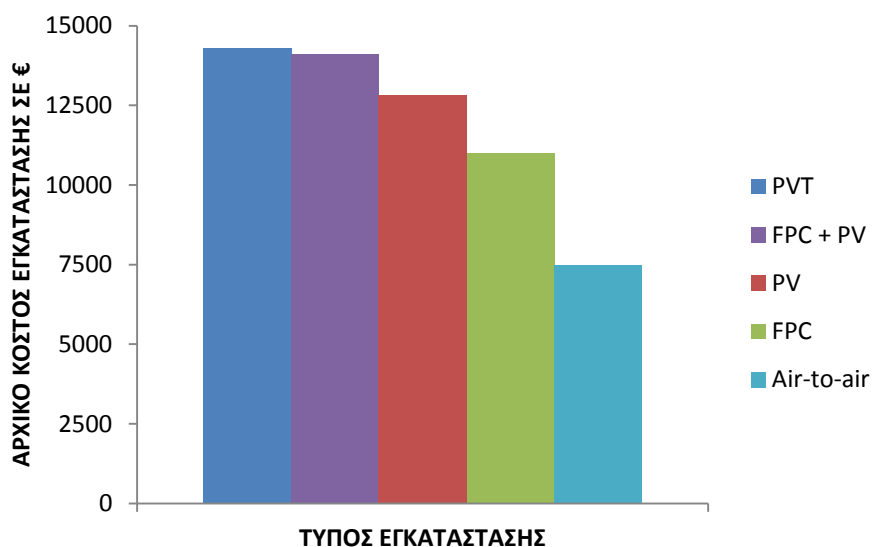
5.8 Οικονομική σύγκριση εγκαταστάσεων

- Πρώτη ανάλυση: κοστολόγηση για διάφορες μεσοσταθμικές χρεώσεις ρεύματος στην 20ετία

Εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η οικονομική σύγκριση των εγκαταστάσεων, τόσο στο αρχικό κόστος επένδυσης όσο και στο συνολικό κόστος σε βάθος 20ετίας. Το πρώτο σκέλος είναι κάτι σχετικά εύκολα υπολογίσιμο καθώς συμπεριλαμβάνει μόνο σημερινή τιμολόγηση. Είναι κάτι που έχει αξία να γνωρίζουμε αφού η δυνατότητα μεγάλης αρχικής χρηματοδότησης πολλές φορές είναι περιορισμένη. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται στο πίνακα 5.12 και στο διάγραμμα 5.36. Το δεύτερο σκέλος έχει περισσότερες δυσκολίες καθώς δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας σε βάθος χρόνου. Γι' αυτό υπολογίσαμε το κόστος λειτουργίας σε ένα μεγάλο φάσμα τιμών (0,15 €/KWh έως 0,25 €/KWh) και να γίνει εμφανές για τις διάφορες τιμές του ρεύματος μεσοσταθμικά ποιά εγκατάσταση αποτελεί την καλύτερη επιλογή. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο πίνακα 5.13 και στο διάγραμμα 5.37.

ΤΥΠΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΑΡΧΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΕ €
PVT	14296
PV	12816
FPC	11000
FPC + PV	14101
Air-to-air	7500

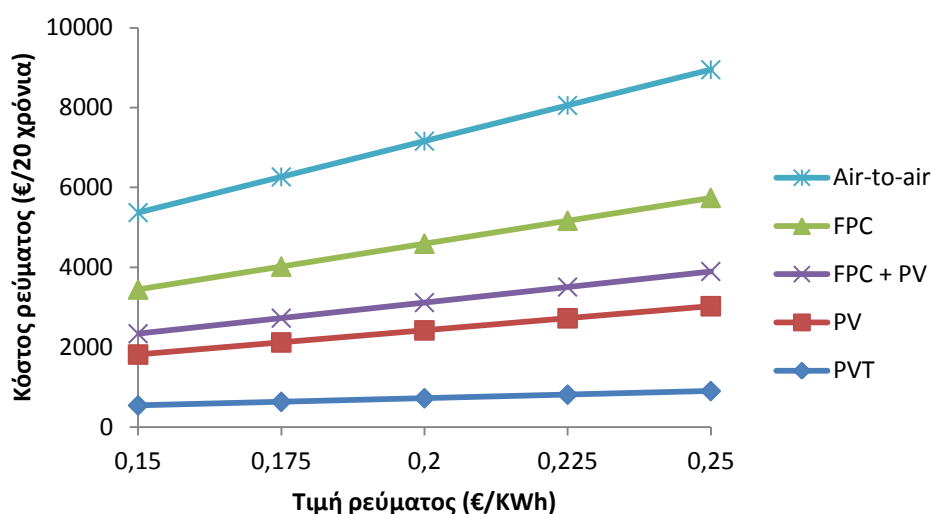
Πίνακας 5.12: Αρχικό κόστος εγκατάστασης ανάλογα τον τύπο της



Διάγραμμα 5.36: Αρχικό κόστος εγκατάστασης ανάλογα με τον τύπο της

ΤΥΠΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΚΟΣΤΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (€/20 χρόνια)				
	ΤΙΜΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (€/KWh)				
	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25
PVT	540	630	720	810	900
PV	1815	2118	2420	2723	3025
FPC	3444	4018	4592	5166	5740
FPC + PV	2337	2727	3116	3506	3895
Air-to-air	5370	6265	7160	8055	8950

Πίνακας 5.13: Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για 20 χρόνια για όλους τους τύπους εγκαταστάσεων

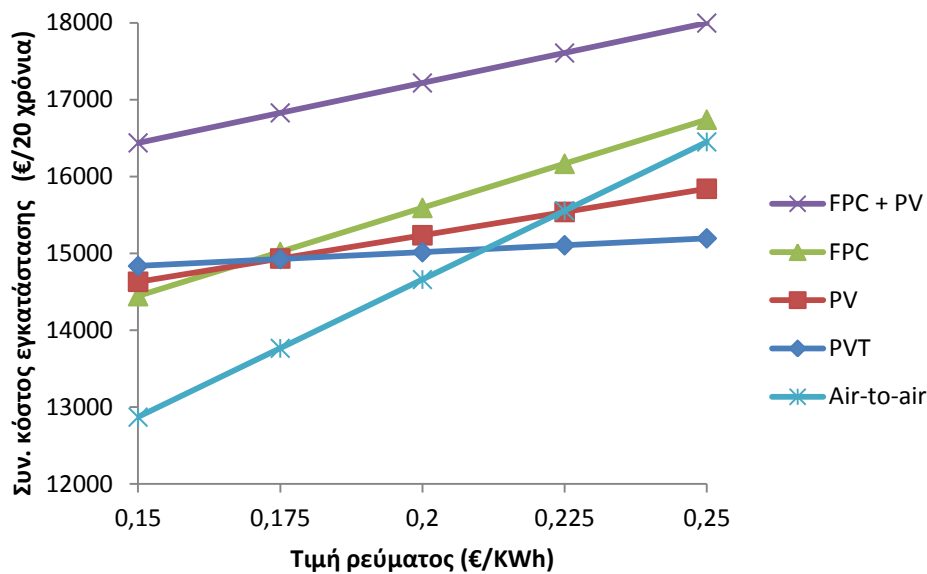


Διάγραμμα 5.37: Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για 20 χρόνια για όλους τους τύπους των εγκαταστάσεων

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον αφού είναι φανερό πως ανεξάρτητα απ' την τιμή του ρεύματος, η εγκατάσταση με τα θερμοφωτοβολταϊκά αποτελεί την καλύτερη επιλογή ενεργειακά, ειδικά συγκρίνοντάς την με την αντλία αέρα-αέρα. Στο πίνακα 5.14 και στο διάγραμμα 5.38 παρουσιάζεται το συνολικό κόστος εγκατάστασης, δηλαδή συμπεριλαμβάνεται το αρχικό κόστος επένδυσης και το κόστος του ρεύματος.

ΤΥΠΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	Συνολικό κόστος εγκατάστασης (€/20 χρόνια)				
	ΤΙΜΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (€/KWh)				
	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25
PVT	14836	14926	15016	15106	15196
PV	14631	14934	15236	15539	15841
FPC	14444	15018	15592	16166	16740
FPC + PV	16438	16828	17217	17607	17996
Air-to-air	12870	13765	14660	15555	16450

Πίνακας 5.14: Συνολικό κόστος εγκατάστασης για 20 χρόνια ανάλογα με την τιμή του ρεύματος και τον τύπο της εγκατάστασης



Διάγραμμα 5.38: Συνολικό κόστος εγκατάστασης για 20 χρόνια ανάλογα με την τιμή του ρεύματος και τον τύπο της εγκατάστασης

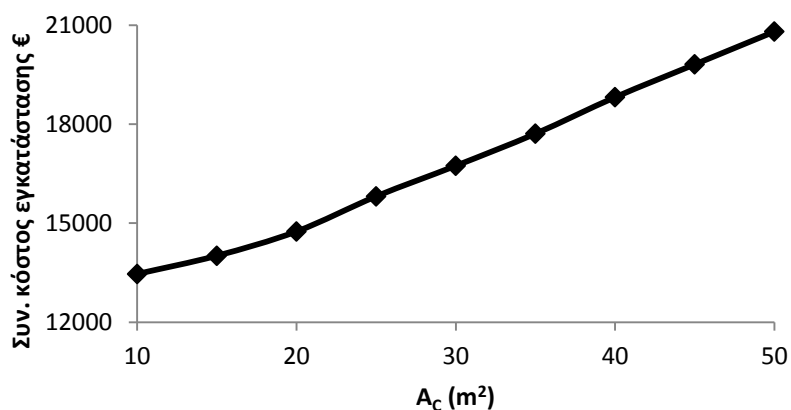
Σχολιάστηκε νωρίτερα η ενεργειακή υπεροχή των θερμοφωτοβολταϊκών από πλευράς αυτονομίας αλλά και το αυξημένο αρχικό κόστος της εγκατάστασής τους. Απ' το διάγραμμα 5.38 φαίνεται πως για μικρές τιμές ρεύματος δεν αποτελούν την καλύτερη επιλογή οικονομικά. Μάλιστα μέχρι την τιμή 0,175 €/KWh οι εγκαταστάσεις των θερμικών ηλιακών και των φωτοβολταϊκών υπερτερούν στο κόστος 20ετίας. Η απλή εγκατάσταση αντλίας αέρα-αέρα φαίνεται η πιο συμφέρουσα επιλογή ξεκάθαρα, μέχρι την τιμή ρεύματος 0,21 €/KWh όπου από αυτό το σημείο και μετά η εγκατάσταση των θερμοφωτοβολταϊκών υπερέχει.

- Δεύτερη ανάλυση: κοστολόγηση με σταθερή τιμή ρεύματος και κόστος χρήματος

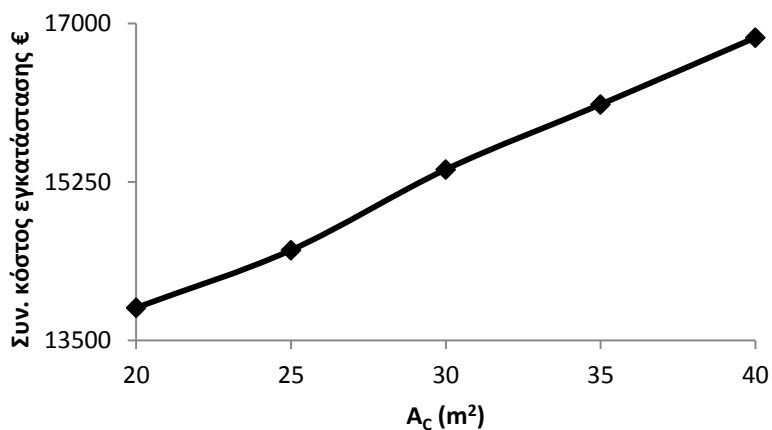
Σε αυτή την περίπτωση, κρατώντας σταθερή την τιμή του ρεύματος στα 0,2€/KWh (σημερινή τιμή) και με κόστος χρήματος $r=5\%$, από την σχέση:

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{(1+r)^i} \quad (5.10)$$

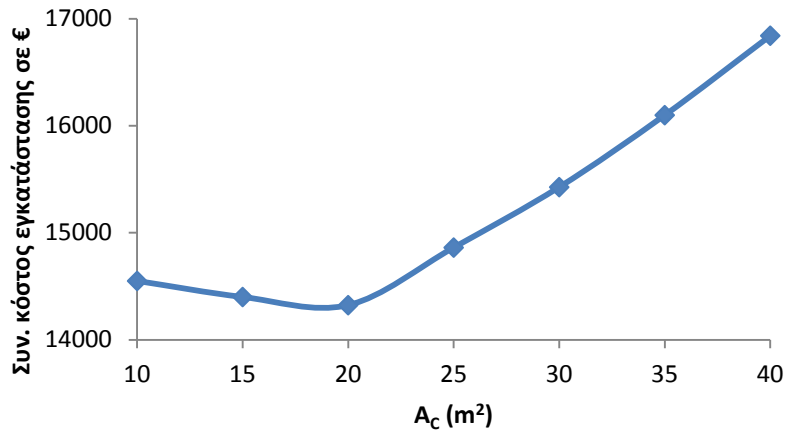
Προκύπτει $N=12,46$ χρόνια αντί για 20. Με αυτά τα νέα δεδομένα πήραμε τα εξής αποτελέσματα για το συνολικό κόστος των εγκαταστάσεων:



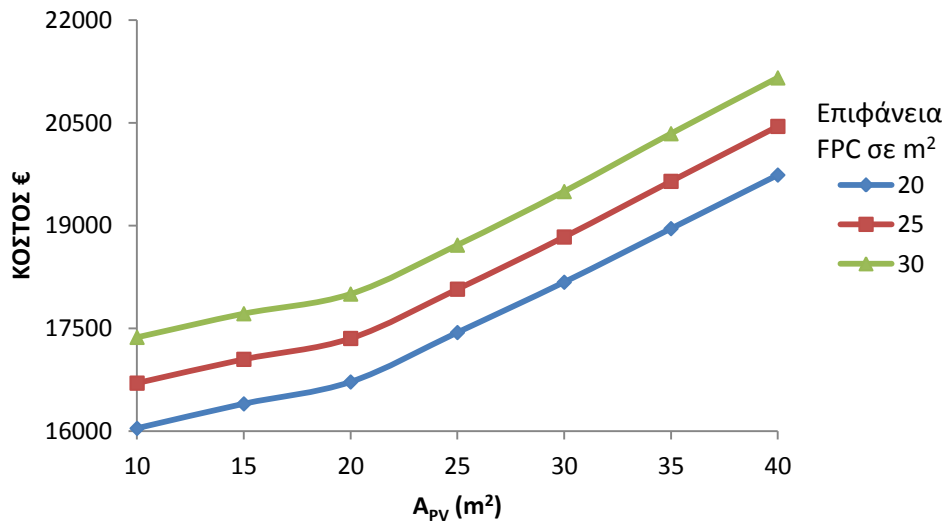
Διάγραμμα 5.39: Συνολικό κόστος εγκατάστασης στην περίπτωση των θερμοφωτοβολταϊκών



Διάγραμμα 5.40: Συνολικό κόστος εγκατάστασης στην περίπτωση των θερμικών ηλιακών



Διάγραμμα 5.41: Συνολικό κόστος εγκατάστασης στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών



Διάγραμμα 5.41: Συνολικό κόστος εγκατάστασης στην περίπτωση του συνδυασμού θερμικών ηλιακών και φωτοβολταϊκών

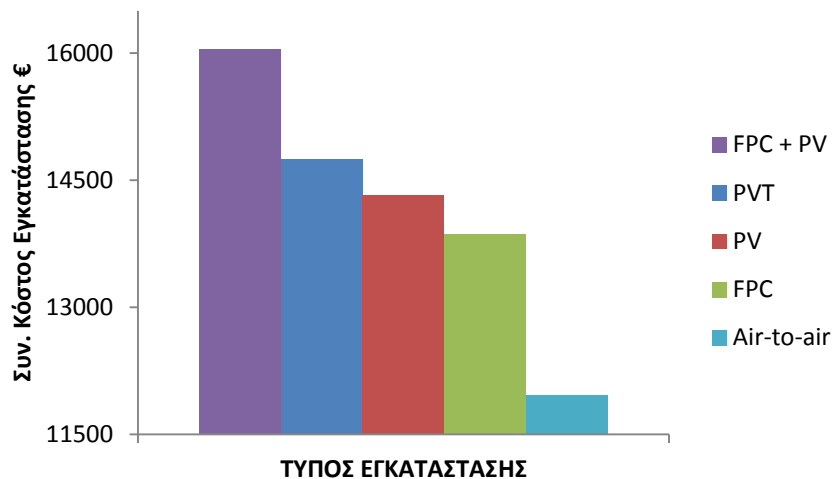
Ενώ το συνολικό κόστος εγκατάστασης την αντλίας αέρα-αέρα είναι:

$$1790\text{KWh} \times 0,2\text{€/KWh} \times 12,46 \text{ χρόνια} + 7500\text{€} = 11960\text{€}$$

Επίσης, όπως παρουσιάστηκε νωρίτερα, για τη σωστή απόδοση της αντλίας θερμότητας νερού-αέρα απαιτείται επιφάνεια συλλεκτών τουλάχιστον 20 m². Με το δεδομένο αυτό και λαμβάνοντας την ελάχιστη δυνατή τιμή για το κόστος της κάθε εγκατάστασης, εξάγεται ο παρακάτω συγκριτικός πίνακας.

ΤΥΠΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΚΟΣΤΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ €
PVT	14745
PV	14324
FPC	13861
FPC + PV	16042
Air-to-air	11960

Πίνακας 5.15: Συνολικό κόστος 20ετίας για όλους τους τύπους εγκαταστάσεων



Διάγραμμα 5.42: Συνολικό κόστος 20ετίας για όλους τους τύπους εγκαταστάσεων

Παρατηρούμε πως και πάλι η αντλία αέρα-αέρα είναι πιο οικονομική επιλογή και ακολουθούν κατά σειρά με μικρές διαφορές οι εγκαταστάσεις, με τα θερμικά ηλιακά, με τα φωτοβολταϊκά και με τα θερμοφωτοβολταϊκά [29].

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκαν διάφορα συστήματα θέρμανσης με χρήση της ηλιακής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν 3 είδη ηλιακών συλλεκτών: επίπεδοι συλλέκτες, φωτοβολταϊκά και θερμοφωτοβολταϊκά. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικότερα συμπεράσματα της μελέτης, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν βάση για περαιτέρω μελέτη στο μέλλον.

- Ο συντελεστής συμπεριφοράς αντλίας της αντλίας θερμότητας που λειτουργεί με υποβοήθηση ηλιακών είναι περίπου 5, σε αντίθεση με τις αντλίες αέρα – αέρα οι οποίες λειτουργούν με COP κοντά στο 3. Έτσι μπορεί να εξοικονομηθεί αρκετά μεγάλη ηλεκτρική ενέργεια, κάτι που έχει οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.
- Η αντλία θερμότητας υποβοηθούμενη από θερμοφωτοβολταϊκά καταναλώνει τη λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια από όλες τις εγκαταστάσεις. Ειδικότερα για μεγάλες συλλεκτικές επιφάνειες η κατανάλωση ρεύματος είναι τόσο μικρή που μπορούμε να πούμε πως λειτουργεί σχεδόν αυτόνομα. Επομένως, από ενεργειακή και περιβαλλοντική σκοπιά αποτελεί εξαιρετική επιλογή. Όμως, η τεχνολογία κοστίζει αρκετά σαν επένδυση, εξαιτίας του υψηλού κόστους των θερμοφωτοβολταϊκών συλλεκτών.
- Η διακύμανση του θερμοκρασιακού προφίλ στο εσωτερικό του κτιρίου έδειξε, πως για να λειτουργήσει η υποβοηθούμενη αντλία νερού-αέρα ικανοποιητικά, απαιτείται επιφάνεια θερμικών ηλιακών ή θερμοφωτοβολταϊκών τουλάχιστον 20 m². Αντίθετα η αντλία αέρα-αέρα μπορεί να λειτουργήσει και με μικρή επιφάνεια φωτοβολταϊκών.
- Η αντλίες θερμότητας που προσομοιάστηκαν μπορούν να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες ενός κτιρίου στην Αθήνα. Η ρύθμιση του θερμοστάτη στους 22 °C έδωσε πράγματι την επιθυμητή θερμοκρασία στο εσωτερικό του σπιτιού, εκτός από κάποιες μέρες τον Ιανουάριο που έπεσε μέχρι τους 21 °C.
- Ο όγκος του δοχείου αποθήκευσης αποδείχθηκε πως παίζει ρόλο στην απόδοση της εγκατάστασης, όχι όμως τόσο, ώστε να δικαιολογείται η δαπάνη για δοχείο μεγαλύτερο από 1 – 1.5 m³.
- Όλα τα διαγράμματα των μεγεθών (συντελεστής συμπεριφοράς COP, το ποσοστό ηλιακής κάλυψης f και η απαιτούμενη ενέργεια από το δίκτυο $P_{el,grid}$) στις εγκαταστάσεις, έδειξαν πως για μεγάλες συλλεκτικές επιφάνειες οι τιμές τους δεν αλλάζουν σημαντικά (οι καμπύλες γίνονται οριζόντιες ευθείες). Είναι φανερό δηλαδή πως χρειάζεται βελτιστοποίηση της εγκατάστασης για την αποφυγή περιττού κόστους χωρίς ιδιαίτερα αποτελέσματα.

- Για όλες τις αναλύσεις που έγιναν η περίπτωση του συνδυασμού θερμικών ηλιακών και φωτοβολταϊκών αποτελεί τη χειρότερη επιλογή.
- Η αντλία θερμότητας αέρα-αέρα είναι η πιο οικονομική εγκατάσταση σε βάθος 20ετίας με την σημερινή τιμή ρεύματος. Σημειώνεται όμως πως εξαρτάται πολύ από τις διακυμάνσεις των τιμών του παρόχου. Επίσης, η τελική διαφορά στο κόστος 20ετίας, δεν είναι απαγορευτική, ώστε, για περιβαλλοντικούς λόγους να επιλεχθεί η εγκατάσταση των θερμοφωτοβολταϊκών.
- Στη παρούσα εργασία δεν υπολογίστηκε η χρησιμότητα των εγκαταστάσεων τη περίοδο του χρόνου που δεν απαιτείται θέρμανση του χώρου. Έτσι, μπορούμε να πούμε πως με τις υποβοηθούμενες εγκαταστάσεις είναι δυνατό να έχουμε και άλλα έμμεσα κέρδη. Συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις των θερμοφωτοβολταϊκών και των θερμικών ηλιακών, είναι δυνατό να έχουμε εξοικονόμηση ενέργειας από το ζεστό νερό χρήσης. Επίσης, στις περιπτώσεις των θερμοφωτοβολταϊκών και των φωτοβολταϊκών, το ρεύμα που παράγεται να καταναλώνεται από την αντλία θερμότητας για ψύξη του χώρου.
- Σημαντικό ρόλο στην εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών έχουν οι μπαταρίες που επιλέγονται, τόσο για την αποδοτικότητα τους όσο και για τη τιμή τους. Ενδιαφέρον θα έχει να μελετηθεί, η απόδοση του συστήματος αν συνδεθεί απευθείας με το δίκτυο, για μικρότερες απώλειες ενέργειας και κατάργηση του κόστους των μπαταριών.
- Σε μελλοντική ανάλυση είναι ενδιαφέρον να αναλυθεί αντλία νερού - νερού συζευγμένη με ενδοδαπέδια θέρμανση ή με τερματικά σώματα τα οποία απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες για τη λειτουργία τους.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Carneiro JO, Vasconcelos G, Azevedo S, Jesus C, Palha C, Gomes N, Teixeira V: 'The evaluation of the thermal behavior of a mortar based brick masonry wall coated with TiO₂ nanoparticles' - An experimental assessment towards energy efficient buildings. Energy and Buildings, 2014.
- 2) Σκανδαλής Α., 'Υπολογιστική προσομοίωση της θερμικής απόδοσης τοιχοποιιών ξηράς δόμησης με εφαρμογή συμβατικών και υπέρ-μονωτικών υλικών', διπλωματική εργασία, Αθήνα 2015.
- 3) Φ.Ε.Κ. Β' 407/9.4.2010, Έγκριση κανονισμού ενεργειακής απόδοσης κτιρίων.
- 4) <http://www.ypeka.gr>
- 5) Οδηγός θερμομόνωσης κτιρίων, υπηρεσία ενέργειας, Υπουργείο Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού, 2^η έκδοση (2010)
- 6) <http://www.unisol.gr/TechnicalSolutions/NewTechnicalSolutions/ThermalInsulation/ThermalInsulation.aspx>
- 7) <http://www.knaufinsulation.uk>
- 8) <https://atyourservice.com.cy/blog/posts/thermomonomosi-spitiou>
- 9) Κακάτσιος Ξ., 'Αρχές Μεταφορά Θερμότητας και Μάζης', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2006
- 10) Χρηματοπούλου Μ., 'Προσομοίωση ηλιακά υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας', διπλωματική εργασία, Αθήνα 2009
- 11) <http://www.technotec.gr>
- 12) <http://www.4green.gr>
- 13) Mahmut Sami Buker, Saffa B. Riffat, Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: A systematic review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 55, March 2016
- 14) Αντωνόπουλος Κίμων, 'Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα', Αθήνα 2011
- 15) <http://gogreenheatsolutions.co.za/?q=project-type/solar-water-heating/flat-plate-collector>
- 16) Soteris A. Kalogirou, Solar thermal collectors and applications, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 30, Issue 3, 2004, Pages 231-295
- 17) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Type_of_Concentrated_solar_power.png
- 18) <http://blog.xe.gr/?p=4799>
- 19) <http://www.sunblog.org>
- 20) Πλακούτσης Ν., 'Μελέτη φωτοβολταϊκού πάρκου και μέτρηση χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας και απόδοσης', διπλωματική εργασία, Αθήνα 2015.

- 21) Ζαπίτης Στ., 'Προσομοίωση Υβριδικών Φωτοβολταϊκών Θερμικών συστημάτων νερού με χρήση λογισμικού Energy Plus', διπλωματική εργασία, Αθήνα 2010.
- 22) Τρυπαναγνωστόπουλος Ι., Τσελεπής Σ., Σουλιώτης Μ., Τονι J.K., 'Σχεδίαση και οικονομικά στοιχεία για υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά ηλιακά συστήματα', 3^ο εθνικό συνέδριο – Η εφαρμογή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, Αθήνα 2005.
- 23) T.T. Chow, K.F. Fong, G. Pei, J. Ji, M. He, Potential use of photovoltaic-integrated solar heat pump system in Hong Kong, Applied Thermal Engineering, Volume 30, Issues 8–9, June 2010, Pages 1066-1072
- 24) H.A. Zondag, D.W. de Vries, W.G.J. van Helden, R.J.C. van Zolingen, A.A. van Steenhoven, The yield of different combined PV-thermal collector designs, Solar Energy, Volume 74, Issue 3, March 2003, Pages 253-269
- 25) Soteris A. Kalogirou, Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid pv-thermal solar system for Cyprus, Renewable Energy, Volume 23, Issue 2, June 2001, Pages 247-260
- 26) Shyam, G.N. Tiwari, I.M. Al-Helal, Analytical expression of temperature dependent electrical efficiency of N-PVT water collectors connected in series, Solar Energy, Volume 114, April 2015, Pages 61-76
- 27) <http://www.monachos.gr>
- 28) <http://www.wikipedia.gr>
- 29) Μπέλλος Ε. 'Ενεργειακή αξιοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας βιομηχανικών διεργασιών', διπλωματική εργασία, Αθήνα 2012