

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**  
**Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Προσομοίωση κτιρίου μηδενικής ενέργειας με το  
λογισμικό TRNSYS**

**Δήμτσας Δημήτριος**

**Επιβλέπων καθηγητής: Τζιβανίδης Χρήστος**

**Αθήνα, Ιούνιος 2016**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Τζιβανίδη Χρήστο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, καθώς επίσης και για την άψογη συνεργασία και την άμεση καθοδήγηση του όλο αυτό το διάστημα.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Μπέλλο Ευάγγελο για το διαρκές ενδιαφέρον και τις πολύτιμες συμβουλές του σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση, την υπομονή και την στήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	4
ABSTRACT .....	5
1. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ.....	6
1.1 Εισαγωγή .....	6
1.2 Κατανάλωση ενέργειας στον κτιριακό τομέα .....	6
1.3 Ενεργειακός σχεδιασμός κτιρίων με ενσωμάτωση ΑΠΕ.....	7
1.4 Βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων και παθητικά ηλιακά συστήματα .....	9
1.5 Βιοκλιματικός σχεδιασμός και χρήση βλάστησης στα κτίρια.....	13
1.6 Θερμομονωτικά υλικά στα κτίρια .....	23
2. ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΚΤΙΡΙΑ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	27
2.1 Εισαγωγή .....	27
2.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα στα κτίρια.....	27
2.3 Ανεμογεννήτρια στα κτίρια .....	39
2.4 Το σύστημα αυτοπαραγωγής με ενεργειακό συμψηφισμό (Net Metering) .....	48
2.5 Αντλίες Θερμότητας .....	51
3. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ TRNSYS 16.....	58
3.1 Εισαγωγή στο TRNSYS .....	58
3.2 Το στούντιο προσομοίωσης (Simulation Studio) .....	59
3.3 Το περιβάλλον TRNBuild .....	67
3.4 Οι εφαρμογές TRNSED και TRNEdit .....	74
4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΟ TRNSYS SIMULATION STUDIO .....	75
4.1 Βήματα σχεδιασμού του κτιρίου στο TRNSYS Studio .....	75
4.2 Ρύθμιση παραμέτρων του κτιρίου .....	84
4.3 Ανάλυση της συνδεσμολογίας των στοιχείων της βασικής εγκατάστασης.....	91
4.4 Περίπτωση 1 <sup>η</sup> : Χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου .....	106
4.5 Περίπτωση 2 <sup>η</sup> : Χρήση ανεμογεννήτριας για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου	114
4.6 Περίπτωση 3 <sup>η</sup> : Χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ σε συνδυασμό με ανεμογεννήτρια για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου.....	118
4.7 Περίπτωση 4 <sup>η</sup> : Χρήση φωτοβολταϊκών χωρίς μπαταρία για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου (Net Metering Case) .....	122

4.8 Περίπτωση 5 <sup>η</sup> : Χρήση τεχνολογίας Net Metering για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου και βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίου .....	124
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	132
5.1 Εισαγωγή .....	132
5.2 Ανάλυση και περιγραφή του κτιρίου .....	133
5.3 Χρήση Αντλίας Θερμότητας Αέρα-Αέρα για την θέρμανση και την ψύξη του κτιρίου .....	138
5.4 Χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου.....	140
5.5 Χρήση οικιακής ανεμογεννήτριας για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου .....	146
5.6 Χρήση συνδυασμού ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκών πάνελ για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου .....	152
5.7 Χρήση του συστήματος Net Metering για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου.....	158
5.8 Χρήση τεχνολογίας Net Metering για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου και βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίου .....	166
5.9 Ενεργειακή και οικονομική σύγκριση των εγκαταστάσεων .....	175
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	181
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	184

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Λαμβάνοντας υπόψη τις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις των κτιρίων σήμερα, την βαθμιαία εξάντληση των συμβατικών καυσίμων αλλά και τη συνεχόμενη επιβάρυνση του περιβάλλοντος, στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται σχεδιασμός και μελέτη ενός κτιρίου μηδενικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, μελετάται ένα τυπικό κτίριο διαστάσεων  $100 \text{ m}^2$ , στην περιοχή της Αθήνας, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, του οποίου η θέρμανση και η ψύξη επιτυγχάνεται με χρήση αντλίας θερμότητας. Η κάλυψη όλων των ηλεκτρικών καταναλώσεων του κτιρίου θα γίνει μέσω της εκμετάλλευσης της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας. Μελετώνται διάφορα συστήματα και συνδυασμοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού, με σκοπό την επιλογή της βέλτιστης λύσης ενεργειακά και οικονομικά. Αναλυτικά τα πέντε συστήματα που προσομοιώθηκαν με χρήση του λογισμικού TRNSYS 16 με σκοπό την κάλυψη των ηλεκτρικών καταναλώσεων του κτιρίου είναι:

- Φωτοβολταϊκά συζευγμένα με μπαταρία για αποθήκευση ενέργειας.
- Ανεμογεννήτρια μικρού μεγέθους συζευγμένη με μπαταρία για αποθήκευση ενέργειας.
- Συνδυασμός φωτοβολταϊκών και ανεμογεννήτριας συζευγμένα με μπαταρία για αποθήκευση ενέργειας.
- Φωτοβολταϊκά χωρίς μπαταρία για αυτοπαραγωγή (Net Metering System).
- Φωτοβολταϊκά χωρίς μπαταρία για αυτοπαραγωγή σε συνδυασμό με ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίου (Εγκατάσταση φυτεμένης οροφής).

Η δομή της εργασίας είναι κατανοητή σε 6 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις των κτιρίων σήμερα και προτείνονται τρόποι για την ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων όπως η ενσωμάτωση ΑΠΕ, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων, η χρήση παθητικών ηλιακών συστημάτων, η χρήση βλάστησης στα κτίρια και η χρήση σωστής θερμομόνωσης. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συστήματα ΑΠΕ που χρησιμοποιούνται στα κτίρια για ηλεκτροπαραγωγή όπως φωτοβολταϊκά με ή χωρίς μπαταρία και ανεμογεννήτριες καθώς και εναλλακτικοί τρόποι θέρμανσης και ψύξης, όπως αντλίες θερμότητας. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή του λογισμικού προσομοίωσης TRNSYS και των βασικότερων λειτουργιών του. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται βήμα-βήμα η κατασκευή και η διαμόρφωση όλων των εγκαταστάσεων που μελετήθηκαν. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της κάθε εγκατάστασης και στη συνέχεια ακολουθεί ενεργειακή και οικονομική σύγκριση όλων των εγκαταστάσεων. Τέλος στο έκτο κεφάλαιο εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της εργασίας και προτείνονται θέματα προς διερεύνηση στο μέλλον.

## **ABSTRACT**

Considering the high energy demands today, the increasing fossil fuel exhaustion and the continuous environmental pollution, the aim of this diploma thesis is to design and simulate a zero energy building. Specifically, to achieve the required thermal comfort standards for an indoor area of 100 m<sup>2</sup> throughout the year, an air source heat pump is utilized. In order to cover all the electrical consumptions of the building, renewable energy sources as solar and wind energy are mainly used. Many different systems and combinations are investigated, towards the selection of the optimum solution from both financial and energy point of view. In detail, the five systems that were simulated by the TRNSYS software are the following:

- Photovoltaic energy system with battery storage
- Wind turbine system with battery storage
- Photovoltaic – Wind energy system with battery storage
- Photovoltaic net metering system
- Photovoltaic net metering system and energy efficiency improvement of building (Green roof establishment)

Particularly the aims of this project are reflected in a six-chapter structure. The first chapter presents the current energy situation in buildings and recommends certain solutions for energetic improvement, such as renewable energy sources incorporation, bioclimatic design of buildings, passive solar systems use, vegetation in buildings and appropriate use of thermal insulation. The second chapter consists of the main renewable energy systems for electrical generation such as photovoltaic collectors and wind turbines as well as alternative heating and cooling methods like heat pumps. Furthermore, the third chapter explains the fundamentals of TRNSYS software and its main functions while the next chapter provides a detailed examination of the construction and modelling of each system. The fifth chapter presents the results of each simulation as long as an energy-financial comparison between facilities. Finally, in the last chapter many important conclusions are drawn after the elaboration of this issue and also suggestions are made for future scientific research.

## **1. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ**

### **1.1 Εισαγωγή**

Ο άνθρωπος ανέκαθεν προσπαθούσε να εξασφαλίσει ευνοϊκές συνθήκες διαβίωσης. Αυτό οδήγησε στην κατασκευή κτιρίων με μεγάλο ενεργειακό αποτύπωμα, με υψηλές καταναλώσεις σε ηλεκτρική ενέργεια και καύσιμα, τα οποία παράλληλα δεν ήταν φιλικά προς το περιβάλλον. Η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και προστασία του περιβάλλοντος γίνεται όλο και πιο ορατή στις μέρες μας, και αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω της ενεργειακής αναβάθμισης των κτιρίων. Σκοπός της, είναι η μείωση της κατανάλωσης της συμβατικής ενέργειας στα κτίρια μέσω του αποδοτικού ενεργειακού σχεδιασμού τους και της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.

### **1.2 Κατανάλωση ενέργειας στον κτιριακό τομέα**

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ο κτιριακός τομέας αποτελεί τον σημαντικότερο τομέα κατανάλωσης της τελικής ενέργειας σε απόλυτες τιμές, με ποσοστό που αγγίζει το 40%. Έχει καταγραφεί, ότι η θέρμανση των κτιρίων κατέχει σημαντικό μέρος των συνολικών ενεργειακών καταναλώσεων τους με ποσοστό 69% , ακολουθούμενη από την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (15%) , τις ηλεκτρικές συσκευές και το φωτισμό (11%). Ιδιαίτερα στις βόρειες ευρωπαϊκές χώρες όπως είναι η Φινλανδία και η Δανία, όπου υπάρχουν μεγάλες ανάγκες για θέρμανση, καταναλώνονται 1.5 ΤΙΠ/κατοικία. Στην Ελλάδα, η κατάσταση είναι κάπως πιο βελτιωμένη με την κατανάλωση τόνων ισοδύναμου πετρελαίου, να ανέρχεται σε 0.9 ΤΙΠ/κατοικία.

Η μέση κατανάλωση ενέργειας ανά κατοικία έχει μειωθεί ελαφρά στην Ε.Ε. τα τελευταία 20 χρόνια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι τόσο οι κατοικίες όσο και οι ηλεκτρικές συσκευές είναι ενεργειακά πιο αποδοτικές, παρόλο που οι απαιτήσεις για θερμική άνεση είναι αυξημένες. Επιπλέον, υπάρχουν αυστηρότερα κριτήρια ενεργειακής απόδοσης που έχουν θεσπιστεί σε αρκετές χώρες την τελευταία 5ετία. Στην Ελλάδα, χώρα μεσογειακή με πολύ λιγότερες απαιτήσεις σε θέρμανση κατά τη διάρκεια σε χειμώνα, οι ανάγκες για θέρμανση των κατοικιών ανέρχονται περίπου στο 70% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. Η κατανάλωση ενέργειας για τις οικιακές συσκευές, το φωτισμό και τον κλιματισμό ανέρχεται στο 18% του συνολικού ενεργειακού ισοζυγίου. Οι κατοικίες με κεντρικό σύστημα θέρμανσης, το οποίο χρησιμοποιεί ως καύσιμο αποκλειστικά το πετρέλαιο αντιστοιχούν στο 36% του συνόλου. Το υπόλοιπο 64% είναι αυτόνομα θερμαινόμενες κατοικίες που χρησιμοποιούν σε ποσοστό 25% πετρέλαιο, 12% ηλεκτρικό ρεύμα και 18% καυσόξυλα. Σε αντίθεση με το σύνολο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στην Ελλάδα η κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια παρουσιάζει αυξητική τάση.

Η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας είναι ιδιαίτερα εμφανής στον κτιριακό τομέα, ο οποίος καλύπτει το 36% περίπου της συνολικής τελικής ενεργειακής κατανάλωσης

στην Ελλάδα, με μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης 7%. Επιπλέον, τα κτίρια ευθύνονται για πάνω από 45% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), βασικού αερίου του φαινομένου του θερμοκηπίου. [1]

### **1.3 Ενεργειακός σχεδιασμός κτιρίων με ενσωμάτωση ΑΠΕ**

Ο ενεργειακός σχεδιασμός κτιρίων, έχει ως στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας, την εξασφάλιση συνθηκών άνεσης και την αξιοποίηση των τοπικά διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε επίπεδο κτιρίου. Αυτό προϋποθέτει το βιοκλιματικό σχεδιασμό των κτιρίων και του περιβάλλοντος χώρου, τη χωροθέτηση των κτιρίων και των λειτουργιών με γνώμονα την εξοικονόμηση ενέργειας και την κάλυψη των θερμικών, ψυκτικών και ηλεκτρικών φορτίων του κτιρίου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

#### **Πλεονεκτήματα**

Η ενσωμάτωση ενεργειακά αποδοτικότερων τεχνολογιών στο δομημένο περιβάλλον αποτελεί προϋπόθεση για την πλήρη αξιοποίηση του ενεργειακού δυναμικού για κάθε κτίριο σε κάθε τόπο. Η μέγιστη αξιοποίηση του δυναμικού αυτού, μέσω ενός βέλτιστου συνδυασμού τεχνολογιών και συστημάτων, επιφέρει σημαντική μείωση στις ενεργειακές ανάγκες ενός κτιριακού συνόλου. Η μείωση αυτή των αναγκών, εκτός από τον περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης, επιφέρει και μείωση της απαιτούμενης εγκατεστημένης ισχύος των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων θέρμανσης, ψύξης, αερισμού και φωτισμού, με αποτέλεσμα τη διαστασιολόγηση τους, το μειωμένο κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης, το μειωμένο ηλεκτρικό φορτίο αιχμής το καλοκαίρι, συγχρόνως με τη μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος από τους ρύπους, σε επίπεδο κτιρίου και σε επίπεδο δικτύου.

Επιπλέον η αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί σήμερα απαραίτητη προϋπόθεση για την βελτίωση των ενεργειακών και περιβαλλοντικών συνθηκών ενός τόπου. Με σημαντική συμβολή στην αντιμετώπιση του ενεργειακού προβλήματος, χωρίς επιβάρυνση του περιβάλλοντος, η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι σε θέση να συμβάλει και με οικονομοτεχνικά οφέλη για μια αειφόρο ανάπτυξη σε τοπικό, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο.

Ο ολοκληρωμένος ενεργειακός σχεδιασμός ενός οικισμού μπορεί να αποδώσει σε μια γενικότερη κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη. Εκτός από τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα και αναλόγως του μεγέθους του οικισμού, προσφέρει δυνατότητες απασχόλησης σε διάφορους τομείς, καθώς σχετίζεται με δραστηριότητες όπως περιβαλλοντικές μετρήσεις, ενεργειακές μετρήσεις, περαιτέρω ενεργειακές μελέτες, ενεργειακό σχεδιασμό κλπ.



## Μεθοδολογία

Με στόχο την ολική κάλυψη των θερμικών και ηλεκτρικών αναγκών ενός νέου οικιστικού συνόλου με αξιοποίηση του τοπικού δυναμικού ΑΠΕ, ο ενεργειακός σχεδιασμός βασίζεται στην παρακάτω μεθοδολογία:

- Ελαχιστοποίηση των ενεργειακών αναγκών του οικιστικού συνόλου με κατάλληλο σχεδιασμό χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.
- Μέγιστη αξιοποίηση των τοπικά διαθέσιμων ΑΠΕ, με βελτιστοποίηση σε επίπεδο σχεδιασμού και εγκατάστασης/λειτουργίας των ενεργειακών συστημάτων.
- Ενεργειακή διαχείριση σε επίπεδο παραγωγής ενέργειας και τελικής χρήσης.

Η ελαχιστοποίηση των ενεργειακών αναγκών του οικιστικού συνόλου επιτυγχάνεται με το βιοκλιματικό σχεδιασμό, ο οποίος εφαρμόζεται:

- Είτε σε πολεοδομική κλίμακα για εξασφάλιση κατάλληλων μικροκλιματικών συνθηκών (επαρκής ηλιασμός, αερισμός κ.ο.κ.)
- Είτε σε κτιριακή κλίμακα, ενσωματώνοντας τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας και κατάλληλα παθητικά ηλιακά συστήματα, συστήματα φυσικού φωτισμού και ηλιοπροστασίας, φυσικού αερισμού και τεχνικές παθητικού δροσισμού.

Ορισμένες ενέργειες που συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση των ενεργειακών αναγκών για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό και ταυτόχρονα στην αύξηση της απόδοσης των ΑΠΕ, είναι η εγκατάσταση συστημάτων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και ενεργειακής διαχείρισης.

Η εγκατάσταση ΑΠΕ προτείνεται :

- Είτε σε επίπεδο οικισμού (π.χ. τηλεθέρμανση/τηλεψύξη με βιομάζα ή γεωθερμία, ηλεκτροδότηση με φωτοβολταϊκά, αιολικά ή άλλα συστήματα ΑΠΕ)
- Είτε μεμονωμένα σε ένα κτίριο (π.χ. παθητικά και ενεργητικά ηλιακά συστήματα, γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, φωτοβολταϊκά συστήματα)

Ο ενεργειακός σχεδιασμός κτιρίων με βάση και την βιοκλιματική αρχιτεκτονική συνεπάγεται πολλαπλά οφέλη όπως: ενεργειακά (εξοικονόμηση ενέργειας και θερμική/οπτική άνεση), οικονομικά (μείωση καυσίμων και κόστους ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων), περιβαλλοντικά (μείωση ρύπων, περιορισμός φαινομένου του θερμοκηπίου), κοινωνικά (βελτίωση της ποιότητας ζωής).

#### **1.4 Βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων και παθητικά ηλιακά συστήματα**

Η βιοκλιματική αρχιτεκτονική αναφέρεται στο σχεδιασμό των κτιρίων με γνώμονα την εξασφάλιση συνθηκών θερμικής και οπτικής άνεσης μέσω της αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας αλλά και άλλων περιβαλλοντικών πηγών. Βασικά στοιχεία του βιοκλιματικού σχεδιασμού αποτελούν αφενός τα παθητικά συστήματα που εγκαθίστανται στα κτίρια με στόχο την αξιοποίηση των περιβαλλοντικών πηγών για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό των χώρων και αφετέρου όλες οι τεχνικές δόμησης των κτιρίων που βελτιώνουν τη φυσική λειτουργία και την ενεργειακή συμπεριφορά του κελύφους.

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας και των περιβαλλοντικών πηγών γενικότερα μέσω των παθητικών ηλιακών συστημάτων (ΠΗΣ), επιτυγχάνεται στα πλαίσια της συνολικής θερμικής λειτουργίας του κτιρίου και της σχέσης κτιρίου – περιβάλλοντος. Η θερμική λειτουργία ενός κτιρίου αποτελεί μια δυναμική κατάσταση, η οποία εξαρτάται από τις τοπικές κλιματικές και περιβαλλοντικές συνθήκες (ηλιοφάνεια, θερμοκρασία εξωτερικού αέρα, σχετική υγρασία, άνεμος, βλάστηση, σκίαση από άλλα κτίρια κ.α.) όπως επίσης και από τις συνθήκες χρήσης του κτιρίου (κατοικία, γραφεία, νοσοκομεία, ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις).



Εικόνα 1.1 : Βιοκλιματικός σχεδιασμός κατοικίας [2]

#### **Παθητικά Ηλιακά Συστήματα Θέρμανσης**

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα στα κτίρια στοχεύουν στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση των χώρων το χειμώνα, καθώς και για παροχή φυσικού φωτισμού.

- Το συνηθέστερο παθητικό ηλιακό σύστημα είναι το σύστημα άμεσου ηλιακού κέρδους, το οποίο αξιοποιεί την ηλιακή ενέργεια για θέρμανση, με άμεσο τρόπο μέσω ανοιγμάτων κατάλληλου προσανατολισμού (νότιου). Εκτός από τα ανοίγματα το σύστημα αποτελείται από την απαραίτητη θερμική μάζα (υλικά υψηλής θερμοχωρητικότητας), την απαραίτητη θερμική προστασία (θερμομόνωση κελύφους, διπλοί ή τριπλοί υαλοπίνακες) και την απαιτούμενη ηλιοπροστασία κατά τους θερινούς μήνες.

Τα υπόλοιπα συστήματα είναι συστήματα εμμέσου κέρδους και είναι τα ακόλουθα:

- Ηλιακοί τοίχοι: Αποτελούνται από τοιχοποιίες συνδυαζόμενες με υαλοστάσιο, τοποθετημένο εξωτερικά, σε απόσταση 5-15 cm. Η τοιχοποιία είναι είτε μη μονωμένος τοίχος μεγάλης θερμικής μάζας (τοίχος θερμικής αποθήκευσης), είτε θερμομονωμένος (θερμοσιφωνικό πάνελ) ενώ το υαλοστάσιο μπορεί να είναι σταθερό ή ανοιγόμενο και να φέρει μονούς ή διπλούς υαλοπίνακες. Ο ηλιακός τοίχος λειτουργεί ως ηλιακός συλλέκτης και η θερμότητα που δημιουργείται μεταφέρεται μέσω της μάζας του τοίχου ή μέσω θυρίδων στον προσκείμενο χώρο. Μια ειδική κατηγορία τοίχων θερμικής αποθήκευσης είναι ο τοίχος Trombe – Michel (τοίχος μάζας με θυρίδες) ο οποίος συνδυάζει και τις δυο λειτουργίες θερμικής απόδοσης.
- Θερμοκήπια (ηλιακοί χώροι): Είναι κλειστοί χώροι που ενσωματώνονται σε νότια τμήματα του κτιριακού κελύφους και περιβάλλονται από υαλοστάσια. Η ηλιακή ακτινοβολία, εισερχόμενη από τα νότια υαλοστάσια του θερμοκηπίου, μετατρέπεται σε θερμική και μέρος αυτής αποδίδεται άμεσα στο χώρο (αυξάνοντας τη θερμοκρασία του αέρα), ενώ μέρος αυτής αποθηκεύεται στα δομικά στοιχεία του χώρου (θερμική μάζα) και αποδίδεται με χρονική υστέρηση. Η μεταφορά της θερμικής ενέργειας από τον ηλιακό χώρο προς το εσωτερικό του κτιρίου επιτυγχάνεται μέσω θυρίδων ή ανοιγμάτων του διαχωριστικού δομικού στοιχείου.
- Ηλιακά αίθρια: Είναι οι αιθριακοί χώροι του κτιρίου οι οποίοι επικαλύπτονται με υαλοστάσια και η θερμική τους λειτουργία είναι παρόμοια με αυτή των θερμοκηπίων.

Όλα τα παθητικά ηλιακά συστήματα, πρέπει να συνδυάζονται με κατάλληλη θερμική προστασία, ικανή θερμική μάζα (για να αποθηκεύεται μέρος της θερμικής ενέργειας και να αποδίδεται σταδιακά στους χώρους), αλλά και με επαρκή συστήματα ηλιοπροστασίας (σκιασμού) και φυσικού αερισμού για το καλοκαίρι για την αποφυγή ανεπιθύμητων συνθηκών.



Εικόνα 1.2 : Ενσωμάτωση ηλιακού χώρου σε κατοικία [3]

### **Τεχνικές φυσικού δροσισμού**

Οι κυριότερες μέθοδοι φυσικού δροσισμού που βρίσκουν ευρεία εφαρμογή είναι οι ακόλουθες:

- ❖ Η ηλιοπροστασία (σκίαση) του κτιρίου, η οποία επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους, όπως η φυσική βλάστηση, τα γεωμετρικά στοιχεία του κτιρίου (προεξοχές, εσοχές), τα σκίαστρα μόνιμα ή κινητά που τοποθετούνται εξωτερικά ή εσωτερικά των ανοιγμάτων, υαλοπίνακες με ειδικές επιστρώσεις ή ειδικής επεξεργασίας (ανακλαστικοί, επιλεκτικοί, ηλεκτροχρωμικοί κ.λπ.)
- ❖ Ο φυσικός εξαερισμός, που πραγματοποιείται με κατάλληλα σχεδιασμένα ανοίγματα στο κέλυφος και ειδικές θυρίδες στους εσωτερικούς διαχωριστικούς τοίχους έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η διείσδυση του αέρα στο χώρο.
  - Ο νυκτερινός διαμπερής αερισμός είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός, ιδιαίτερα τις θερμές ημέρες, κατά τις οποίες δεν υπάρχει δυνατότητα για ημερήσιο αερισμό. Ο νυκτερινός αερισμός έχει στόχο την αποθήκευση δροσιάς στην θερμική μάζα του κτιρίου έτσι ώστε να υπάρχει μικρή θερμική επιβάρυνση του κτιρίου κατά την επόμενη ημέρα.
  - Η χρήση ανεμιστήρων είναι επίσης μια μέθοδος η οποία ενισχύει τον φυσικό αερισμό, καταναλώνοντας ένα πολύ μικρό ποσό ηλεκτρικής

ενέργειας. Εξασφαλίζει συνθήκες θερμικής άνεσης όταν η θερμοκρασία του χώρου είναι 2-3 °C υψηλότερη από την επιθυμητή.

- ❖ Η χρήση ενισχυμένης θερμικής μάζας για την μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου.

Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι παθητικού δροσισμού, οι οποίες όμως δεν βρίσκουν τόσο ευρεία εφαρμογή λόγω της σύνθετης μορφής τους. Ωστόσο αναφέρονται και είναι οι εξής:

- ❖ Θερμική προστασία του κτιριακού περιβλήματος με τεχνικές όπως φυτεμένο δώμα, αεριζόμενο κέλυφος, ανακλαστικά επιχρίσματα εξωτερικών επιφανειών, φράγμα ακτινοβολίας.
- ❖ Ενίσχυση του φαινομένου του φυσικού εξαερισμού με πύργους αερισμού ή ηλιακές καμινάδες.
- ❖ Δροσισμός με εξάτμιση νερού με τεχνικές όπως: υδάτινες επιφάνειες, πύργος δροσισμού, ψυκτικές μονάδες εξάτμισης (άμεσης, έμμεσης ή συνδυασμένης εξάτμισης) ή και βλάστηση (μέσω της εξάτμισης-διαπνοής των φυτών).
- ❖ Δροσισμός με απόρριψη της θερμότητας στην ατμόσφαιρα με ακτινοβολία στον νυχτερινό ουρανό
- ❖ Δροσισμός με απόρριψη της θερμότητας από το κτίριο στη γη με αγωγή (υπόσκαφα ή ημιυπόσκαφα κτίρια ή υπεδάφιο σύστημα αγωγών και εναλλάκτες εδάφους – αέρα)

### **Συστήματα και Τεχνικές Φυσικού Φωτισμού**

Χρησιμοποιούνται ειδικά σχεδιασμένα συστήματα φυσικού φωτισμού με σκοπό να αξιοποιηθεί το φώς του ηλίου. Τα συστήματα αυτά ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες:

1. Ανοίγματα στην κατακόρυφη τοιχοποιία
2. Ανοίγματα οροφής
3. Αίθρια
4. Φωταγωγοί

Στα συστήματα αυτά εφαρμόζονται ορισμένες τεχνικές ως προς τον σχεδιασμό των ανοιγμάτων, τις οπτικές ιδιότητες των υαλοπινάκων, τα φωτομετρικά χαρακτηριστικά των επιφανειών (υφή, χρώμα, φωτοδιαπερατότητα υλικών), τη χρήση ανακλαστήρων. Το ζητούμενο είναι να επικρατεί επάρκεια και ομαλή κατανομή του φυσικού φωτός μέσα στο κτίριο. Χρησιμοποιούνται υαλοπίνακες με συγκεκριμένες ιδιότητες, πρισματικά φωτοδιαπερατά στοιχεία, διαφανή μονωτικά υλικά και ανακλαστήρες (ράφια φωτισμού ή ανακλαστικές περσίδες).





Εικόνα 1.3 : Φυσικός φωτισμός σε κατοικία [4]

### **Επιλογή Συστημάτων και Τεχνικών**

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια απαιτείται σωστός και ορθολογικός σχεδιασμός, όσον αφορά στη χωροθέτηση και τον προσανατολισμό του κτιρίου, το μέγεθος, τον προσανατολισμό και τη θέση των ανοιγμάτων, την προστασία του κελύφους (θερμομόνωση, ανεμοπροστασία, ηλιοπροστασία) αλλά και σωστή λειτουργία των συστημάτων. Προτιμώνται τα συστήματα τα οποία είναι απλά στην κατασκευή και τη λειτουργία τους και που συνδυάζουν θερμικά οφέλη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η εξασφάλιση επαρκούς σκίασης αλλά και φυσικού αερισμού, τους θερινούς μήνες είναι δυο πολύ σημαντικά στοιχεία. Η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνει ένα βιοκλιματικό κτίριο εξαρτάται από τον τύπο του κτιρίου, το κλίμα της περιοχής και τις επιμέρους τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται.

### **1.5 Βιοκλιματικός σχεδιασμός και χρήση βλάστησης στα κτίρια**

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός, συχνά περιλαμβάνει και τη χρήση βλάστησης με σκοπό τη δημιουργία πολεοδομικών συνόλων με ευνοϊκό μικροκλίμα, άνετους εξωτερικούς χώρους και τη μείωση των ενεργειακών καταναλώσεων του κτιρίου για θέρμανση και ψύξη. Το μικροκλίμα μιας περιοχής καταρχάς εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την ηλιοφάνεια, την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου και την υγρασία, οι οποίες μεταβάλλονται από εποχή σε εποχή. Το δομημένο περιβάλλον, ο

προσανατολισμός και η γεωμετρία των κτιρίων, η τοπογραφία, η κάλυψη του εδάφους με βλάστηση διαφόρων ειδών, τα υλικά και τα χρώματα των κτιρίων διαμορφώνουν το μικροκλίμα της περιοχής και καθορίζουν τις συνθήκες άνεσης στο χώρο.

Ειδικότερα, απαιτείται συγκεκριμένος προσανατολισμός και χωροθέτηση των κτιρίων, και ορισμένη διάταξη και πλάτος δρόμων. Παράλληλα, απαιτείται κατάλληλη διαμόρφωση του περιβάλλοντος χώρου και επιλογή βλάστησης ανάλογα με το αν είναι επιθυμητό να υπάρχει ηλιασμός ή ηλιοπροστασία και αντίστοιχα έκθεση στον άνεμο ή ανεμοπροστασία του κτιρίου, με γνώμονα πάντα τη βελτίωση του μικροκλίματος της περιοχής.

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα κτίρια, τα οποία επηρεάζουν με τη σειρά τους το μικροκλίμα, τις συνθήκες άνεσης σε υπαίθριους χώρους και την ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου. Τεχνικά χαρακτηριστικά όπως ο συντελεστής ανακλαστικότητας και ο συντελεστής εκπομπής στη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη θερμοκρασία των εξωτερικών επιφανειών. Οι ανοιχτόχρωμες επιφάνειες απορροφούν μικρό ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς αντανακλούν το μεγαλύτερο μέρος και επομένως οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι μειωμένες.

Ο ρόλος της βλάστησης είναι καθοριστικός στο δομημένο περιβάλλον καθώς συνεισφέρει στη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα του περιβάλλοντος χώρου τη θερινή περίοδο, αποτέλεσμα του σκιασμού της περιοχής και της απώλειας θερμότητας μέσω των βασικών λειτουργιών των φυτών που είναι η φωτοσύνθεση, η διαπνοή και η εξάτμιση. Καθώς το φυτό διαπνέει εξατμίζεται νερό από τα φύλλα του και παγιδεύεται θερμική ενέργεια από το περιβάλλον, ώστε να δροσίζονται τα φύλλα και ο αέρας που τα περιβάλλει με αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου. Συνεπώς, ο αέρας κοντά στο έδαφος σε δεντροφυτεμένες περιοχές είναι πιο δροσερός από άλλες δομημένες περιοχές. Μελέτες και πειράματα έχουν δείξει ότι η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε δεντροφυτεμένη και συμβατική περιοχή μπορεί να φτάσει ακόμα και τους 5 °C επηρεάζοντας θετικά το μικροκλίμα της περιοχής.

Η ένταξη της βλάστησης στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό γίνεται τόσο σε επίπεδο μεμονωμένων κτιρίων όσο και σε επίπεδο πόλης. Σε μεμονωμένα κτίρια περιλαμβάνει δέντρα σε μικρή απόσταση από το κτίριο, αναρριχώμενα φυτά και πέργκολες προσκείμενες σε τοίχους του κτιρίου, φυτεμένες οροφές κ.λπ. Ανάλογα με τον προσανατολισμό του κτιρίου, συστήνεται διαφορετικό είδος πρασίνου με σκοπό τη βελτίωση των μικροκλιματικών συνθηκών και τη μείωση των ενεργειακών καταναλώσεων του κτιρίου.



Εικόνα 1.4 : Φυτεμένη οροφή κτιρίου στο Σικάγο των Η.Π.Α. [5]

### **Φυτεμένη οροφή**

Ως αποτέλεσμα της ραγδαίας οικονομικής ανάπτυξης, πολλές χώρες αντιμετωπίζουν έντονο πρόβλημα αστικοποίησης. Εξαιτίας του αυξημένου πληθυσμού στα αστικά κέντρα, κατασκευάζονται ογκώδη κτίρια σε βάρος των πράσινων χώρων. Αυτό οδηγεί στην έλλειψη πρασίνου, η οποία με τη σειρά της προκαλεί μείωση της διαπνοής των φυτών και επομένως αυξημένη θερμοκρασία και μειωμένη υγρασία αέρα. Αυτά τα προβλήματα, μπορούν μερικώς να αντιμετωπισθούν μεταβάλλοντας τις ιδιότητες των οροφών των κτιρίων. Η εισαγωγή χώματος και φυτών στις αναξιοποίητες επιφάνειες των οροφών, θεωρείται μια πολύτιμη μέθοδος για να μετατραπούν τα κτίρια σε πιο βιώσιμα. Οι πράσινες οροφές (φυτεμένες, οικολογικές ή έμβιες) είναι ουσιαστικά οροφές με βλάστηση που αναπτύσσεται πάνω σε ένα υπόστρωμα. Η ιδέα σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε για να προωθήσει την ανάπτυξη διαφόρων ειδών βλάστησης στις οροφές των κτιρίων και ως εκ τούτου να παρέχει αισθητικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Οι πράσινες οροφές γενικά αποτελούνται από διάφορα συστατικά στοιχεία όπως βλάστηση, υπόστρωμα, υφασμάτινο φίλτρο, υλικό αποστράγγισης, φράγμα ριζών και μόνωση.

Οι πράσινες οροφές εν γένει ταξινομούνται σε εντατικές, ημιεντατικές και εκτατικές.

- Οι εντατικές οροφές χαρακτηρίζονται από ένα παχύ υπόστρωμα (20-200 cm), μεγάλη ποικιλία φυτών, υψηλές ανάγκες για συντήρηση, υψηλό κόστος



και μεγαλύτερο βάρος. Εξαιτίας του μεγάλου βάθους που έχει το χώμα, υπάρχει μεγάλο εύρος επιλογών σε βλάστηση, από θάμνους μέχρι μικρά δέντρα. Από την άλλη όμως απαιτούν συχνή συντήρηση, η οποία μπορεί να είναι λίπανση, φύτευση ή άρδευση.

- Οι εκτατικές οροφές χαρακτηρίζονται από λεπτό υπόστρωμα (κάτω από 15 cm), χαμηλό κόστος, μικρό βάρος και ελάχιστες ανάγκες για συντήρηση. Εξαιτίας του μικρού βάθους που έχει το χώμα, οι εκτατικές οροφές περιλαμβάνουν περιορισμένα είδη βλάστησης όπως γρασίδι, βρύα και ορισμένα παχύφυτα. Το σύστημα εκτατικής οροφής είναι κατάλληλο για περιπτώσεις στις οποίες δεν υπάρχει δυνατότητα για πρόσθετη δομική στήριξη.
- Οι ημιεντατικές οροφές περιλαμβάνουν μικρά ποώδη φυτά, καλύμματα εδάφους, γρασίδι και μικρούς θάμνους εξαιτίας του μετρίου πάχους υποστρώματος που διαθέτουν. Οι οροφές αυτού του τύπου απαιτούν συχνή συντήρηση και έχουν υψηλό κόστος.

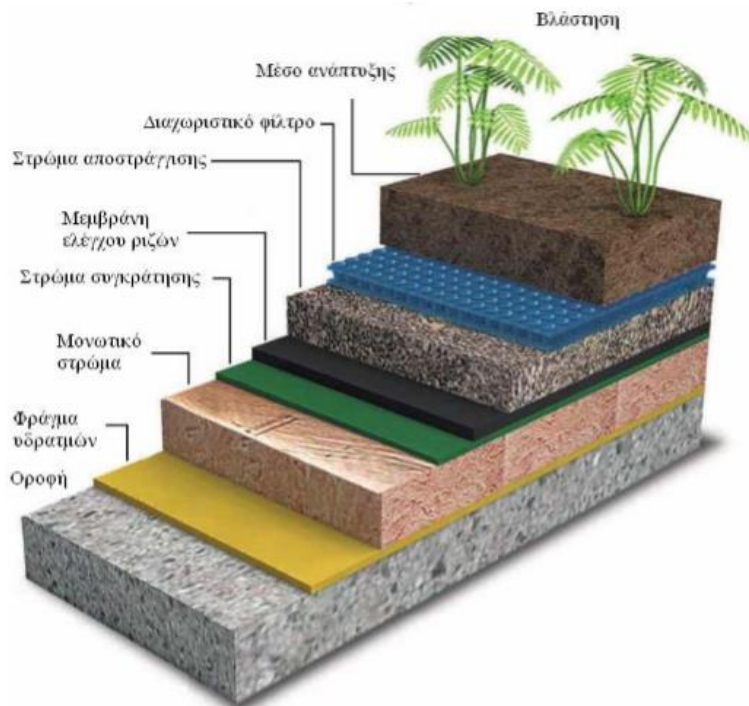
Ανάμεσα στα τρία είδη, οι εκτατικές οροφές είναι αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο, καθώς δεν επιβαρύνουν στατικά το κτίριο, έχουν χαμηλό κόστος και μικρές ανάγκες για συντήρηση. [6]

### **Συστατικά στοιχεία πράσινης οροφής**

Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς κήπους σε οροφές κτιρίων, οι πράσινες οροφές είναι δομικά κατασκευασμένες και μηχανικά σχεδιασμένες για να αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της αστικοποίησης.

Ανάλογα με την τοποθεσία και τις απαιτήσεις, οι πράσινες οροφές περιλαμβάνουν διάφορα συστατικά όπως:

- Βλάστηση
- Μέσο ανάπτυξης
- Διαχωριστικό φίλτρο
- Στρώμα αποστράγγισης
- Μεμβράνη ελέγχου ριζών
- Στρώμα συγκράτησης
- Μονωτικό στρώμα
- Φράγμα υδρατμών
- Οροφή



Εικόνα 1.5 : Παρουσίαση στρωμάτων τυπικής φυτεμένης οροφής [7]

**Βλάστηση:** Αποτελεί το ανώτερο μέρος της οροφής και ορίζεται ως η απόσταση από την ανώτερη επιφάνεια του μέσου ανάπτυξης μέχρι το ύψος των φυτών. Σχετίζεται με τις δυο βασικότερες λειτουργίες της φυτεμένης οροφής που είναι η σκίαση και η εξατμισοδιαπνοή οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζονται από παράγοντες όπως το ύψος της βλάστησης  $L$ , τον δείκτη έκτασης φύλλων LAI (Leaf Area Index) που εκφράζει την πυκνότητα της βλάστησης, την κλασματική φυτοκάλυψη δηλαδή το τμήμα της επιφάνειας που καλύπτεται από φύλλα προς τη συνολική έκταση της οροφής και το λόγο της ανακλώμενης ακτινοβολίας προς την εισερχόμενη. Η ποικιλία φυτικού υλικού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι αρκετά μεγάλη και εξαρτάται από τον τύπο της πράσινης οροφής (εντατικό, εκτατικό ή ημιεντατικό), τις κλιματολογικές συνθήκες, το ύψος του κτιρίου και τη θέση του.

**Μέσο ανάπτυξης:** Το μέσο ανάπτυξης διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην κατασκευή και τη λειτουργία μιας φυτεμένης οροφής. Η επιλογή κατάλληλου εδαφικού μίγματος είναι καθοριστικός παράγοντας για τη διάρκεια ζωής του φυτικού υλικού. Τα αναγκαία χαρακτηριστικά του μέσου ανάπτυξης είναι τα ακόλουθα:

- Επαρκής αερισμός του ριζικού συστήματος των φυτών
- Δυσκολία σε συμπίεση ώστε να εμποδίζεται η αποστράγγιση του νερού
- Μεγάλη ικανότητα συγκράτησης υγρασίας
- Ανθεκτική βάση για τα φυτά

- Απαλλαγμένο από σπόρους ζιζανίων και ασθένειες
- Μικρό βάρος

Επειδή τα φυσικά εδάφη είναι βαριά, στις φυτεμένες οροφές χρησιμοποιούνται ελαφριά εδαφικά μίγματα που αποτελούνται από υψηλής ποιότητας λίπασμα και ανακυκλωμένα υλικά. Ένα τυπικό μίγμα αποτελείται από 1/3 επιφανειακό χώμα, 1/3 λίπασμα και 1/3 περλίτη. Άλλα μίγματα περιλαμβάνουν άργιλο, ελαφρόπετρα ή λάβα.

Διαχωριστικό φίλτρο: Η ύπαρξη του είναι αναγκαία έτσι ώστε να αποφεύγεται η είσοδος του εδαφικού υλικού στο στρώμα αποστράγγισης. Τα υλικά του διαχωριστικού φίλτρου συνήθως είναι υφάσματα με κρυσταλλικές ίνες, ίνες από πολυπροπυλένιο και πολυαιθυλένιο κ.λπ.

Στρώμα αποστράγγισης: Μια φυτεμένη οροφή πρέπει να διαθέτει αποστραγγιστικό στρώμα προκειμένου να απομακρύνει ή να αποθηκεύει το νερό που δεν απορροφάται από το μέσο ανάπτυξης των φυτών και δεν χρησιμοποιείται από τα φυτά. Εάν το πλεονάζον νερό δεν απομακρυνθεί αφενός αυξάνεται το βάρος του συστήματος και αφετέρου μπορεί να προκληθεί διάβρωση των ριζών. Επομένως το στρώμα αποστράγγισης συσσωρεύει το νερό με τη βοήθεια μικρών δεξαμενών της άνω πλευράς ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την αποστράγγιση του πλεονάζοντος νερού μέσω μερικών οπών. Το στρώμα αποστράγγισης μπορεί να δομηθεί με διάφορα υλικά ανάλογα τις απαιτήσεις της κάθε περίπτωσης. Τα υλικά αυτά μπορεί να είναι φυσικά χαλίκια, θρυμματισμένες πέτρες, λάβα, σπασμένα κεραμίδια, πετροβάμβακας, αφρώδη υλικά και πλαστικά υφάσματα με κυψέλες. Το μειονέκτημα αυτών των υλικών είναι το μεγάλο βάρος τους και το ότι δεν συγκρατούν επαρκώς την ποσότητα διαλυμένων θρεπτικών στοιχείων που χρειάζεται για τα φυτά.

Μεμβράνη ελέγχου ριζών: Τα φράγματα ριζών είναι κατασκευασμένα από υλικά με πυκνή δομή τα οποία εμποδίζουν τη διείσδυση των ριζών και διασφαλίζουν την ακεραιότητα της στεγανοποιητικής στρώσης. Η ανάγκη ύπαρξης τους εξαρτάται από το είδος της στεγανοποιητικής μεμβράνης. Για παράδειγμα, οι συνθετικές μεμβράνες, συνήθως δεν απαιτούν την ύπαρξη φράγματος ριζών.

Στεγανοποιητική στρώση: Το στρώμα αυτό προστατεύει από τη διείσδυση νερού και διαρροές. Αποτελείται από ασφατικές μεμβράνες (ασφαλτόπανα) ή συνθετικές μεμβράνες.

Μονωτικό στρώμα: Η στρώση αυτή συμβάλλει στη θερμική προστασία του κτιρίου.

Φράγμα υδρατμών: Είναι ένα φύλλο πλαστικού ή φύλλα αλουμινίου και προστατεύει από τη διείσδυση υγρασίας. [7]

## **Πλεονεκτήματα φυτεμένης οροφής**

### **Ενεργειακά**

- ✓ Μείωση κατανάλωσης για θέρμανση και ψύξη
- ✓ Αύξηση θερμομόνωσης
- ✓ Σκίαση από το φύλλωμα
- ✓ Εξατμισοδιαπνοή
- ✓ Αύξηση θερμικής προστασίας

### **Περιβαλλοντικά**

- ✓ Μείωση φόρτισης αστικού δικτύου απορροής υδάτων με την κατακράτηση νερού από το φυτεμένο δώμα
- ✓ Μείωση ηχορύπανσης
- ✓ Δέσμευση σκόνης και ρύπων
- ✓ Βελτίωση μικροκλίματος περιοχής
- ✓ Φυσικό καταφύγιο για τοπική χλωρίδα και πανίδα
- ✓ Επανάκτηση περιοχών πρασίνου
- ✓ Μείωση φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας

### **Κοινωνικά**

- ✓ Αξιοποίηση χώρου
- ✓ Αύξηση αξίας της ιδιοκτησίας
- ✓ Αισθητική αναβάθμιση αστικού τοπίου
- ✓ Αύξηση παραγωγικότητας κατοίκων
- ✓ Αειφόρος ανάπτυξη

## **Μειονεκτήματα φυτεμένης οροφής**

Παρά τα πολυάριθμα οφέλη της, η εγκατάσταση φυτεμένης οροφής παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα:

- Οικονομική επιβάρυνση
- Στατική επιβάρυνση φυτεμένων οροφών
- Κίνδυνος υγρασίας
- Δυσκολία επισκευής σε περίπτωση βλάβης των στεγανωτικών στρώσεων
- Συντήρηση κήπου

## Μαθηματική Μοντελοποίηση Πράσινης Οροφής

Προηγούμενες έρευνες έχουν δείξει ότι η πράσινη οροφή που είναι καλυμμένη με φυτά παρουσιάζει διαφορετική θερμική συμπεριφορά από την πράσινη οροφή χωρίς φυτά. Αυτό έγκειται στο γεγονός ότι τα φυτά παρέχουν σκίαση, διαπνοή και ανεμοπροστασία. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μοντελοποίηση πράσινης οροφής εκτατικού τύπου (χωρίς φυτά μεγάλου μεγέθους) καθώς αυτή προσφέρει τα περισσότερα οφέλη και είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη.

Στην περίπτωση που η οροφή καλύπτεται μόνο από υπόστρωμα και γρασίδι, η προσομοίωση είναι σχετικά απλή. Η διατήρηση ενέργειας κατά μήκος της οροφής για ημι-σταθερές συνθήκες περιβάλλοντος είναι:

$$R_n = Q_E + Q_{sensible} + Q_{conduction} \quad (1.1)$$

Η εξίσωση (1.1) μπορεί να τροποποιηθεί έτσι ώστε να εμπεριέχει τις απώλειες θερμότητας στον περιβάλλοντα αέρα, ομαδοποιημένες μαζί ως απώλειες θερμότητας στρώματος, μέσω συναγωγής, ακτινοβολίας και εξάτμισης.

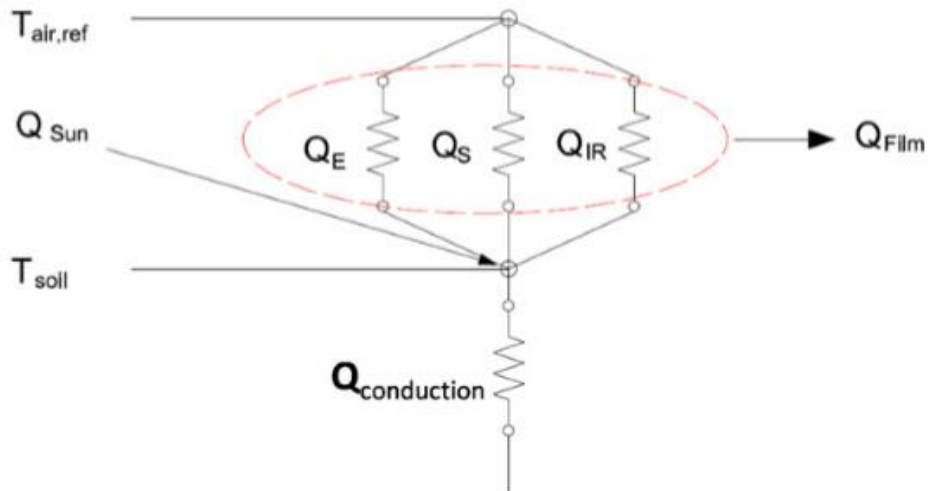
$$R_{sh,abs} = Q_{film} + Q_{conduction} \quad (1.2)$$

Στην εξίσωση (1.2) ο όρος  $Q_{film}$  αναφέρεται στην μεταφορά θερμότητας από το υπόστρωμα στο περιβάλλον μέσω εξάτμισης, συναγωγής και ακτινοβολίας. Η απορροφούμενη μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία  $R_{sh,abs}$  είναι γραμμικά ανάλογη με την εισερχόμενη ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος  $R_{sh}$  και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_{sh,abs} = (1 - \rho_{soil})R_{sh} \quad (1.3)$$

Η ανακλαστικότητα του χώματος, εξαρτάται από το είδος του χώματος και το περιεχόμενο νερό σε αυτό και λαμβάνει τιμές από 0.1 για υγρό χώμα έως 0.35 για ξηρό χώμα. Αντίθετα, ο συντελεστής εκπομπής χώματος  $\varepsilon_{soil}$ , δεν εξαρτάται από το περιεχόμενο νερό και λαμβάνει τιμές από 0.90 έως 0.98.

Συνολικά το μοντέλο πράσινης οροφής χωρίς φυτά, περιλαμβάνει εξισώσεις για συναγωγή, εξάτμιση, ακτινοβολία και αγωγή διαμέσου του υποστρώματος.



Εικόνα 1.6: Θερμικό κύκλωμα ροών θερμότητας στην περίπτωση πράσινης οροφής χωρίς φυτά [8]

- Ροή θερμότητας μέσω συναγωγής

Η αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση, η οποία υπολογίζει τον αριθμό Nusselt για εξαναγκασμένη, μικτή ή φυσική συναγωγή σε μια επίπεδη επιφάνεια, ανάλογα με τον λόγο των αριθμών Grashof και Reynolds.

$$Nu = \begin{cases} 3 + 1.25 \times 0.025Re^{0.8}, & Gr < 0.068Re^{2.2} \\ 2.7 \left(\frac{Gr}{Re}\right)^{\frac{1}{3}} \left(3\frac{15}{4} + \frac{15}{16} \times 0.0253Re^{0.8}\right), & 0.068Re^{2.2} < Gr < 55.3Re^{5/3} \\ 0.15Ra^{1/3}, & 55.3Re^{5/3} < Gr \end{cases} \quad (1.4)$$

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \quad (1.5)$$

Όπου  $L$  το χαρακτηριστικό μήκος της ροής που λαμβάνεται ίσο με τη διαγώνιο. Στην περίπτωση που η οροφή είναι τετραγωνική με πλευρά  $a$  το χαρακτηριστικό μήκος δίνεται από τη σχέση (1.6).

$$L = a\sqrt{2} \quad (1.6)$$

- Ροή θερμότητας μέσω εξάτμισης

Ο δεύτερος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι η εξατμιστική ροή, η οποία υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση.

$$Q_E = \frac{\rho C_p}{\gamma(r_{substrate} + r_a)} (e_{soil} - e_{air}) \quad (1.7)$$

Όπου  $e_{air}$  είναι η πίεση ατμών του αέρα,  $e_{soil}$  είναι η κορεσμένη πίεση ατμών στη θερμοκρασία του χώματος,  $r_a$  είναι η αεροδυναμική αντίσταση στην μεταφορά μάζας,  $\gamma$  είναι η ψυχομετρική σταθερά ενώ  $r_{substrate}$  είναι η αντίσταση της επιφάνειας του υποστρώματος στη μεταφορά μάζας. Αυτός ο τελευταίος συντελεστής βασίζεται στο γεγονός ότι καθώς η επιφάνεια του χώματος ξηραίνεται, λαμβάνει χώρα εξάτμιση σε βαθύτερα επίπεδα χώματος, και επομένως η αντίσταση στην εξάτμιση νερού αυξάνεται.

- Ροή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος

Η ροή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας ανάμεσα στον ουρανό και το υπόστρωμα, και η αντίστοιχη αντίσταση του στη μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας για δυο σώματα τα οποία το ένα περιβάλλει πλήρως το άλλο, δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{IR} = \varepsilon_{substrate} \sigma (T_{top,substrate}^4 - T_{sky}^4) \quad (1.8)$$

Όπου  $T_{top,substrate}$ , είναι το ανώτατο επίπεδο του υποστρώματος, το οποίο έρχεται σε επαφή με τον αέρα. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να υπολογισθεί η θερμοκρασία του ουρανού. Ο απλούστερος είναι να γίνει η παραδοχή ότι είναι ίση με τη θερμοκρασία του αέρα.

- Ροή θερμότητας μέσω αγωγής

Η ροή θερμότητας μέσω αγωγής υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση. Η θερμική αγωγιμότητα του υποστρώματος  $k_{substrate}$  υπολογίζεται από εμπειρικές σχέσεις.

$$Q_{conduction} = k_{substrate} \frac{T_{top,substrate} - T_{bottom,substrate}}{L} \quad (1.9)$$

- Συνολική ροή θερμότητας

Η συνολική ροή θερμότητας από το περιβάλλον μέσα στο χώρο του κτιρίου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$Q_{in} = A_{roof} \cdot h_{total} \cdot (T_{amb} - T_{in}) \quad (1.10)$$

Όπου  $h_{total}$ , συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας. [8]

## **1.6 Θερμομονωτικά υλικά στα κτίρια**

Θερμομονωτικά χαρακτηρίζονται τα υλικά, τα οποία παρεμποδίζουν τη ροή θερμότητας μέσω των δομικών στοιχείων ενός κτιρίου και κατά αυτό τον τρόπο συμβάλλουν στην βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς του. Η θερμική προστασία που παρέχουν οφείλεται στον αέρα που είναι εγκλωβισμένος στη μάζα τους, είτε μέσα σε κλειστές ή ανοικτές κυψελίδες, είτε ανάμεσα σε πολλές μικρές και λεπτές ίνες. Ο αέρας αυτός θεωρείται πρακτικά ακίνητος και ως εκ τούτου παρουσιάζει πολύ μικρή θερμική αγωγιμότητα. Υπάρχουν περιπτώσεις που ο αέρας καταλαμβάνει μέχρι και το 96% του όγκου των θερμομονωτικών υλικών, κάτι που δικαιολογεί το πολύ μικρό βάρος τους συγκριτικά με τα υπόλοιπα οικοδομικά υλικά.

Όπως αναφέρεται στα σχετικά πρότυπα, ένα υλικό χαρακτηρίζεται θερμομονωτικό όταν ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητάς του είναι μικρότερος από μια ανώτερη τιμή, που κυμαίνεται από 0.06 W/mK έως 0.1 W/mK. Φυσικά υπάρχουν και υλικά με θερμική διαπερατότητα που υπερβαίνει αυτή την τιμή, τα οποία επίσης προσφέρουν αξιοσημείωτη θερμική προστασία.

### **Ταξινόμηση θερμομονωτικών υλικών**

Τα θερμομονωτικά υλικά ταξινομούνται με διάφορα κριτήρια ως εξής:

- Σε οργανικά και ανόργανα (με κριτήριο την πρώτη ύλη παραγωγής τους)
- Σε ινώδη, κυψελώδη και κοκκώδη (με κριτήριο τη μορφή τους)
- Σε προσβαλλόμενα και μη προσβαλλόμενα από την υγρασία, ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες κ.τ.λ. (με κριτήριο τις ιδιότητες τους)
- Σε πλάκες, παπλώματα, χύδην, άκαμπτα ή εύκαμπτα (με κριτήριο τη μορφή τους)
- Σε φυσικά και τεχνητά (με κριτήριο τον τρόπο παραγωγής τους)
- Σε βαριά και ελαφρά (με κριτήριο το βάρος τους)

### **Βασικές ιδιότητες θερμομονωτικών υλικών**

Βασική προϋπόθεση για την σωστή επιλογή ενός θερμομονωτικού υλικού κατά την κατασκευή ενός κτιρίου, είναι η γνώση των ιδιοτήτων του. Οι κυριότερες ιδιότητες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι τα ιδιαίτερα θερμοτεχνικά του χαρακτηριστικά, οι μηχανικές του ιδιότητες, η ανθεκτικότητα του στις περιβαλλοντικές συνθήκες, η φιλικότητα προς το περιβάλλον, οι δυνατότητες χρήσης και εφαρμογής του και η αλληλεπίδραση του με άλλα υλικά. Ωστόσο, σημαντικό κριτήριο για την επιλογή ενός θερμομονωτικού υλικού, αποτελεί το κόστος του καθώς και το κόστος μεταφοράς και τοποθέτησης. Συγκεκριμένα οι παράμετροι οι οποίες καθορίζουν τις ιδιότητες ενός υλικού είναι οι ακόλουθες:



❖ *Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ*

Ορίζει την ποσότητα της ροής θερμότητας που διέρχεται από τη μονάδα επιφάνειας ενός υλικού, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δυο απέναντι επιφανειών του είναι ίση με τη μονάδα. Η τιμή του συντελεστή αυτού, υπολογίζεται εργαστηριακά σε θερμοκρασία 10 °C και σε ξηρή κατάσταση, και ακολούθως γίνεται μια προσαύξηση προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση της πρακτικής υγρασίας, δηλαδή της υγρασίας που προσλαμβάνει το υλικό από το περιβάλλον του υπό κανονικές συνθήκες.

❖ *Η επίδραση της θερμοκρασίας*

Η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Άνοδος της θερμοκρασίας επιφέρει αύξηση της τιμής του λ και άρα μείωση της θερμομονωτικής ικανότητας του υλικού. Επίσης, ορισμένα θερμομονωτικά υλικά είναι ευπαθή σε πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές τιμές της θερμοκρασίας, καθώς προκαλείται αλλοίωση της υφής τους και θραύση των κυψελών τους. Γενικά, η άνοδος της θερμοκρασίας επιφέρει επιμήκυνση των διαστάσεων των υλικών σε βαθμό που εξαρτάται από το συντελεστή θερμοδιαστολής τους. Για παράδειγμα στα θερμομονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται υπό μορφή σκληρών πλακών, τυχόν επιμήκυνση λόγω διαστολής μπορεί να επιφέρει ανασήκωσή τους και η συρρίκνωση τους να δημιουργήσει θερμογέφυρες στις ακμές συναρμογής τους.

❖ *Η επίδραση της υγρασίας*

Η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας επηρεάζεται άμεσα και από την υγρασία. Υλικά που έχουν εμποτισθεί με υγρασία μειώνουν ή ακόμα και χάνουν τις θερμομονωτικές τους ιδιότητες.

❖ *Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας*

Τα αφρώδη οργανικά θερμομονωτικά υλικά και κυρίως τα πολυστερινικά και πολυουρεθανικά επηρεάζονται από την ηλιακή ακτινοβολία, όταν είναι εκτεθειμένα για μεγάλο χρονικό διάστημα σε αυτήν. Οι ακτίνες του ηλίου αλλοιώνουν σταδιακά το υλικό, μειώνοντας την αντοχή του και καθιστώντας το πιο εύθραυστο. Αυτός είναι ο λόγος που τα μονωτικά υλικά φυλάσσονται σε υπόγειους ή σκιασμένους χώρους και με κατάλληλο προστατευτικό επικάλυμμα.

❖ *Η χημική συμπεριφορά*

Ορισμένα οργανικά θερμομονωτικά υλικά προσβάλλονται από ποικιλία χημικών διαλυτών όπως είναι οι βενζίνες, το ασετόν, το βενζόλιο κ.α. Επίσης τα αφρώδη οργανικά υλικά επηρεάζονται από την πίσσα και τη ρευστή άσφαλτο.

#### ❖ Η αντίσταση στη φωτιά

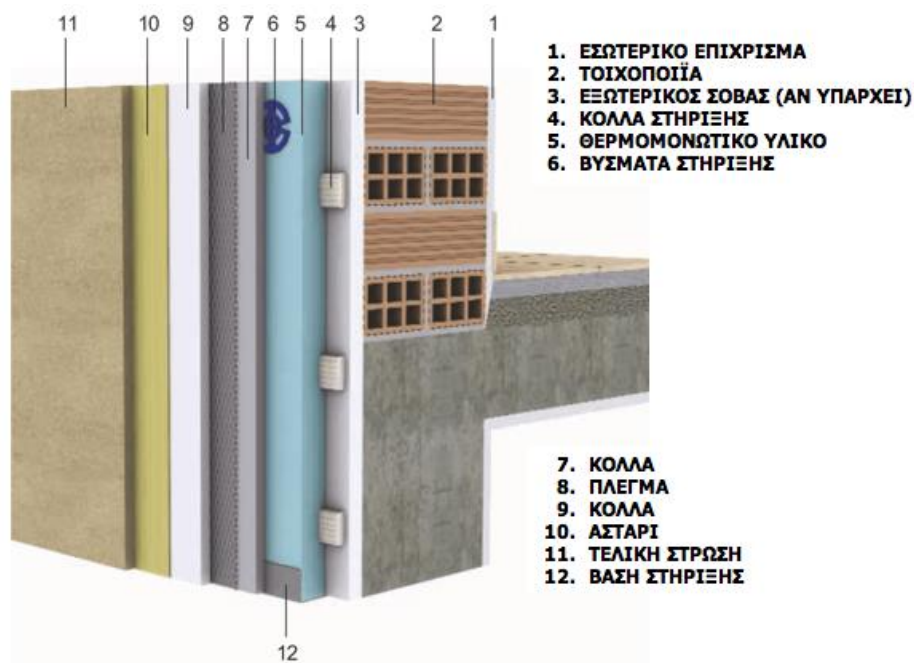
Όλα σχεδόν τα θερμομονωτικά υλικά ανόργανης προέλευσης παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά απέναντι στη φωτιά. Τα περισσότερα δεν αναφλέγονται. Τέτοια είναι ο υαλοβάμβακας, ο πετροβάμβακας, το αφρώδες γυαλί, ο περλίτης κ.α. Αντιθέτως τα οργανικά θερμομονωτικά υλικά, έχουν κακή συμπεριφορά απέναντι στη φωτιά και αναφλέγονται αμέσως. Τέτοια είναι τα πολυστερινικά και πολυουρεθανικά υλικά και τα παράγωγα από ξύλα και φυτά.

#### ❖ Η μηχανική αντοχή

Το θέμα της αντοχής των θερμομονωτικών υλικών σε θλιπτικά ή εφελκυστικά φορτία είναι άλλοτε μείζονος σημασίας και άλλοτε όχι. Για παράδειγμα μικρή σημασία έχει η μηχανική αντοχή μιας θερμομονωτικής στρώσης στον πυρήνα μιας τοιχοποιίας πλήρωσης. Αντιθέτως, είναι ζωτικής σημασίας αν η τοιχοποιία είναι φέρουσα και το θερμομονωτικό υλικό ανήκει στα φέροντα στοιχεία της κατασκευής (πχ θερμομονωτικά τούβλα).

#### ❖ Η ηχομονωτική ικανότητα

Η ικανότητα των υλικών να περιορίζουν τη μετάδοση του αερόφερτου ήχου (δηλαδή του ήχου που μεταφέρεται με τη βοήθεια του αέρα) και του κτυπογενούς (δηλαδή του παραγόμενου από την κρούση δυο στέρεων υλικών) καθορίζει την ηχομονωτική του συμπεριφορά. Τέτοια υλικά είναι τα διάφορα ανόργανα ινώδη (υαλοβάμβακας, πετροβάμβακας) ή οργανικά πορώδη ή ινώδη (φελλός, ξυλόμαλλο). [9]



Εικόνα 1.7 : Στρώματα θερμομόνωσης κτιρίου [10]

### Τα κυριότερα θερμομονωτικά υλικά και οι ιδιότητες τους

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα κυριότερα θερμομονωτικά υλικά που βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή των κτιρίων, με τις ιδιότητες του καθενός.

Υλικό	Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ (W/mK)
Διογκωμένη πολυστερίνη	8-50	-80°C έως 80°C	0.029-0.041
Αφρώδης πολυστερίνη	20-80	-60°C έως 75°C	0.025-0.035
Πολυουρεθάνη	30-80	-50°C έως 120°C	0.020-0.027
Υαλοβάμβακας	13-100	-100°C έως 500°C	0.030-0.045
Πετροβάμβακας	30-180	-100°C έως 750°C	0.033-0.045
Αφρώδες γυαλί	100-180	-260°C έως 430°C	0.038-0.063
Ξυλόμαλλο	360-570	0°C έως 250°C	0.055-0.065
Βαμβακόμαλλο	20-60	-80°C έως 100°C	0.0355
Περλίτης	50-800	-273°C έως 750°C	0.040-0.065
Αφρώδης φελλός	100-130	-100°C έως 120°C	0.040-0.065

Πίνακας 1.1 : Θερμοφυσικές ιδιότητες κυριότερων θερμομονωτικών υλικών στα κτίρια [11]

## **2. ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΚΤΙΡΙΑ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

### **2.1 Εισαγωγή**

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν τη σύγχρονη απάντηση στα περιβαλλοντικά προβλήματα της γης, στην βαθμιαία εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και στην υψηλή ενεργειακή ζήτηση, κι αυτός είναι ο λόγος που η χρήση τους επεκτείνεται όλο και περισσότερο. Εκτός αυτού, τα Ευρωπαϊκά κράτη αλλά και ολόκληρη η παγκόσμια κοινότητα δημιουργούν νομοθετικά πλαίσια μέσα στα οποία θα προωθηθεί αλλά και θα επιβληθεί η χρήση των ΑΠΕ. Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται έμφαση σε δυο από τις μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την ηλιακή και την αιολική, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα κτίρια ενώ παράλληλα προτείνονται εναλλακτικοί τρόποι θέρμανσης και ψύξης σε κτίρια όπως οι αντλίες θερμότητας.

### **2.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα στα κτίρια**

#### **Εισαγωγή**

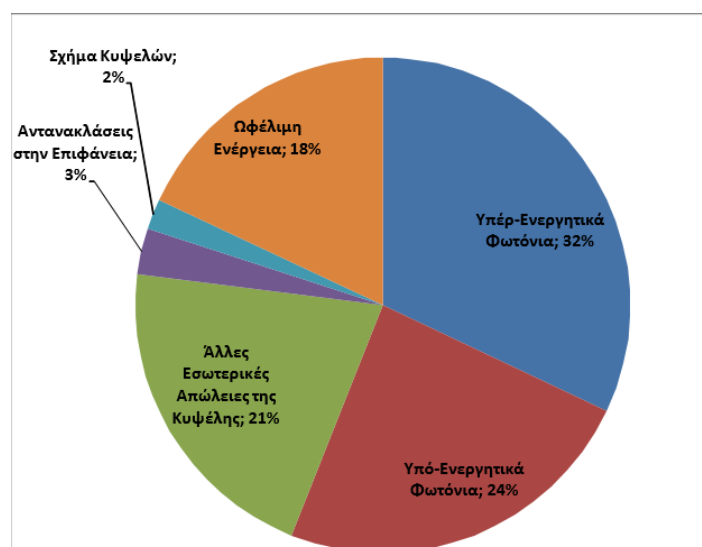
Τα φωτοβολταϊκά συστήματα (Φ/Β) είναι μια τεχνολογία που μετατρέπει μέρος της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας απευθείας σε ηλεκτρισμό. Η τεχνολογία αυτή αρχικά χρησιμοποιήθηκε την δεκαετία του '60 για την παραγωγή ενέργειας σε διαστημικές εφαρμογές. Από τις αρχές της δεκαετίας του '70 τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν για την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια σε περιοχές που ήταν απομονωμένες ή σε εφαρμογές που οι ενεργειακές απαιτήσεις ήταν μικρές. Η τεχνολογία αυτή είναι μια ενδιαφέρουσα λύση για την κάλυψη ηλεκτρικών αναγκών, ιδιαίτερα σε περιοχές με αξιόλογο ηλιακό δυναμικό.

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι η βασική πηγή ενέργειας, η οποία ενεργοποιεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το οποίο αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια που κινούνται με εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες και έχουν διαφορετικό μήκος κύματος (συχνότητα). Η ενέργεια που έχει κάθε φωτόνιο είναι ίση με το γινόμενο της μάζας επί της ταχύτητάς του.

Το βασικό υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή φωτοβολταϊκών είναι το πυρίτιο. Όλα τα φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από 1.08 eV, εφόσον απορροφηθούν θα ενεργοποιήσουν τα ηλεκτρόνια του υλικού του φωτοβολταϊκού (ημιαγωγός). Αρχικά γίνεται λανθασμένα αντιληπτό, ότι όλη η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας θα μπορούσε να μετατραπεί σε ηλεκτρικό ρεύμα. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει στην πραγματικότητα, καθώς ένα φωτόνιο μπορεί να ενεργοποιήσει και να ελευθερώσει ένα μόνο ηλεκτρόνιο. Τα φωτόνια τα οποία έχουν περισσότερη ενέργεια από αυτήν που απαιτείται για την ενεργοποίηση ενός ηλεκτρονίου, μετατρέπουν την υπολειπόμενη ενέργεια σε θερμότητα μέσα στο ίδιο το υλικό. Έτσι σαν αποτέλεσμα οι φωτοβολταϊκές κυψέλες από πυρίτιο μετατρέπουν περίπου το

25% της ολικής απορροφούμενης ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Αυτό σύμφωνα με τις σημερινές τεχνολογικές δυνατότητες αποτελεί θεωρητικό όριο. Γι αυτό το λόγο, είναι οικονομικότερο να κατασκευάσουμε συστήματα που εκμεταλλεύονται και τη θερμική ενέργεια που συσσωρεύεται στο υλικό, για εφαρμογές που χρειάζεται τόσο ηλεκτρισμός όσο και θερμότητα. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται φωτοβολταϊκά – θερμικά συστήματα.

Η επιλογή του πυριτίου ως υλικού κατασκευής στα φωτοβολταϊκά προκαλεί ανακλάσεις της ηλιακής ακτινοβολίας με συνέπεια ένα μέρος της να μη φτάνει ποτέ στο φωτοβολταϊκό κα καθώς αντανακλάται πάνω στην επιφάνεια του υλικού. Αυτή η απώλεια μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας αντανάκλαστική επικάλυψη πάνω στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. Επίσης, υπάρχουν εσωτερικές απώλειες ενέργειας που εξαρτώνται από την καθαρότητα του υλικού και την ποιότητα της κρυσταλλικής δομής του. Τέλος, σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα η επιφάνεια που έχει διατεθεί για τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας δεν καλύπτεται πλήρως από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Αν και το πρόβλημα αυτό περιορίζεται κατασκευάζοντας στοιχεία με εξαγωνικό ή παραλληλεπίπεδο σχήμα αντί για κυκλικό (όπως συνηθιζόταν παλιότερα), κάποιο μέρος της επιφάνειας παραμένει αχρησιμοποίητο.

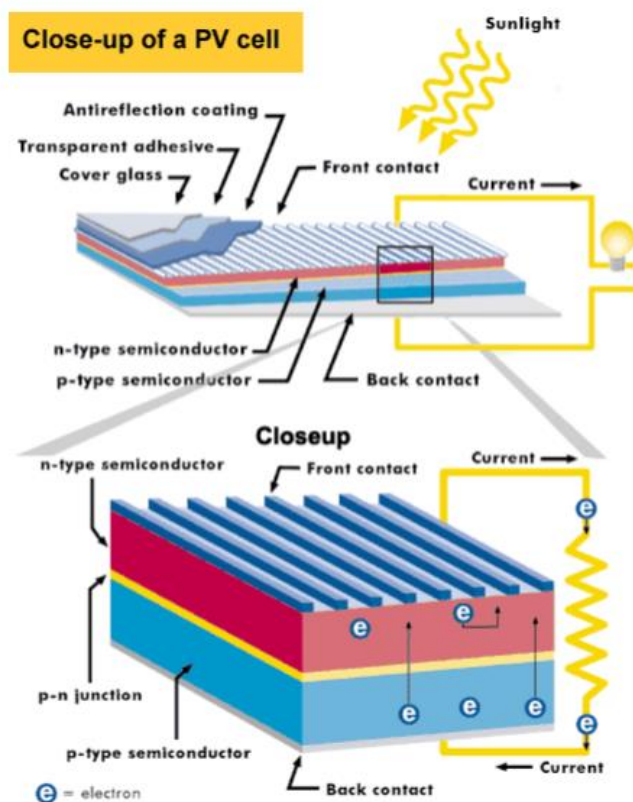


Εικόνα 2.1 : Κατανομή ενέργειας σε μια φωτοβολταϊκή κυψέλη [12]

Κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια φωτοβολταϊκή κυψέλη, ένα άτομο πυριτίου (ημιαγωγός) απορροφά ένα φωτόνιο και η πρόσθετη ενέργεια που ενεργοποιεί ή διεγείρει ένα από τα εξωτερικά ηλεκτρόνια το ελευθερώνει. Αυτό γίνεται καλύτερα όταν τα άτομα είναι παρατεταγμένα σε συγκεκριμένες σειρές ή θέσεις. Αυτή ονομάζεται κρυσταλλική κατάσταση. Σε οποιοδήποτε κρύσταλλο, τα άτομα ή τα μόρια είναι διατεταγμένα σε τέλειους γεωμετρικούς συνδυασμούς. Όταν ένα φωτόνιο χτυπήσει τον κρύσταλλο του πυριτίου, το διαπερνά μέχρις ότου απορροφηθεί από ένα άτομο. Αμέσως μετά, η ενέργεια του φωτονίου μεταφέρεται σε ένα από τα εξωτερικά ηλεκτρόνια, το οποίο ακολούθως ελευθερώνεται από το

άτομο αφήνοντας ελεύθερη τη θέση του, ή όπως ονομάζεται, δημιουργώντας μια “οπή”. Όταν μια δέσμη φωτός πέφτει πάνω στον κρύσταλλο του πυριτίου, εκατομμύρια ηλεκτρονίων απελευθερώνονται κατά αυτόν τον τρόπο και δημιουργείται ένας αντίστοιχος αριθμός οπών που παραμένουν στην εξωτερική στοιβάδα. Ένα οποιοδήποτε ηλεκτρόνιο μπορεί να γεμίσει τη θέση μιας οπής εκπέμποντας μια ελάχιστη ποσότητα θερμότητας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής.

Όταν σταματήσει η ακτινοβολία, όλα τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται ελεύθερα και εκτός θέσεως, επιστρέφουν αμέσως στις κενές θέσεις. Ο κρύσταλλος επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση, με αυξημένη τη θερμοκρασία του υλικού. Επειδή τα άτομα δεν αλλάζουν θέση, ο κρύσταλλος δεν αλλάζει μέγεθος, βάρος, σχήμα, ή εμφάνιση.



Εικόνα 2.2 : Βασική δομή ενός ηλιακού κελιού [13]

### Αρχές Λειτουργίας – Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών

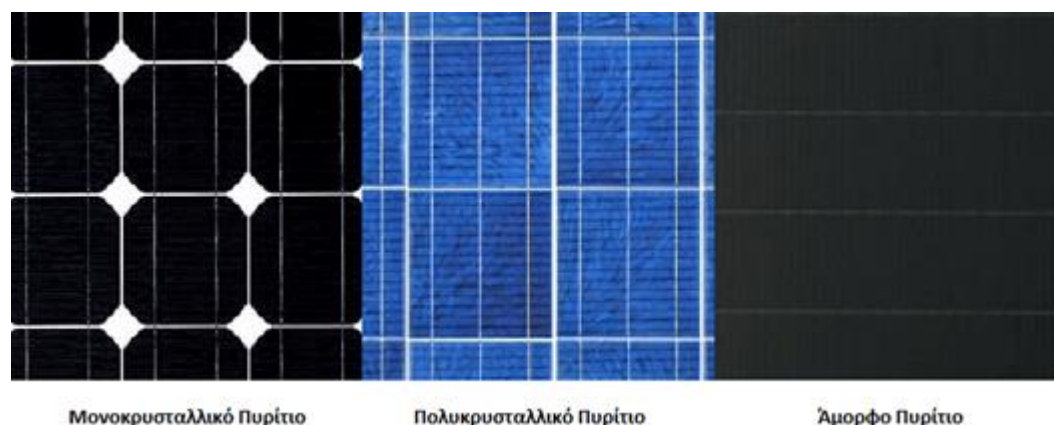
Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο περιέχει ένα λεπτό στρώμα πυριτίου ενισχυμένο με φώσφορο, το οποίο έρχεται σε επαφή με ένα στρώμα πυριτίου ενισχυμένο με βόριο. Καθώς προσπίπτει ακτινοβολία πάνω στο στοιχείο, τα φωτόνια απορροφούνται και ελευθερώνονται τα ηλεκτρόνια. Το τμήμα πυριτίου-φωσφόρου ονομάζεται N-πυρίτιο διότι τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό φορτίο ενώ το τμήμα πυριτίου-βορίου ονομάζεται P-πυρίτιο, μιας και το φορτίο του είναι θετικό. Εάν τα

δύο τμήματα συνδεθούν με ένα σύρμα, μεταφέρονται ηλεκτρόνια από το αρνητικό στο θετικό.

Η ποσότητα ρεύματος που παράγει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι ανάλογη της ποσότητας ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στο στοιχείο. Γι αυτό το λόγο, το ρεύμα αυξάνεται με την επιφάνεια του στοιχείου καθώς και με την ένταση της ακτινοβολίας. Η τάση από την άλλη, εξαρτάται από το υλικό που χρησιμοποιείται. Όλα τα στοιχεία από πυρίτιο παράγουν περίπου 0.5 Volt ανεξάρτητα από την επιφάνεια.

Τα φωτοβολταϊκά αποτελούν ένα μοναδικό τρόπο παραγωγής ενέργειας αφού δεν καταναλώνουν κανένα υλικό κατά τη διάρκεια παραγωγής του ρεύματος, ούτε απελευθερώνουν κάποια ποσότητα υλικού κατά τη χρήση τους. Επομένως, τα Φ/Β μπορούν να είναι μονάδες εντελώς απομονωμένες και ανεξάρτητες και θεωρητικά έχουν χρόνο ζωής όσο και τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται.

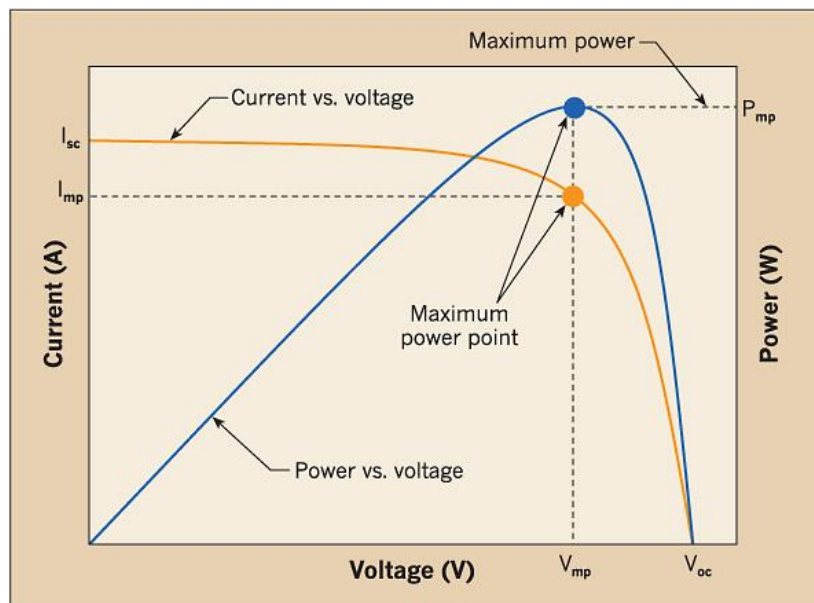
Τα φωτοβολταϊκά πυρίτιου ταξινομούνται ανάλογα με τη δομή του βασικού υλικού τους. Για να έχει το πυρίτιο ικανοποιητικές ιδιότητες απαιτείται μεγάλη καθαρότητα. Από τις φάσεις καθαρισμού προκύπτει σε κυλινδρική μονοκρυσταλλική μορφή το στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυρίτιου. Εκτός από το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο υπάρχουν και άλλες μορφές πυρίτιου που είναι πιο φθηνές να παραχθούν όπως το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Ωστόσο η απόδοση στην μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό είναι μικρότερη και παρατηρούνται επίσης ηλεκτρικά βραχυκυκλώματα στα όρια των κρυστάλλων. Χρησιμοποιείται επίσης το άμορφο πυρίτιο, το οποίο είναι καθαρό πυρίτιο που δεν έχει κρυσταλλική δομή (τα άτομα του είναι τοποθετημένα τυχαία). Τα στοιχεία από άμορφο πυρίτιο είναι πολύ φθηνά στην κατασκευή τους, οι αποδόσεις τους όμως είναι μικρές 9-11% σε σχέση με 16-18% για τις μονοκρυσταλλικές κυψέλες. Το άμορφο πυρίτιο χρησιμοποιείται σε μικροσυσκευές (π.χ. ρολόγια, υπολογιστές τσέπης, παιχνίδια κ.α.)



Εικόνα 2.2 : Είδη κυψελών πυρίτιου ανάλογα με τη δομή τους [14]

## Χαρακτηριστικά μεγέθη φωτοβολταϊκών

Συνδέοντας το φωτοβολταϊκό σύστημα σε κύκλωμα που παρεμβάλλεται ωμική αντίσταση, παρατηρείται μεταβολή της τάσης  $V$  συναρτήσει της τιμής της αντίστασης από το μηδέν έως την τιμή της τάσης ανοικτοκυκλώματος  $V_{o.c}$ . Παράλληλα με την αύξηση της αντίστασης, η ένταση του ρεύματος παραμένει σταθερή μέχρι ενός χαρακτηριστικού σημείου, ενώ στη συνέχεια μειώνεται απότομα. Η τυπική χαρακτηριστική καμπύλη των φωτοβολταϊκών στοιχείων που προκύπτει για σταθερή τιμή της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας  $G$  και της θερμοκρασίας του πλαισίου είναι η ακόλουθη.



Εικόνα 2.3 : Χαρακτηριστικές Καμπύλες I-V και P-V φωτοβολταϊκού συστήματος [15]

Προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση διαφορετικών φωτοβολταϊκών πλαισίων έχουν καθοριστεί οι πρότυπες συνθήκες ελέγχου (Standard Test Conditions, STC) κάτω από τις οποίες καταγράφεται η ηλεκτρική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών από όπου προκύπτει και η χαρακτηριστική I-V. Σύμφωνα με το πρότυπο που χρησιμοποιείται, η κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι ίση με  $1000 \text{ W/m}^2$ , η θερμοκρασία της επιφάνειας του Φ/Β  $25^\circ\text{C}$  και το φάσμα ακτινοβολίας του φωτός μάζας αέρα  $AM=1.5$ . Η μάζα αέρα ορίζεται ως ο λόγος του μήκους της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα, προς το πάχος της ατμόσφαιρας, καθορίζοντας ουσιαστικά τη μείωση της έντασης ακτινοβολίας που προκαλείται από το μεγαλύτερο δρόμο (σε σχέση με την κατακόρυφη διαδρομή) που ακολουθούν οι ηλιακές ακτίνες μέσα στην ατμόσφαιρα.

Η καμπύλη λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου χαρακτηρίζεται από το σημείο μέγιστης ισχύος όπου το φωτοβολταϊκό λειτουργεί αποδίδοντας μέγιστη ισχύ ( $P_{mp}$ ), το σημείο ρεύματος βραχυκυκλώσεως ( $I_{sc}$ ) το οποίο είναι 5-15% μεγαλύτερο από το ρεύμα μέγιστης ισχύος ( $I_{mp}$ ) και το σημείο τάσης



ανοιχτοκυκλώσεως ( $V_{oc}$ ) το οποίο είναι περίπου 0.5-0.6V στα φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου και 0.6-0.9V στα άμορφου πυριτίου.

Χαρακτηριστικό μέγεθος το οποίο καθορίζει την ποιότητα του φωτοβολταϊκού είναι ο συντελεστής πλήρωσης (FF), ο οποίος ορίζεται από το λόγο της μέγιστης παραγόμενης ισχύος  $P_{mp}$  προς τη μέγιστη θεωρητικά παραγόμενη ισχύ η οποία ορίζεται από το γινόμενο του ρεύματος βραχυκυκλώσεως  $I_{sc}$  επί την τάση ανοιχτοκυκλώσεως  $V_{oc}$ .

$$FF = \frac{P_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (2.1)$$

Ο συντελεστής πλήρωσης των φωτοβολταϊκών κρυσταλλικού πυριτίου είναι περίπου 0.75-0.85 και των φωτοβολταϊκών άμορφου πυριτίου 0.56-0.61.

Η ισχύς  $P$  που αποδίδει ένα Φ/Β στοιχείο δίνεται από την εξίσωση:

$$P = V \cdot I \quad (2.2)$$

Όπως προκύπτει από την εικόνα (2.3) η μέγιστη ισχύς  $P_{mp}$  αντιστοιχεί σε τιμή τάσης  $V_{mp}$  ελαφρά μικρότερη από την τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$ . Για ενδεικτικούς υπολογισμούς μπορεί να ληφθεί κατά προσέγγιση  $V_{mp} \cong 0.9 \cdot V_{oc}$ . Για μεγαλύτερη ακρίβεια απαιτείται η διερεύνηση του διαγράμματος P-V, ώστε να εντοπισθεί το σημείο της μέγιστης ισχύος του Φ/Β και να καθοριστεί η ακριβής τιμή της τάσης  $V_{mp}$  και η αντίστοιχη ένταση  $I_{mp}$ .

Ο βαθμός απόδοσης  $\eta$ , ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου (ή καλύτερα ο βαθμός αξιοποίησης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας) είναι ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος  $P$  που παράγεται προς τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια, η οποία καθορίζεται ως το γινόμενο της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας  $G$  επί το εμβαδόν  $A$  της επιφάνειας του Φ/Β. Συνεπώς ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται από την εξίσωση (2.3).

$$\eta = \frac{P}{G \cdot A} \quad (2.3)$$

Η καμπύλη απόδοσης του Φ/Β δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ έχει παρόμοια μορφή με την καμπύλη ισχύος. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης εμφανίζεται στην ίδια περίπου τιμή τάσης λειτουργίας του Φ/Β, με μικρή μετατόπιση προς τα δεξιά και προς τα πάνω, όσο αυξάνεται η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. [12]

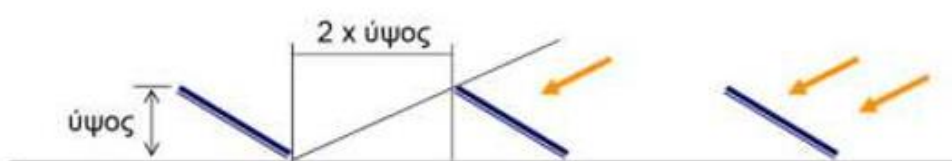
### **Κανόνες χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάνελ**

Όπως έγινε φανερό, το πρώτο ζητούμενο αποτελεί η επίτευξη της μέγιστης δυνατής έντασης ακτινοβολίας σε κάθε πάνελ κατά τη διάρκεια του χρόνου. Όπως είναι

αναμενόμενο η ένταση της ακτινοβολίας είναι αρκετά μεγαλύτερη το καλοκαίρι από ότι το χειμώνα. Ωστόσο για τον υπολογισμό της ενεργειακής απολαβής θα πρέπει κανείς να λάβει υπόψη του και το γεγονός ότι οι υψηλές θερμοκρασίες του καλοκαιριού συντελούν αρνητικά στην παραγωγή ενέργειας.

Για τη μέγιστη απολαβή ενέργειας, τα πάνελ είναι απαραίτητο να τοποθετούνται με νότιο προσανατολισμό με κλίση η οποία εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Για τα ελληνικά δεδομένα, μια τυπική μέση χαρακτηριστική κλίση είναι αυτή των 30 μοιρών. Ωστόσο, υπάρχει δυνατότητα να αυξηθεί η παραγωγή ενέργειας από τα Φ/Β, αναγκάζοντας τα να ακολουθούν καθημερινώς την πορεία του ηλίου από ανατολή προς δύση με μεταβλητή κλίση, ώστε να λαμβάνεται υπόψη και η θέση του ηλίου στον ορίζοντα.

Αναφορικά με τη σκίαση, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε η εγκατάσταση να βρίσκεται σε χώρο στον οποίο απουσιάζουν εμπόδια. Επιπρόσθετα, για την αποφυγή σκιάσεων σειρών φωτοβολταϊκών πάνελ μεταξύ τους, ένας πρακτικός κανόνας τοποθέτησης είναι ότι η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών σειρών θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια του ύψους της εγκατάστασης. Το σχήμα είναι ενδεικτικό.

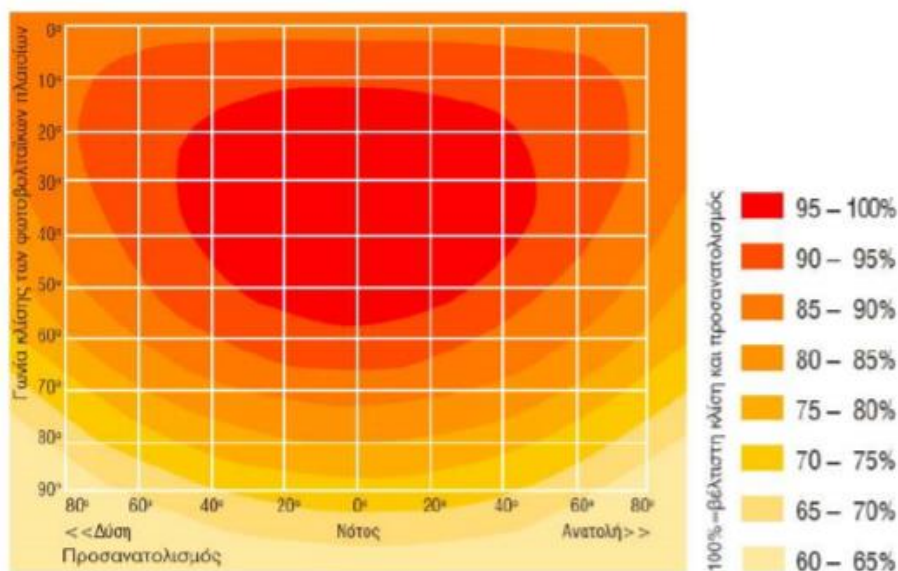


Εικόνα 2.4 : Χωροθέτηση σειρών πάνελ [16]

Η ενεργειακή απολαβή εξαρτάται προφανώς και από τα κλιματολογικά δεδομένα του τόπου εγκατάστασης. Είναι λογικό ότι δυο φωτοβολταϊκά πάνελ του ίδιου κατασκευαστή τοποθετημένα με τον ίδιο ακριβώς τρόπο θα δίνουν διαφορετική παραγωγή σε δυο διαφορετικές περιοχές, όπου επικρατούν διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Κατά την μελέτη, πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη ότι η αναγραφόμενη ισχύς κάθε πάνελ (peak power,  $W_p$ ) αναφέρεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC) οι οποίες διαφέρουν σημαντικά από τις πραγματικά επικρατούσες συνθήκες.

Για την περιοχή της Ελλάδας, μια μέση εκτίμηση της ενεργειακής απολαβής είναι 1150-1500 kWh/kWp ετησίως. Η τιμή αυτή δέχεται μια προσαύξηση 25-30% κατά μέσο όρο, με τη χρησιμοποίηση συστημάτων ανίχνευσης της πορείας του ηλίου (tracking).

Παρόλα ταύτα, ένα συχνό θέμα αποτελεί ο υπολογισμός της απόδοσης όταν υπάρχει απόκλιση από τις ιδανικές συνθήκες προσανατολισμού και κλίσης. Το φαινόμενο αυτό συναντάται συνήθως σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών σε κτίρια όπου η επιφάνεια χωροθέτησης είναι δεδομένου προσανατολισμού και κλίσης. Αντίθετα, σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών επί εδάφους υπάρχει συνήθως αρκετός χώρος ώστε να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες.



Εικόνα 2.5 : Απόδοση ανάλογα με την κλίση και τον προσανατολισμό [17]

### **Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα**

Βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών είναι η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο σημείο χρήσης. Πρόσθετα πλεονεκτήματα είναι τα ακόλουθα:

- Μηδενική ρύπανση της ατμόσφαιρας
- Μεγάλη διάρκεια ζωής των ηλιακών στοιχείων (πάνω από 25 χρόνια)
- Αθόρυβη λειτουργία
- Μηδαμινό κόστος συντήρησης και λειτουργίας
- Δυνατότητα ενσωμάτωσης τους σε οροφές, προσόψεις κτιρίων ως κύρια δομικά στοιχεία
- Δυνατότητα επέκτασης του συστήματος ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις

Το κόστος των Φ/Β πλαισίων αποτελεί το μεγαλύτερο μειονέκτημα και τροχοπέδη μπροστά στην εξάπλωση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Παρόλα αυτά, σε αρκετές περιπτώσεις, όπως σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε

περιοχές όπου το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλό, τα Φ/Β αποτελούν την πλέον ενδεδειγμένη, τεχνικά αξιόπιστη και οικονομικά αποδεκτή λύση.

### **Ενσωμάτωση στα κτίρια**

Τα τελευταία χρόνια έχει εκδηλωθεί έντονο ενδιαφέρον για εφαρμογές Φ/Β συστημάτων ενσωματωμένων σε κτίρια. Στις εφαρμογές αυτές τα Φ/Β συστήματα εγκαθίστανται σε κτίρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ συγχρόνως τα Φ/Β πλαίσια χρησιμοποιούνται σαν δομικά στοιχεία για την κάλυψη εξωτερικών επιφανειών του κτιρίου, όπως σε οροφές, προσόψεις, σκίαστρα κλπ. Τα οφέλη από την ραγδαία χρήση των Φ/Β σε κτίρια είναι πολλαπλά. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μόνη τεχνολογία που μπορεί να εφαρμοσθεί σε αστικό περιβάλλον με μηδενική ρύπανση. Η παραγωγή των Φ/Β προκύπτει κατά τις ώρες αιχμής της ζήτησης, υποστηρίζοντας το σύστημα παραγωγής ενέργειας σε περιόδους υψηλού κόστους παραγωγής. Λόγω δε της κατανεμημένης παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας στα σημεία ζήτησης μειώνονται οι απώλειες στο σύστημα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι κυριότερες εφαρμογές ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίρια είναι οι ακόλουθες.

- ❖ Η κάλυψη ολόκληρης ή μέρους της οροφής του κτιρίου
- ❖ Η χρήση τους σε υάλινες προσόψεις του κτιρίου
- ❖ Η χρήση τους σε επιφάνειες προστασίας από καιρικές συνθήκες όπως στέγαστρα, σκίαστρα.

Για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε υπάρχουσες κατασκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα κοινά πλαίσια με το πλαίσιο αλουμινίου που διαθέτουν. Σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται μια πρόσθετη ενδιάμεση κατασκευή πάνω στην οποία τοποθετούνται τα Φ/Β πλαίσια.

Για εφαρμογές Φ/Β συστημάτων σε νέα κτίρια είναι προτιμότερα τα πλαίσια χωρίς το πλαίσιο αλουμινίου (τύπου laminate) τα οποία επιτρέπουν την ενσωμάτωσή τους σαν δομικές επιφάνειες του κτιρίου. Η στήριξη των πλαισίων μπορεί να γίνει με ειδικά σχεδιασμένα υλικά ή με τυποποιημένα υλικά που χρησιμοποιούνται στην αγορά για τη στήριξη υαλοπινάκων.

Επίσης πολλές κατασκευάστριες εταιρίες μπορούν να παράγουν Φ/Β κατά παραγγελία σε συγκεκριμένες διαστάσεις ή ακόμα και σε διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα. Για εφαρμογές ενσωμάτωσης σε κτίρια, διατίθενται και πλαίσια διαφόρων χρωμάτων και βαθμού διαφάνειας, σε βάρος όμως της απόδοσης. Επίσης οι κατασκευαστές διαθέτουν ειδικά πλαίσια τα οποία μπορούν να αντικαταστήσουν

απευθείας κεραμίδια ή άλλα συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των οροφών. [18] , [19]

### **Υποσυστήματα εγκατάστασης φωτοβολταϊκών**

Μια ολοκληρωμένη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών περιλαμβάνει εκτός από το κυρίως τμήμα που είναι τα ηλιακά πάνελ, και διάφορα άλλα υποσυστήματα και εξαρτήματα όπως σύστημα μετατροπής ισχύος (inverter), μπαταρίες κ.α. Τα συστήματα αυτά εξετάζονται ξεχωριστά στη συνέχεια.

#### ❖ Σύστημα Μετατροπής Ισχύος

Όπως είναι γνωστό, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο οδηγεί σε παραγωγή συνεχούς ρεύματος (DC - Direct Current) , ενώ το δίκτυο της ΔΕΗ και όλες οι ηλεκτρικές συσκευές και τα φορτία λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC - Alternating Current). Τη διαδικασία μετατροπής του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο αναλαμβάνει ο μετατροπέας (inverter). Ο inverter είναι μια συσκευή με ηλεκτρονικές και ηλεκτρολογικές διατάξεις, η οποία μετατρέπει το παραγόμενο από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο, συμβατό με το δίκτυο του ηλεκτρισμού. Πρακτικά, ο μετατροπέας του κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι ο εγκέφαλος της εγκατάστασης αφού μπορεί να εκμεταλλεύεται το ρεύμα που παράγεται από τα πάνελ, είτε πρόκειται για αυτόνομο είτε για διασυνδεδεμένο σύστημα. Επιπρόσθετα, ο inverter είναι υπεύθυνος για την επιτήρηση όλου του συστήματος. Αν για παράδειγμα εντοπισθεί κάποια βλάβη στο δημόσιο δίκτυο, στη Φ/Β γεννήτρια ή στην καλωδίωση, θα ενημερώσει το σύστημα αμέσως. Αποτελεί ένα από τα κυριότερα τμήματα της εγκατάστασης, καθώς από αυτόν εξαρτάται η λειτουργία και η καλή απόδοση του συστήματος που διαθέτουμε. Στο πρακτικό κομμάτι, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη σημασία κατά την επιλογή του προϊόντος, καθώς έτσι διασφαλίζεται σε μεγάλο βαθμό η απρόσκοπτη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Πιο συγκεκριμένα, οι λειτουργίες και οι αρμοδιότητες ενός μετατροπέα περιλαμβάνουν μετατροπή συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο με όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες, βελτιστοποίηση παραγόμενης ισχύος, επίβλεψη συστήματος και διασφάλιση ασφαλούς λειτουργίας, επικοινωνία με λειτουργικά δεδομένα, έλεγχο της θερμοκρασίας, προστασία από καιρικά φαινόμενα κ.α. [29]

Οι μετατροπείς μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες.

- Αυτόνομοι μετατροπείς (Stand-alone inverters). Χρησιμοποιούνται σε απομονωμένα συστήματα όπου ο μετατροπέας αντλεί συνεχές ρεύμα από μπαταρίες που φορτίζονται από φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Πολλοί αυτόνομοι μετατροπείς ενσωματώνουν επίσης αναπόσπαστους φορτιστές μπαταριών έτσι ώστε να τροφοδοτούν την μπαταρία από μια

εναλλασσόμενη πηγή, όταν είναι διαθέσιμη. Υπό κανονικές συνθήκες, αυτοί δεν συνδέονται με το δίκτυο ηλεκτροδότησης οπότε δεν είναι απαραίτητο να περιέχουν σύστημα αυτόματης διακοπής.

- Μετατροπείς συγχρονισμένοι με δίκτυο (Grid tie inverters). Η φάση τους περιγράφεται από ένα ημιτονοειδές κύμα. Είναι σχεδιασμένοι ώστε να διακόπτουν αυτόματα τη λειτουργία τους σε περίπτωση βλάβης της τροφοδοσίας, για λόγους ασφαλείας. Δεν παρέχουν εφεδρική τροφοδοσία σε περίπτωση διακοπής.
- Μετατροπείς με εφεδρική μπαταρία (Battery backup inverters). Είναι ειδικοί μετατροπείς που έχουν σχεδιασθεί για να αντλούν ηλεκτρική ενέργεια από μπαταρία, να ελέγχουν τη φόρτιση της μπαταρίας μέσω ενός ενσωματωμένου φορτιστή και να εξάγουν την περίσσεια ενέργειας στο δίκτυο ηλεκτροδότησης. Αυτοί οι μετατροπείς είναι σε θέση να προμηθεύουν με εναλλασσόμενο ρεύμα επιλεγμένα φορτία σε περίπτωση διακοπής και έχουν προστασία αυτόματης διακοπής εάν υπάρξει βλάβη.



Εικόνα 2.6 : Μετατροπείς (inverters) σε εγκατάσταση Φ/Β [30]

#### ❖ Μπαταρίες

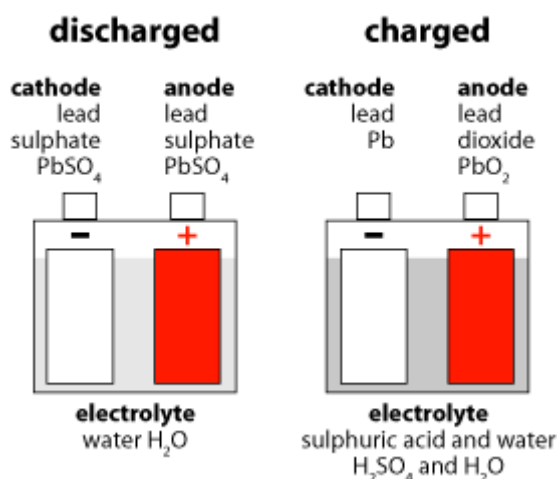
Οι μπαταρίες συσσωρεύουν την περίσσεια ενέργειας που δημιουργείται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ κατά τη διάρκεια της ημέρας και την αποθηκεύουν έτσι ώστε να προμηθεύουν τα ηλεκτρικά φορτία κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε περιόδους νέφωσης. Υπάρχουν και άλλοι λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα όπως για να λειτουργούν τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια κοντά στο σημείο ονομαστικής ισχύος της, να τροφοδοτούν τα ηλεκτρικά φορτία με σταθερές τάσεις και να παρέχουν ρεύμα σε ηλεκτρικά φορτία και μετατροπείς (inverters).

Οι μπαταρίες έχουν τη δυνατότητα να εκφορτίζονται γρήγορα και να παράγουν περισσότερο ρεύμα από ότι η πηγή φόρτισης μπορεί να παράγει από μόνη της. Η

χωρητικότητα μιας μπαταρίας μετράται σε αμπερώρες για μια δεδομένη τάση. Οι μπαταρίες είναι ηλεκτροχημικές συσκευές ευαίσθητες στο κλίμα, στον αριθμό των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης, στη θερμοκρασία και στην ηλικία. Η απόδοση μιας μπαταρίας εξαρτάται από το κλίμα, την τοποθεσία και τον τρόπο χρήσης.

Πολλά διαφορετικά χημικά μπορούν να συνδυαστούν για την παραγωγή μπαταριών. Ορισμένοι συνδυασμοί είναι χαμηλού κόστους αλλά και ισχύος επίσης ενώ κάποιοι άλλοι μπορούν να αποθηκεύσουν τεράστιο ποσό ενέργειας όμως έχουν και τεράστιο κόστος. Για τη σωστή επιλογή μιας μπαταρίας σε ένα απομονωμένο σύστημα φωτοβολταϊκών είναι απαραίτητη η πλήρης κατανόηση των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών, των χαρακτηριστικών απόδοσης και των λειτουργικών απαιτήσεων του συστήματος.

Σήμερα κατασκευάζονται αρκετά είδη μπαταριών το καθένα με ειδικό σχεδιασμό και χαρακτηριστικά απόδοσης, που είναι κατάλληλο για συγκεκριμένες εφαρμογές. Ο κάθε τύπος έχει τα ατομικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα οι μπαταρίες μολύβδου – οξέως είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες λόγω της ευρείας διαθεσιμότητας τους σε πολλά μεγέθη, με χαμηλό κόστος και αξιόπιστα χαρακτηριστικά απόδοσης. Σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις πολύ χαμηλών θερμοκρασιακών συνθηκών, χρησιμοποιούνται μπαταρίες νικελίου – καδμίου, όμως το υψηλό κόστος αγοράς τους περιορίζει τη χρήση τους στα περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα. Όπως είναι προφανές, δεν υπάρχει η τέλεια μπαταρία και εναπόκειται στον σχεδιαστή του συστήματος να επιλέξει την κατάλληλη μπαταρία για την συγκεκριμένη εφαρμογή. [31]



Εικόνα 2.7: Εκφόρτιση και φόρτιση μπαταρίας μολύβδου οξέως [32]

## 2.3 Ανεμογεννήτρια στα κτίρια

### Εισαγωγή

Οι αιολικές μηχανές αποτελούν ανθρώπινες επινοήσεις, που στοχεύουν στην αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αιολικές μηχανές ή ανεμόμυλοι όπως ονομάζονταν στο παρελθόν είναι συσκευές που χρησιμοποιούνταν από την 2<sup>η</sup> π.Χ. χιλιετία από Κινέζους, Πέρσες, Ασσύριους και αρχαίους Έλληνες.

Οι ανεμοκινητήρες ή ανεμογεννήτριες (Α/Γ) όπως αποκαλούνται σήμερα, επανήλθαν στο προσκήνιο τη δεκαετία του '70, εξαιτίας της ενεργειακής κρίσης που επικρατούσε αλλά και του συνεχώς επιδεινούμενου περιβαλλοντικού προβλήματος. Αρχικά, οι Α/Γ χρησιμοποιούνταν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μικρών απομονωμένων καταναλωτών. Στη συνέχεια ο τομέας της αιολικής ενέργειας, παρουσίασε ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη και οι Α/Γ συνδέθηκαν με τοπικά ηλεκτρικά δίκτυα.

Σήμερα οι ανεμογεννήτριες έχουν γνωρίσει σημαντική εξέλιξη σχετικά με το μέγεθος τους και η πλειοψηφία των αιολικών εγκαταστάσεων παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε ηλεκτρικά δίκτυα (διασυνδεδεμένες εγκαταστάσεις). Παράλληλα, σημαντική παραμένει η συνεισφορά των Α/Γ στην κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών απομονωμένων καταναλωτών όπως εξοχικές κατοικίες, τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί, αγροκτήματα, φάροι κ.λπ.

Κάθε χρόνο προστίθενται όλο και περισσότερες εγκαταστάσεις Α/Γ φτάνοντας το 2010 την εγκατάσταση νέων αιολικών πάρκων ονομαστικής ισχύος πάνω από 25000 MW (2 φορές περίπου την εγκατεστημένη ισχύ της χώρας μας). Παράλληλα, στην Ευρωπαϊκή Ένωση το μεγαλύτερο ποσοστό νέων εγκαταστάσεων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής αφορούσε σε μονάδες αιολικής ενέργειας.

Οι Α/Γ ανάλογα με την ονομαστική τους ισχύ και το μέγεθος τους διακρίνονται σε:

Χαρακτηρισμός	Ονομαστική ισχύς (kW)
Μίκρο (micro)	≤1
Μικρές	1-10
Μικρές – Μεσαίες	10-100
Μεσαίες	100-500
Μεγάλες	≥500

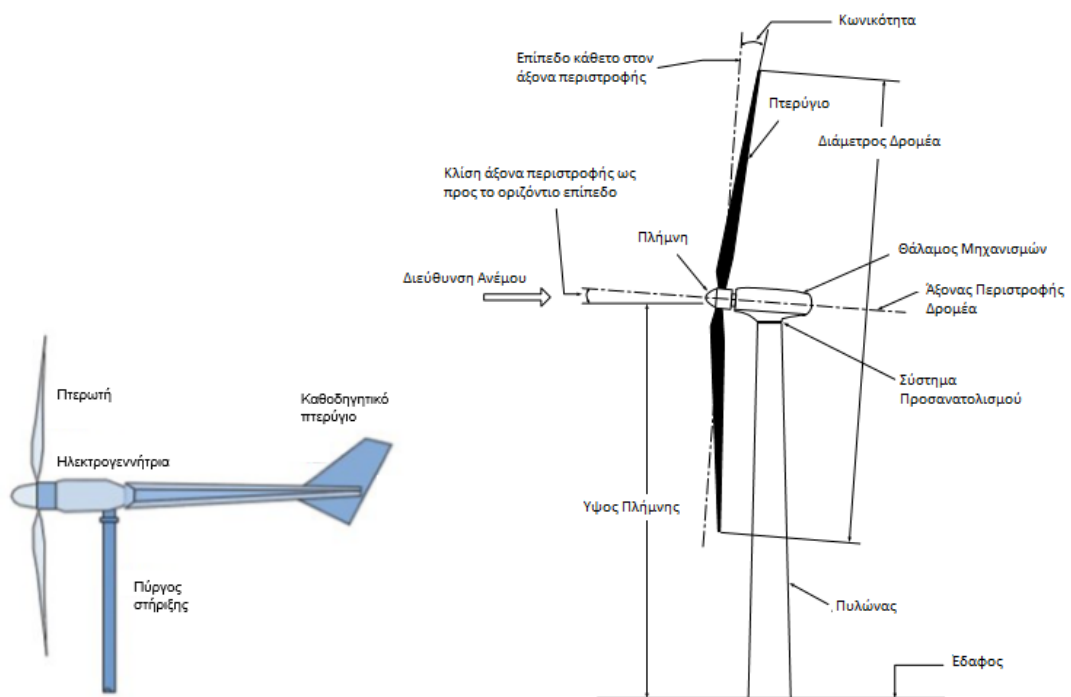
Πίνακας 2.1 : Ταξινόμηση ανεμογεννητριών ανάλογα με το μέγεθος

Οι Α/Γ έως 10 kW είναι κατάλληλες για την κάλυψη ηλεκτρικών αναγκών στον κτιριακό τομέα, καθώς μπορούν υπό προϋποθέσεις να εγκατασταθούν εντός του αστικού περιβάλλοντος.



Οι πλέον διαδεδομένοι τύποι ανεμογεννητριών είναι οι :

- **Οριζοντίου Άξονα:** Διαθέτουν άξονα παράλληλο προς την επιφάνεια της γης και συνήθως παράλληλο με τη διεύθυνση του ανέμου. Επιπλέον, μπορούν να έχουν ένα, δύο, τρία ή και περισσότερα πτερύγια, ενώ η πτερωτή τους τοποθετείται είτε σε προσηνέμη διάταξη, δηλαδή μπροστά από τον πύργο στήριξης, είτε σε υπήνεμη διάταξη, δηλαδή πίσω από τον πύργο στήριξης σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου. Οι μηχανές αυτές παρουσιάζουν μεγάλο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης. Ο προσανατολισμός του δρομέα προς τη διεύθυνση του ανέμου, επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση καθοδηγητικού πτερυγίου (σε μικρές Α/Γ), είτε με κατάλληλα αισθητήρια που καταγράφουν τη στιγμιαία διεύθυνση του ανέμου και στρέφουν (προσανεμίζουν) την πτερωτή στη διεύθυνση του ανέμου ηλεκτρονικά με τη χρήση σερβομηχανισμού.

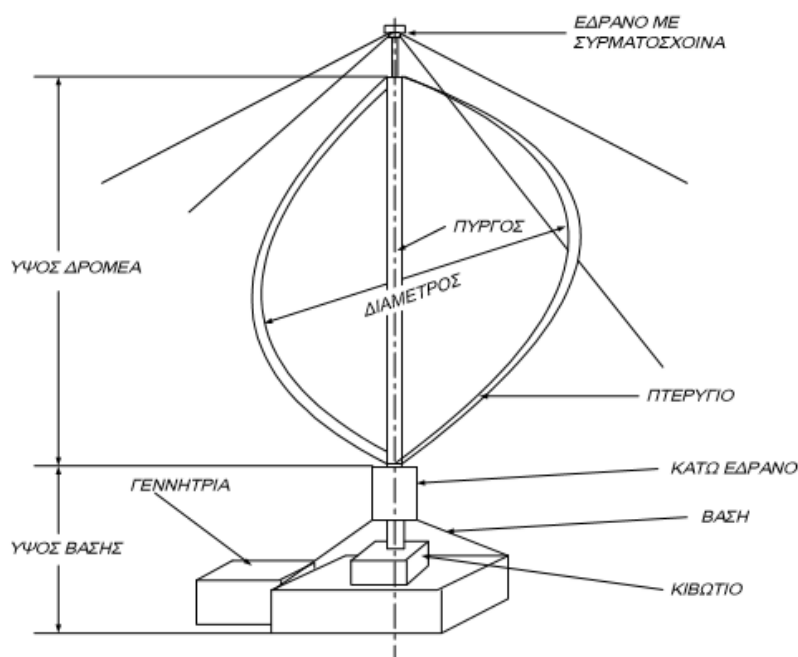


Εικόνα 2.6 : Βασικά τμήματα μικρής και μεγάλης Α/Γ οριζοντίου άξονα [20]

Για τον έλεγχο της ισχύος της μηχανής είναι απαραίτητη είτε η ρύθμιση του βήματος της, είτε ο κατάλληλος αεροδυναμικός σχεδιασμός και η αξιοποίηση του φαινομένου “απώλειας στήριξης”. Πιο συγκεκριμένα, με τη διαδικασία ρύθμισης βήματος (pitch control) επιχειρείται η περιστροφή του πτερυγίου γύρω από το διαμήκη άξονα του, με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής γωνίας προσβολής κατά μήκος του πτερυγίου ώστε να υλοποιούνται οι απαιτήσεις ισχύος της μηχανής. Αντίστοιχα ο μηχανισμός απώλειας στήριξης (stall control) βασίζεται στο αεροδυναμικό φαινόμενο της αποκόλλησης του οριακού στρώματος από το τμήμα ή

το σύνολο του πτερυγίου, εφόσον η γωνία προσβολής του πτερυγίου ξεπεράσει κάποια όρια. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε δραματική μείωση της ισχύος της μηχανής.

- Κατακόρυφου άξονα: Οι μηχανές κατακόρυφου άξονα, εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα της αυτόματης προσαρμογής στη διεύθυνση του ανέμου και ως εκ τούτου αποτελούν πιο απλές κατασκευές. Οι εν λόγω Α/Γ περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα κάθετο στη διεύθυνση του ανέμου όσο και στο έδαφος. Το παραγόμενο μηχανικό έργο μεταφέρεται μέσω κατακόρυφου άξονα απευθείας στο έδαφος όπου βρίσκεται τοποθετημένη ηλεκτρική γεννήτρια. Ο συντελεστής ισχύος των μηχανών κατακόρυφου άξονα είναι εν γένει μικρότερος από των μηχανών οριζοντίου άξονα. Επίσης, οι μεγάλες μηχανές κατακόρυφου άξονα παρουσιάζουν σημαντικό πρόβλημα κατά την εκκίνηση, όπου απαιτείται εξωτερική βοήθεια, μειονέκτημα που δεν εμφανίζεται στις μηχανές οριζοντίου άξονα. Η επιλογή μικρών Α/Γ κατακόρυφου άξονα μειώνει τις διαστάσεις της πτερωτής και θεωρείται ότι ενσωματώνεται καλύτερα στο αστικό περιβάλλον. [20]



Εικόνα 2.7 : Βασικά τμήματα Α/Γ κατακόρυφου άξονα [20]

### Αρχές λειτουργίας ανεμογεννητριών

Τα πτερύγια του δρομέα μιας ανεμογεννήτριας δεσμεύουν ένα ποσοστό της ανά μονάδα χρόνου κινητικής ενέργειας του ανέμου και το μετατρέπουν σε μηχανικό έργο (στρεπτική ροπή) στον άξονα της πτερωτής. Το μηχανικό έργο μετασχηματίζεται μέσω της ηλεκτρικής γεννήτριας σε ηλεκτρική ισχύ. Η τελική ισχύς εξόδου της Α/Γ είναι:

$$N_{ex} = C_p \cdot \eta \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \right) \quad (2.4)$$

Όπου:

- $C_p$  είναι ο αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης της πτερωτής. Η μέγιστη τιμή του για μικρές Α/Γ είναι 10-35%. Από το σχεδιασμό της πτερωτής των υφιστάμενων Α/Γ είναι γνωστό ότι το  $C_p$  εκφράζεται συναρτήσει της παραμέτρου περιστροφής  $\lambda$  της πτερωτής.

$$\lambda = \frac{\pi D n_r}{60V} \quad (2.5)$$

- $n_r$  συμβολίζεται ο αριθμός στροφών του άξονα της πτερωτής και συνεπώς

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (2.6)$$

Οι τιμές του αεροδυναμικού βαθμού απόδοσης μεταβάλλονται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, ενώ η μέγιστη τιμή του επιτυγχάνεται σε ταχύτητες ανέμου 10-15 m/s.

- $\eta$  είναι ο ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης της Α/Γ. Στις μικρές Α/Γ ο ηλεκτρονικός βαθμός απόδοσης λαμβάνει τιμές 80-95% ενώ για μακροχρόνιους υπολογισμούς πρέπει να ληφθεί υπόψη και η γήρανση της μηχανής. Οι σύγχρονες μεγάλες Α/Γ έχουν ηλεκτρονικούς βαθμούς απόδοσης περίπου 95%.
- $\rho$  η πυκνότητα του αέρα σε  $\text{kg/m}^3$ . Οι καμπύλες λειτουργίας που δίνουν οι κατασκευαστές αναφέρονται σε πυκνότητα αέρα  $1.225 \text{ kg/m}^3$ . Η πυκνότητα του αέρα, όπως είναι λογικό παρουσιάζει μεταβολές καθώς εξαρτάται από παράγοντες όπως η ατμοσφαιρική πίεση, η σχετική υγρασία, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, το υψόμετρο τοποθέτησης της Α/Γ.
- $A$  η επιφάνεια σάρωσης της πτερωτής η οποία δίνεται από τη σχέση:

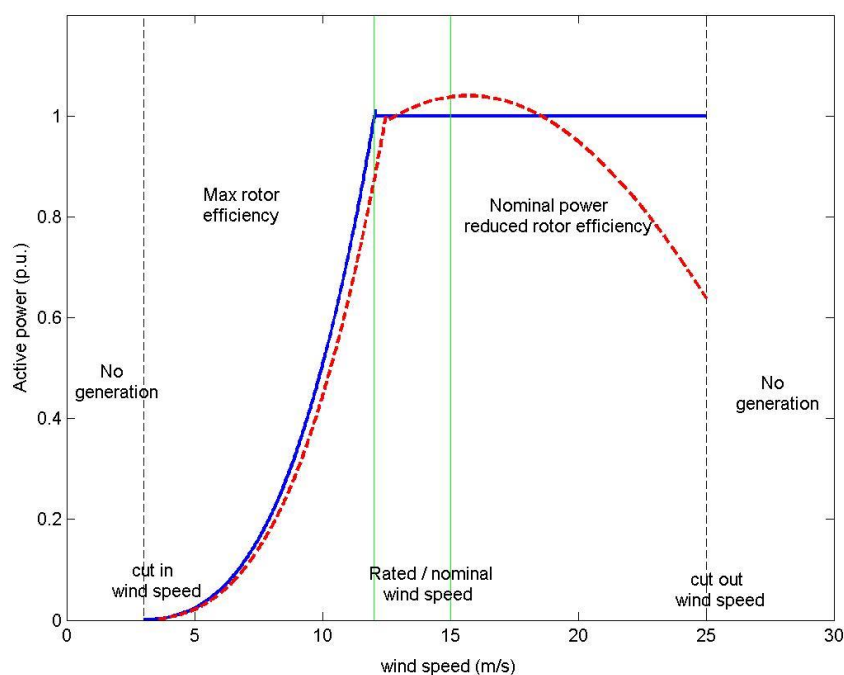
$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2.7)$$

Η επιφάνεια σάρωσης της πτερωτής αποτελεί σημαντική παράμετρο στην ενεργειακή παραγωγή μιας Α/Γ, καθώς η ενεργειακή παραγωγή είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου της.

- $V$  είναι η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πτερωτής και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ενεργειακή παραγωγή μιας Α/Γ. Η ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται από το ύψος τοποθέτησης της Α/Γ και φυσικά από την ποιότητα του αιολικού δυναμικού, στην περιοχή της εγκατάστασης.

Η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας μιας Α/Γ περιγράφει την μεταβολή της παραγόμενης ισχύος της Α/Γ ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου που προσβάλλει

την πτερωτή. Ανάλογα με τη μέθοδο ελέγχου ισχύος που χρησιμοποιεί η Α/Γ, αλλάζει και η μορφή της καμπύλης λειτουργίας της. Οι Α/Γ ελέγχου βήματος παρουσιάζουν σταθερή απόδοση ισχύος για ταχύτητες μεγαλύτερες από την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας της μηχανής, ενώ στις Α/Γ απώλειας στήριξης η αποδιδόμενη ισχύς μετά από την ταχύτητα ονομαστικής λειτουργίας δεν είναι απολύτως σταθερή.



Εικόνα 2.8: Καμπύλες λειτουργίας Α/Γ ελέγχου βήματος και απώλειας στήριξης [21]

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μια Α/Γ ξεκινάει από ταχύτητες ανέμου  $V_c = 2-5$  m/s (ταχύτητα έναρξης λειτουργίας-cut in wind speed) οι οποίες αντιστοιχούν σε ένταση ανέμων 2-3 Beaufort και διακόπτεται για λόγους ασφαλείας όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την  $V_f = 20-25$  m/s (ταχύτητα διακοπής λειτουργίας- cut out wind speed) ή αντίστοιχα 9-10 Beaufort. Η μέγιστη ενεργειακή παραγωγή της Α/Γ επιτυγχάνεται σε ταχύτητες ανέμου  $V_R = 10-15$  m/s (ταχύτητα ονομαστικής λειτουργίας-rated/nominal wind speed) δηλαδή 6-7 της κλίμακας Beaufort.

Η ετήσια ενεργειακή παραγωγή μιας Α/Γ για χρονικό διάστημα  $\Delta t$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E(\Delta t) = N_0 \cdot \omega \cdot \Delta \cdot \Delta t \quad (2.8)$$

Όπου ο μέσος συντελεστής ισχύος της εγκατάστασης δίνεται από τη σχέση:

$$\omega = \int_{V_c}^{V_F} \frac{N(V)}{N_0} f(V) dV \quad (2.9)$$

Το  $\omega$  λαμβάνει τιμές από 0.2 έως 0.6 συνήθως, αλλά και μεγαλύτερες και μικρότερες τιμές ανάλογα με την περίπτωση. Στις αστικές περιοχές, για παράδειγμα, λόγω της μέτριας ποιότητας του αιολικού δυναμικού οι τιμές του  $\omega$  υπολείπονται σημαντικά των παραπάνω ενδεικτικών τιμών.

Η τεχνική διαθεσιμότητα  $\Delta$  μιας εγκατάστασης εκφράζει τη δυνατότητα ασφαλούς λειτουργίας της εγκατάστασης από τεχνικής σκοπιάς και δεν συνδέεται άμεσα με το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό. Σχετίζεται με περιπτώσεις τυχαίων βλαβών, προγραμματισμένης συντήρησης, λειτουργίας μηχανισμών αυτοπροστασίας αλλά και αδυναμίας του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου να απορροφήσει την αποδιδόμενη ενέργεια, όταν η Α/Γ είναι διασυνδεδεμένη. Σε μικρές Α/Γ η τεχνική διαθεσιμότητα κυμαίνεται από 0.7 έως 0.9.

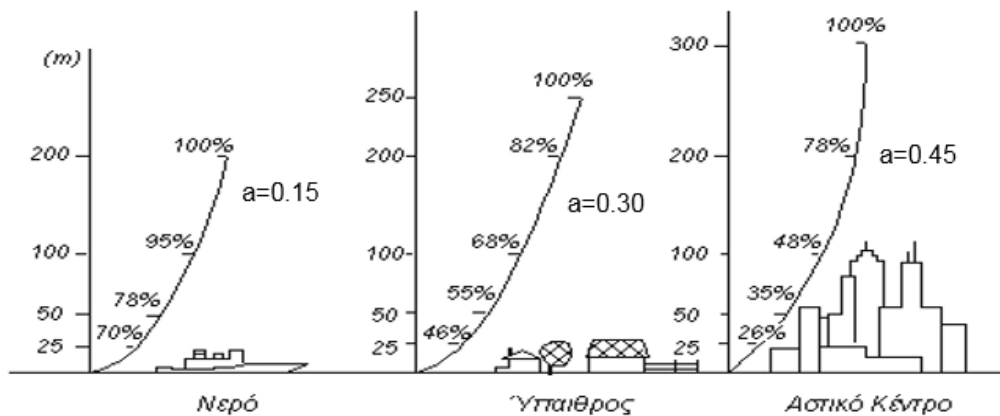
Συχνά το γινόμενο  $\omega \cdot \Delta$  αποδίδεται με τον όρο Capacity Factor (CF), δηλαδή συντελεστής φορτίου ισχύος της εγκατάστασης.

$$CF = \Delta \cdot \omega \quad (2.10)$$

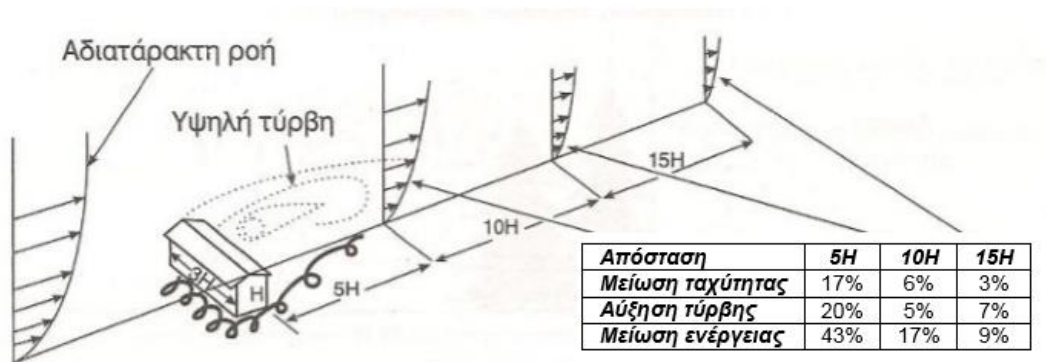
Βασική επιδίωξη στον τομέα των αιολικών εφαρμογών είναι η επιλογή εκείνης της εμπορικής μηχανής, η οποία με δεδομένο το διαθέσιμο τοπικό αιολικό δυναμικό μεγιστοποιεί την ετήσια παραγωγή ενέργειας. [22]

### **Αιολικό Δυναμικό**

Η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει μια κατακόρυφη κατανομή μέσα στο στρώμα της ατμόσφαιρας. Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτητα αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση του ύψους. Αυτό σημειώνεται στα πρώτα 100m από το έδαφος δηλαδή εντός του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα εξαρτάται άμεσα από το ανάγλυφο της περιοχής. Στις αστικές περιοχές, η παρουσία κτιρίων διαταράσσει σημαντικά το πεδίο ροής του ανέμου. Σύμφωνα με έρευνες σχετικά με τη ροή γύρω από τα κτίρια, η ζώνη επιρροής των κτιρίων περιλαμβάνει δυο φορές το ύψος του κτιρίου ανάντη, δέκα φορές το ύψος του κτιρίου κατάντη και ύψος τουλάχιστον διπλάσιο του κτιρίου. Είναι ενδεικτικό, ότι σε απόσταση διπλάσια του ύψους του κτιρίου έχουμε 5% αύξηση του επιπέδου της τύρβης και 6% μείωση της ταχύτητας του ανέμου η οποία οδηγεί σε 17% μείωση της διαθέσιμης ενέργειας του αδιατάρακτου ρεύματος ανάντη του κτιρίου.



Εικόνα 2.9: Μεταβολή της κατακόρυφης κατανομής ταχύτητας του ανέμου ανάλογα με το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής. [20]



Εικόνα 2.10 : Επίδραση κτιρίου στη ροή της ταχύτητας του ανέμου [20]

Για την περιγραφή του κατακόρυφου προφίλ της ταχύτητας του ανέμου έχουν προταθεί διάφορες αναλυτικές σχέσεις οι οποίες στηρίζονται στη θεωρία των οριακών στρωμάτων εκ των οποίων η πιο διαδεδομένη είναι η εκθετική κατανομή (power law):

$$\frac{V(h)}{V(h_o)} = \left(\frac{h}{h_o}\right)^a \quad (2.11)$$

Η εξίσωση 2.11 δίνει την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος  $h$  από το έδαφος συναρτήσει της παραμέτρου  $a$  όταν είναι γνωστή η ταχύτητα στο ύψος αναφοράς  $h_o$ . Η ακριβής τιμή της παραμέτρου  $a$  εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και από τη διεύθυνση του ανέμου.

### Χρήση των ανεμογεννητριών στα κτίρια

Οι πρώτες χρήσεις των Α/Γ σε κτίρια αφορούσαν την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών απομονωμένων οικισμών, μη συνδεδεμένων στο δίκτυο. Σήμερα, αυξάνονται συνεχώς οι εφαρμογές μικρών Α/Γ σε κτίρια, που έχουν ως στόχο στην

κάλυψη μέρους των ηλεκτρικών αναγκών των καταναλωτών αλλά και γενικότερα τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου και τη μείωση των περιβαλλοντικών και χρηματοοικονομικών επιπτώσεων που επιφέρει η χρήση συμβατικών καυσίμων. Διακρίνονται οι περιπτώσεις χρήσης των Α/Γ, είτε ως αυτόνομα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής είτε ως συστήματα διασυνδεδεμένα στο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο, όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αντισταθμίζει μέρος της απορροφούμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το τοπικό δίκτυο ηλεκτροδότησης, επιστρέφοντας σε αυτό τις ποσότητες που δεν μπορεί να απορροφήσει τοπικά ο καταναλωτής λόγω μειωμένης ζήτησης.

Συνεπώς η ετήσια ενεργειακή παραγωγή της Α/Γ σε διασυνδεδεμένο σύστημα, μειώνεται κατά τις απώλειες του σταθεροποιητή τάσης (UPS) του οποίου ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης είναι περίπου 95-98%. Αντίθετα, στην περίπτωση αυτόνομου συστήματος πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- Η μέση ετήσια απόδοση του μετατροπέα AC/DC (converter) (90-96%)
- Η μέση ετήσια απόδοση του ρυθμιστή φόρτισης (87-93%)
- Η μέση ετήσια απόδοση του μετατροπέα συχνότητας (inverter) (90-96%)
- Οι απώλειες των καλωδιώσεων μεταφοράς (1-4%)
- Η συνολική απόδοση του συστήματος αποθήκευσης και απόδοσης της αποθηκευμένης ενέργειας στον μετατροπέα συχνότητας (80-90%)

Οι Α/Γ που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη ηλεκτρικών αναγκών σε κτιριακά σύνολα, τοποθετούνται είτε στον περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου είτε στην οροφή του κτιρίου, είτε ενσωματώνονται στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κτιρίου. Κατά την επιλογή της θέσης τοποθέτησης μιας Α/Γ, βασικά κριτήρια εκτός φυσικά από την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελούν η ελαχιστοποίηση των ταλαντώσεων που δημιουργούνται κατά τη λειτουργία της, η μείωση του θορύβου λειτουργίας και οι χωροταξικοί/πολεοδομικοί περιορισμοί.

Οι Α/Γ μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στην κάλυψη των ενεργειακών καταναλώσεων των κτιρίων είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό με άλλα συστήματα ΑΠΕ όπως για παράδειγμα τα φωτοβολταϊκά. Ο συνδυασμός φωτοβολταϊκής γεννήτριας και Α/Γ έχει αποδειχθεί για τη χώρα μας ως ο ιδανικός συνδυασμός για την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των κτιρίων. Αυτό συμβαίνει διότι, οι δυο πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται (ηλιακή και αιολική) αλληλοσυμπληρώνονται κατά τη διάρκεια του έτους. Λόγω των αυξημένων απαιτήσεων χώρου για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, η δημιουργία κτιρίων μηδενικής (zero energy buildings) ή σχεδόν μηδενικής (near zero energy buildings) είναι εφικτή σε πολλές περιπτώσεις, μόνο με την ταυτόχρονη εκμετάλλευση του ηλιακού και αιολικού δυναμικού της περιοχής.



Εικόνα 2.11 : Οικιακή Α/Γ τοποθετημένη στην οροφή κτιρίου [23]



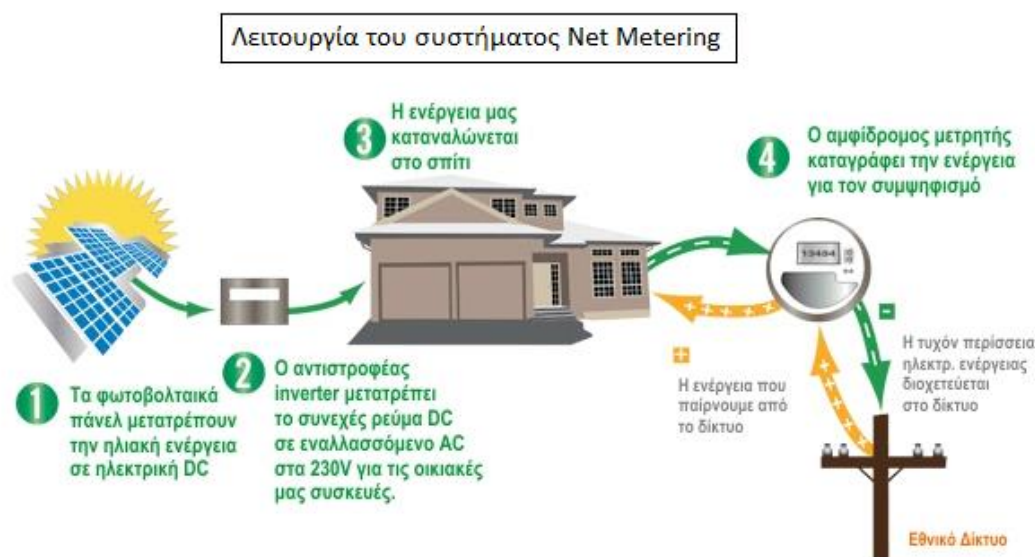
Εικόνα 2.12 : Α/Γ ενσωματωμένες στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κτιρίου [24]



## 2.4 Το σύστημα αυτοπαραγωγής με ενεργειακό συμψηφισμό (Net Metering)

Το net metering ή αλλιώς αυτοπαραγωγή, είναι μια μέθοδος ενεργειακού συμψηφισμού της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά και της καταναλισκόμενης ενέργειας από τον ιδιοκτήτη του συστήματος. Τα συστήματα Net Metering ανήκουν στην κατηγορία των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών καθώς υπάρχει σύνδεση με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο. Η παραγόμενη ενέργεια συμψηφίζεται σε ετήσια βάση με την καταναλισκόμενη ενέργεια (σε kWh). Στην περίπτωση που υπάρχει περίσσεια ενέργειας αυτή διοχετεύεται στο δίκτυο χωρίς κάποια αποζημίωση προς τον αυτοπαραγωγό, ενώ στην περίπτωση που υπάρχει μεγαλύτερη κατανάλωση αντί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ο αυτοπαραγωγός επιβαρύνεται μόνο τη διαφορά μεταξύ των δυο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η σωστή διαστασιολόγηση και επιλογή του συστήματος ώστε να παράγει σε ένα έτος, όση ενέργεια (kWh) καταναλώνεται μειώνει στο ελάχιστο το κόστος καταναλισκόμενης ενέργειας στο δίκτυο ηλεκτροδότησης. Το συγκεκριμένο σύστημα αριθμεί πολλά πλεονεκτήματα και εφαρμόζεται επιτυχώς σε πολλές χώρες του εξωτερικού (Κύπρος, Γερμανία, Δανία κ.α.). Το net metering αποτελεί την καλύτερη λύση για εξάλειψη του κόστους ρεύματος για οικίες και επιχειρήσεις ενώ αν συνδυαστεί κατάλληλα με μια αντλία θερμότητας μπορεί να εξαλείψει και το κόστος θέρμανσης και ηλεκτρισμού. [25]



Εικόνα 2.13 : Αρχή λειτουργίας του συστήματος Net Metering [26]

## **Πλεονεκτήματα συστήματος Net Metering**

Η εγκατάσταση του συστήματος αυτοπαραγωγής είναι μια ενέργεια η οποία επιφέρει πολυάριθμα οφέλη, μερικά από τα οποία είναι τα εξής:

- Το βασικότερο πλεονέκτημα είναι η τεράστια μείωση και ο μηδενισμός της κατανάλωσης ρεύματος για 25 χρόνια.
- Προστασία ως προς τις μελλοντικές αυξήσεις των χρεώσεων του ηλεκτρικού ρεύματος, με μοναδικό αρχικό κόστος την προμήθεια και εγκατάσταση του συστήματος, το οποίο όμως θα αποσβέσει πολύ γρήγορα.
- Ενεργειακή αναβάθμιση του ακινήτου η οποία συνεπάγεται αύξηση της πραγματικής αξίας του ακινήτου.
- Δυνατότητα αύξησης της ηλεκτρικής κατανάλωσης χωρίς επιβάρυνση καλύπτοντας ψύξη, θέρμανση και ζεστό νερό χρήσης.
- Δυνατότητα αποθήκευσης ποσοστού ενέργειας σε μπαταρίες για αδιάκοπη ηλεκτροδότηση στην περίπτωση διακοπής.
- Μικρότερο μελλοντικό ρίσκο φορολόγησης, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς η παραγόμενη ενέργεια δεν πωλείται με το σύστημα των εγγυημένων τιμών αλλά συμψηφίζεται.
- Μικρός χρόνος απόσβεσης, ελάχιστος χρόνος εγκατάστασης.
- Ο αυτοπαραγωγός είναι ταυτόχρονα ιδιοκαταναλωτής χωρίς να επιβαρύνει το δίκτυο μεταφοράς.
- Άμεση ανάπτυξη και επαναδημιουργία θέσεων εργασίας στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.
- Συνδυασμός με προηγμένα συστήματα θέρμανσης – ψύξης, όπως είναι οι αντλίες θερμότητας για ακόμη περισσότερη οικονομία και πλήρη απεξάρτηση από το πετρέλαιο και τις διακυμάνσεις των τιμών.
- Η μικρή περίσσεια ρεύματος που διοχετεύεται στο δίκτυο συνεισφέρει στην εξισορρόπηση του συστήματος σε ώρες αιχμής.
- Η κατανάλωση γίνεται κοντά στην παραγωγή μειώνοντας τις απώλειες στα καλώδια.
- Μειώνονται οι εκπομπές CO<sub>2</sub>.
- Ελαχιστοποιείται η περιβαλλοντική επιβάρυνση περιοχών κοντά σε εργοστάσια παραγωγής ρεύματος με λιγνίτη. [27]

## **Νομοθετικό πλαίσιο συστήματος Net Metering**

Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία (Νόμος για αυτοπαραγωγή – Υπουργική Απόφαση net metering – Εγκύκλιοι και πληροφοριακό υλικό από ΔΕΗ) ισχύουν τα ακόλουθα:

- Μέγιστο όριο είναι τα 20kWp ή το ½ της συμφωνημένης ισχύος για το διασυνδεδεμένο σύστημα με άνω όριο τα 500kW.

- Μέγιστο όριο τα 5kWp για μονοφασικό μετρητή (ειδάλλως πρέπει να γίνει επαύξηση).
- Μέγιστο όριο τα 10 kWp στο μη-διασυνδεδεμένο σύστημα (νησιά εκτός από Κρήτη) όπου το άνω όριο είναι 20-50 kW.
- Σε Πελοπόννησο και Νότια Εύβοια άνω όριο τα 20 kWp.
- Δικαίωμα ένταξης στις διατάξεις της παρούσας έχουν φυσικά πρόσωπα (επιτηδευματίες ή μη) ή νομικά πρόσωπα δημοσίου ή ιδιωτικού δικαίου τα οποία είτε έχουν στην κυριότητα τους τον χώρο στον οποίο εγκαθίσταται το φωτοβολταϊκό σύστημα είτε έχουν τη νόμιμη χρήση αυτού (πχ μίσθωση, δωρεάν παραχώρηση κλπ) και έχουν διασφαλίσει την έγγραφη συναίνεση του ιδιοκτήτη του χώρου.
- Η καταμέτρηση και ο συμψηφισμός γίνεται σε εκκαθαριστικό λογαριασμό και η διαφορά ενέργειας πιστώνεται στον επόμενο συμψηφισμό για 1 χρόνο.
- Στην περίπτωση φωτοβολταϊκού συστήματος σε κοινόχρηστο ή κοινόκτητο χώρο κτιρίου, επιτρέπεται η εγκατάσταση ενός ή περισσότερων συστημάτων.
- Κάθε φωτοβολταϊκό net metering πρέπει να αντιστοιχίζεται σε ένα μόνο μετρητή.
- Μπορούν να εγκατασταθούν στον ίδιο χώρο ή όμορο χώρο με τις εγκαταστάσεις κατανάλωσης τις οποίες τροφοδοτούν και οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορεί να εγκαθίστανται επί κτιρίων ή επί εδάφους ή άλλων κατασκευών, περιλαμβανομένων και αυτών του πρωτογενούς τομέα.
- Πρέπει να έχουν εξοφληθεί όλοι οι λογαριασμοί ΔΕΗ.
- Το κόστος στη ΔΕΗ είναι κάτω από 400€ έως 55kWp.
- Επαύξηση λειτουργούντος συστήματος μετά από νέα αίτηση και προσφορά σύνδεσης.
- Μπορεί ένα φωτοβολταϊκό με ταρίφα να μετατραπεί σε φωτοβολταϊκό net metering με νέα σύνδεση.
- Δεν επιτρέπεται στον ίδιο μετρητή να αντιστοιχίζονται περισσότερα του ενός φωτοβολταϊκά (πχ φωτοβολταϊκό με ταρίφα και net metering) .
- Δεν υπάρχει περιορισμός κατά άτομο των φωτοβολταϊκών με net metering που μπορεί να διαθέτει.
- Σε εργοταξιακές περιοχές δεν μπορεί να γίνει συμψηφισμός net metering καθώς δεν θεωρούνται μόνιμες. [25],[28]

## **2.5 Αντλίες Θερμότητας**

Η αντλία θερμότητας είναι συσκευή που έχει τη δυνατότητα εναλλαγής λειτουργίας στον κύκλο ψύξης ενός συστήματος έτσι ώστε να δίνει άλλοτε θερμό και άλλοτε ψυχρό αέρα ή άλλο μέσο μεταφοράς θερμότητας ή ψύχους, ανάλογα με τις κλιματιστικές συνθήκες του χώρου. Όπως είναι γνωστό, η θερμότητα έχει φυσική ροή από καταστάσεις υψηλότερων θερμοκρασιών σε καταστάσεις χαμηλότερων. Το σύστημα αυτό όμως, έχει την ικανότητα να μεταφέρει τη θερμότητα αντίθετα από τη φυσική ροή, δηλαδή αντλεί θερμότητα. Συγκεκριμένα, τους θερινούς μήνες αφαιρεί θερμότητα από ένα κλιματιζόμενο χώρο και την αποβάλλει στο περιβάλλον οπότε ψύχεται ο κλιματιζόμενος χώρος, ενώ το χειμώνα αφαιρεί θερμότητα από το περιβάλλον και την αποβάλλει μέσα στον κλιματιζόμενο χώρο οπότε τον θερμαίνει. Η αντλία θερμότητας είναι ένα φθινό σύστημα θέρμανσης σε σχέση με τη θέρμανση που δίνουν οι ηλεκτρικοί θερμοσυσσωρευτές, τα αερόθερμα και γενικά τα ηλεκτρικά θερμαντικά σώματα. [33]

### **Αρχή λειτουργίας των αντλιών θερμότητας**

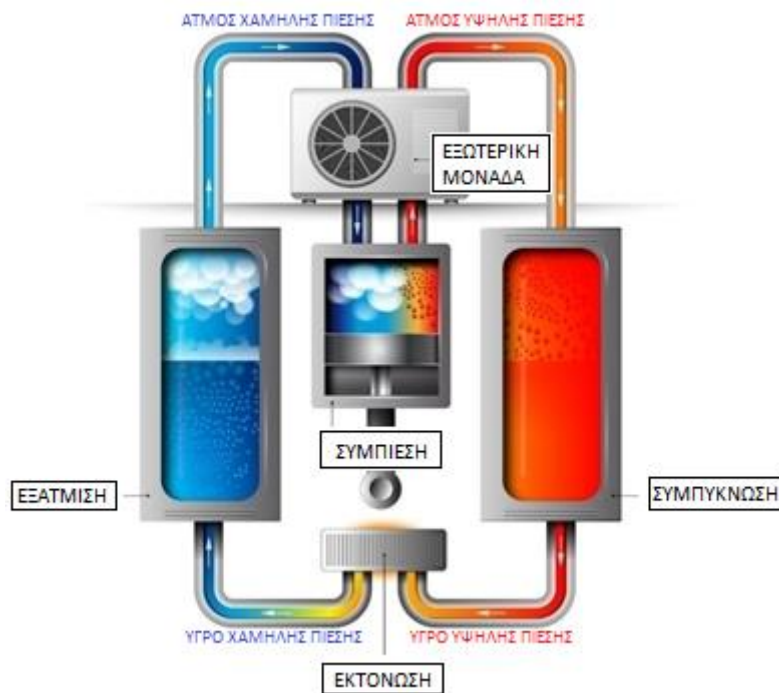
Οι αντλίες θερμότητας λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο που λειτουργούν όλα τα ψυκτικά μηχανήματα και η λειτουργία τους βασίζεται στις ίδιες αρχές που εφαρμόζονται στα ψυγεία, τους καταψύκτες, τα κλιματιστικά μηχανήματα κ.α. Η λειτουργία τους βασίζεται στον ψυκτικό κύκλο που είναι ένας αένας κύκλος εκτόνωσης και συμπίεσης ενός ρευστού (εργαζόμενο μέσο). Το ρευστό (ψυκτικό μέσο) που ρέει μέσα στις σωληνώσεις εξέρχεται μετά το συμπιεστή σε υγρή κατάσταση με υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Στη συνέχεια αποβάλλεται η θερμότητα που απέδωσε κατά τη συμπίεση ο συμπιεστής. Έπειτα, το ψυκτικό μέσο εκτονώνεται (μειώνεται η πίεση του) στην εκτονωτική βαλβίδα και εξατμίζεται λόγω της πτώσης πίεσης στον εξατμιστή, όπου ψύχεται και προσλαμβάνει θερμότητα. Στη συνέχεια το κρύο ψυκτικό μέσο σε αέρια ακόμα μορφή, συμπιέζεται στον συμπιεστή, υγροποιείται, θερμαίνεται, αποβάλλει θερμότητα κ.ο.κ. [34]

### **Βασικά μέρη**

Τα βασικά μέρη που αποτελείται μια αντλία θερμότητας είναι:

1. Το τμήμα συμπιεστή-συμπυκνωτή που απορρίπτει θερμότητα στο περιβάλλον.
2. Το τμήμα ανεμιστήρα-ατμοποιητή, που απορροφά θερμότητα από τον εσωτερικό χώρο ή το περιβάλλον.
3. Ο μηχανισμός αντιστροφής, που αποτελείται από μια τετράοδη βαλβίδα, η οποία μετατρέπει τον ψυκτικό κύκλο σε θερμαντικό και αντίστροφα.
4. Οι αυτοματισμοί για τον έλεγχο και την λειτουργία του συστήματος θέρμανσης ή ψύξης.

5. Η συμπληρωματική ηλεκτρική αντίσταση, που αυξάνει τη θερμική απόδοση του συστήματος, όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι πολύ μικρή.



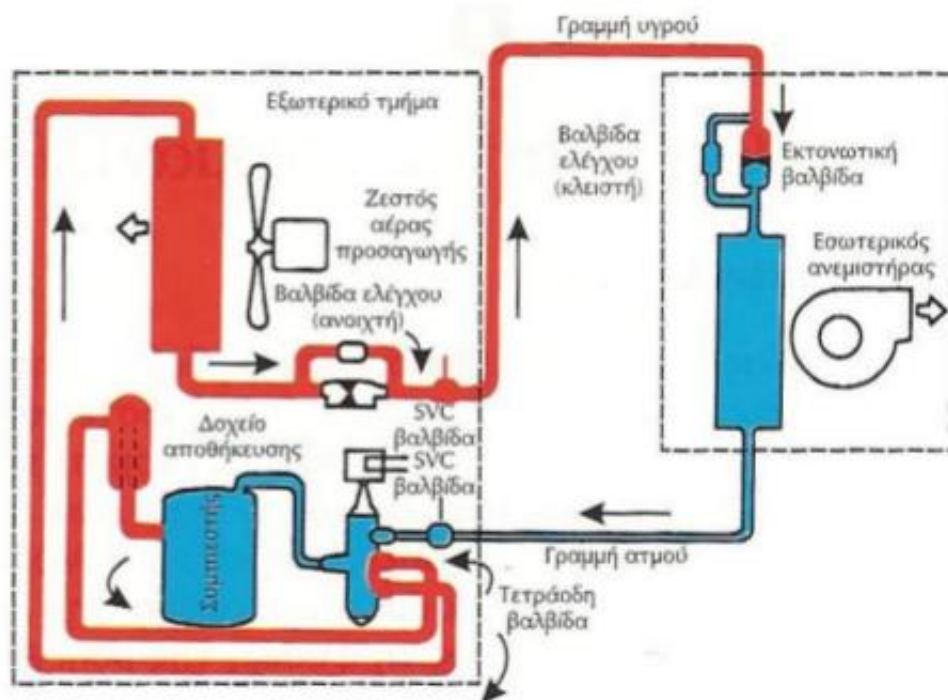
Εικόνα 2.14 : Τυπική μορφή αντλίας θερμότητας [35]

### **Λειτουργία αντλίας θερμότητας στις δυο περιπτώσεις Θέρμανσης και Ψύξης**

Μια αντλία θέρμανσης εκτελεί πάντα ψυκτικό κύκλο και ποτέ θερμικό γιατί τέτοιος κύκλος δεν υφίσταται. Συχνά αναφέρεται ότι η αντλία θερμότητας 'αντιστρέφει' ή 'αναστρέφει' τον κύκλο του ψυκτικού ρευστού και ανάλογα με την περίπτωση ακολουθεί ψυκτικό κύκλο το καλοκαίρι ή θερμαντικό κύκλο το χειμώνα. Το μόνο που αντιστρέφεται είναι ο ρόλος του συμπυκνωτή με το ρόλο του ατμοποιητή. Το καλοκαίρι ο ατμοποιητής είναι τοποθετημένος μέσα στον ψυχόμενο χώρο και τον ψύχει, ενώ τον χειμώνα ο ατμοποιητής είναι τοποθετημένος στο περιβάλλον και το ψύχει εφόσον αντλεί θερμότητα από αυτό. Αντί λοιπόν να μεταφέρονται οι συσκευές ατμοποιητής-συμπυκνωτής από τον χώρο στο περιβάλλον, η αντλία θερμότητας με τη χρήση της τετράοδης βαλβίδας αντιστρέφει τη ροή του ψυκτικού μέσου διατηρώντας φυσικά τον ψυκτικό κύκλο, στον οποίο συνεχίζεται κανονικά η προσφορά μηχανικού έργου, για την συμπίεση των ατμών του ψυκτικού μέσου.

### ❖ Κύκλος για ψύξη χώρου

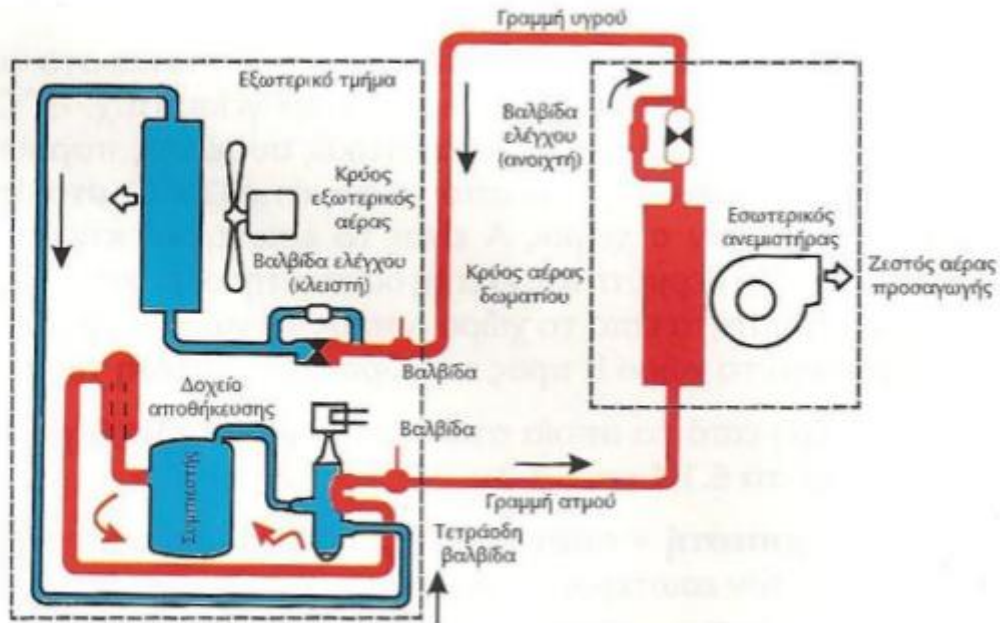
Την μελέτη του κύκλου για ψύξη την ξεκινάμε από τη στιγμή που το ψυκτικό υγρό εισέρχεται στον ατμοποιητή. Η είσοδος του ψυκτικού ρευστού στον ατμοποιητή ελέγχεται από την άεργη εκτονωτική-στραγγαλιστική διάταξη (βαλβίδα). Η διάταξη αυτή ελαττώνει την πίεση του υγρού, το οποίο ατμοποιείται σε χαμηλή θερμοκρασία. Κατά την ατμοποίηση, ποσά θερμότητας προσδίδονται σε αέριο, το οποίο αποκτά υψηλή πίεση και θερμοκρασία στο συμπιεστή. Το συμπιεσμένο αέριο φτάνει στο συμπυκνωτή και προσδίδει ποσά θερμότητας στο μέσο συμπύκνωσης (αέρας ή νερό). Το συμπυκνωμένο αέριο υγροποιείται και στη συνέχεια το ψυκτικό υγρό οδηγείται στην εκτονωτική διάταξη.



Εικόνα 2.15 : Κύκλος αντλίας θερμότητας για ψύξη [33]

### ❖ 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 έξοδο του από τον συμπιεστή και την εκτονωτική διάταξη στους εναλλάκτες θερμότητας ψυκτικού μέσου-αέρα (ή νερού), ανάλογα με την επιλογή των απαιτήσεων μέσω διακόπτη.



Εικόνα 2.16 : Κύκλος αντλίας θερμότητας για θέρμανση [33]

### Η ιδανική Αντλία Θερμότητας

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

Κατά τη θέρμανση ενδιαφέρον παρουσιάζει το ποσό θερμότητας  $Q_2$  ενώ κατά την ψύξη το  $Q_1$ . Ο ενεργειακός ισολογισμός δίνει:

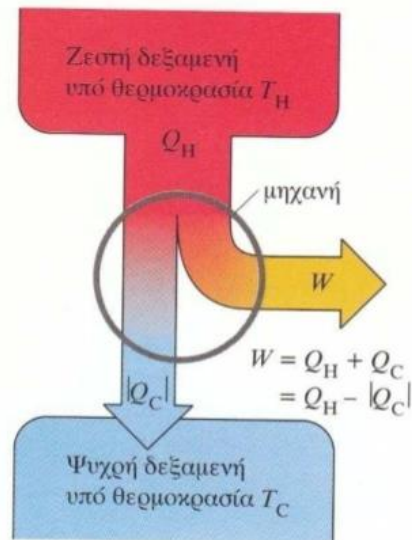
$$Q_2 = Q_1 + W \quad (2.12)$$

Ο συντελεστής συμπεριφοράς COP δίνεται από τη σχέση:

$$COP = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} \quad (2.13)$$

Στην ιδανική περίπτωση τα ποσά θερμότητας δύναται να αντικατασταθούν από τις θερμοκρασίες (Κύκλος Carnot).

$$COP = \frac{T_h}{T_h - T_c} \quad (2.14)$$



Εικόνα 2.17: Κύκλος αντλίας θερμότητας [36]

Παρατηρούμε ότι:

- Για την ίδια θερμοκρασιακή διαφορά  $T_h - T_c$  ο συντελεστής συμπεριφοράς COP βελτιώνεται όσο υψηλότερης στάθμης είναι η θερμοκρασία  $T_h$ .
- Όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στον κλιματιζόμενο και τον εξωτερικό χώρο, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του COP.

Οι δυο αυτές παρατηρήσεις έχουν ιδιαίτερη σημασία για τη χώρα μας λόγω των ειδικών κλιματολογικών συνθηκών. Έχουμε ήπιο χειμώνα με υψηλές σχετικά θερμοκρασίες περιβάλλοντος, δυνατότητα χρήσης της ηλιακής ενέργειας βοηθητικά στην αντλία θερμότητας κατά τη διάρκεια του χειμώνα και δυνατότητα χρήσης της γεωθερμίας βοηθητικά στην αντλία θερμότητας.

### **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 μια, και από την άλλη προβλήματα σωστής λειτουργίας του συστήματος κατά τον χειμώνα.

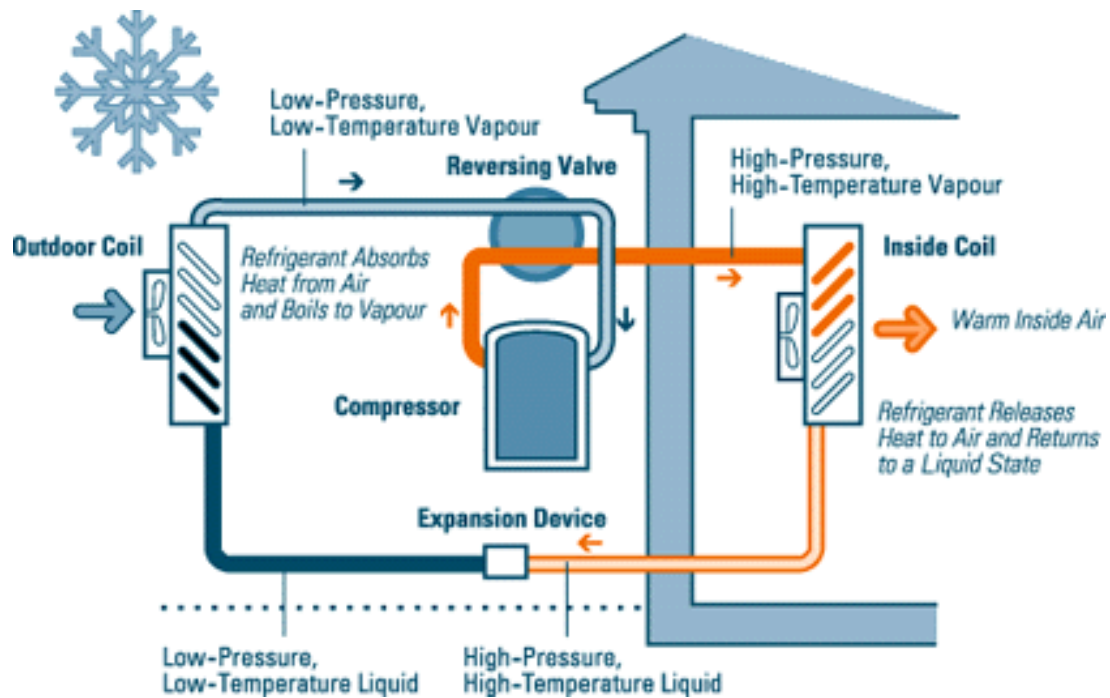
### **Κατηγορίες αντλιών θερμότητας**

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 – αέρος:

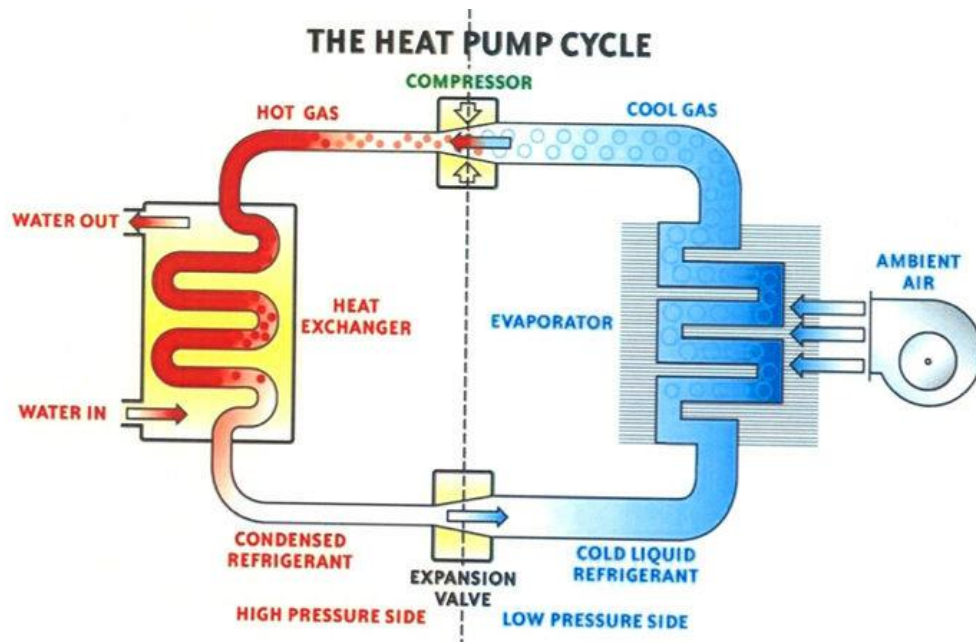
Είναι οι πιο συνηθισμένες στις σύγχρονες εγκαταστάσεις, έχουν ως πηγή άντλησης ενέργειας αλλά και ως μέσο απόδοσης της ενέργειας τον αέρα. Στην πρώτη περίπτωση τον εξωτερικό αέρα και στην δεύτερη τον εσωτερικό ή και ένα μέρος εξωτερικού για ταυτόχρονο εξαερισμό του χώρου. Είναι τα κλιματιστικά μηχανήματα διαιρούμενου τύπου (split type) στα οποία το ένα στοιχείο (εναλλάκτης) βρίσκεται μέσα στο κτίριο και προσλαμβάνει ενέργεια (αφαιρεί θερμότητα/ψύχει το χώρο) και το άλλο είναι εναλλάκτης ψυκτικού μέσου/αέρα και αποβάλλει θερμότητα έξω από το σπίτι μας. [37]



Εικόνα 2.18: Αντλία θερμότητας αέρος – αέρος [38]

- Αντλία θερμότητας αέρος – νερού:

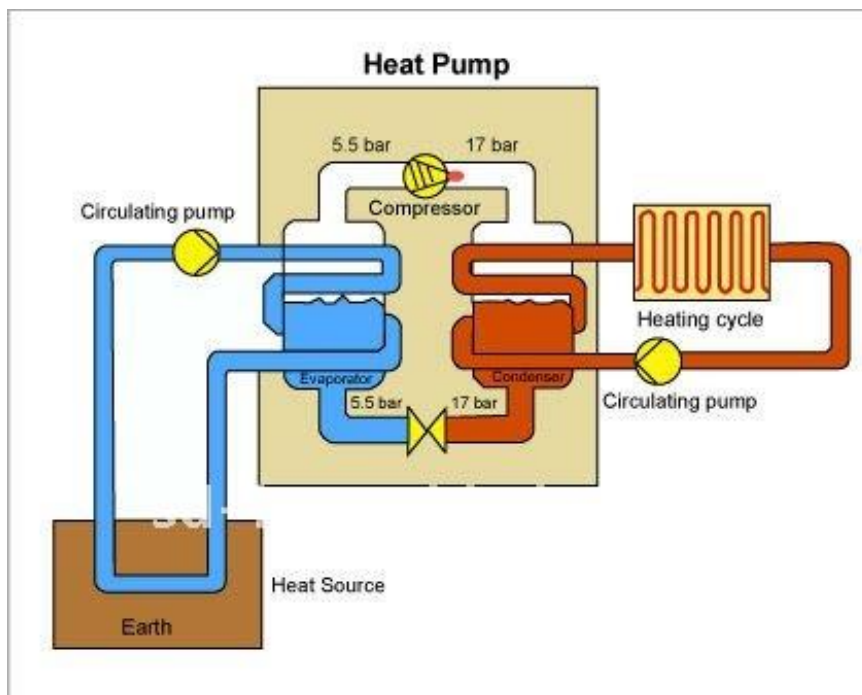
Εκμεταλλεύονται για την άντληση ενέργειας τον αέρα του περιβάλλοντος. Το θερμικό μέσο απόδοσης ενέργειας είναι συνήθως το νερό που μπορεί να κυκλοφορεί στο δίκτυο θέρμανσης (ενδοδαπέδια, σώματα ακτινοβολίας, fan coils) ή σε κάποιο εναλλάκτη από θερμοδοχείο με ενσωματωμένη αντλία θερμότητας (ζεστού νερού χρήσης). Είναι ιδανικές για κάθε είδους κατοικία και λειτουργούν τόσο σε υψηλές θερμοκρασίες όσο και σε θερμοκρασίες μέχρι 20 °C.



Εικόνα 2.19 : Αντλία θερμότητας αέρος – νερού [39]

- Αντλία 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.



Εικόνα 2.20 : Αντλία θερμότητας νερού – νερού [40]

### 3. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ TRNSYS 16

#### 3.1 Εισαγωγή στο TRNSYS

Το πρόγραμμα TRNSYS (Transient System Simulation Program) είναι ένα ολοκληρωμένο και επεκτάσιμο περιβάλλον προσομοίωσης μεταβαλλόμενων συστημάτων στο χρόνο, συμπεριλαμβανομένων και των πολυζωνικών κτιρίων (multi-zone buildings). Χρησιμοποιείται παγκοσμίως από μηχανικούς και ερευνητές για την αξιολόγηση νέων ενεργειακών συστημάτων, από ένα απλό οικιακό σύστημα θέρμανσης νερού, μέχρι τον σχεδιασμό και την προσομοίωση κτιρίων καθώς επίσης και του εξοπλισμού τους. Η προσομοίωση αυτή, περιλαμβάνει τη χρήση συστημάτων ελέγχου, λαμβάνει υπόψη τη συμπεριφορά των κατοίκων του κτιρίου και δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως αιολικά, ηλιακά, φωτοβολταϊκά, συστήματα υδρογόνου κλπ.

Ένα από τα μυστικά της μεγάλης επιτυχίας που γνώρισε το TRNSYS τα τελευταία χρόνια, είναι η ανοιχτή αρθρωτή δομή του. Ο πηγαίος κώδικας, ο πυρήνας του προγράμματος καθώς και οι κώδικες των διαφόρων μοντέλων που περιλαμβάνει το TRNSYS είναι διαθέσιμα στον χρήστη, ο οποίος μπορεί να τροποποιήσει κατάλληλα τα υπάρχοντα μοντέλα έτσι ώστε να εξυπηρετούνται καλύτερα οι δικές του ανάγκες.

Επιπρόσθετα, η αρχιτεκτονική του προγράμματος, η οποία βασίζεται σε αρχεία DLL, επιτρέπει τη δημιουργία νέων μοντέλων από το χρήστη με τη βοήθεια γλωσσών προγραμματισμού (C, C++, PASCAL, FORTRAN κλπ). Ακόμη, το TRNSYS μπορεί να συνδεθεί εύκολα με διάφορες εφαρμογές με σκοπό την επεξεργασία πριν, μετά ή και κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (Microsoft Excel, Matlab, COMIS κλπ).

Στις εφαρμογές του TRNSYS περιλαμβάνονται:

- Ηλιακά συστήματα (θερμικά ηλιακά και φωτοβολταϊκά)
- Κτίρια χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και συστήματα HVAC με στοιχεία προηγμένου σχεδιασμού (φυσικός αερισμός, ενδοδαπέδια θέρμανση και ψύξη, διπλές προσόψεις κ.α.)
- Συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- Συμπαγωγή, κυψέλες καυσίμου
- Οτιδήποτε απαιτεί δυναμική προσομοίωση

Για τη δημιουργία μιας νέας εφαρμογής στο περιβάλλον του TRNSYS, αρκεί η γραφική σύνδεση των διαφόρων στοιχείων (components) στο στούντιο προσομοίωσης (Simulation Studio). Κάθε τύπος στοιχείου περιγράφεται από ένα μαθηματικό μοντέλο και αναφέρεται συνήθως ως type. Κάθε στοιχείο δέχεται εισόδους (inputs) και παρέχει εξόδους (outputs). Για παράδειγμα το στοιχείο Type 1 αναφέρεται στον ηλιακό συλλέκτη, ενώ το στοιχείο Type 90 αντιστοιχεί σε μια ανεμογεννήτρια.

Το TRNSYS αποτελείται από μια σειρά προγραμμάτων: Το στούντιο προσομοίωσης (Simulation Studio) με το εκτελέσιμο του TRNExe, το γραφικό περιβάλλον για τα δεδομένα του κτιρίου (Building) με το εκτελέσιμο του TRNBuild, και τον επεξεργαστή (Editor) για τη δημιουργία αυτόνομων συστημάτων αναδιανομής γνωστά ως TRNSED με το εκτελέσιμο του TRNEdit.

### **3.2 Το στούντιο προσομοίωσης (Simulation Studio)**

Το κεντρικό περιβάλλον εργασίας του TRNSYS είναι το Στούντιο Προσομοίωσης, με τη βοήθεια του οποίου, μπορούμε να δημιουργήσουμε τις επιθυμητές εφαρμογές, σύροντας με το ποντίκι (drag and drop) τα επιλεγόμενα στοιχεία στο χώρο εργασίας, επιλέγοντας τις κατάλληλες διασυνδέσεις μεταξύ τους και καθορίζοντας τις παραμέτρους της προσομοίωσης.

Το στούντιο προσομοίωσης αποθηκεύει τις πληροφορίες της εφαρμογής μας σε ένα αρχείο Trnsys Project File (\*.trpf). Καθώς εκτελείται το πρόγραμμα, δημιουργείται επίσης ένα αρχείο εισόδου σε μορφή κειμένου το οποίο περιέχει όλες τις πληροφορίες της προσομοίωσης.

Το στούντιο προσομοίωσης περιλαμβάνει επίσης ένα διαχειριστή εξόδου (output manager), με τον οποίο ο χρήστης καθορίζει ποιες μεταβλητές θα ολοκληρωθούν, ποιες θα εκτυπωθούν και ποιες θα χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό γραφικών παραστάσεων. Επιπλέον, περιλαμβάνει ένα αρχείο καταγραφής σφαλμάτων (log-error manager) ο οποίος επιτρέπει τη λεπτομερή μελέτη των γεγονότων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Τέλος, με το στούντιο προσομοίωσης, μπορούν να πραγματοποιηθούν πολλές πρόσθετες εργασίες. Κάποιες από αυτές είναι η δημιουργία νέων υπολογιστικών μοντέλων προς εισαγωγή στο TRNSYS, χρησιμοποιώντας την επιλογή Fortran Wizard, η ανάγνωση και η επεξεργασία της εισόδου, της εξόδου και των παραμέτρων ενός στοιχείου, καθώς επίσης και η ανάγνωση των αρχείων εξόδου.

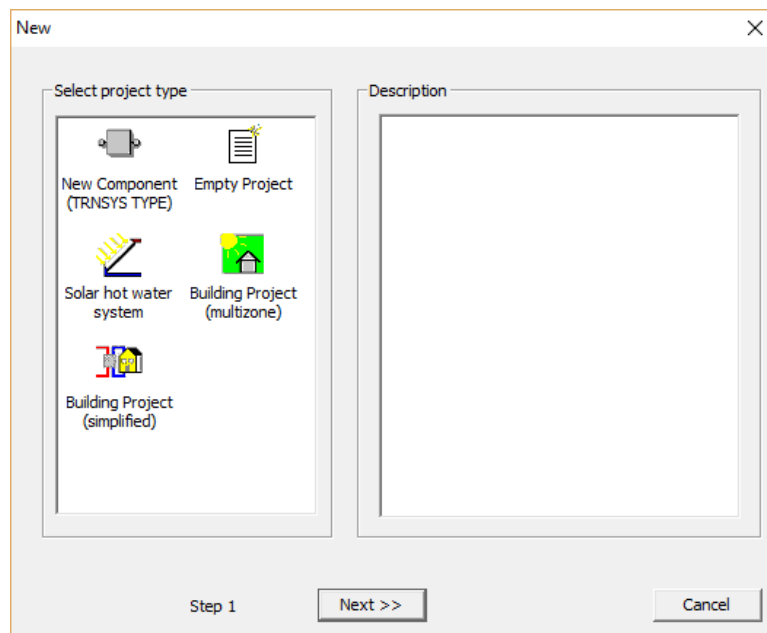
#### **Εκκίνηση του TRNSYS Simulation Studio**

Το πρώτο παράθυρο που εμφανίζεται με το που ανοίξουμε το πρόγραμμα TRNSYS είναι το κενό περιβάλλον που φαίνεται στην εικόνα.



Εικόνα 3.1 : Αρχικό περιβάλλον TRNSYS Simulation Studio

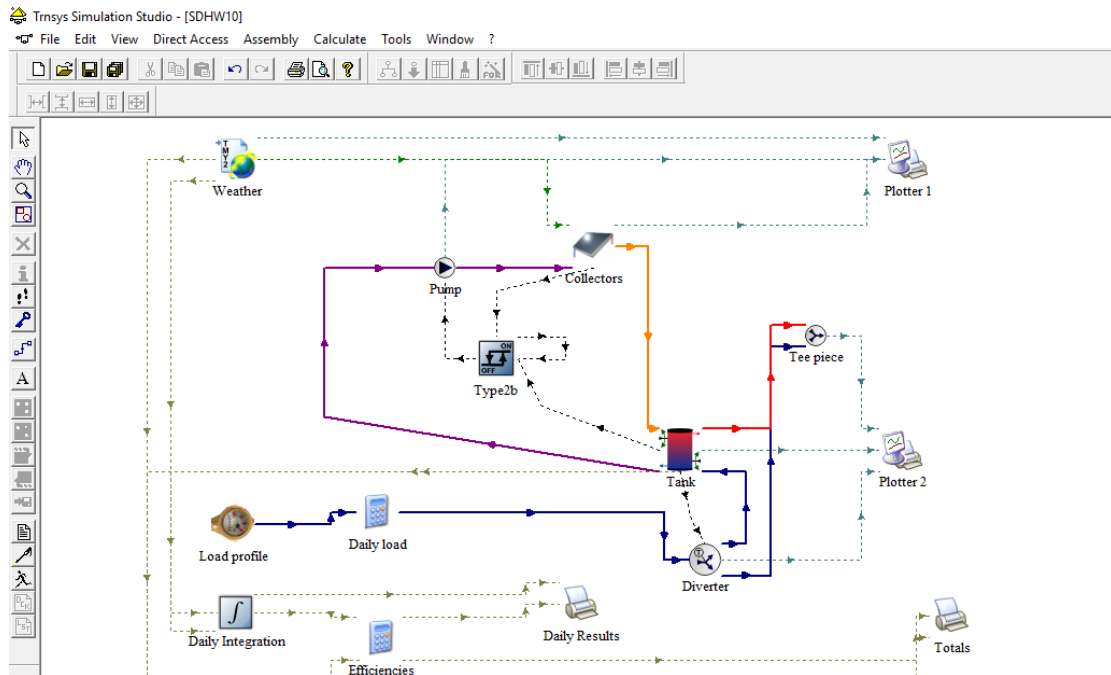
Επιλέγοντας το εικονίδιο File πάνω αριστερά και στη συνέχεια την επιλογή New, εισαγόμαστε σε μια νέα εργασία, η οποία περιλαμβάνει τις εξής βασικές επιλογές:



Εικόνα 3.2 : Βασικές Επιλογές του Simulation Studio

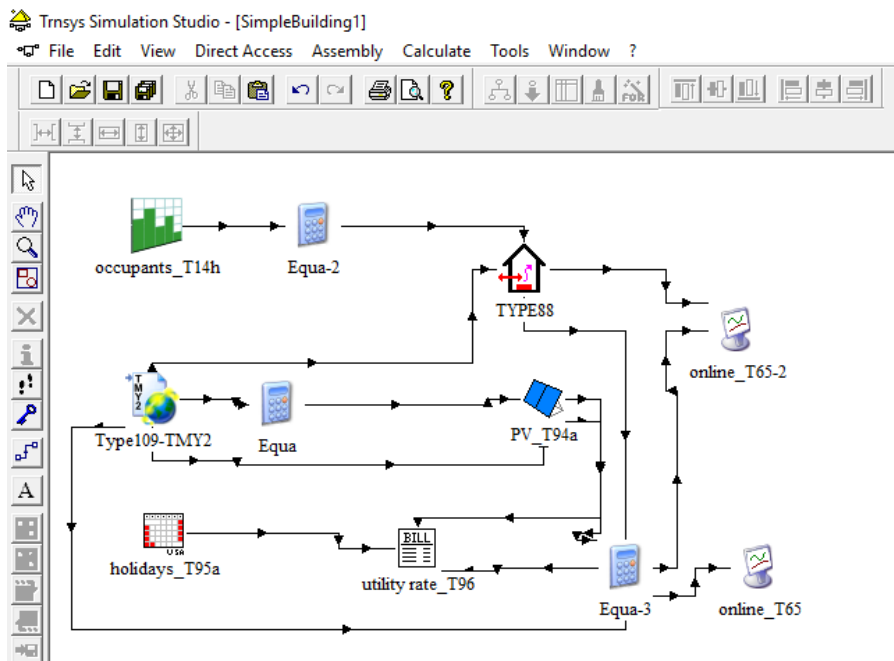
- **New Component (TRNSYS TYPE):** Με την επιλογή αυτή μπορούμε να δημιουργήσουμε από το μηδέν, ένα νέο στοιχείο με τη χρήση μιας γλώσσας προγραμματισμού.
- **Empty Project:** Με την επιλογή αυτή θα μεταβούμε σε ένα κενό παράθυρο εργασίας, το οποίο μπορούμε εμείς να διαμορφώσουμε όπως επιθυμούμε ανάλογα με τη μελέτη μας.

- Solar hot water system: Εμφανίζεται στην οθόνη μας ένα τυπικό σύστημα θέρμανσης νερού με ηλιακό συλλέκτη, έτοιμο από το TRNSYS.



Εικόνα 3.3 : Ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού

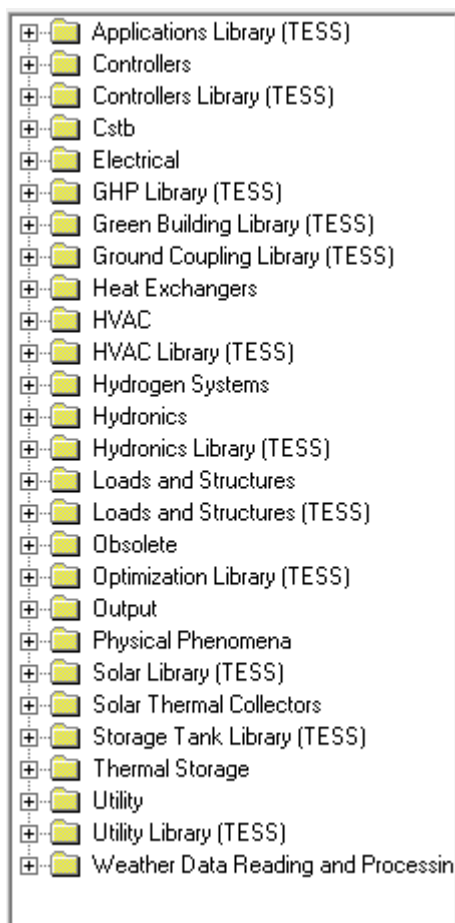
- Building Project (simplified): Δημιουργία ενός απλοποιημένου μοντέλου ενός κτιρίου.



Εικόνα 3.4 : Απλοποιημένο μοντέλο κτιρίου

- Building Project (multizone): Δημιουργία ενός πολυζωνικού κτιρίου στο οποίο μπορούμε να εργαστούμε ανάλογα με τις ανάγκες μας και να το τροποποιήσουμε κατάλληλα. Η συγκεκριμένη επιλογή θα αναλυθεί εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο.

Επιλέγουμε τη δημιουργία ενός κενού θέματος (Empty Project) , προκειμένου να εισέλθουμε σε ένα βασικό περιβάλλον εργασίας. Στη δεξιά πλευρά του παραθύρου υπάρχει η βιβλιοθήκη του TRNSYS, με όλα τα διαθέσιμα στοιχεία προς χρήση και επεξεργασία.



Τα κυριότερα από αυτά είναι:

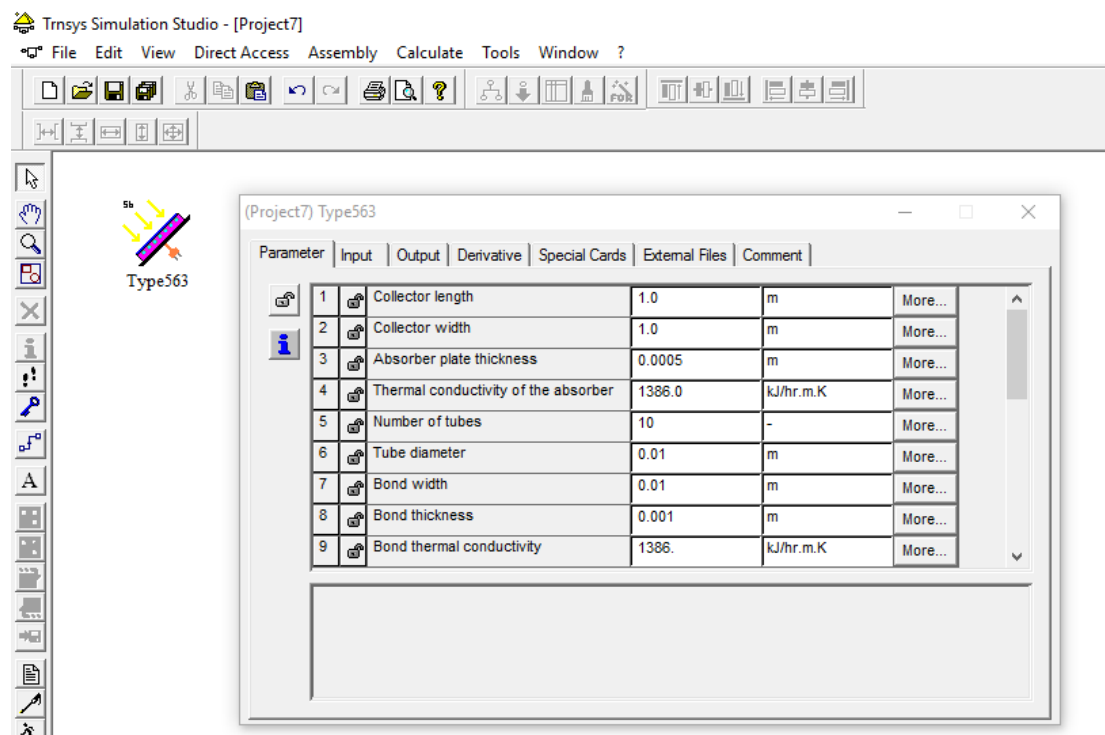
- Controllers: Ελεγκτές γενικής χρήσης και θερμοστάτες.
- Electrical: Φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, μπαταρίες, inverter κ.α.
- Heat Exchangers : Εναλλάκτες Θερμότητας
- HVAC: Μοντέλα θέρμανσης, ψύξης, αερισμού, ψύκτες απορρόφησης
- Hydronics: Αντλίες, ανεμιστήρες
- Output: Εκτυπωτές, διαγράμματα
- Physical Phenomena: Ψυχομετρικοί χάρτες, υπολογιστής ηλιακής ακτινοβολίας
- Solar Thermal Collectors : Επίπεδοι, συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες.
- Thermal Storage: Δεξαμενές με/ή χωρίς διαστρωμάτωση, εσωτερικούς εναλλάκτες
- Utility : Μετατροπείς μονάδων, χρονικά προγράμματα, data readers

Εικόνα 3.5 : Βιβλιοθήκη στοιχείων

- Weather Data Reading and Processing: Μετεωρολογικά δεδομένα, επεξεργαστές ηλιακής ακτινοβολίας.

## Παράμετροι και συνδέσεις του στοιχείου

Για κάθε στοιχείο που επιλέγεται από τη βιβλιοθήκη, υπάρχει η δυνατότητα επεξεργασίας και τροποποίησης των παραμέτρων του, ανάλογα με τις ανάγκες μας κάθε φορά. Για παράδειγμα, εάν επιλέξουμε το στοιχείο Type 563 που αναφέρεται σε ένα θερμικό-ηλιακό συλλέκτη, θα εμφανιστεί το παράθυρο που φαίνεται στην εικόνα.

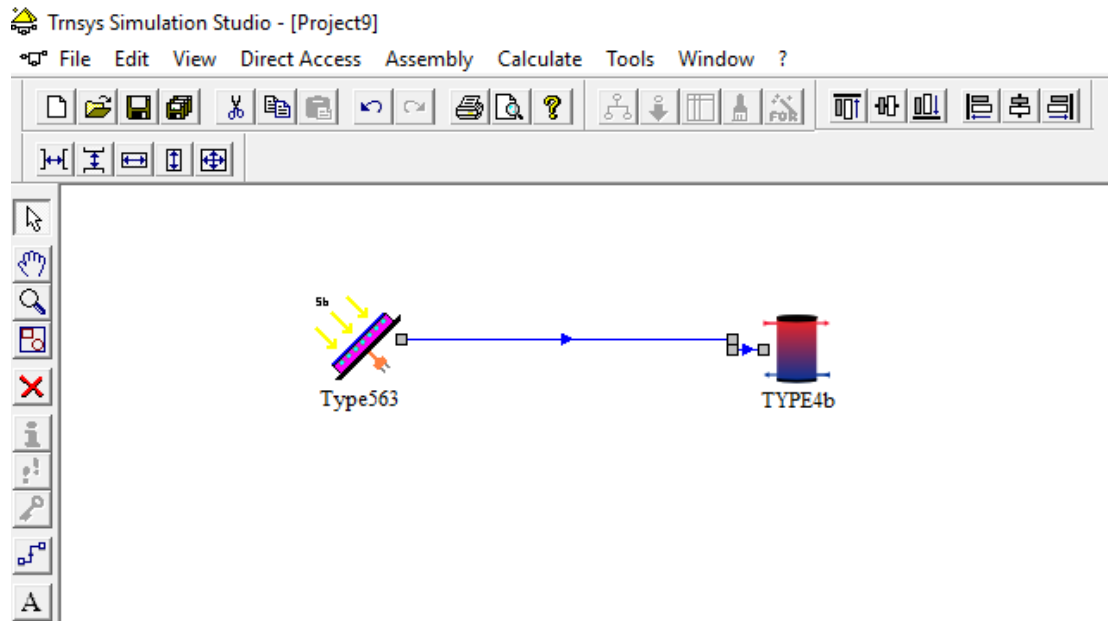


Εικόνα 3.6: Επεξεργασία παραμέτρων στοιχείου

Στο παράθυρο εμφανίζονται ορισμένες παράμετροι του στοιχείου, όπως είναι το μήκος και το πλάτος του συλλέκτη ή το πάχος του απορροφητικού υλικού του. Όπως είναι λογικό, οι παράμετροι έχουν σταθερή τιμή και δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, όπως συμβαίνει λόγω χάριν με τις εισόδους (input) και τις εξόδους (output) του στοιχείου, οι οποίες αφενός είναι συναρτήσεις του χρόνου και αφετέρου εξαρτώνται από άλλα στοιχεία με τα οποία είναι συνδεδεμένο το στοιχείο. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι στο TRNSYS οι εισοδοι μπορούν να συνδεθούν μόνο μια φορά ενώ οι έξοδοι παραπάνω.

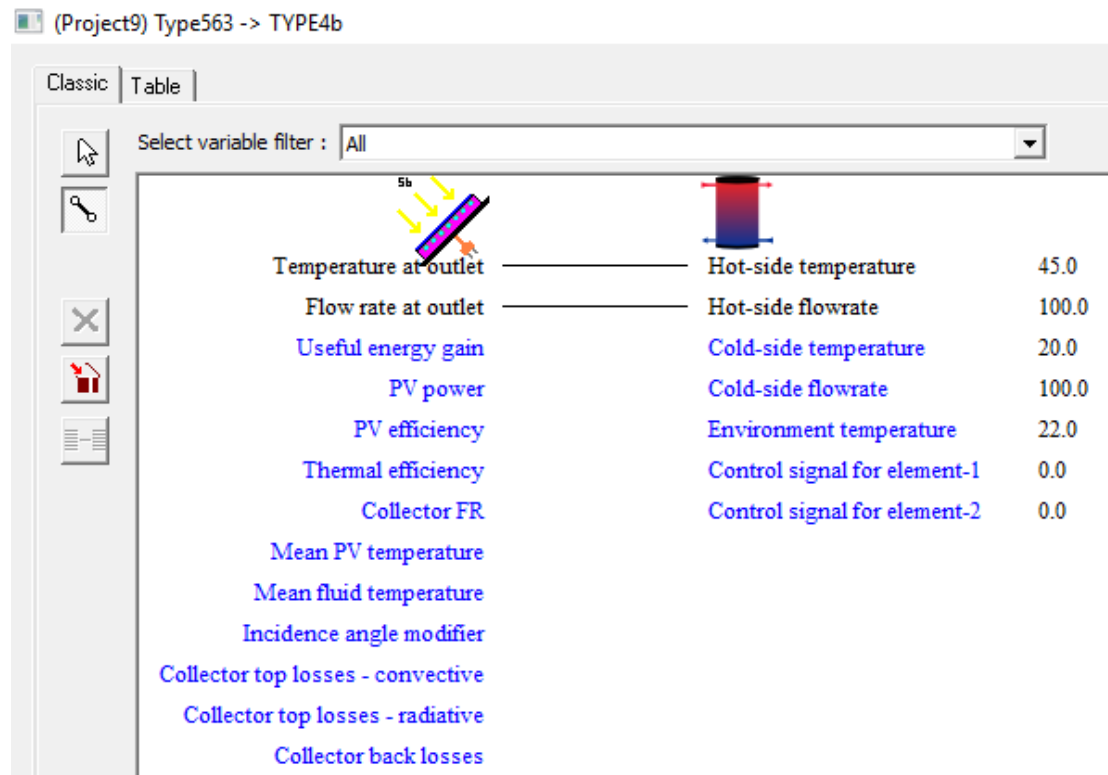
Αφού επεξεργαστούμε τις παραμέτρους όπως θέλουμε, μπορούμε να συνδέσουμε το στοιχείο αυτό με ένα ή περισσότερα στοιχεία της βιβλιοθήκης. Για παράδειγμα με το στοιχείο Type 4b που αντιστοιχεί σε μια δεξαμενή για τη θέρμανση νερού. Για τη σύνδεση δυο στοιχείων χρησιμοποιούμε το εικονίδιο Link και ενώνουμε την έξοδο του ενός στοιχείου με την είσοδο του άλλου όπως φαίνεται στην εικόνα:





Εικόνα 3.7: Σύνδεση στοιχείων

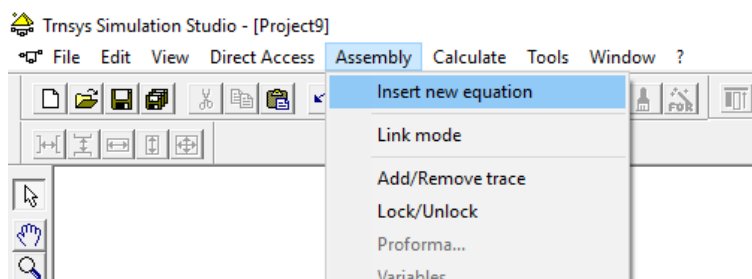
Η γραμμή που συνδέει τα δυο στοιχεία έχει μπλε χρώμα, καθώς δεν έχουμε συνδέσει τις μεταβλητές των δυο στοιχείων. Μόλις το πραγματοποιήσουμε η γραμμή θα έχει μαύρο χρώμα. Κάνοντας κλικ πάνω στη γραμμή εμφανίζεται το ακόλουθο παράθυρο, όπου συνδέουμε μεταβλητές που αντιστοιχούν σε ίδια φυσικά μεγέθη, δηλαδή θερμοκρασία με θερμοκρασία κ.ο.κ.



Εικόνα 3.8: Σύνδεση μεταβλητών ανάμεσα σε στοιχεία

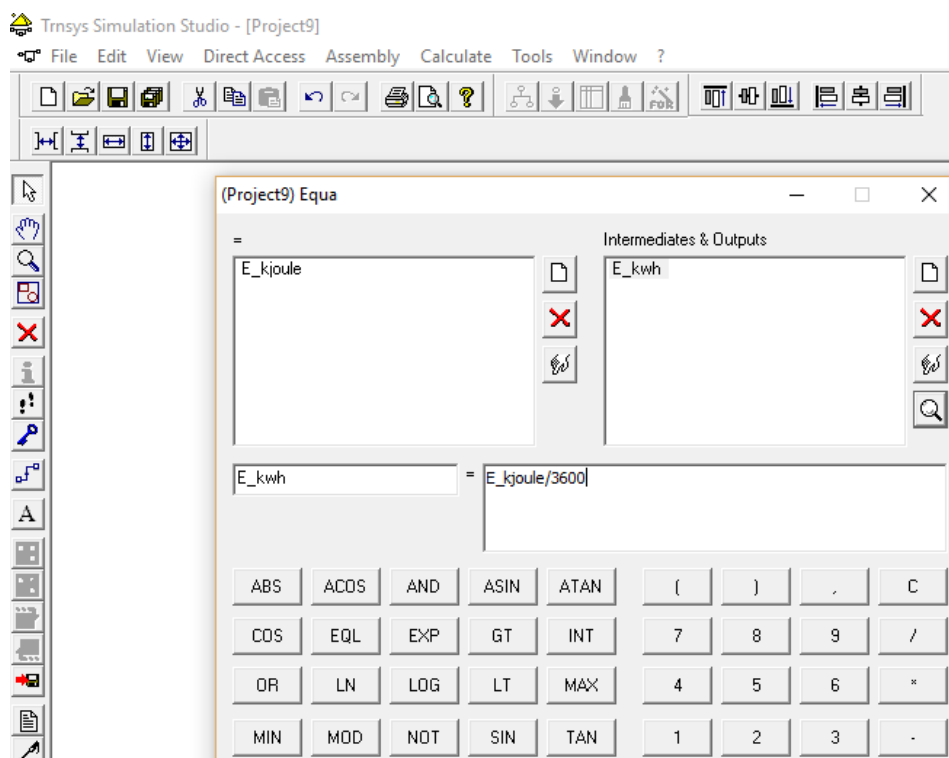
## Πρόσθετες δυνατότητες του Simulation Studio

Μία πολύ χρήσιμη λειτουργία του TRNSYS είναι η εισαγωγή εξισώσεων μέσα στο αρχείο εισόδου. Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να είναι συναρτήσεις με μεταβλητές ενός στοιχείου ή σταθερές αριθμητικές τιμές. Η εισαγωγή μιας εξίσωσης γίνεται με το εικονίδιο Assembly – Insert new equation.



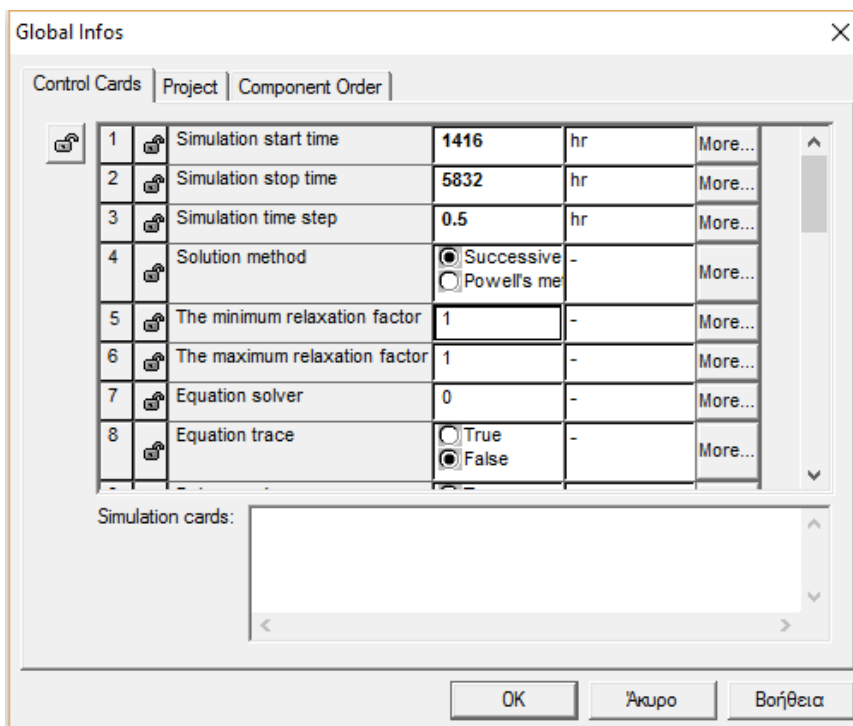
Εικόνα 3.9: Εισαγωγή εξίσωσης

Στη συνέχεια εμφανίζεται το ακόλουθο παράθυρο, το οποίο περιέχει δύο στήλες. Στην αριστερή στήλη είναι οι εισόδοι της εξίσωσης (inputs) ενώ στη δεξιά στήλη οι έξοδοι της εξίσωσης (Intermediates & Outputs). Μία μεταβλητή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη δεξιά στήλη, εάν δεν έχει οριστεί στις εισόδους αριστερά. Στο παρακάτω παράδειγμα, παρουσιάζεται η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας ενός στοιχείου από kilojoule σε kWh.



Εικόνα 3.10: Είσοδοι και έξοδοι της εξίσωσης

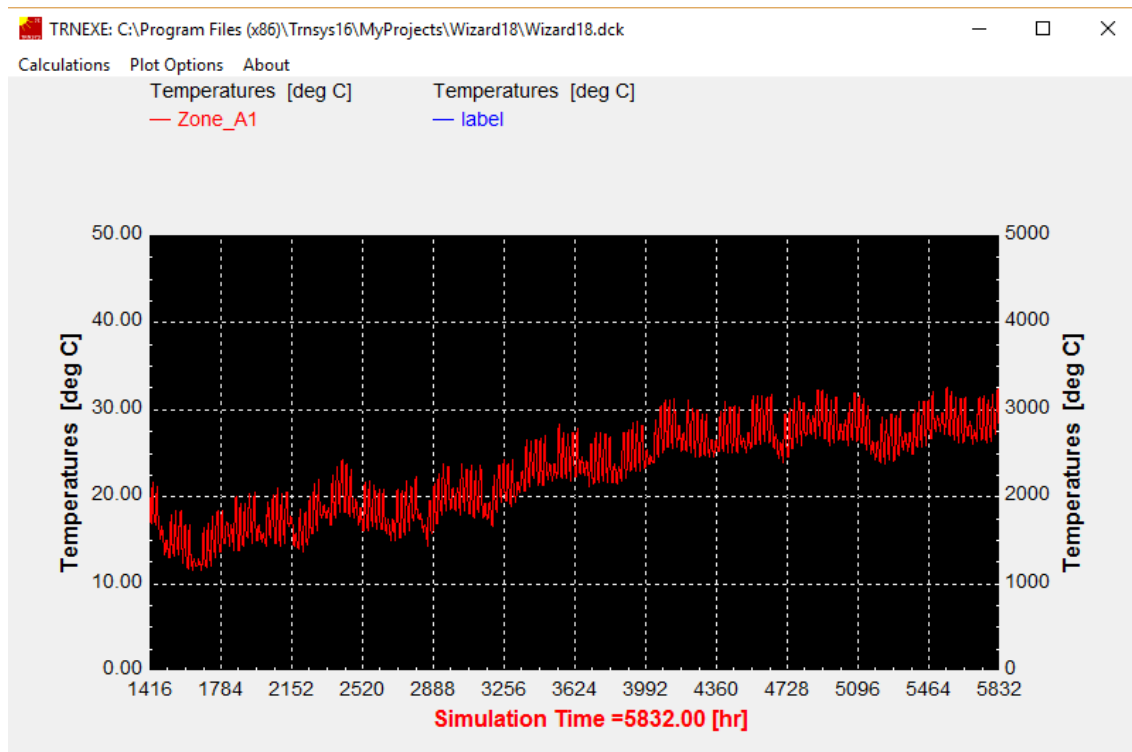
Το Simulation Studio μας δίνει επίσης τη δυνατότητα να ορίσουμε την στιγμή έναρξης και τερματισμού της προσομοίωσης, καθώς επίσης και το βήμα της, με το εικονίδιο Control Cards. Για παράδειγμα εάν επιθυμούμε την προσομοίωση τους μήνες της άνοιξης και του καλοκαιριού, δηλαδή από Μάρτιο έως Αύγουστο με βήμα μισή ώρα θα επιλέξουμε τα παρακάτω:



Εικόνα 3.11: Καρτέλα Ελέγχου

Τέλος, ίσως η πιο σημαντική δυνατότητα του Simulation Studio, είναι το εικονίδιο Run, με το οποίο γίνεται γραφική απεικόνιση της μεταβολής και παρουσιάζεται το προφίλ θερμοκρασιών και άλλων μεγεθών. Επίσης επιλέγοντας το εικονίδιο Calculate - Open - External Files, λαμβάνουμε τα αριθμητικά αποτελέσματα της προσομοίωσης για κάθε χρονική στιγμή.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται το θερμοκρασιακό προφίλ στο εσωτερικό ενός κτιρίου για τους μήνες από Μάρτιο έως Αύγουστο με βήμα μισή ώρα. Όπως φαίνεται, οι γραφικές παραστάσεις γίνονται με τη βοήθεια του TRNEXE.



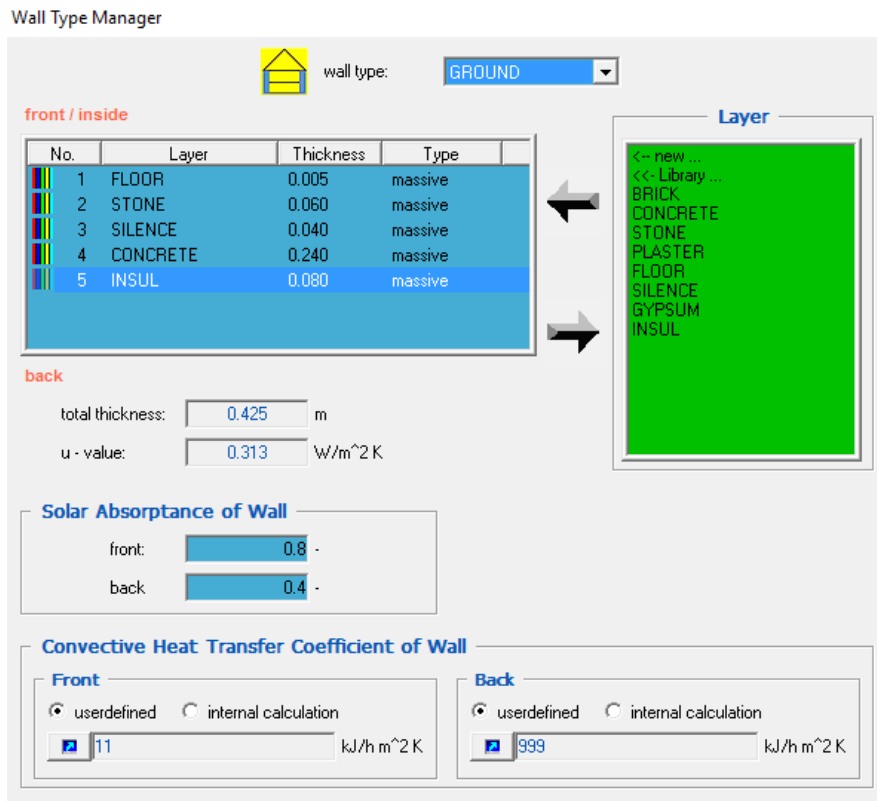
Εικόνα 3.12: Το περιβάλλον TRNEXE

### 3.3 Το περιβάλλον TRNBuild

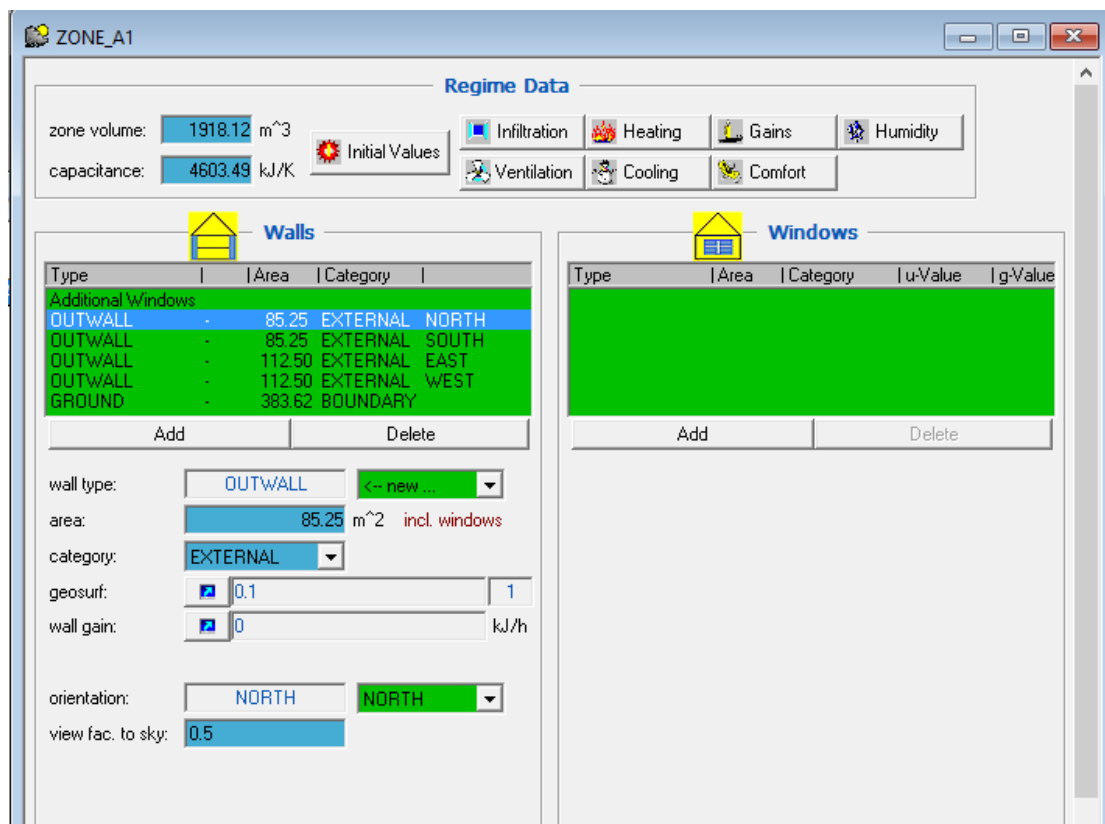
Το TRNBuild είναι το πρόγραμμα με το οποίο εισάγουμε τα δεδομένα και τις παραμέτρους ενός πολυζωνικού κτιρίου. Δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει λεπτομερώς όλα τα υλικά κατασκευής του κτιρίου, τους υαλοπίνακες, καθώς επίσης και το πρόγραμμα ψύξης και θέρμανσης που εφαρμόζεται στο κτίριο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα εργαλεία του TRNBuild :

- Wall type manager

Με το εικονίδιο αυτό, εισάγουμε τα δεδομένα για τους τοίχους του κτιρίου. Αρχικά, επιλέγεται το είδος του τοίχου (έδαφος, οροφή, εξωτερικός, εσωτερικός ή παρακείμενος σε άλλη ζώνη) από την επιλογή Wall type. Ακολούθως, προσδιορίζονται τα στρώματα κατασκευής του τοίχου καθώς επίσης και το πάχος του καθενός. Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μιας σειράς υλικών που προσφέρει το TRNSYS όπως πλίνθο, σκυρόδεμα, πέτρα, σοβά, γύψο και μόνωση. Φυσικά, υπάρχει η δυνατότητα προσδιορισμού νέου υλικού όπως θα δούμε παρακάτω. Επιλέγοντας τη ζώνη που επιθυμούμε να επεξεργαστούμε, μπορούμε να ορίσουμε το συντελεστή θέασης του τοίχου από τον ουρανό, το συντελεστής κατανομής της εισερχόμενης ακτινοβολίας (geosurf) και άλλα φορτία του τοίχου.



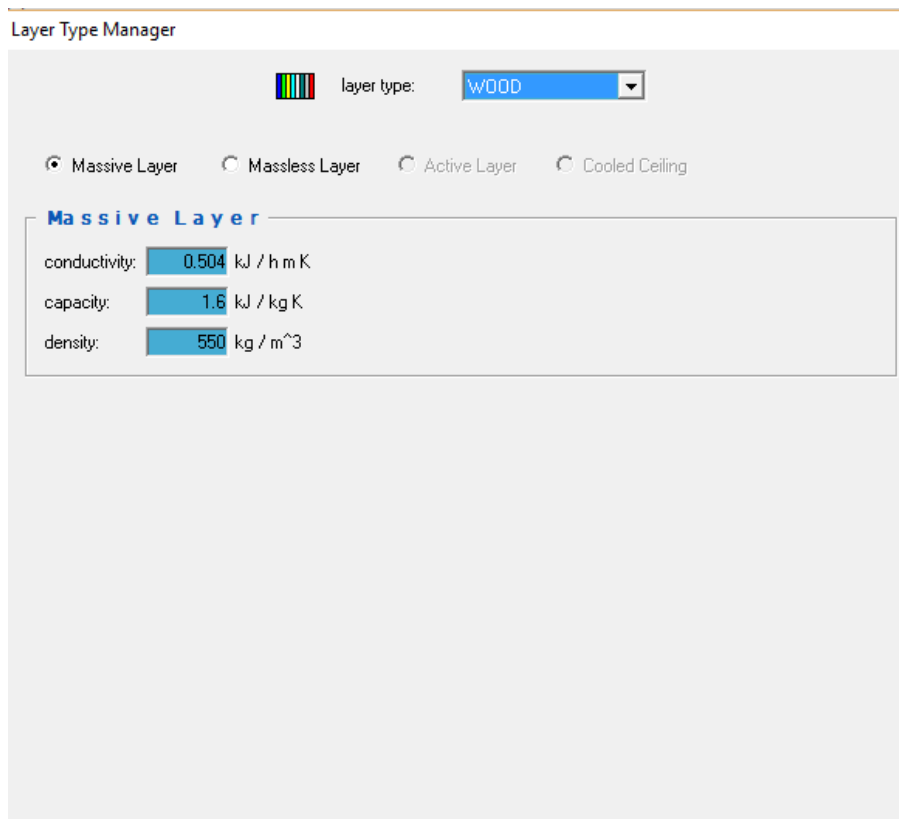
Εικόνα 3.13: Εισαγωγή υλικών τοίχων



Εικόνα 3.14: Επεξεργασία τοίχων

- Layer type manager

Όπως προαναφέρθηκε, το TRNSYS και πιο συγκεκριμένα το TRNBuild δίνει τη δυνατότητα ορισμού ενός νέου υλικού, αρκεί φυσικά να γνωρίζουμε τις φυσικές του ιδιότητες. Έτσι, προσδιορίζοντας τη θερμική αγωγιμότητα (conductivity), τη θερμοχωρητικότητα (capacity) και την πυκνότητα (density) του υλικού και τέλος ονομάζοντας το, έχουμε τη δυνατότητα να το χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή του κτιρίου. Για παράδειγμα, ένα νέο υλικό προς χρήση θα μπορούσε να είναι το ξύλο το οποίο είναι 18 φορές καλύτερο θερμομονωτικό από το σκυρόδεμα. Το υλικό αυτό ονομάστηκε wood και είναι έτοιμο προς χρήση.



Εικόνα 3.15: Εισαγωγή νέου υλικού

- Window type manager

Αποτελεί τον επεξεργαστή των υαλοπινάκων του κτιρίου. Συγκεκριμένα υπάρχει η δυνατότητα επιλογής διπλών υαλοπινάκων, του είδους του γυαλιού ανάμεσα σε 125 δυνατές επιλογές της βιβλιοθήκης του TRNSYS, του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, του μεγέθους του πλαισίου του υαλοπίνακα, καθώς επίσης και άλλες προαιρετικές ρυθμίσεις όπως σκίαση, αντανάκλαση κλπ. Στη συνέχεια επιλέγοντας τη ζώνη που μας ενδιαφέρει, ορίζουμε το μέγεθος του υαλοπίνακα, το είδος του, τον προσανατολισμό, το συντελεστή geosurf κ.α.

Window Type Manager

window type: DOUBLE

**Glazing**

ID number: 2001 WinID: Pool Lib  
 slope of window: 90 degree  
 For 1 glazing module width: 0 m height: 0 m  
 u - value: 1.4 W/m<sup>2</sup> K  
 g - value: 0.589 %/100  
 ID spacer: 0 Data from w4-lib.dat

**Convective Heat Transfer Coefficient of Window**

**Front (inside)**  
 userdefined  internal calculation  
 11 kJ/h m<sup>2</sup> K

**Back (outside)**  
 userdefined  internal calculation  
 64 kJ/h m<sup>2</sup> K

**Optional Properties of Shading Devices**

**Additional Heat Resistance**  
 internal device: 0 h m<sup>2</sup> K/kJ  
 external device: 0 h m<sup>2</sup> K/kJ

**Reflection Coefficient of Internal Device**  
 towards window: 0.5 % / 100  
 towards zone: 0.5 % / 100

**Fraction of abs. Solar Radiation to Zone Air Node (CCISHADE)**  
 0.5 % / 100

**Frame**

area frame/window: 0.2 % / 100  
 u - value (1/R): 8.17 kJ/h m<sup>2</sup> K  
 solar absorptance: 0.8

Εικόνα 3.16: Επιλογή είδους υαλοπίνακα και πλαισίου

ZONE\_A1

**Regime Data**

zone volume: 1918.12 m<sup>3</sup>  
 capacitance: 4603.49 kJ/K  
 Initial Values  
 Infiltration  Heating  Gains  Humidity  
 Ventilation  Cooling  Comfort

**Walls**

Type	Area	Category
Additional Windows		
OUTWALL	85.25	EXTERNAL NORTH
OUTWALL	85.25	EXTERNAL SOUTH
OUTWALL	112.50	EXTERNAL EAST
OUTWALL	112.50	EXTERNAL WEST
GROUND	383.62	BOUNDARY

wall type: OUTWALL  
 area: 85.25 m<sup>2</sup>  
 category: EXTERNAL  
 geosurf: 0.1  
 wall gain: 0 kJ/h  
 orientation: NORTH  
 view fac. to sky: 0.5

**Windows**

Type	Area	Category	u-Value	g-Value
DOUBLE	10.00	EXTERNAL	1.4	0.589

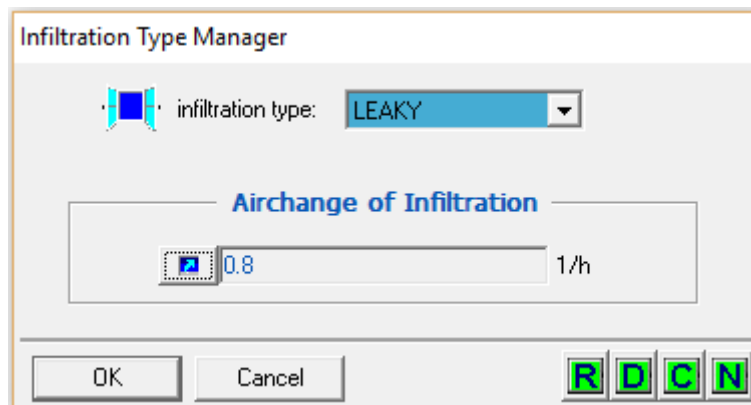
window type: DOUBLE  
 area: 10 m<sup>2</sup>  
 category: EXTERNAL  
 geosurf: 0  
 gain: 0 kJ/h  
 orientation: NORTH  
 view fac. to sky: 0.5

internal shad. factor: 0  
 external shad. factor: 0

Εικόνα 3.17: Επεξεργασία μεγέθους υαλοπινάκων

- Infiltration type manager

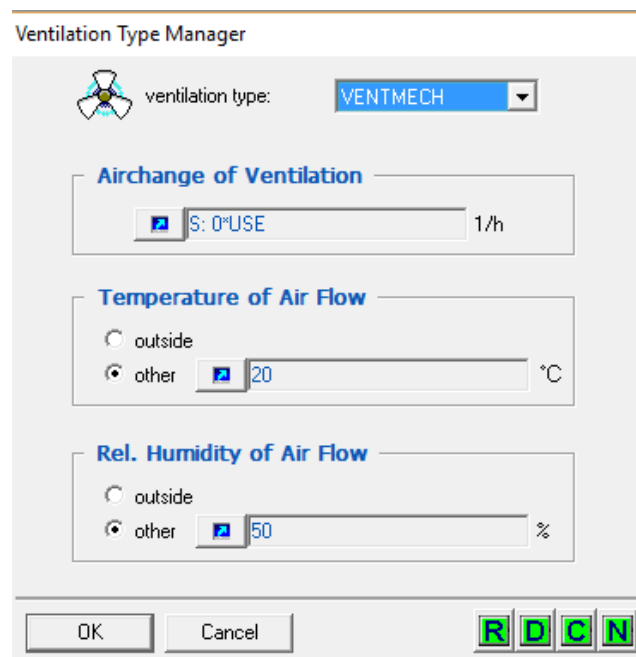
Από το εικονίδιο αυτό, καθορίζεται η διείσδυση του αέρα μέσα στη ζώνη του κτιρίου που έχουμε επιλέξει. Να σημειωθεί ότι η ρύθμιση αυτή είναι προαιρετική και αρχικά είναι απενεργοποιημένη. Απαραίτητη προϋπόθεση για την λειτουργία αυτή είναι να γνωρίζουμε το ρυθμό εναλλαγών του αέρα περιβάλλοντος που θα διεισδύσει στο κτίριο μας.



Εικόνα 3.17: Ρύθμιση διείσδυσης αέρα

- Ventilation type manager

Με τον επεξεργαστή αυτόν ορίζεται επίσης προαιρετικά ο αερισμός του κτιρίου. Ο αερισμός αυτός μπορεί να πραγματοποιείται μέσω μιας κλιματιστικής συσκευής για παράδειγμα. Για να ρυθμίσουμε πλήρως αυτή την παράμετρο, αρκεί να γνωρίζουμε το ρυθμό εναλλαγών του αέρα, τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του.



Εικόνα 3.18: Επεξεργασία αερισμού κτιρίου



- Heating type manager

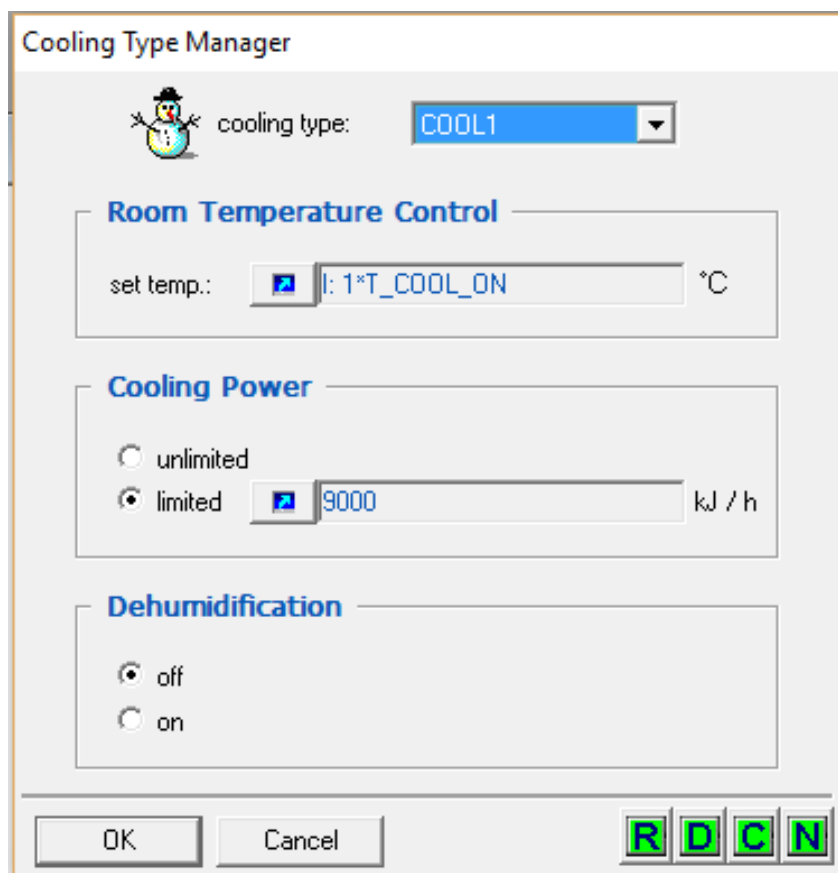
Με το εικονίδιο αυτό επιλέγουμε με ποιο τρόπο θα γίνει η θέρμανση στο κτίριο μας. Συγκεκριμένα προσδιορίζεται η επιθυμητή θερμοκρασία δωματίου κάτω από την οποία θα λειτουργεί η θέρμανση, τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να παραχθεί για θέρμανση (αν θα είναι απεριόριστη ή αν θα τίθεται κάποιο όριο) και το αν θα υπάρχει υγραποίηση του αέρα (humidification). Παρόλα αυτά, η ρύθμιση του heating είναι προαιρετική, καθώς μπορούμε να μοντελοποιήσουμε το μηχανισμό θέρμανσης και εξωτερικά του περιβάλλοντος TRNBuild, στέλνοντας ως εισόδους στο Building τη θερμοκρασία, την υγρασία και τις εναλλαγές αέρα.

Εικόνα 3.19: Επεξεργασία θέρμανσης κτιρίου

- Cooling type manager

Παρόμοια λειτουργία με το Heating type manager, μόνο που εδώ αναφερόμαστε σε ψύξη του κτιρίου και πιο συγκεκριμένα της επιλεγμένης ζώνης αυτού. Συγκεκριμένα ρυθμίζουμε τη θερμοκρασία πάνω από την οποία θα τίθεται σε λειτουργία το σύστημα ψύξης, τη μέγιστη παρεχόμενη ισχύ για ψύξη καθώς επίσης και το αν επιθυμούμε αφύγρανση του αέρα.

Να σημειωθεί ότι τόσο στη θέρμανση όσο και στην ψύξη, υπάρχει η δυνατότητα ορισμού ενός χρονοδιαγράμματος λειτουργίας, θέτοντας την επιθυμητή θερμοκρασία στο χώρο κάθε χρονική στιγμή.



Εικόνα 3.20: Επεξεργασία ψύξης κτιρίου

- Εσωτερικά φορτία (Gains)

Επιλέγοντας την επιθυμητή ζώνη και το εικονίδιο Gains, μας δίδεται η δυνατότητα να επεξεργαστούμε τα εσωτερικά φορτία του κτιρίου, τα οποία αποτελούν οι άνθρωποι που βρίσκονται στο χώρο (persons), οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές (computer), ο φωτισμός (artificial lighting), καθώς και άλλα θερμικά κέρδη που μπορούμε να ορίσουμε με την επιλογή other gains. Η παρουσία των ατόμων, ρυθμίζεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές ISO 7730 ή VDI 2078 ανάλογα με τη συμπεριφορά τους στο χώρο, για τους υπολογιστές υπάρχει δυνατότητα επιλογής της ισχύος τους και του αριθμού τους, ενώ για το φωτισμό επιλέγεται 0 για κλειστά φώτα και 1 για ανοιχτά στη ρύθμιση scale ή ακόμα και κάποιο πρόγραμμα φωτισμού ανάλογα με τις ανάγκες του κτιρίου.

Gains [ Zone: ZONE\_A1 ]

**Persons**

off  on

degree of activity:

ISO 7730  VDI 2078

Table

scale:

**Computer**

off  on

computer type:

scale:

**Artificial Lighting**

off  on

related floor area:  m<sup>2</sup>

total heat gain:

control strategy:

convective part:

scale:

**Other Gains**

Type	Scale	Geo Position
PER_SP	S: 25*USE	
LIGHT_SP	S: 25*LIGHT	
GAIN_SP	S: 25*USE	

Add Delete

gain type:  <- new ...

scale:

OK Cancel

Εικόνα 3.21: Καθορισμός εσωτερικών φορτίων κτιρίου

### 3.4 Οι εφαρμογές TRNSED και TRNEdit

Το πρόγραμμα TRNEdit είναι ένας εξειδικευμένος επεξεργαστής που χρησιμοποιείται για την τροποποίηση των αρχείων εισόδου του TRNSYS. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία αυτόνομων εφαρμογών, οι οποίες ονομάζονται TRNSED εφαρμογές. Υπάρχει η δυνατότητα ελεύθερης διανομής αυτών των εφαρμογών μεταξύ χρηστών που δεν έχουν άδεια χρήσης του TRNSYS, με σκοπό έχουν στη διάθεση τους 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 δυο καρτέλες. Στην πρώτη φαίνεται ο κώδικας του αρχείου εισαγωγής και στην άλλη το γραφικό αποτέλεσμα που αποτελεί την TRNSED εφαρμογή. [41]

## 4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΟ TRNSYS SIMULATION STUDIO

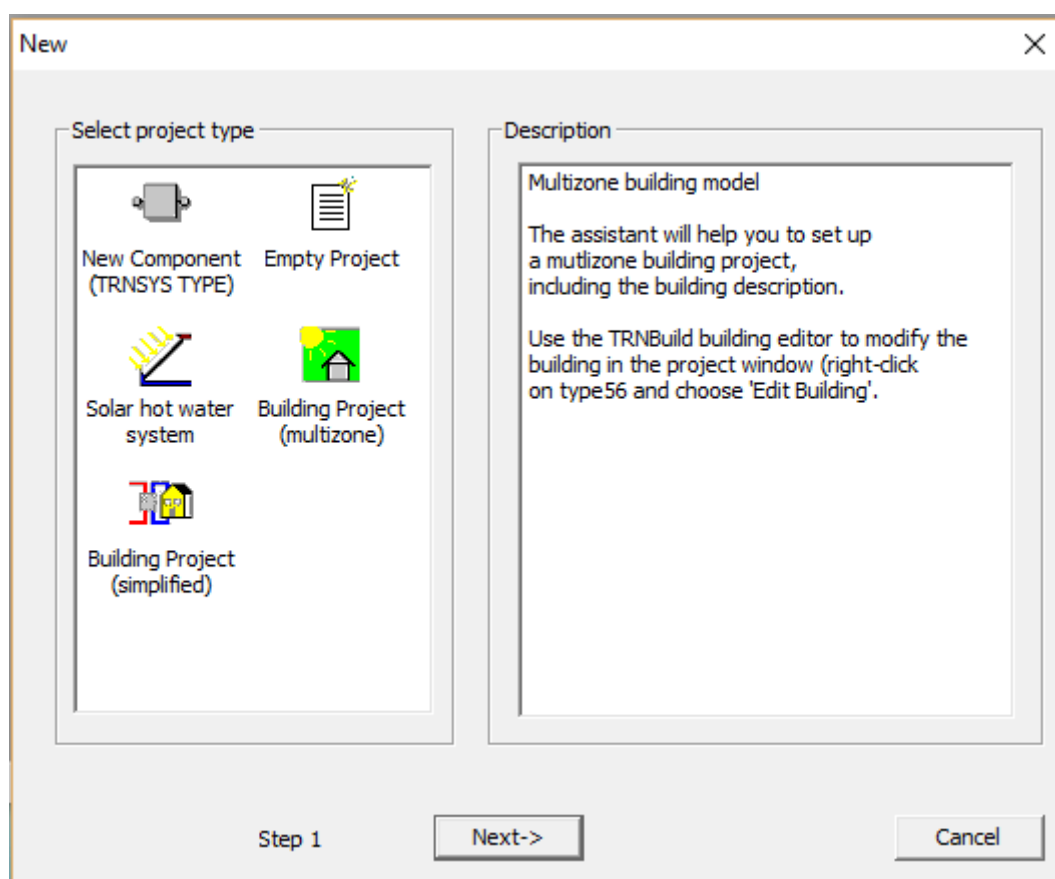
### STUDIO

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται εκτενώς η εγκατάσταση μας, για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Σε πρώτη φάση, γίνεται ανάλυση της κατασκευής του κτιρίου και εν συνεχεία επεξήγηση όλων των συνδέσεων που έγιναν με τα διάφορα εξαρτήματα της εγκατάστασης, όπως την ανεμογεννήτρια, τα φωτοβολταϊκά πάνελ, την αντλία θερμότητας, το inverter, την μπαταρία κλπ.

#### 4.1 Βήματα σχεδιασμού του κτιρίου στο TRNSYS Studio

##### Βήμα 1<sup>ο</sup>

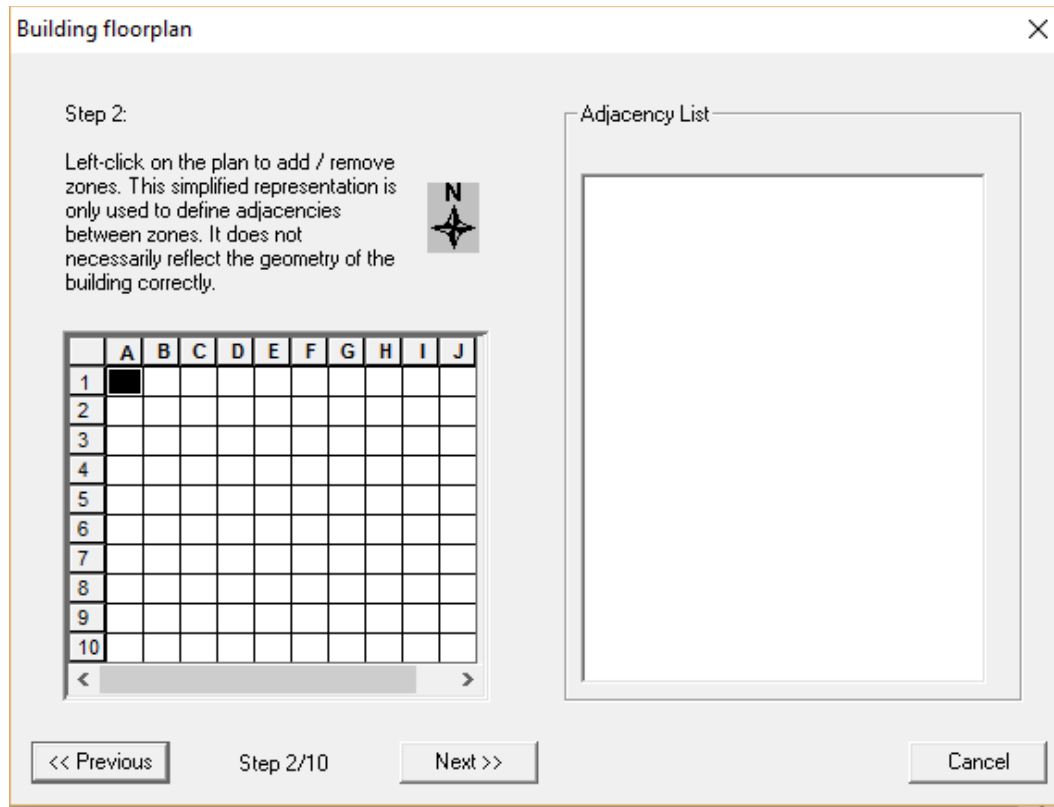
Αφού ανοίξουμε το πρόγραμμα Trnsys Studio, επιλέγουμε το εικονίδιο New και εν συνεχεία το εικονίδιο Building Project (multizone).



Εικόνα 4.1 : Δημιουργία πολυζωνικού μοντέλου κτιρίου

## Βήμα 2<sup>ο</sup>

Σε αυτό το σημείο καλούμαστε να επιλέξουμε τον αριθμό των ζωνών του κτιρίου μας. Στη μελέτη μας χρησιμοποιήσαμε μια ενεργειακή ζώνη.



Εικόνα 4.2 : Επιλογή αριθμού ζωνών κτιρίου

### Βήμα 3°

Στο βήμα αυτό γίνεται η επιλογή των διαστάσεων για κάθε ζώνη του κτιρίου μας. Θα χρησιμοποιηθεί μια ζώνη όπως προαναφέρθηκε, με τις διαστάσεις ενός τυπικού κτιρίου 100τ.μ. και συγκεκριμένα:

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

Zone properties

Step 3: Define zone dimensions

Select the zone you want to modify in the plan and edit the values below.

Name

Zone dimension

Height  [m] ·

Width  [m] -->

Depth  [m] ^

Volume  [m^3]

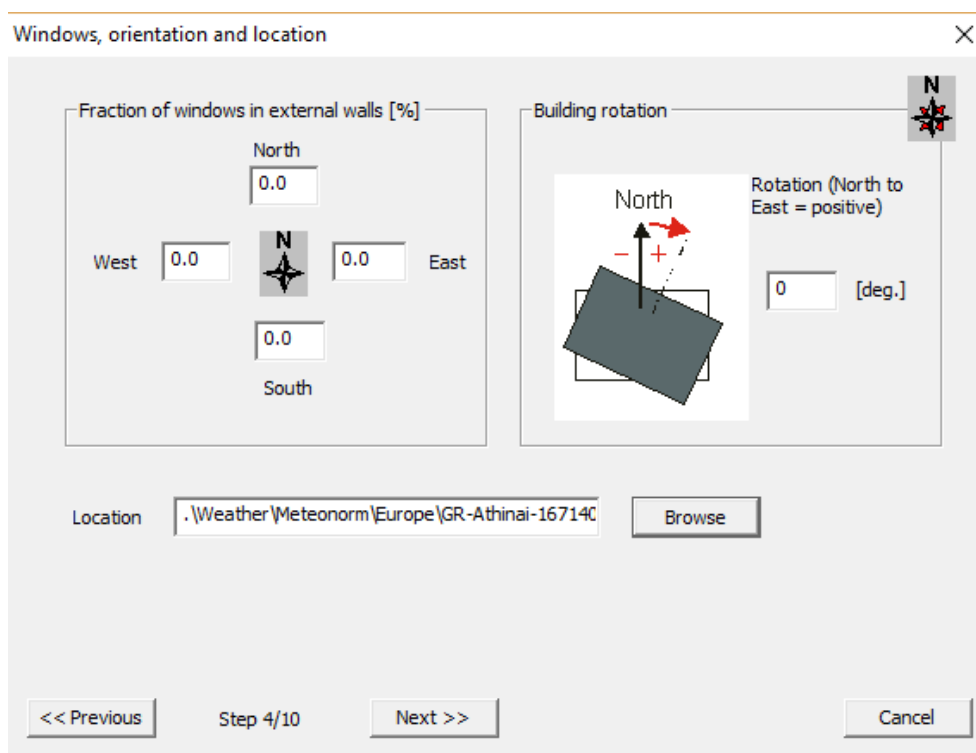
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

<< Previous Step 3/10 Next >> Cancel

Εικόνα 4.3: Επιλογή διαστάσεων ζωνών κτιρίου

## Βήμα 4<sup>ο</sup>

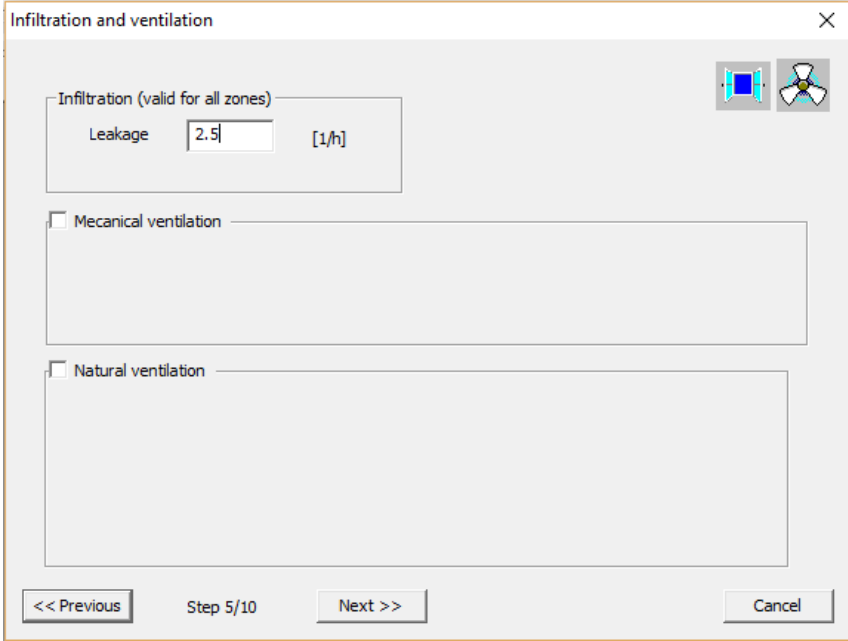
Η επόμενη ρύθμιση αφορά το ποσοστό των υαλοπινάκων επί του τοίχου για κάθε μία από τις τέσσερις κατευθύνσεις (Βορρά, Νότο, Δύση, Ανατολή). Αποφασίστηκε όμως, οι υαλοπίνακες να προσδιοριστούν σε δεύτερη φάση και όχι από αυτό το βήμα όπως θα δούμε στη συνέχεια. Επίσης επιλέγεται η τοποθεσία του κτιρίου, για την οποία επιλέξαμε την Αθήνα, ενώ υπάρχει δυνατότητα για ακριβή προσδιορισμό του προσανατολισμού του κτιρίου, όμως δεν χρησιμοποιήθηκε αυτή η ρύθμιση και παρέμεινε η default τιμή των 0 μοιρών.



Εικόνα 4.4: Επιλογή ανοιγμάτων, προσανατολισμού, μετεωρολογικών δεδομένων

## Βήμα 5<sup>ο</sup>

Από εδώ καθορίζεται η διείσδυση του αέρα και ο αερισμός. Για τη διείσδυση του αέρα καταλήξαμε στην τιμή 2.5 εναλλαγές/h, μετά από αρκετές δοκιμές, ενώ δεν ενεργοποιήσαμε τον αερισμό, είτε το φυσικό είτε το μηχανικό, σε αυτό το βήμα.



Infiltration and ventilation

Infiltration (valid for all zones)

Leakage  [1/h]

Mechanical ventilation

Natural ventilation

<< Previous Step 5/10 Next >> Cancel

Εικόνα 4.5: Επιλογή παραμέτρων αερισμού χώρου



## Βήμα 6<sup>ο</sup>

Επόμενο βήμα η επιλογή της θέρμανσης (Heating) και της ψύξης (Cooling) για το κτίριο μας. Δεν έγινε κάποια ενέργεια εδώ, καθώς θα γίνει χρήση συγκεκριμένου συστήματος θέρμανσης-ψύξης στη συνέχεια.



Εικόνα 4.6: Επιλογή θέρμανσης και ψύξης κτιρίου

## Βήμα 7<sup>ο</sup>

Στο σημείο αυτό υπάρχει η δυνατότητα προσδιορισμού των εσωτερικών φορτίων του κτιρίου, τα οποία προκύπτουν από την παρουσία ανθρώπων μέσα στο χώρο, από τη χρήση ηλεκτρονικών συσκευών και φυσικά από τα φώτα. Αποφασίστηκε ωστόσο η ρύθμιση να γίνει σε δεύτερη φάση με τη βοήθεια του TRNBuild όπου ρυθμίζονται πιο αναλυτικά οι παράμετροι και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι στο βήμα αυτό δεν μεταβάλλαμε τις default τιμές.

Internal gains	
Specific gains	14 [W/m <sup>2</sup> ]
Person density	0.1 [1/m <sup>2</sup> ]

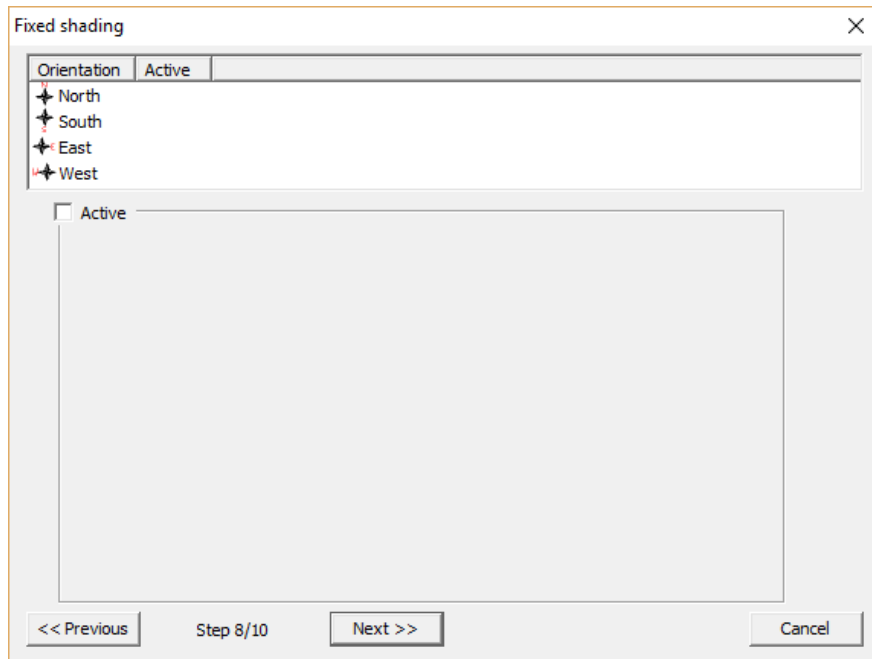
  

Lighting	
Light ON if total horizontal rad <	120 [W/m <sup>2</sup> ]
Light OFF if total horizontal rad >	200 [W/m <sup>2</sup> ]
Specific light	10 [W/m <sup>2</sup> ]

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

## Βήματα 8<sup>ο</sup> και 9<sup>ο</sup>

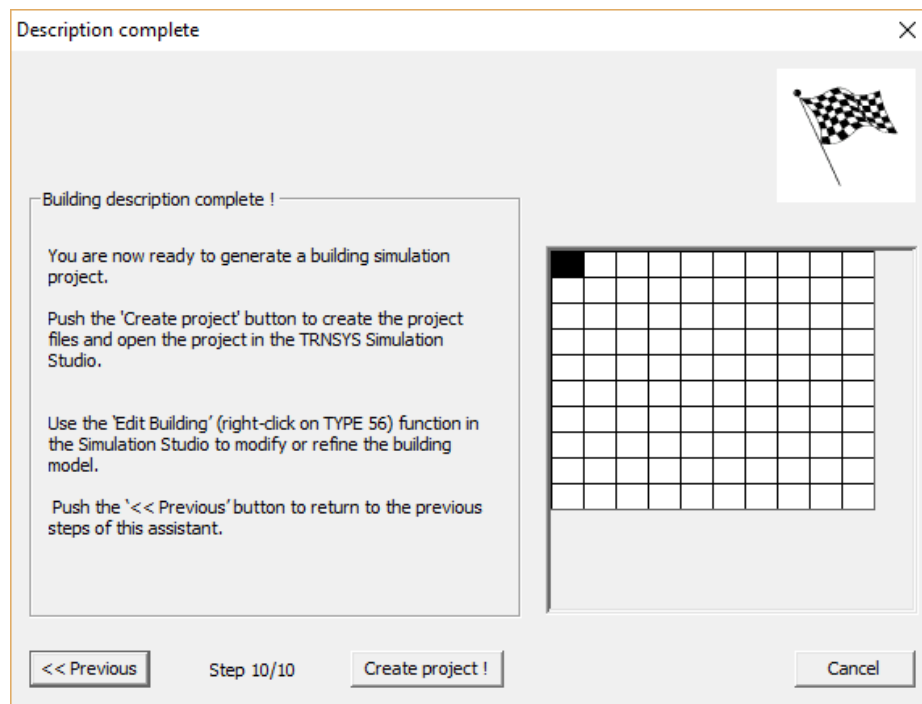
Στα βήματα αυτά παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης της σκίασης (Fixed και Movable) καθώς επίσης και του προσανατολισμού με τον οποίο γίνεται. Δεν μεταβλήθηκαν ούτε εδώ οι default τιμές. Σε επόμενη φάση θα επιλεγεί ο συντελεστής σκίασης.



Εικόνα 4.8: Επιλογή σκίασης κτιρίου

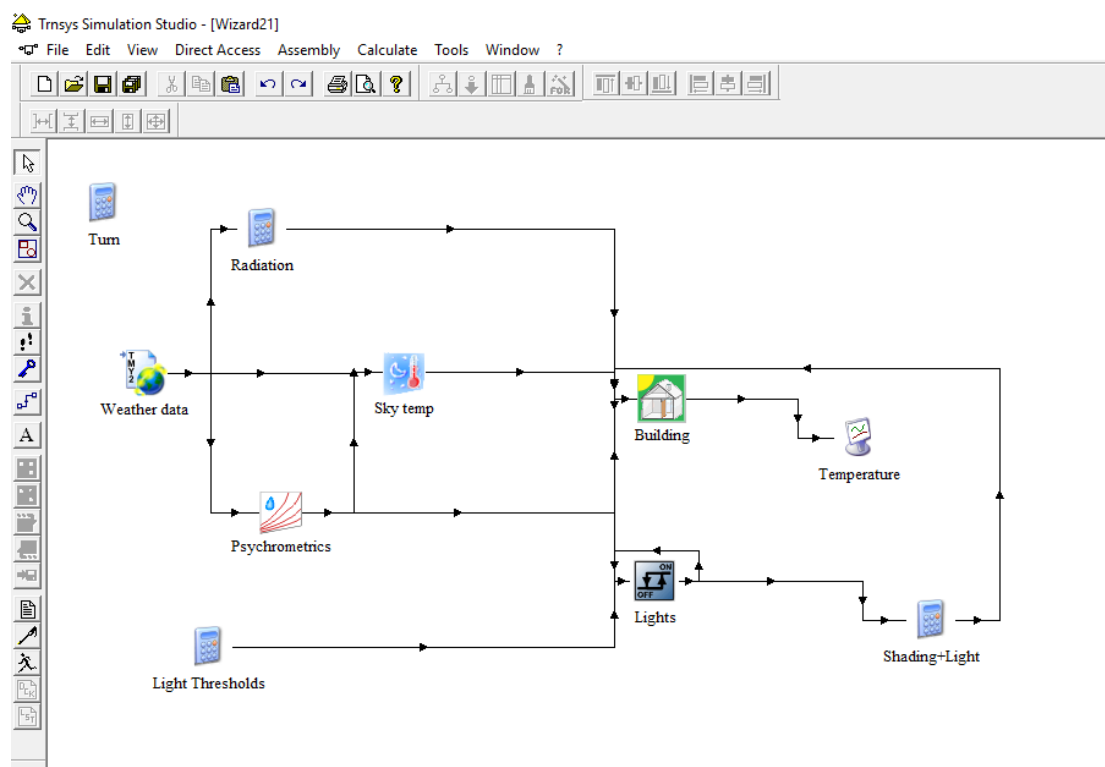
## Βήμα 10<sup>ο</sup>

Το τελευταίο βήμα σχεδιασμού το οποίο έχει χαρακτήρα επικύρωσης. Επιλέγουμε το εικονίδιο Create Project και ολοκληρώνουμε το σχεδιασμό του κτιρίου μας.



Εικόνα 4.9: Ολοκλήρωση σχεδιασμού κτιρίου

Στη συνέχεια, στο Simulation Studio εμφανίζεται η εγκατάσταση του κτιρίου προς μελέτη:



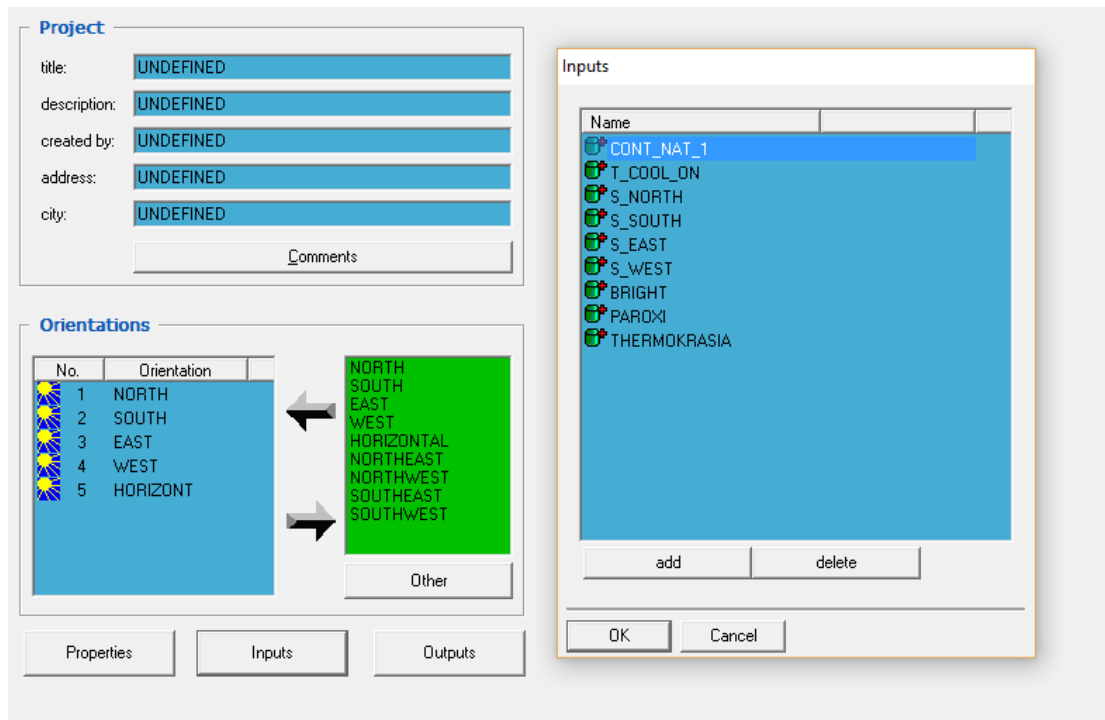
Εικόνα 4.10: Το κτίριο συνδεδεμένο με τα στοιχεία του Simulation Studio

## 4.2 Ρύθμιση παραμέτρων του κτιρίου

Έχοντας δημιουργήσει το μοντέλο του κτιρίου μας, είμαστε σε θέση να το επεξεργαστούμε σύμφωνα με τις ανάγκες της μελέτης μας. Έτσι, επιλέγουμε το εικονίδιο Building, κάνουμε δεξί κλικ και επιλέγουμε Edit Building. Αυτόματα μεταβαίνουμε στο περιβάλλον TRNBuild.

### Δεδομένα εισόδου στο κτίριο

Επιλέγουμε το εικονίδιο Project και στη συνέχεια το Inputs, για να προσδιορίσουμε τις μεταβλητές που θα σταλούν ως εισοδοι στο κτίριο μας. Οι μεταβλητές αυτές θα είναι η μεταβλητή THERMOKRASIA που αναφέρεται στη θερμοκρασία του αέρα του συστήματος θέρμανσης που θα χρησιμοποιηθεί, και η μεταβλητή PAROXI που αναφέρεται στην παροχή του αέρα του συστήματος θέρμανσης. Στην περίπτωση μας, το σύστημα θέρμανσης θα αποτελείται από μια αντλία θερμότητας, όπως θα δούμε αναλυτικότερα στη συνέχεια.



Εικόνα 4.11: Εισαγωγή μεταβλητών εισόδου στο κτίριο

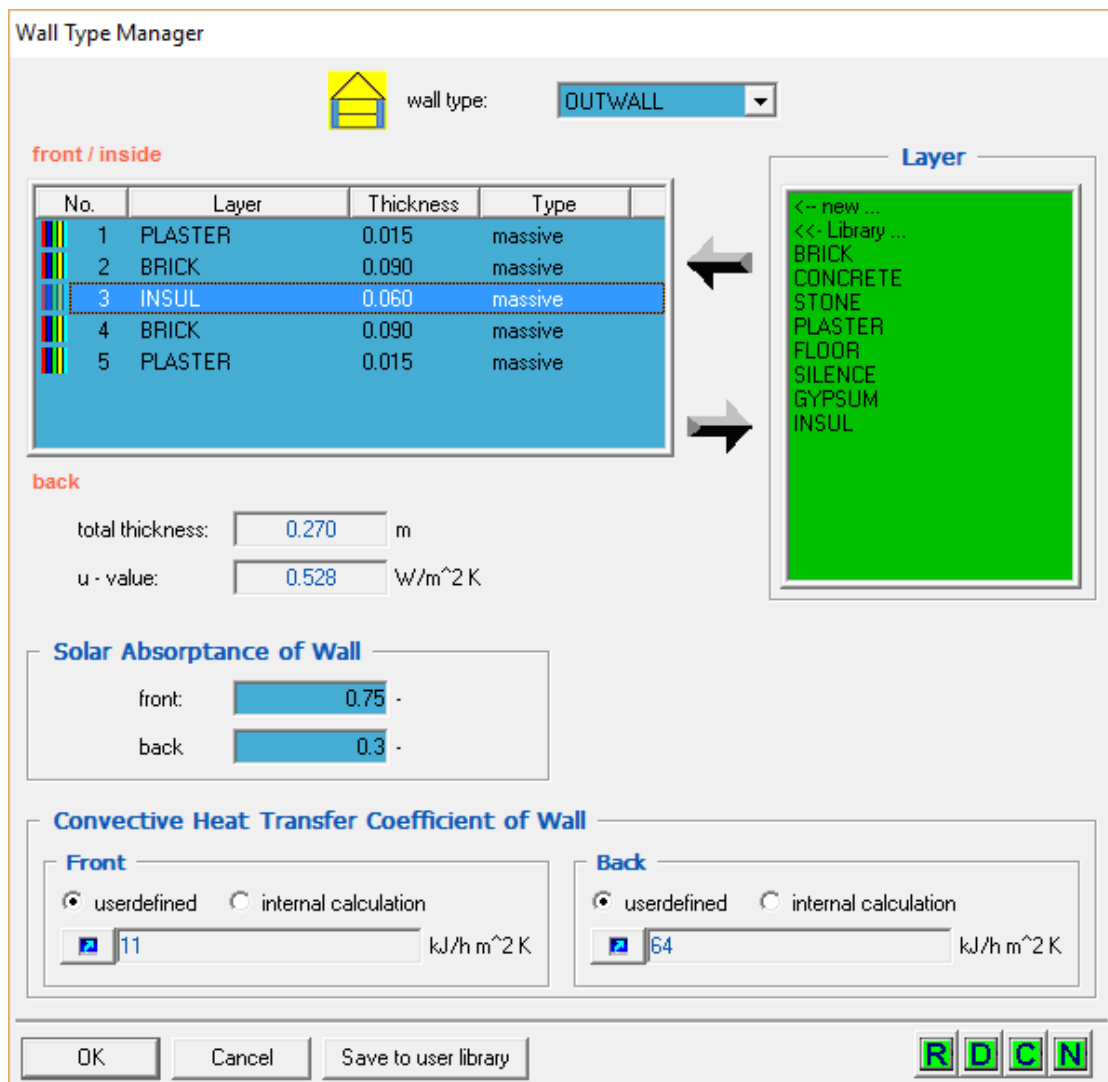
### Δομικά στοιχεία κτιρίου

Αμέσως επόμενο βήμα , είναι η επεξεργασία των δομικών στοιχείων του κτιρίου, δηλαδή του δαπέδου, της οροφής και των εξωτερικών τοίχων του κτιρίου. Βρισκόμαστε στο περιβάλλον TRNBuild, οπότε επιλέγουμε το εικονίδιο Wall type manager για να προσδιορίσουμε τα υλικά από τα οποία θα αποτελείται ο κάθε τοίχος καθώς επίσης και το πάχος του καθενός.

### Εξωτερικοί τοίχοι

Οι 4 εξωτερικοί τοίχοι του κτιρίου μας, θα αποτελούνται από 5 διαφορετικά στρώματα υλικών τα οποία αναφέρονται παρακάτω, ενώ θα έχουν συνολικό πάχος 27 cm. Η τιμή του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας είναι  $0.528 W/m^2K$ , όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί.

- ❖ Σοβάς: 15mm
- ❖ Τούβλο: 90mm
- ❖ Μόνωση: 60mm
- ❖ Τούβλο: 90mm
- ❖ Σοβάς: 15mm

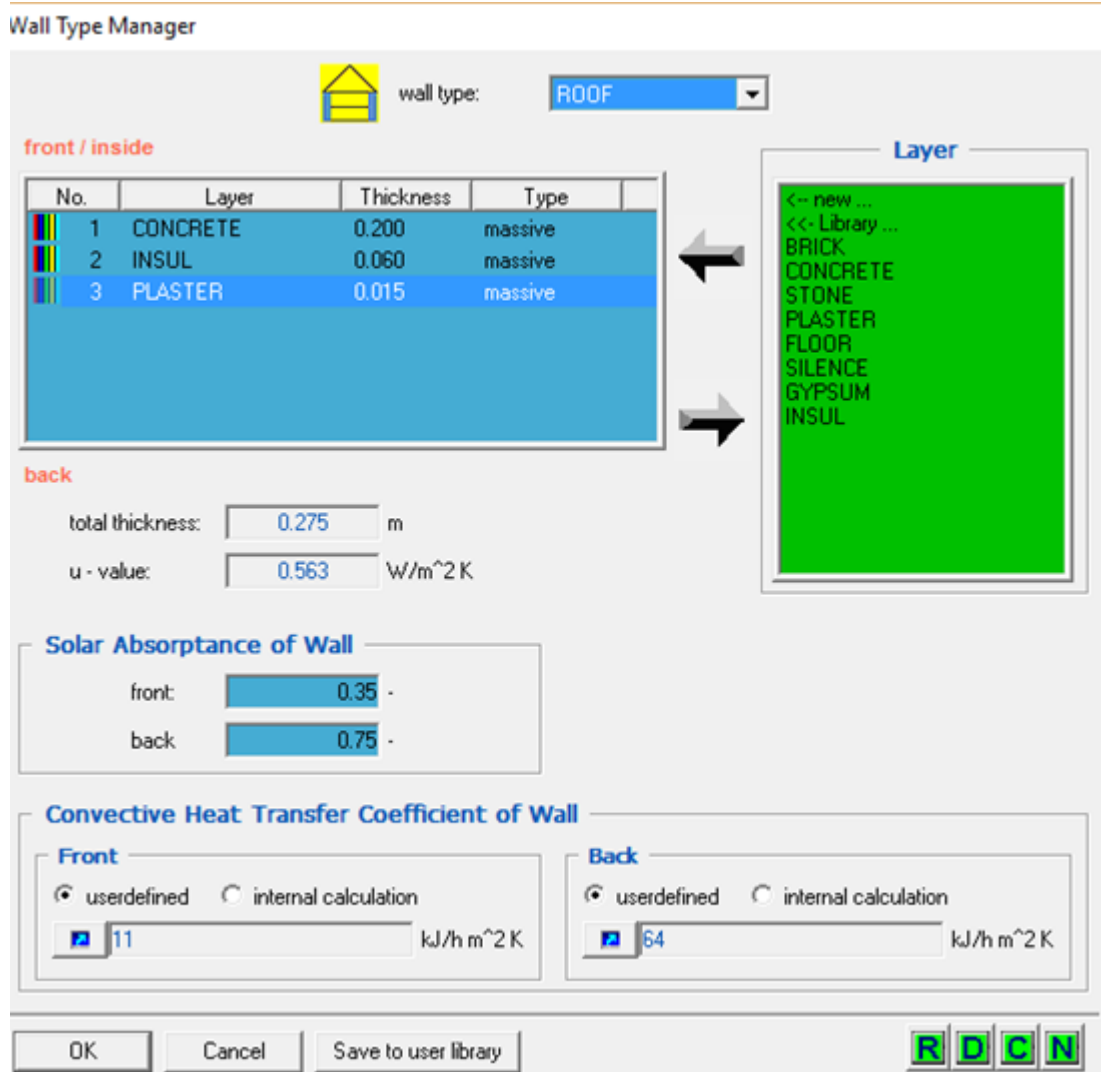


Εικόνα 4.12: Επιλογή υλικών εξωτερικών τοίχων κτιρίου

## Οροφή

Η οροφή του κτιρίου μας, θα αποτελείται από 3 διαφορετικά στρώματα υλικών τα οποία αναφέρονται παρακάτω, ενώ θα έχει συνολικό πάχος 27.5 cm. Η τιμή του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας θα είναι  $0.563 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

- ❖ Οπλισμένο Σκυρόδεμα: 200mm
- ❖ Μόνωση: 60mm
- ❖ Σοβάς: 15mm



Εικόνα 4.13: Επιλογή υλικών οροφής

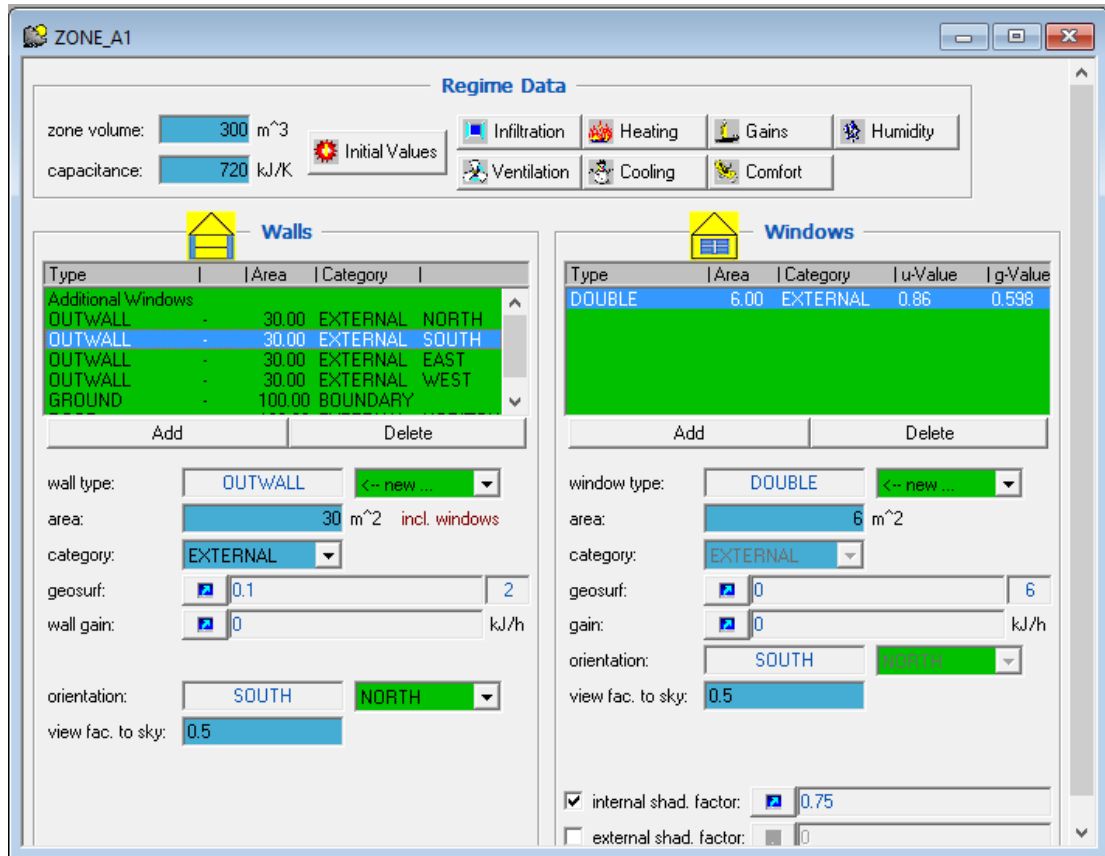
### Υαλοπίνακες κτιρίου

Τα ανοίγματα που θα έχει το κτίριο μας είναι τα ακόλουθα:

- ❖ Βόρεια πλευρά:  $0 \text{ m}^2$
- ❖ Νότια πλευρά:  $6 \text{ m}^2$
- ❖ Ανατολική πλευρά:  $3 \text{ m}^2$
- ❖ Δυτική πλευρά:  $3 \text{ m}^2$

Για να εισάγουμε αυτές τις τιμές, επιλέγουμε το εικονίδιο ZONE\_A1 και εργαζόμαστε στη δεξιά στήλη Windows. Επίσης ορίζουμε την τιμή του εσωτερικού συντελεστή σκίασης 0.75 και το συντελεστή θέασης στον ουρανό 0.5. Τέλος, και οι 3 υαλοπίνακες επιλέξαμε να είναι διπλοί, με την επιλογή DOUBLE.





Εικόνα 4.14: Επεξεργασία υαλοπινάκων

### Αερισμός του χώρου

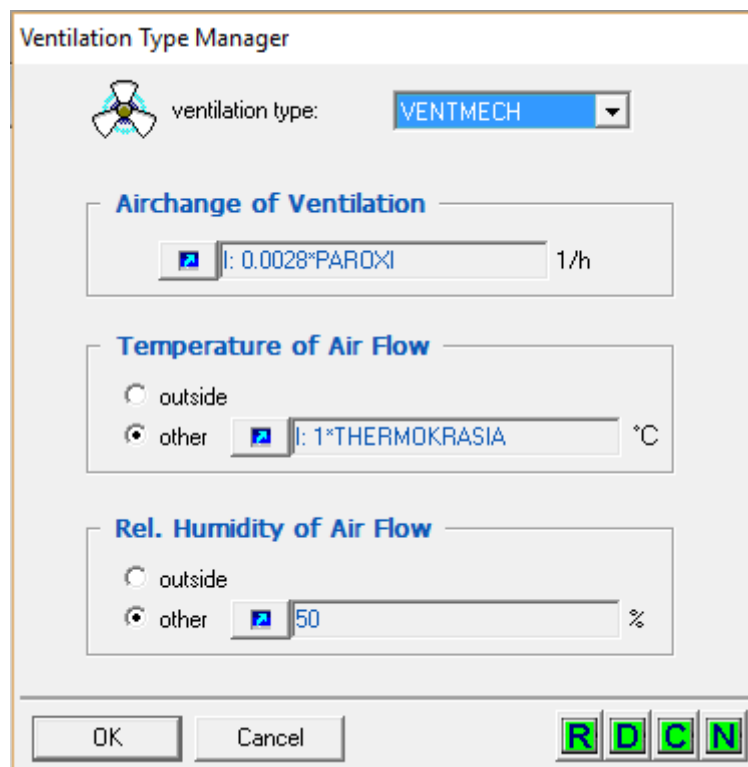
Επόμενο στάδιο της μελέτης μας, είναι η ρύθμιση του αερισμού του χώρου. Για το σκοπό αυτό, θα χρησιμοποιηθεί το εικονίδιο Ventilation type manager. Οι παράμετροι που πρέπει να οριστούν εδώ για να τεθεί σε λειτουργία το σύστημα αερισμού, είναι ο αριθμός των εναλλαγών αέρα, την παροχή του αέρα και τη σχετική υγρασία του. Για τις εναλλαγές του αέρα θα χρησιμοποιηθεί η μεταβλητή PAROXI που ορίσθηκε προηγουμένως ως εξής:

$$\frac{\text{εναλλαγές}}{\text{hr}} = \frac{\dot{V} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \right]}{V[\text{m}^3]} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{\dot{m}}{\rho V} = \frac{\dot{m}}{1.18 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \times 300[\text{m}^3]} = 0.0028 \times \dot{m}$$

Όπου η τιμή 1.18 kg/m<sup>3</sup> αναφέρεται στην πυκνότητα του αέρα, ενώ η τιμή 300 m<sup>3</sup> αναφέρεται στον όγκο του κτιρίου μας.

Η μεταβλητή  $\dot{m}$  προφανώς αναφέρεται στην παροχή του αέρα της αντλίας θερμότητας και θα αντικατασταθεί από τη μεταβλητή PAROXI που θα συνδέεται σαν είσοδος στο κτίριο. Επομένως στο παράθυρο Airchange of Ventilation θα ορίσουμε τη συνάρτηση  $0.0028 \times PAROXI$ .

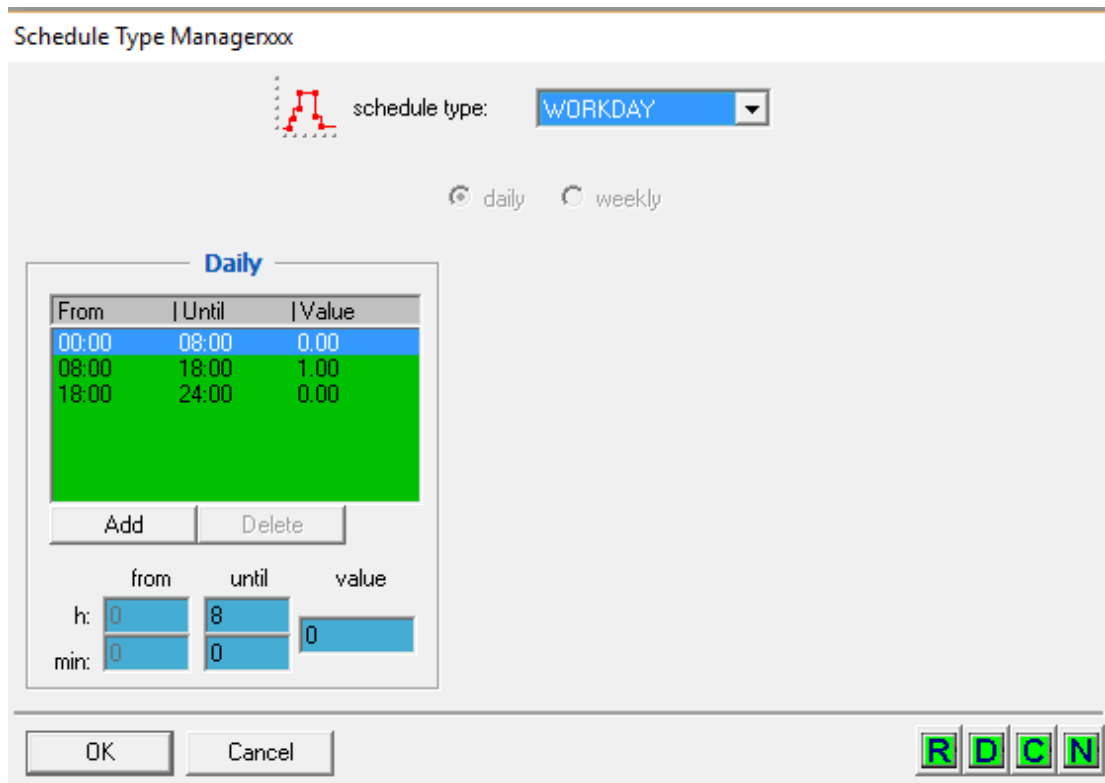
Στη συνέχεια, η θερμοκρασία θα είναι ίση με τη μεταβλητή THERMOKRASIA η οποία αναφέρεται στην θερμοκρασία του αέρα της αντλίας θερμότητας, άρα στο παράθυρο Temperature of Air Flow ορίζεται η συνάρτηση  $1 \times THERMOKRASIA$ , ενώ για τη σχετική υγρασία, στο παράθυρο Relative Humidity of Air Flow, επιλέγεται μια τυπική τιμή της τάξεως του 50%.



Εικόνα 4.15: Επεξεργασία αερισμού κτιρίου

### **Ωράριο Λειτουργίας Κτιρίου**

Για να ρυθμίσουμε το ωράριο λειτουργίας του κτιρίου μας, χρησιμοποιούμε το εικονίδιο Schedule type manager. Επειδή, το κτίριο μας αναφέρεται σε γραφεία τυπικής επιχείρησης, ορίζουμε το ωράριο από τις 08.00 το πρωί μέχρι τις 18.00 το απόγευμα, δηλαδή 10 ώρες.



Εικόνα 4.16: Επεξεργασία ωραρίου λειτουργίας κτιρίου

### Εσωτερικά φορτία κτιρίου

Τελευταίο βήμα πριν την ολοκλήρωση της επεξεργασίας του κτιρίου, είναι ο καθορισμός των εσωτερικών φορτίων που προκύπτουν από την κίνηση των εργαζομένων στο χώρο, από τις ηλεκτρονικές συσκευές που χρησιμοποιούν και από το φωτισμό του χώρου. Συγκεκριμένα, στα γραφεία της επιχείρησης θα εργάζονται 8 εργαζόμενοι με το βαθμό δραστηριότητάς τους να είναι Seated, very light writing κατά ISO 7730, δηλαδή σε καθιστή θέση. Ακόμη, ο καθένας από αυτούς θα διαθέτει τον προσωπικό του υπολογιστή με έγχρωμη οθόνη ισχύος 230 W, ενώ τα φώτα θα λειτουργούν καθ' όλη τη διάρκεια του 10ωρου με 1000W συνολική ισχύ. Όσον αφορά τα επιπρόσθετα φορτία (other gains) δεν επιλέξαμε κάτι.

Gains [ Zone: ZONE\_A1 ]

**Persons**

off  on

ISO 7730  VDI 2078
 

Table
Seated, very light writing

degree of activity

scale:

**Computer**

off  on

computer type: 
 scale:

**Artificial Lighting**

off  on

related floor area:  m<sup>2</sup>

total heat gain: 
 control strategy:

convective part: 
 scale:

**Other Gains**

Type	Scale	Geo Position

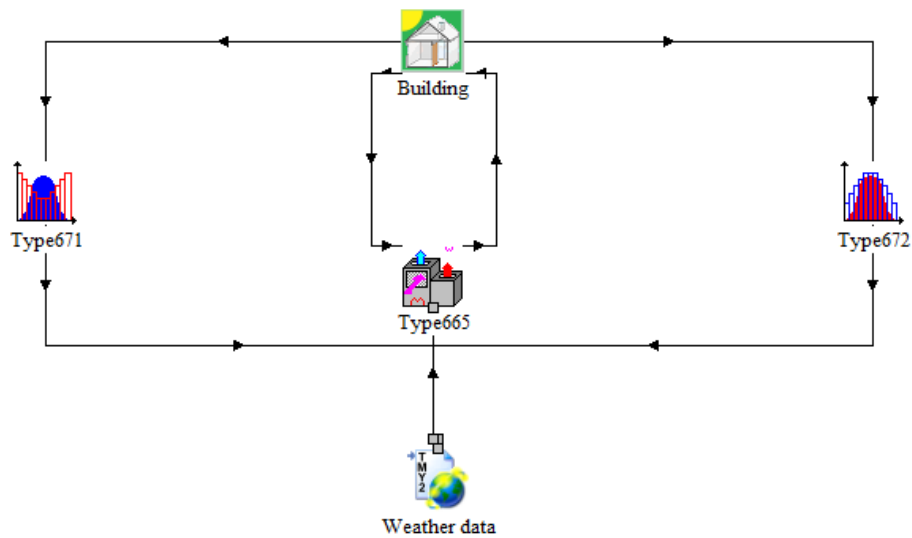
Εικόνα 4.17: Επεξεργασία ατόμων, Η/Υ, φωτισμού κτιρίου

Μετά την περάτωση και αυτού του βήματος, ολοκληρώθηκε η επεξεργασία του κτιρίου μας. Αποθηκεύουμε τις ρυθμίσεις που πραγματοποιήσαμε, κλείνουμε το περιβάλλον TRNBuild και επιστρέφουμε στο Simulation Studio για να ασχοληθούμε με τις συνδέσεις των διαφόρων εξαρτημάτων που συνθέτουν την εγκατάσταση μας.

### 4.3 Ανάλυση της συνδεσμολογίας των στοιχείων της βασικής εγκατάστασης

#### Σύστημα Θέρμανσης-Ψύξης της εγκατάστασης

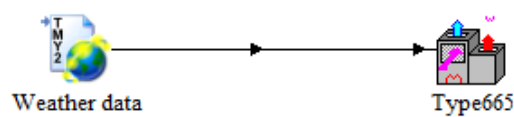
Για τη θέρμανση και την ψύξη του κτιρίου μας, θα χρησιμοποιήσουμε αντλία θερμότητας αέρα-αέρα. Επίσης θα χρησιμοποιηθούν δυο θερμοστάτες, ο ένας για το σύστημα ψύξης και ο άλλος για το σύστημα θέρμανσης.



Εικόνα 4.18: Σύστημα Θέρμανσης-Ψύξης

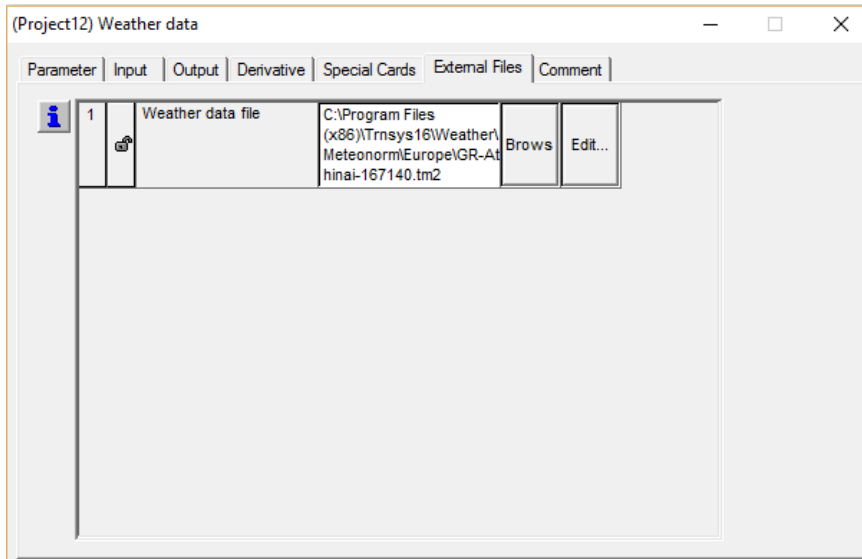
Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι συνδέσεις των επιμέρους στοιχείων μεταξύ τους.

- Σύνδεση μετεωρολογικών δεδομένων – αντλίας θερμότητας



Εικόνα 4.19: Σύνδεση Weather data – Heat Pump

Αρχικά, στα External Files του εικονιδίου Weather Data, επιλέγουμε τα μετεωρολογικά δεδομένα για την πόλη της Αθήνας.



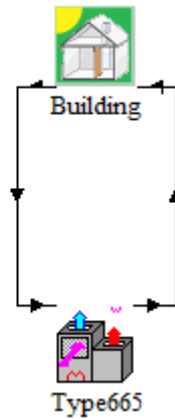
Εικόνα 4.20: Επιλογή μετεωρολογικών δεδομένων

Η αντλία θερμότητας πρέπει να παίρνει ως είσοδο τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος, οπότε πραγματοποιώ την ανάλογη σύνδεση στο Connections:



Εικόνα 4.21: Συνδεσμολογία Weather data – Heat Pump

- Σύνδεση κτιρίου – αντλίας θερμότητας

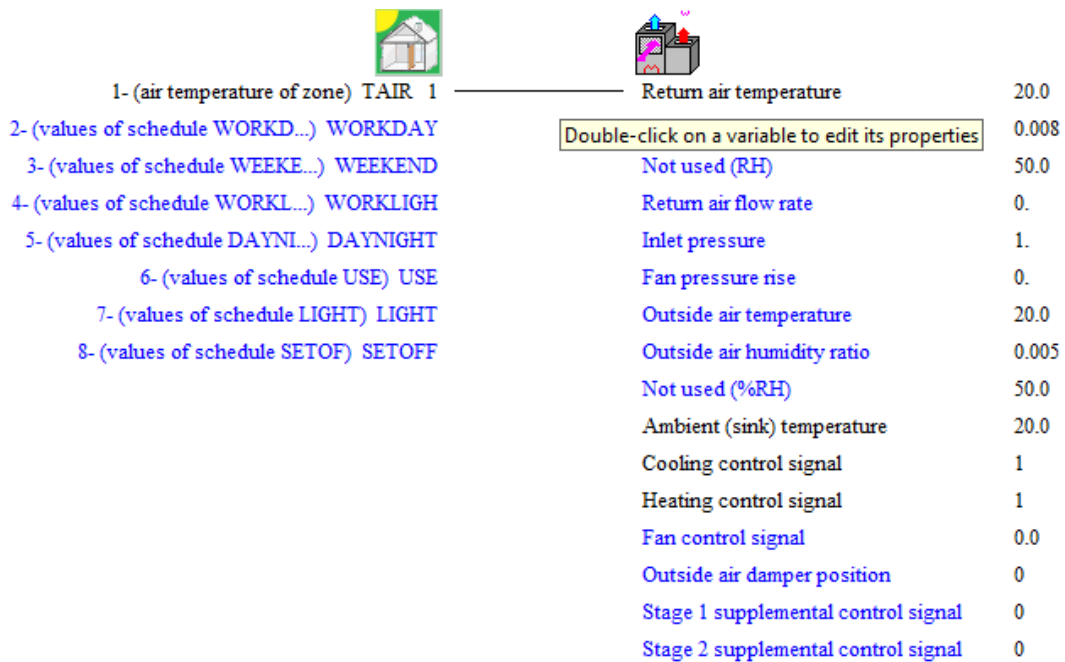


Εικόνα 4.22: Σύνδεση Building – Heat Pump

Η σύνδεση αυτή είναι αμφίδρομη. Η αντλία θερμότητας στέλνει αέρα συγκεκριμένης θερμοκρασίας και παροχής στο κτίριο, ενώ το κτίριο στέλνει ως δεδομένο στην αντλία την εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου. Οι συνδέσεις φαίνονται παρακάτω:

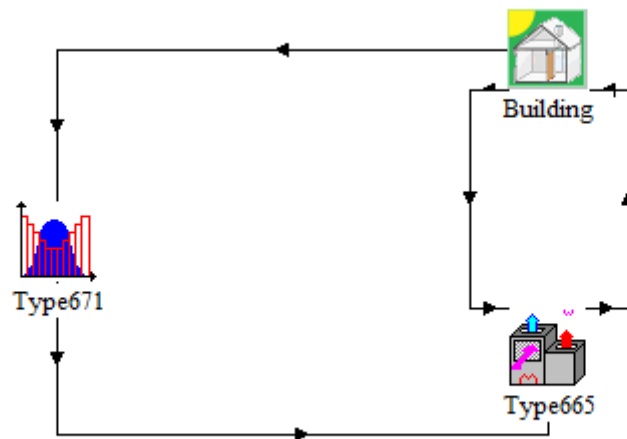
Outlet air temperature	1- TAMB (AMBIENT TEMPERATURE)	0
Outlet air humidity ratio	2- ARELHUM (RELATIVE AMBIENT HUMIDITY)	0
Outlet air %RH	3- TSKY (FIKTIVE SKY TEMPERATURE)	0
Outlet air flow rate	4- ITNORTH (INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION NORTH)	0
Outlet air pressure	5- ITSOUTH (INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION SOUTH)	0
Total cooling rate	6- ITEAST (INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION EAST)	0
Sensible cooling rate	7- ITWEST (INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION WEST)	0
Latent cooling rate	8- ITHORIZONT (INCIDENT RADIATION FOR ORIENTATION HORIZONT)	0
Total heating rate	9- IBNORTH (INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION NORTH)	0
Heat rejection rate	10- IBSOUTH (INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION SOUTH)	0
Heat absorption rate	11- IBEAST (INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION EAST)	0
Auxiliary heating rate	12- IBWEST (INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION WEST)	0
Heat pump power	13- IBHORIZONT (INCIDENT BEAM RADIATION FOR ORIENTATION HORIZONT)	0
C.O.P.	14- AINORTH (ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION NORTH)	0
EER	15- AISOUTH (ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION SOUTH)	0
Indoor fan power	16- AIEAST (ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION EAST)	0
Outdoor fan power	17- AIWEST (ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION WEST)	0
Compressor power	18- AIHORIZONT (ANGLE OF INCIDENCE FOR ORIENTATION HORIZONT)	0
Total energy input	19- CONT_NAT_1 (INPUT)	0
Condensate temperature	20- T_COOL_ON (INPUT)	0
Condensate flow rate	21- S_NORTH (INPUT)	0
	22- S_SOUTH (INPUT)	0
	23- S_EAST (INPUT)	0
	24- S_WEST (INPUT)	0
	25- BRIGHT (INPUT)	0
	26- PAROXI (INPUT)	0
	27- THERMOKRAS (INPUT)	0

Εικόνα 4.23: Συνδεσμολογία Heat Pump - Building



Εικόνα 4.24: Συνδεσμολογία Building – Heat Pump

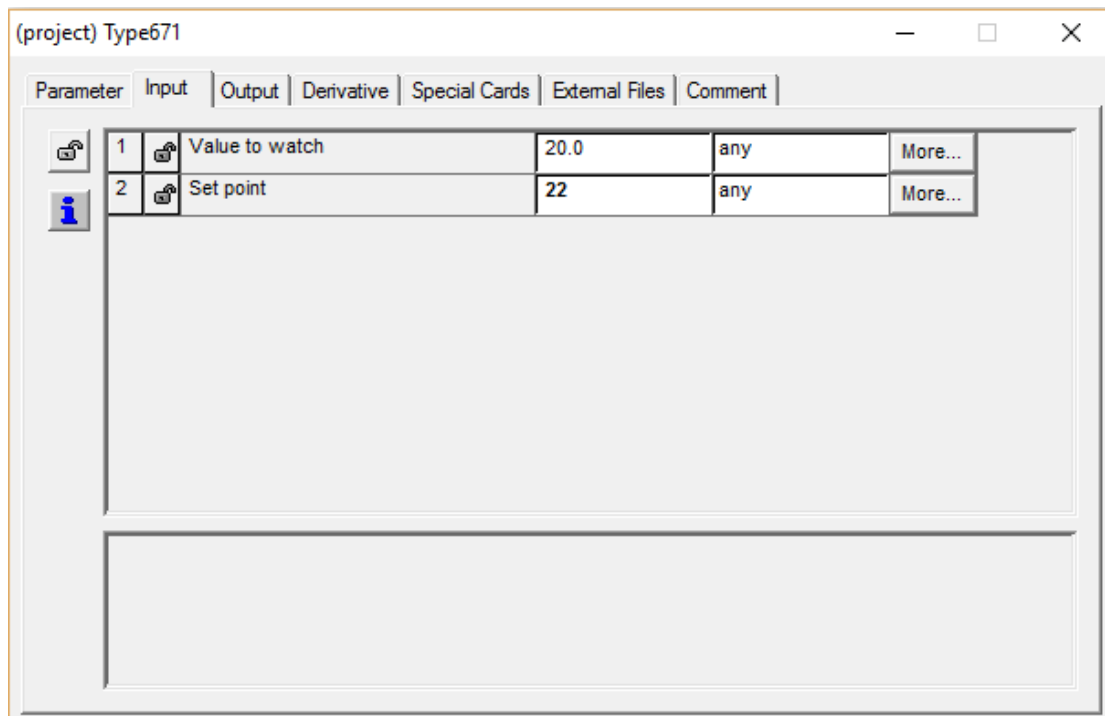
- Σύνδεση θερμοστάτη θέρμανσης – κτιρίου – αντλίας θερμότητας



Εικόνα 4.25: Σύνδεση θερμοστάτη θέρμανσης - Building

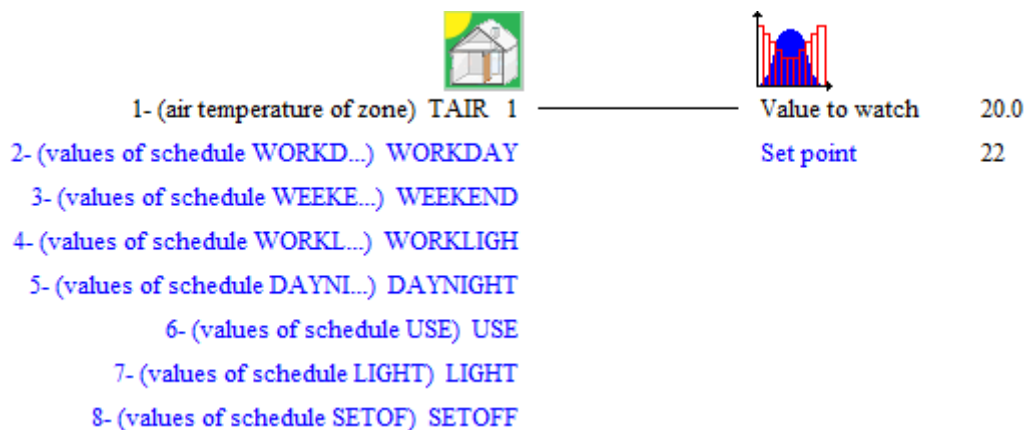
Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται η σύνδεση του θερμοστάτη θέρμανσης στο σύστημα. Ρόλος του στοιχείου Type671 είναι να ορίζει από ποια θερμοκρασία και κάτω θα ενεργοποιείται το σύστημα θέρμανσης του κτιρίου, δηλαδή η αντλία θερμότητας. Ορίσαμε τη θερμοκρασία αυτή (set point) στους 22°C .





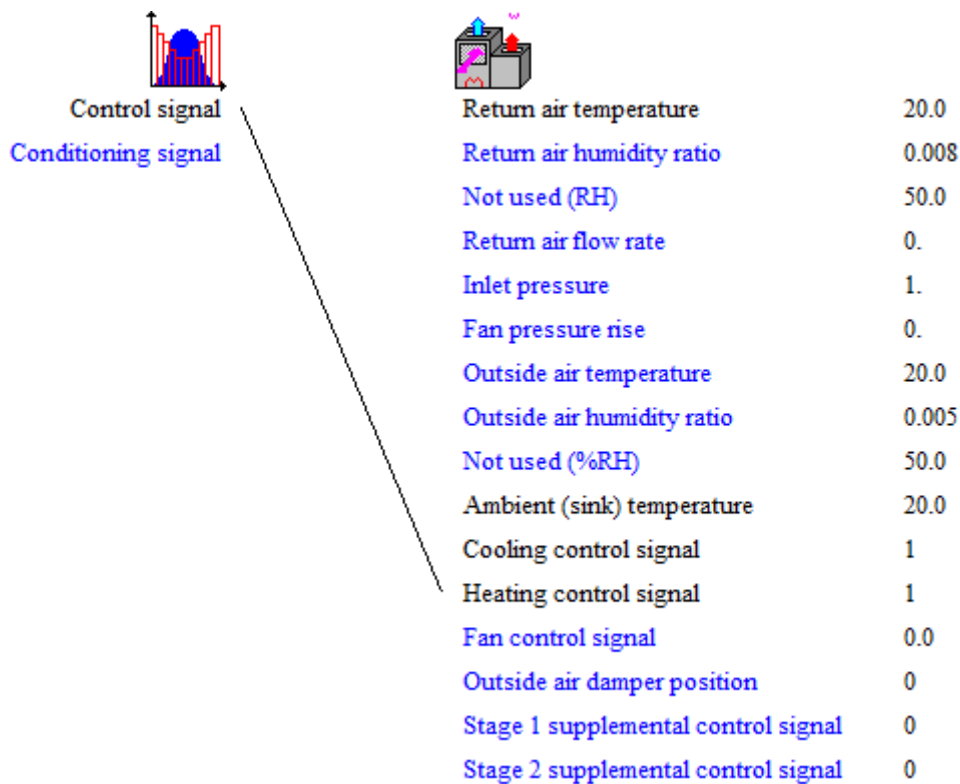
Εικόνα 4.26: Ρύθμιση παραμέτρων θερμοστάτη θέρμανσης

Στη συνέχεια συνδέουμε το θερμοστάτη με το κτίριο, ώστε να παρακολουθεί συνεχώς τη θερμοκρασία που επικρατεί στο εσωτερικό.



Εικόνα 4.27: Συνδεσμολογία Building – θερμοστάτη θέρμανσης

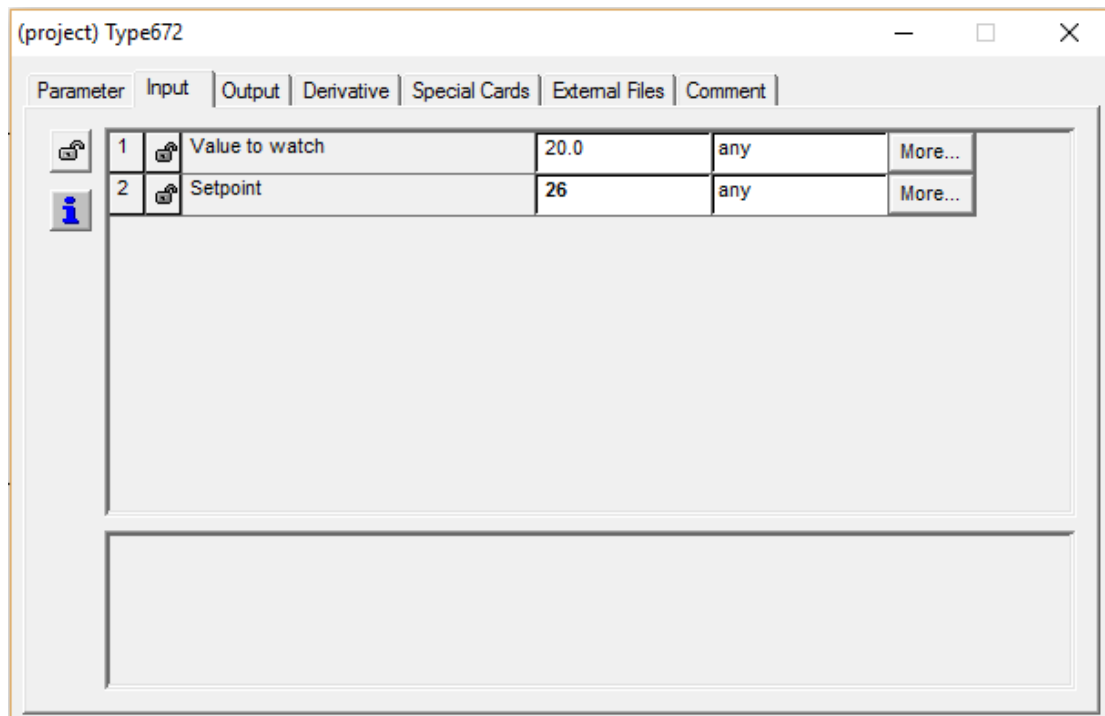
Ύστερα συνδέουμε το θερμοστάτη με την αντλία, ώστε να στέλνει σήμα για την ενεργοποίηση της θέρμανσης όταν αυτό κριθεί απαραίτητο.



Εικόνα 4.28: Συνδεσμολογία θερμοστάτη θέρμανσης – Heat Pump

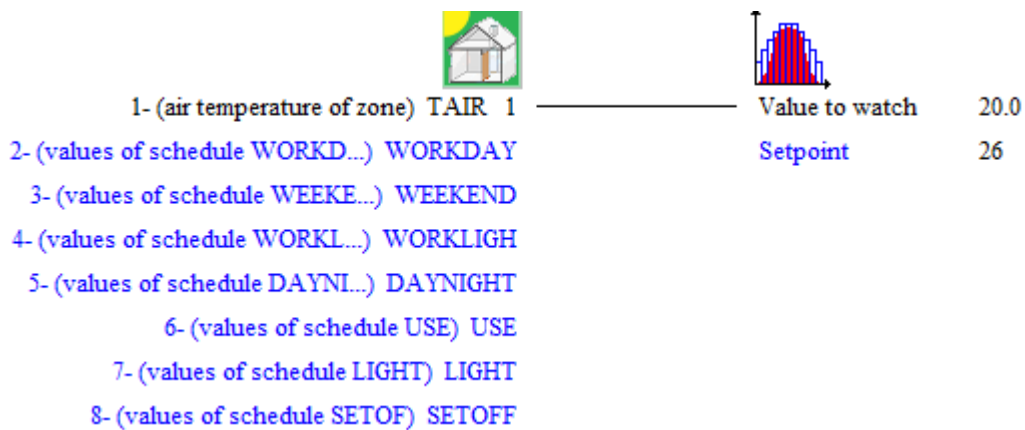
- Σύνδεση θερμοστάτη ψύξης – κτιρίου – αντλίας θερμότητας

Καθώς η αντλία θερμότητας θα λειτουργεί και για ψύξη εκτός από θέρμανση, πρέπει να συνδεθεί και θερμοστάτης ψύξης, ο οποίος θα ορίσει από ποια θερμοκρασία και πάνω θα τίθεται σε λειτουργία η αντλία θερμότητας για να ψύξει το χώρο. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί το στοιχείο Type672. Το set point του ορίσθηκε στους 26°C .



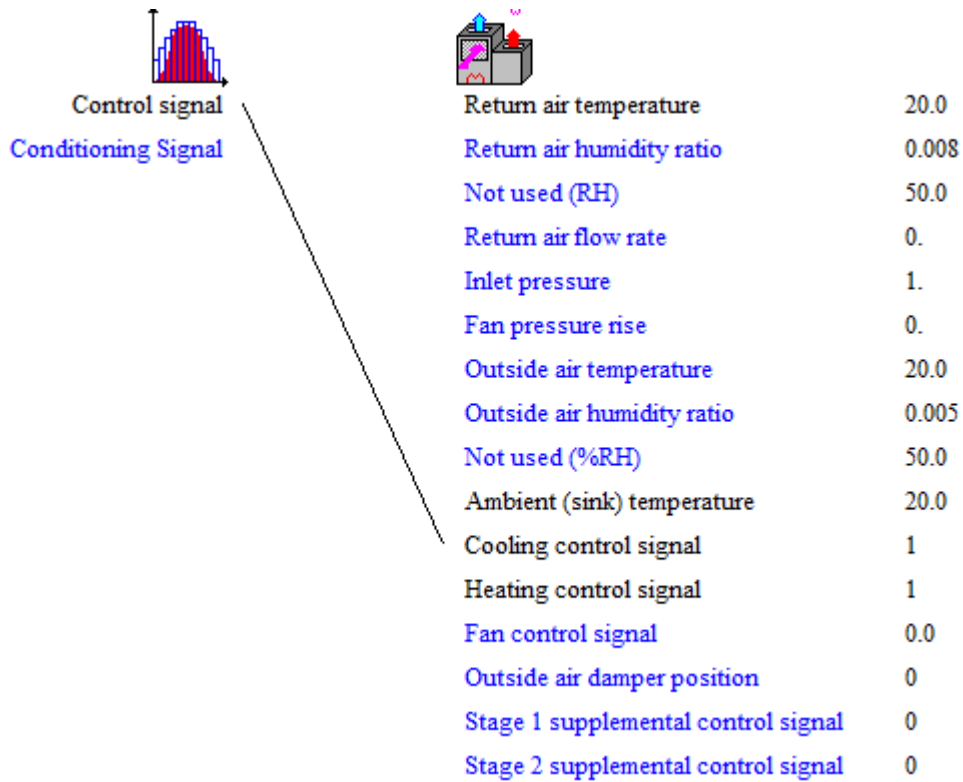
Εικόνα 4.29: Ρύθμιση παραμέτρων θερμοστάτη ψύξης

Στη συνέχεια συνδέουμε το θερμοστάτη με το κτίριο, ώστε να παρακολουθεί συνεχώς τη θερμοκρασία που επικρατεί στο εσωτερικό.



Εικόνα 4.30: Συνδεσμολογία Building – θερμοστάτη ψύξης

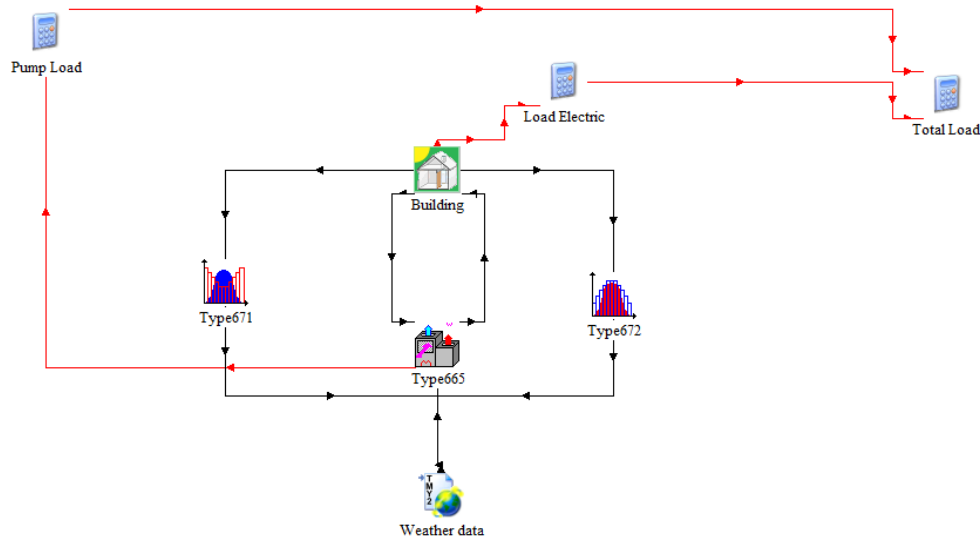
Έπειτα, συνδέουμε το θερμοστάτη με την αντλία, ώστε να στέλνει σήμα για την ενεργοποίηση της ψύξης όταν αυτό κριθεί απαραίτητο.



Εικόνα 4.35: Συνδεσμολογία θερμοστάτη ψύξης – Heat pump

## Σύστημα ηλεκτρικών καταναλώσεων

Ακολούθως, θα γίνει περιγραφή της συνδεσμολογίας των ηλεκτρικών καταναλώσεων του κτιρίου. Σε αυτές περιλαμβάνονται, η ηλεκτρική κατανάλωση της αντλίας θερμότητας, ο φωτισμός του κτιρίου, καθώς επίσης και όλες οι ηλεκτρικές συσκευές που χρησιμοποιεί. Το σύστημα των ηλεκτρικών καταναλώσεων παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα, προκειμένου να ξεχωρίζει από το σύστημα θέρμανσης – ψύξης που απεικονίζεται με μαύρο.



Εικόνα 4.36: Σύστημα ηλεκτρικών καταναλώσεων

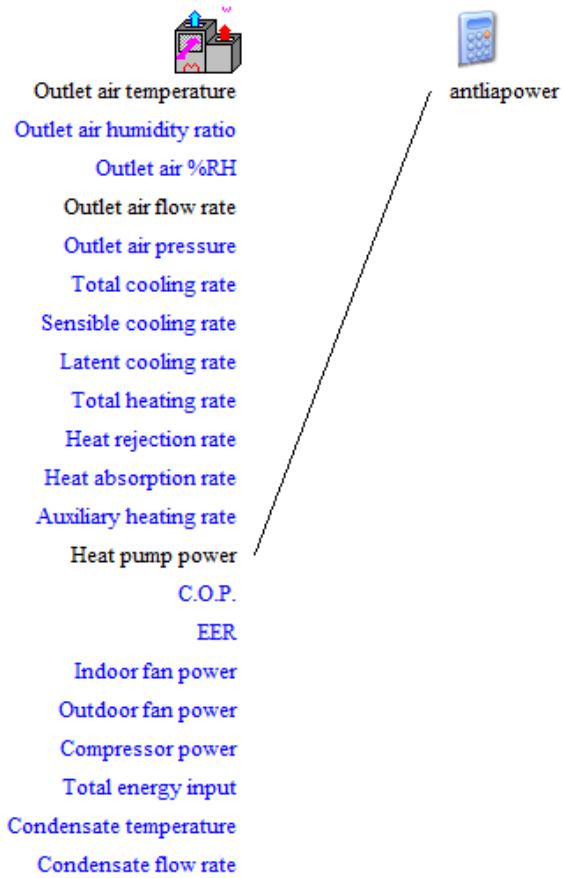
- Σύνδεση αντλίας θερμότητας – Calculator Pump Load

Η αντλία θερμότητας στέλνει ως έξοδο την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνει κατά τη λειτουργία της. Σκοπός αυτής της σύνδεσης είναι η μετατροπή μονάδων της ισχύος, από  $kJ/h$  σε  $kW$ , καθώς όλα τα φορτία θα υπολογιστούν σε  $kW$ .



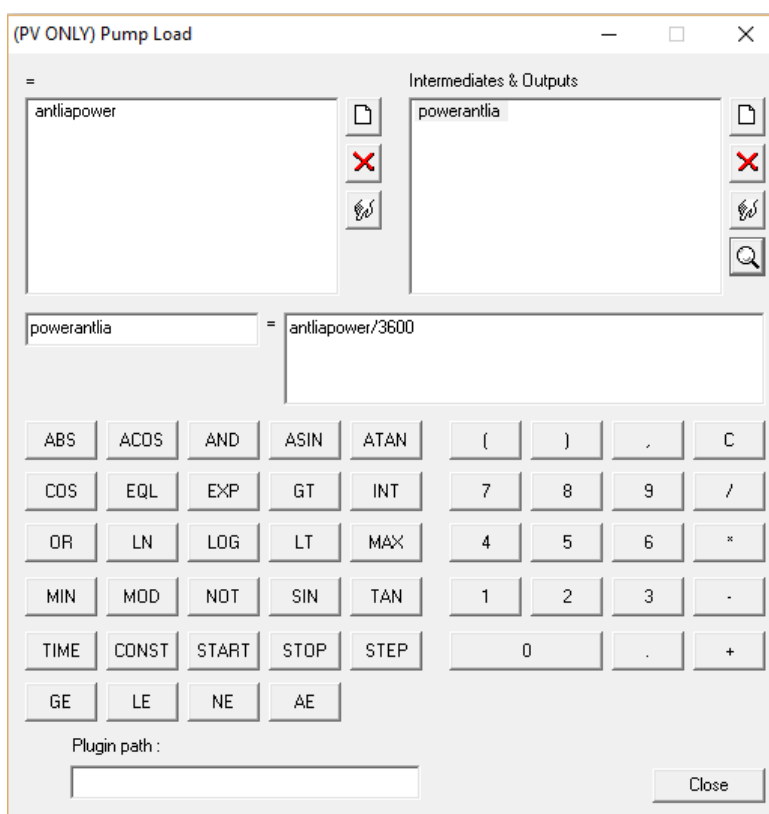
Εικόνα 4.37: Σύνδεση Heat pump – Calculator Pump Load

Στις συνδέσεις (Connections) συνδέεται η έξοδος Heat Pump Power, της αντλίας θερμότητας, με τη μεταβλητή antiapower που ορίζεται σαν input στο Calculator.



Εικόνα 4.38: Συνδεσμολογία Heat pump – Calculator antiapower

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του Calculator, μετατρέπονται τα  $kJ/h$  σε  $kW$ .



Εικόνα 4.39: Calculator Pump Load

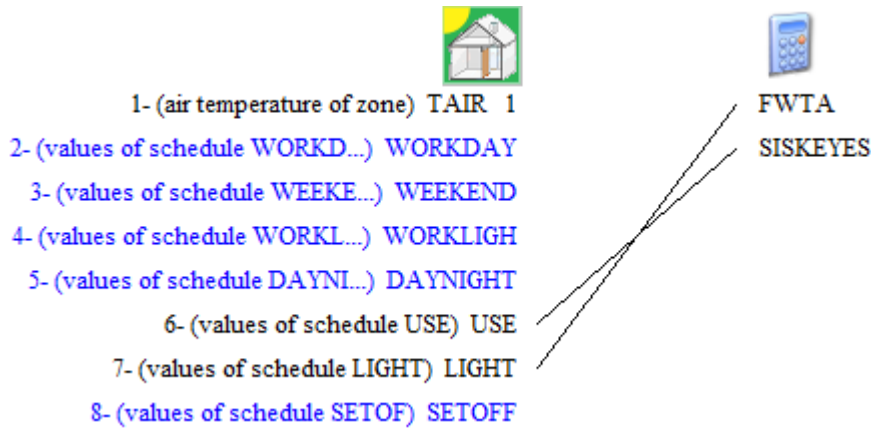
- Σύνδεση ηλεκτρικών καταναλώσεων κτιρίου – Calculator Load Electric



Εικόνα 4.40: Σύνδεση Building – Load Electric

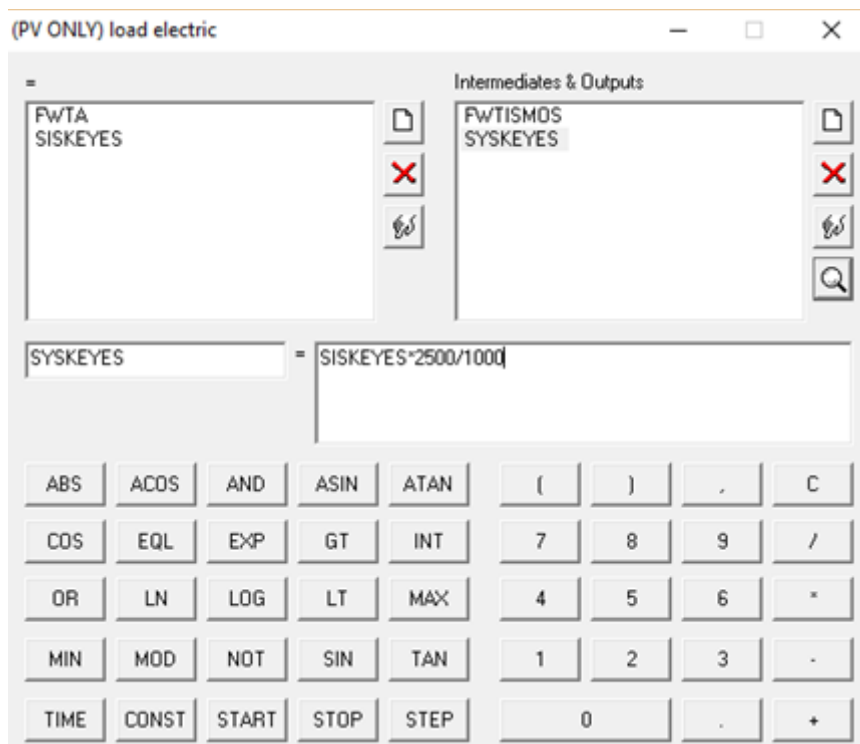
Το εσωτερικό του κτιρίου, που στεγάζει γραφεία εργαζομένων, φέρει ορισμένα ηλεκτρικά φορτία, τα οποία προκύπτουν από τις ηλεκτρικές συσκευές (ηλεκτρονικοί υπολογιστές, φωτοτυπικά μηχανήματα κ.α.) και φυσικά από το φωτισμό του χώρου. Τα παραπάνω ηλεκτρικά φορτία, προφανώς υφίστανται κατά τις ώρες λειτουργίας των γραφείων, που όπως έχει προαναφερθεί είναι από τις 08.00 έως τις 18.00. Οι μεταβλητές, που βοηθούν στην προσομοίωση αυτή, είναι οι τύπου schedule μεταβλητές USE και LIGHT. Η πρώτη θα συνδεθεί με τη μεταβλητή SISKEYES που ορίζεται στο input του Calculator και αφορά τις ηλεκτρικές συσκευές του χώρου,

ενώ η δεύτερη θα συνδεθεί με τη μεταβλητή FWTA του Calculator που προφανώς αναφέρεται στο φωτισμό του χώρου.



Εικόνα 4.41: Συνδεσμολογία Building – Calculator Load Electric

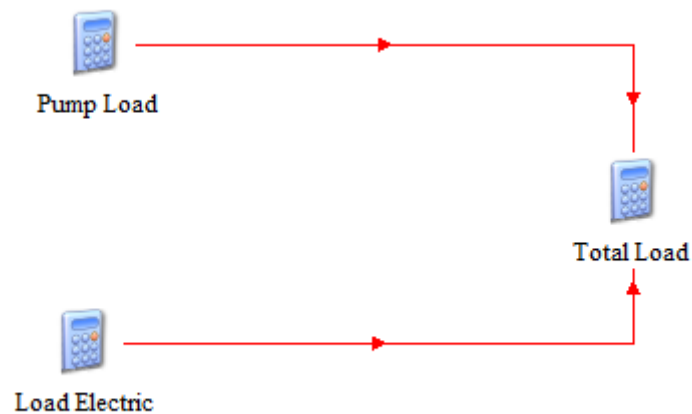
Στη συνέχεια, έπρεπε να γίνει υπολογισμός του φορτίου συσκευών και φωτισμού. Για το φωτισμό, λήφθηκε η τυπική τιμή των  $10 \text{ W/m}^2$ , η οποία αντιστοιχεί σε  $1000\text{W}$ , για τον χώρο  $100\text{m}^2$  που μελετάται. Για τις συσκευές που αντιστοιχούν σε 8 εργαζομένους (8 ηλεκτρονικοί υπολογιστές των  $230\text{W}$  και 2 φωτοτυπικά μηχανήματα των  $330\text{W}$ ), υπολογίσθηκε ηλεκτρικό φορτίο  $2500\text{W}$ . Τέλος, για την μετατροπή σε kW, έγινε διαίρεση με 1000. Οπότε προέκυψαν ως Outputs στο Calculator οι μεταβλητές SYSKEYES και FWTISMOS, οι οποίες εκφράζουν την ηλεκτρική κατανάλωση των συσκευών και του φωτισμού του χώρου σε kW.



Εικόνα 4.42: Calculator Load Electric

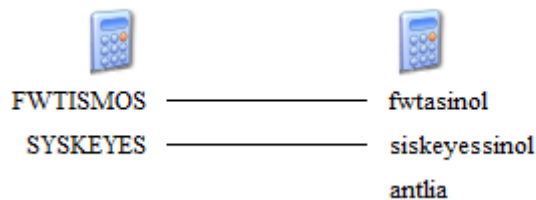


- Σύνδεση Load Electric και Pump Load με το Total Load



Εικόνα 4.43: Σύνδεση-άθροιση Pump Load και Load Electric με Total Load

Τελευταίο βήμα πριν την ολοκλήρωση της προσομοίωσης του συστήματος ηλεκτρικών καταναλώσεων, είναι η άθροιση όλων των ηλεκτρικών καταναλώσεων της εγκατάστασης, σε ένα συνολικό ηλεκτρικό φορτίο. Έτσι συνδέουμε τα στοιχεία Pump Load και Load Electric με το Total Load.

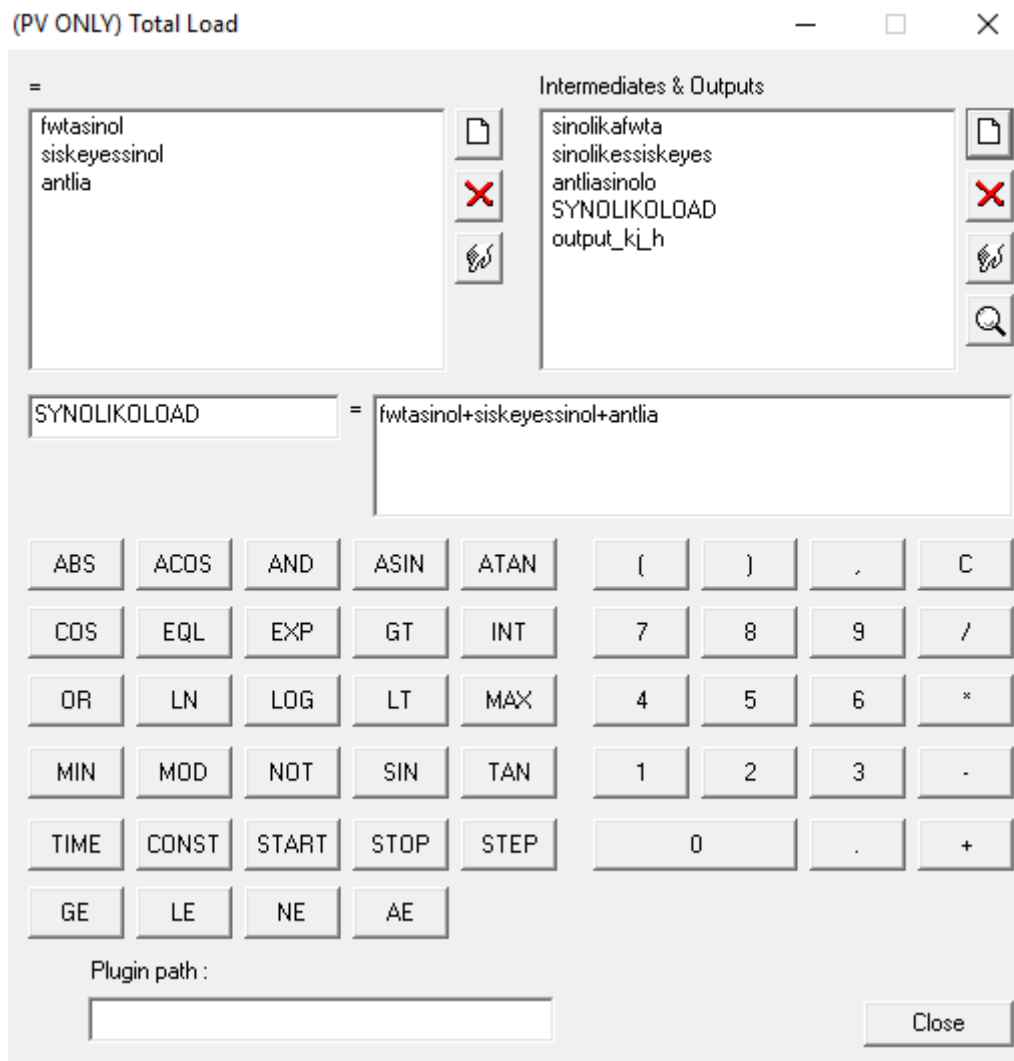


Εικόνα 4.44: Συνδεσμολογία Calculator Load Electric – Total Load



Εικόνα 4.45: Συνδεσμολογία Calculator Pump Load – Total Load

Η άθροιση των ηλεκτρικών καταναλώσεων γίνεται με τη βοήθεια των μεταβλητών `sinolikafwta`, `sinolikessiskeyes` και `antliasinolo` οι οποίες προστίθενται για να προκύψει το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο του κτιρίου το `SYNOLIKOLOAD`.

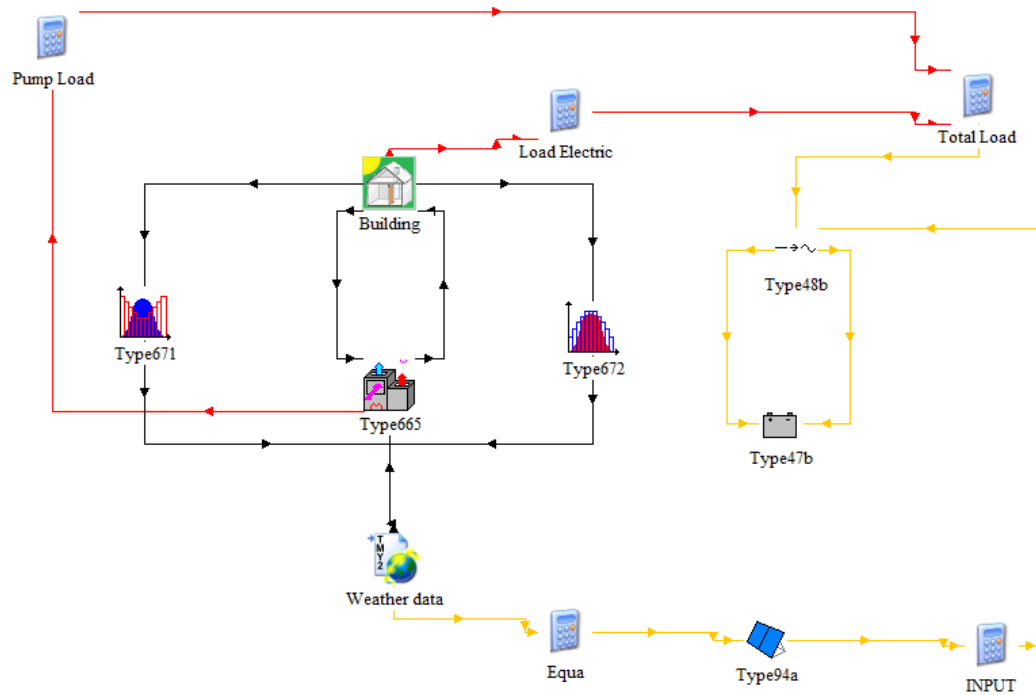


Εικόνα 4.47: Calculator Total Load

Στο σημείο αυτό έχει ολοκληρωθεί, η κατασκευή του συστήματος θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου και έχουν υπολογιστεί και όλες οι ηλεκτρικές του καταναλώσεις. Την ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την λειτουργία του κτιρίου, θα μπορούσε να την παρέχει το δίκτυο ηλεκτροδότησης της χώρας. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου, και αυτό ακριβώς θα πραγματοποιηθεί στην επόμενη ενότητα.

#### 4.4 Περίπτωση 1<sup>η</sup> : Χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου

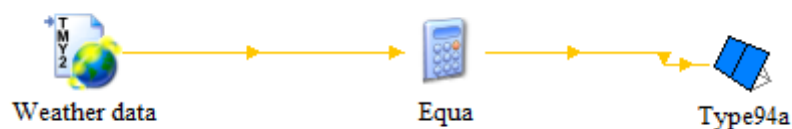
Η πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε, ήταν η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ. Το σύστημα αυτό, που απεικονίζεται με κίτρινο χρώμα, αποτελείται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, το inverter το οποίο είναι απαραίτητο για την μετατροπή του DC ρεύματος που παράγουν τα φωτοβολταϊκά σε AC ρεύμα που θα καταναλώνει το κτίριο και την μπαταρία που χρησιμεύει για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που δεν αξιοποιείται απευθείας από το δίκτυο.



Εικόνα 4.48: Εγκατάσταση 1<sup>ης</sup> περίπτωσης

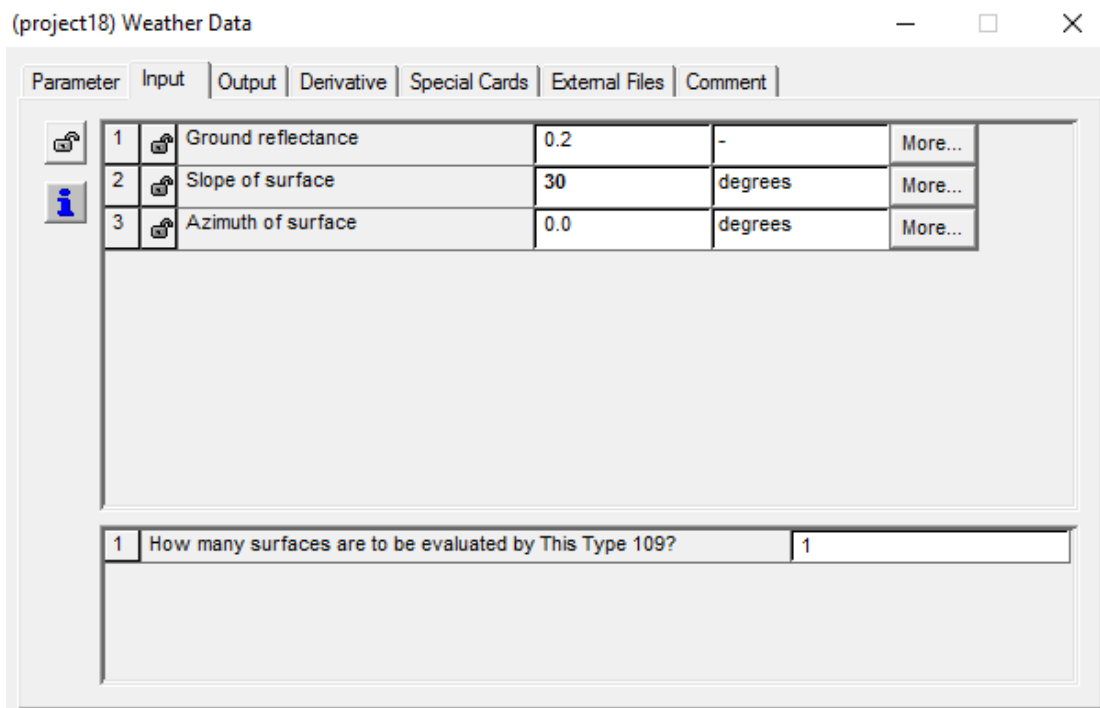
Στη συνέχεια, γίνεται αναλυτική περιγραφή των συνδέσεων των επιμέρους εξαρτημάτων που συνθέτουν την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών.

- Σύνδεση μετεωρολογικών δεδομένων και φωτοβολταϊκών

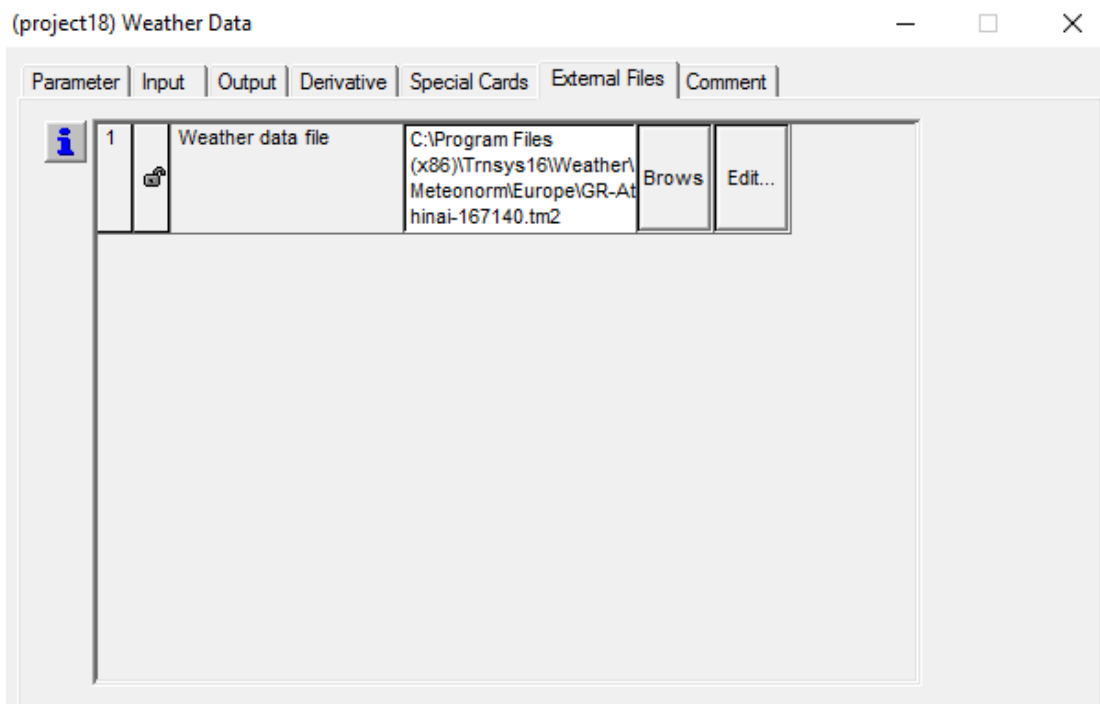


Εικόνα 4.49: Σύνδεση Weather data με Type94a

Αρχικά στο εικονίδιο Weather data, επιλέγουμε στο παράθυρο Input κλίση επιφάνειας 30° για τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Να σημειωθεί ότι έγινε βελτιστοποίηση της κλίσης η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Επίσης στο παράθυρο External Files επιλέγουμε τα μετεωρολογικά δεδομένα των Αθηνών.



Εικόνα 4.50: Ρύθμιση παραμέτρων Weather data



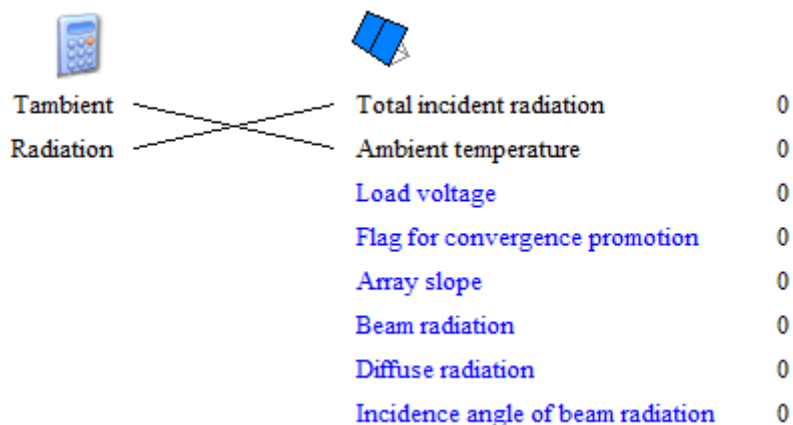
Εικόνα 4.51: Επιλογή μετεωρολογικών δεδομένων Αθήνας

Εισάγουμε επίσης ένα Calculator, έτσι ώστε να μετατρέπει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος από Κελσίου σε Kelvin.



Εικόνα 4.52: Μετατροπή μονάδων σε Calculator Equa

Ακολούθως, φαίνεται η σύνδεση του Calculator με το στοιχείο Type 94a. Ουσιαστικά, για να λειτουργήσουν τα φωτοβολταϊκά, χρειάζονται ως είσοδο την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία.



Εικόνα 4.53: Συνδεσμολογία Calculator Equa – Type94a

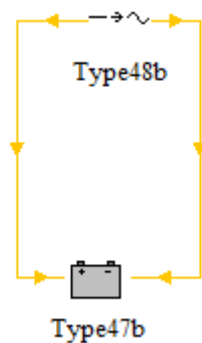
Τέλος γίνεται διαστασιολόγηση των φωτοβολταϊκών και ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας τους. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούμε 10 σειρές και 10 στήλες, δηλαδή συνολικά 100 πάνελ. Το κάθε πάνελ έχει επιφάνεια  $0.89m^2$ .

(project18) Type94a

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
9	☰	☰	☰	☰	☰	☰
Number of cells wired in series	36	-	-	-	-	More...
10	☰	☰	☰	☰	☰	☰
Number of modules in series	10	-	-	-	-	More...
11	☰	☰	☰	☰	☰	☰
Number of modules in parallel	10	-	-	-	-	More...
12	☰	☰	☰	☰	☰	☰
Module temperature at NOCT	313	K	-	-	-	More...
13	☰	☰	☰	☰	☰	☰
Ambient temperature at NOCT	293	K	-	-	-	More...
14	☰	☰	☰	☰	☰	☰
Insolation at NOCT	800	W/m <sup>2</sup>	-	-	-	More...
15	☰	☰	☰	☰	☰	☰
Module area	0.89	m <sup>2</sup>	-	-	-	More...
16	☰	☰	☰	☰	☰	☰
tau-alpha product for normal incidence	0.95	-	-	-	-	More...
17	☰	☰	☰	☰	☰	☰
Semiconductor bandgap	1.12	any	-	-	-	More...

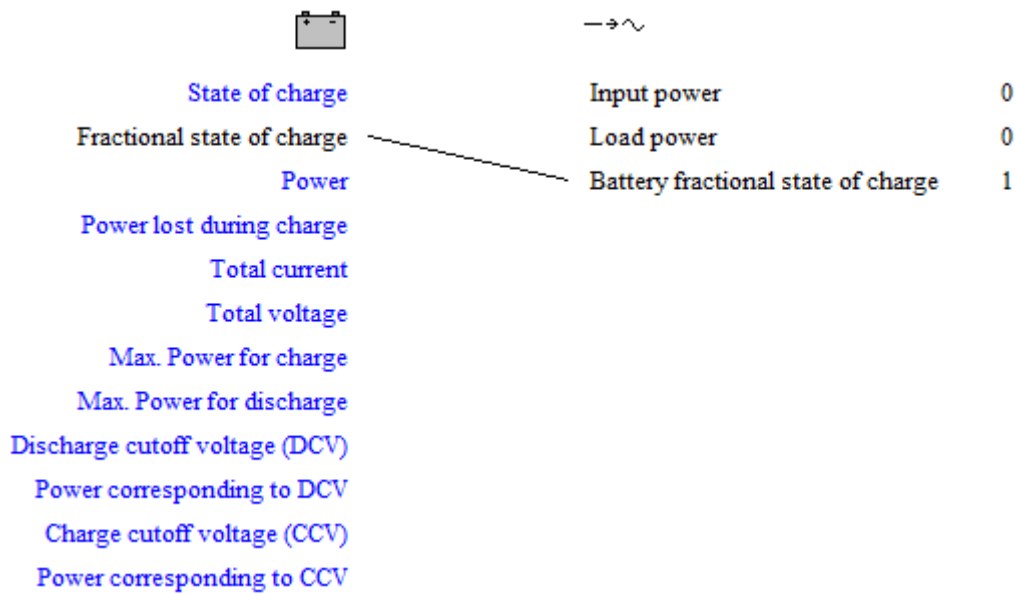
Εικόνα 4.54: Ρύθμιση παραμέτρων φωτοβολταϊκών πάνελ

- Σύνδεση μπαταρίας – inverter

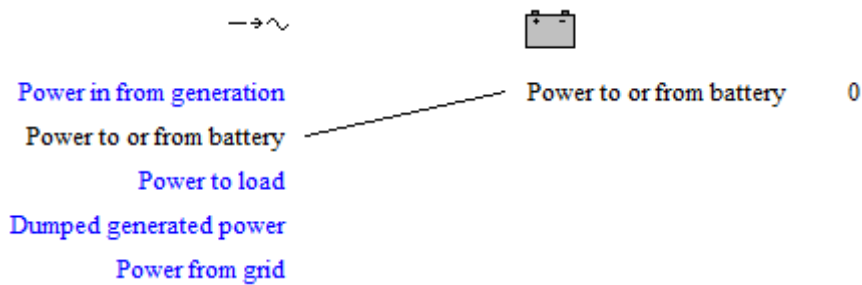


Εικόνα 4.55: Σύνδεση μπαταρίας – inverter

Η συγκεκριμένη είναι μια αμψίδρομη σύνδεση. Η μπαταρία προσομοιώνεται με το στοιχείο Type 47b ενώ το inverter με το στοιχείο Type 48b. Το inverter στέλνει ως δεδομένο στην μπαταρία την ισχύ που προσδίδει ή απορροφά ενώ η μπαταρία ενημερώνει το inverter για το ποσοστό φόρτισης της κάθε χρονική στιγμή.

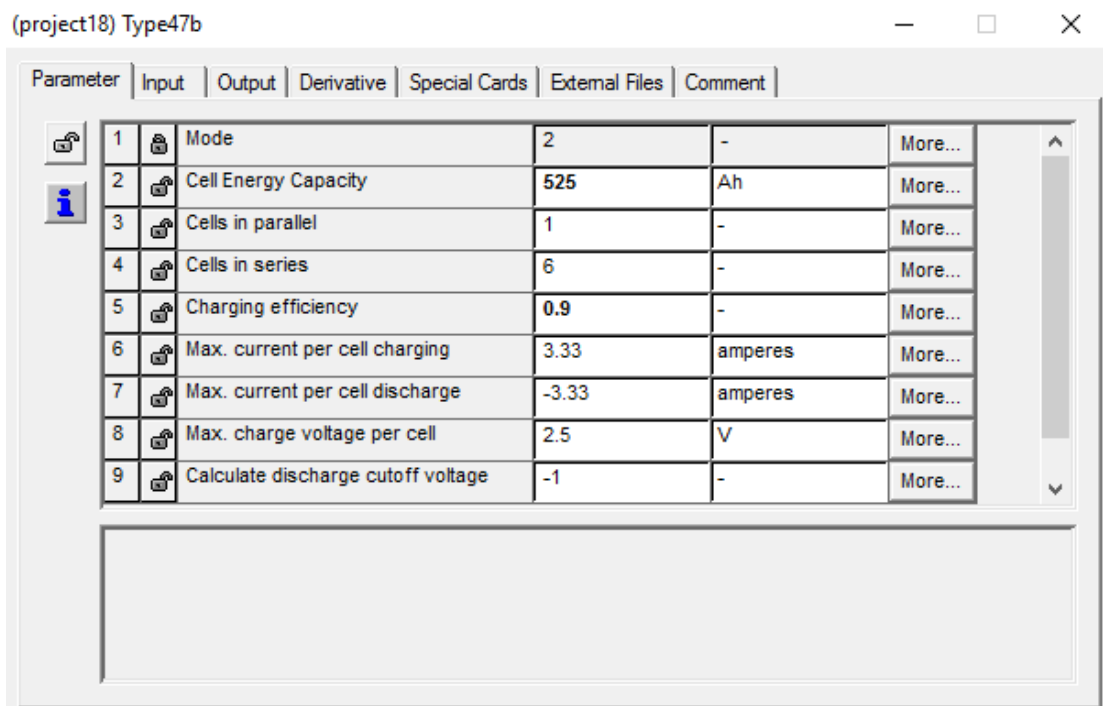


Εικόνα 4.56: Συνδεσμολογία μπαταρίας – inverter

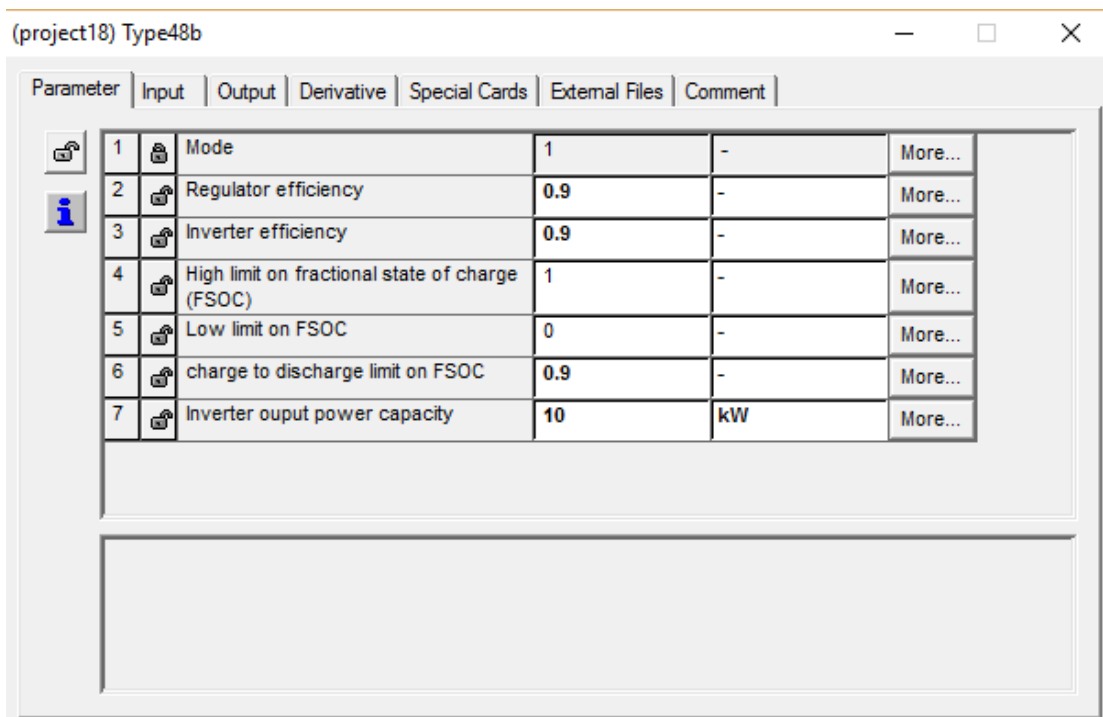


Εικόνα 4.57: Συνδεσμολογία inverter – μπαταρίας

Στη συνέχεια γίνεται ρύθμιση των παραμέτρων της μπαταρίας και του inverter. Οι τιμές που επιλέχθηκαν, προέκυψαν ύστερα από δοκιμές για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος σε παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος αλλά και κόστος. Η χωρητικότητα της μπαταρίας επιλέχθηκε να είναι 550 Ah , με συντελεστή απόδοσης 0.9. Επίσης επιλέχθηκε inverter ισχύος 10 kW.



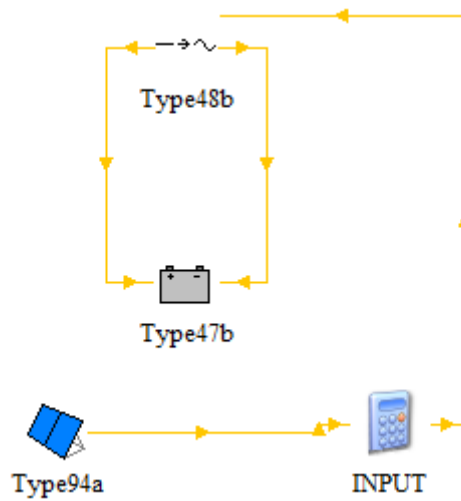
Εικόνα 4.58: Ρύθμιση παραμέτρων μπαταρίας



Εικόνα 4.59: Ρύθμιση παραμέτρων inverter

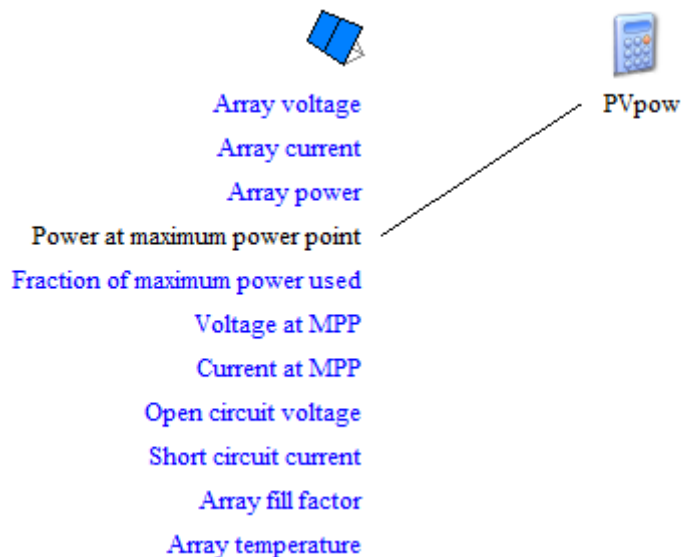


- Σύνδεση φωτοβολταϊκών με το σύστημα μπαταρίας – inverter



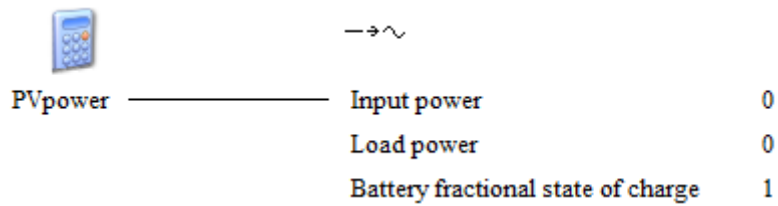
Εικόνα 4.60: Σύνδεση Type 94a – μπαταρίας – inverter

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ πρέπει να στέλνουν την συνολική DC ηλεκτρική ισχύ που παράγουν στο inverter προκειμένου να την μετατρέψει σε AC και να τροφοδοτήσει το κτίριο. Ενδιάμεσα, συνδέουμε ένα Calculator στο οποίο γίνεται μετατροπή μονάδων από Watt σε  $kJ/hr$ .



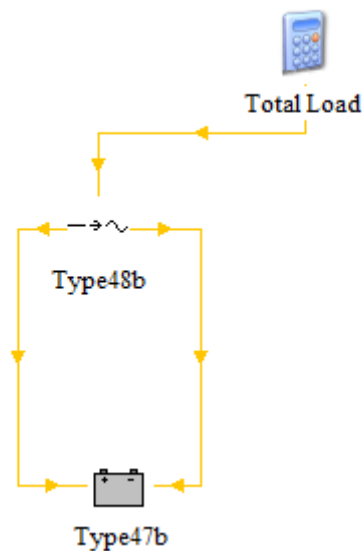
Εικόνα 4.61: Συνδεσμολογία Type 94a – Calculator INPUT

Η έξοδος των φωτοβολταϊκών, η μεταβλητή Power at maximum power point, είναι η ισχύς η οποία στέλνεται σαν είσοδος στο inverter και συνδέεται με τη μεταβλητή input power.



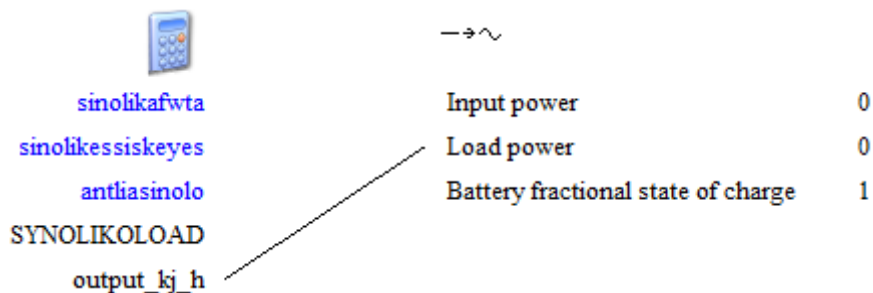
Εικόνα 4.62: Συνδεσμολογία Calculator Input – inverter

- Σύνδεση calculator ηλεκτρικών καταναλώσεων με inverter



Εικόνα 4.63: Σύνδεση Calculator Total Load – μπαταρίας – inverter

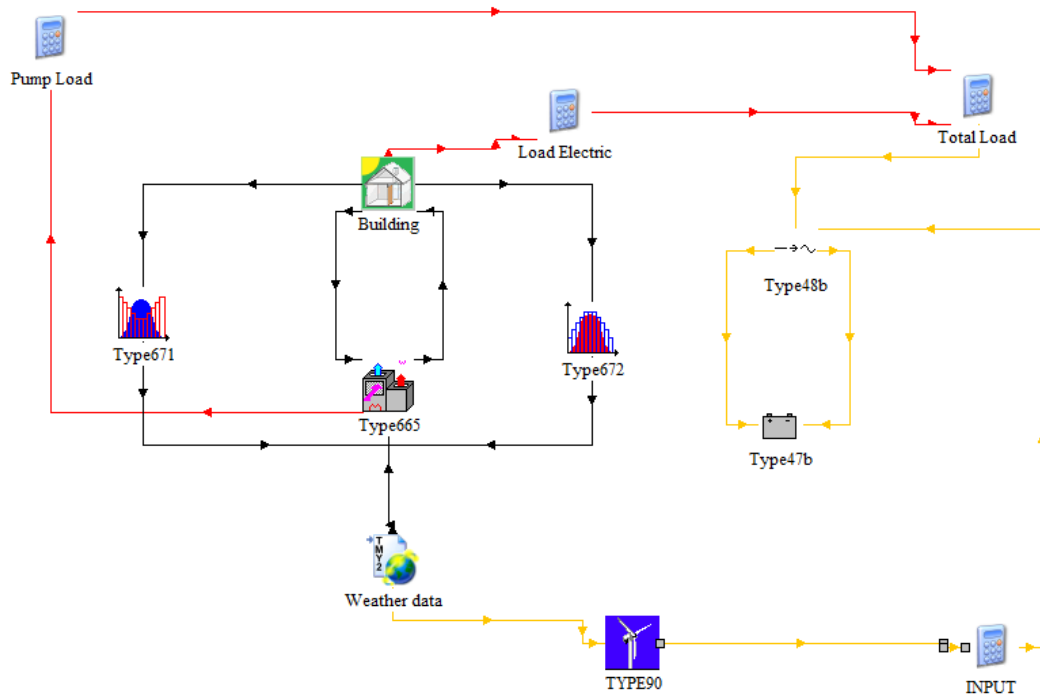
Το inverter εκτός από την πληροφορία για την παραγόμενη ισχύ από τα φωτοβολταϊκά, είναι αναγκαίο να έχει ως δεδομένο και την ζήτηση ισχύος που υπάρχει από το κτίριο. Για αυτό το λόγο, συνδέουμε τα στοιχεία Total Load και Inverter. Το inverter δέχεται ως είσοδο την ισχύ, σε  $kJ/hr$ , οπότε το ολικό φορτίο με τη βοήθεια της μεταβλητής `output_kj_h`, μετατρέπεται σε αυτές τις μονάδες.



Εικόνα 4.64: Συνδεσμολογία Calculator Total Load - inverter

#### 4.5 Περίπτωση 2<sup>η</sup> : Χρήση ανεμογεννήτριας για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου

Η δεύτερη περίπτωση που εξετάζεται είναι η εγκατάσταση μιας οικιακής ανεμογεννήτριας. Το σύστημα αυτό, που απεικονίζεται με κίτρινο χρώμα, αποτελείται και σε αυτή την περίπτωση, από την ανεμογεννήτρια, το inverter για την μετατροπή του DC ρεύματος που παράγει η ανεμογεννήτρια σε AC ρεύμα που θα καταναλώνει το κτίριο και την μπαταρία για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 4.65: Εγκατάσταση 2<sup>ης</sup> περίπτωσης

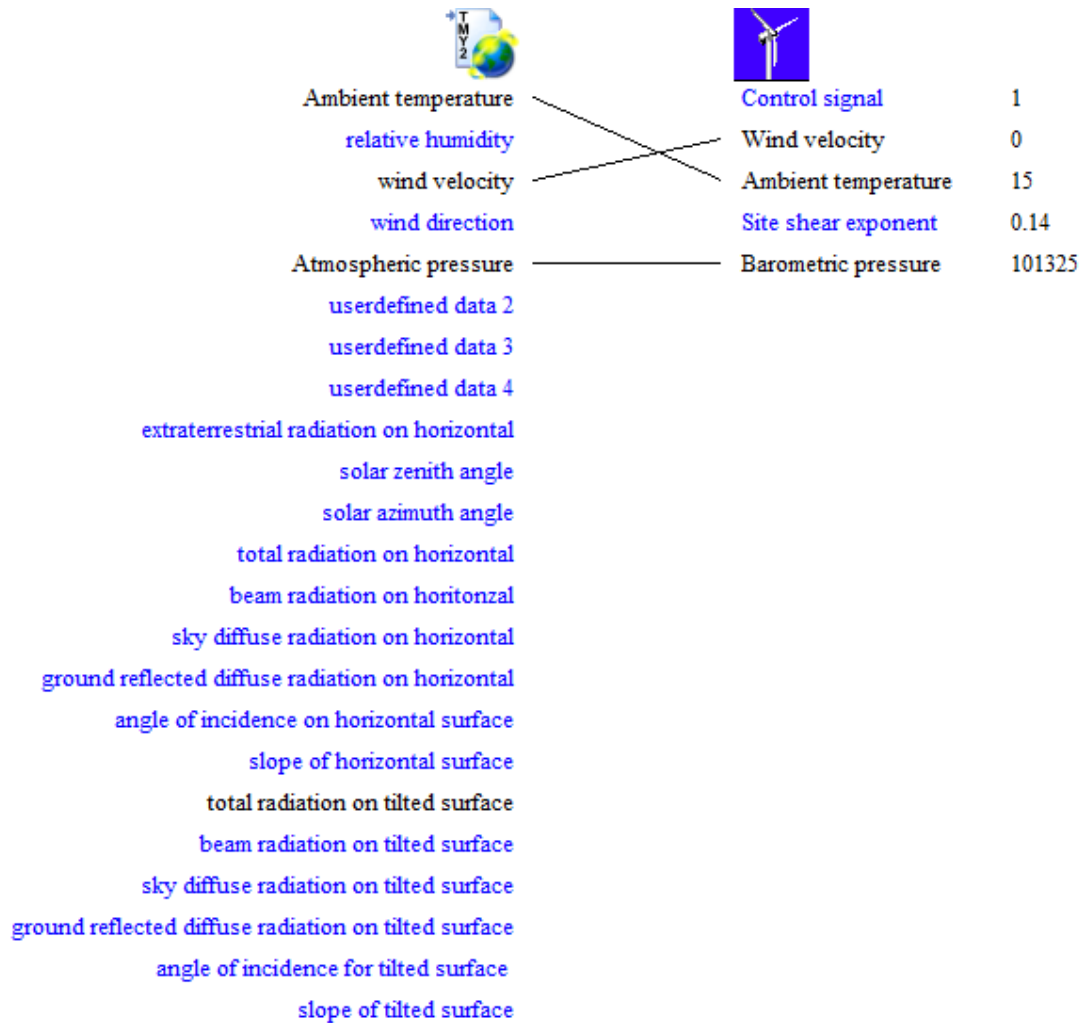
Στη συνέχεια, γίνεται αναλυτική περιγραφή των συνδέσεων των επιμέρους εξαρτημάτων που συνθέτουν την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας.

- Σύνδεση μετεωρολογικών δεδομένων – ανεμογεννήτριας



Εικόνα 4.66: Σύνδεση μετεωρολογικών δεδομένων - ανεμογεννήτριας

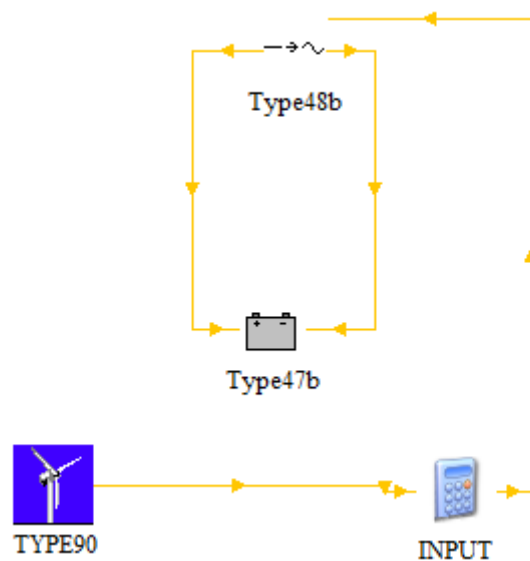
Αρχικά, για να λειτουργήσει το στοιχείο TYPE90, το οποίο αναφέρεται στην ανεμογεννήτρια, χρειάζεται ως δεδομένα την ταχύτητα του ανέμου, την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και τη βαρομετρική πίεση. Έτσι, συνδέοντας το component TYPE90 με τα μετεωρολογικά δεδομένα της Αθήνας, λαμβάνονται τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου.



Εικόνα 4.67: Συνδεσμολογία μετεωρολογικών δεδομένων – ανεμογεννήτριες

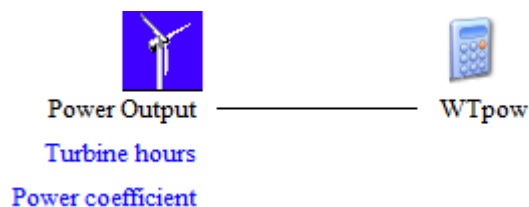
Να σημειωθεί ότι, επειδή εξετάσθηκαν διάφορα μεγέθη ανεμογεννήτριας, συγκεκριμένα 5kW, 10kW και 15kW, σε κάθε δοκιμή γινόταν επεξεργασία του αρχείου στο External Files, ώστε να ταιριάζει στην προσομοίωση. Έτσι, για κάθε δοκιμή ορίσθηκαν διαφορετικές διαμέτροι πτερυγίων, διαφορετικά ύψη πύργου κλπ.

- Σύνδεση ανεμογεννήτριας με το σύστημα inverter – μπαταρία



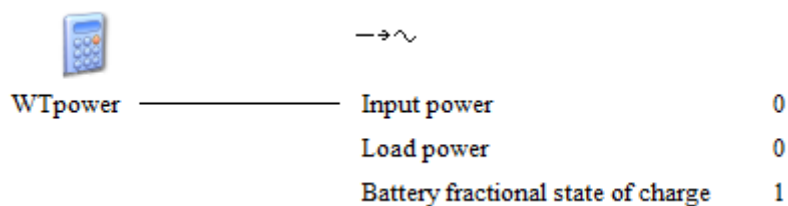
Εικόνα 4.68: Σύνδεση ανεμογεννήτριας – μπαταρίας – inverter

Αρχικά, η ανεμογεννήτρια συνδέεται με το Calculator INPUT, προκειμένου να γίνει μετατροπή μονάδων της μεταβλητής Power Output, η οποία αναφέρεται στην ισχύ της ανεμογεννήτριας, από Watt σε  $kJ/hr$ .



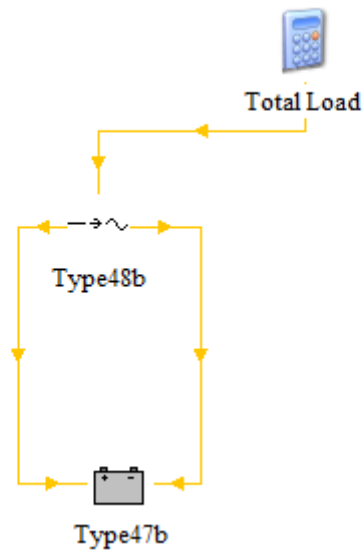
Εικόνα 4.69: Σύνδεση ανεμογεννήτριας – Calculator Input

Στη συνέχεια, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της ανεμογεννήτριας που πλέον βρίσκεται στις κατάλληλες μονάδες, στέλνεται σαν είσοδος στο inverter.



Εικόνα 4.70: Συνδεσμολογία Calculator Input - inverter

- Σύνδεση inverter – Calculator ηλεκτρικών καταναλώσεων



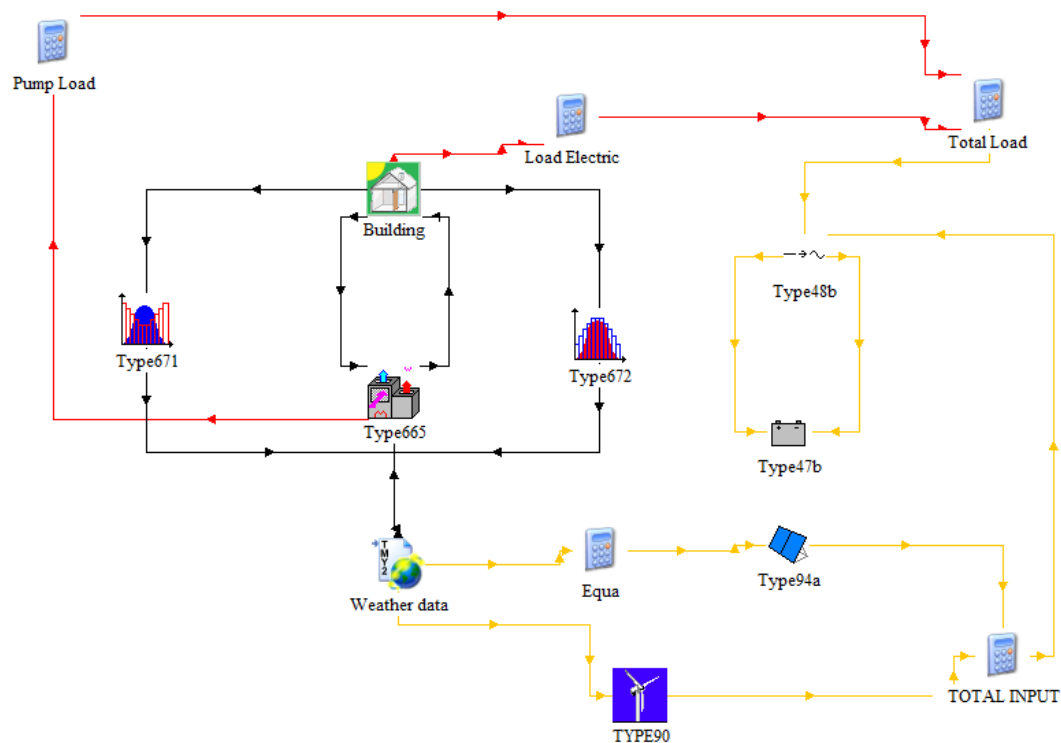
Εικόνα 4.71: Σύνδεση Calculator Total Load –μπαταρίας – inverter

Όπως και στην 1<sup>η</sup> περίπτωση, με την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών, το inverter εκτός από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, πρέπει να λαμβάνει σαν δεδομένο και την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από το κτίριο. Ακριβώς, η ίδια σύνδεση πραγματοποιείται και εδώ, συνδέοντας το εικονίδιο Total Load με το σύστημα μπαταρίας-inverter.

Σημειώνεται ακόμη, ότι και σε αυτή την περίπτωση, οι παράμετροι και οι ρυθμίσεις των components Type48b και Type47b, δηλαδή inverter και μπαταρίας, παραμένουν ως έχουν (χωρητικότητα μπαταρίας, ισχύς inverter κλπ).

#### 4.6 Περίπτωση 3<sup>η</sup> : Χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ σε συνδυασμό με ανεμογεννήτρια για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου.

Η τρίτη περίπτωση που εξετάζεται είναι η εγκατάσταση που συνδυάζει φωτοβολταϊκά πάνελ και ανεμογεννήτρια. Όπως στις προηγούμενες δυο περιπτώσεις, έτσι και εδώ χρησιμοποιείται inverter και μπαταρία και γίνεται σύνδεση με το σύστημα ηλεκτρικών καταναλώσεων. Το συνδυασμένο κύκλωμα απεικονίζεται με κίτρινο χρώμα.

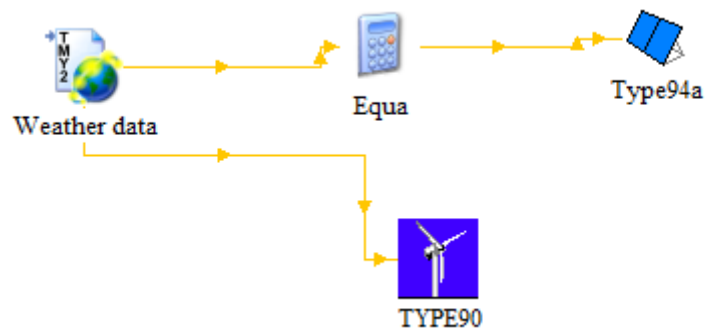


Εικόνα 4.72: Εγκατάσταση 3<sup>ης</sup> περίπτωσης

Έγιναν διάφορες δοκιμές για συλλεκτική επιφάνεια φωτοβολταϊκών 25, 50, 75, 100, 125, 150  $m^2$  και για ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 5, 10 και 15  $kW$ . Σε κάθε δοκιμή, γινόταν μεταβολή των παραμέτρων στα στοιχεία Type94a και TYPE90. Επίσης, οι ιδιότητες των στοιχείων Type47b (μπαταρία) και Type48b (inverter) παρέμειναν ίδιες όπως και στις δυο προηγούμενες περιπτώσεις.

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των συνδέσεων των επιμέρους components που συνδέουν την εγκατάσταση ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκών.

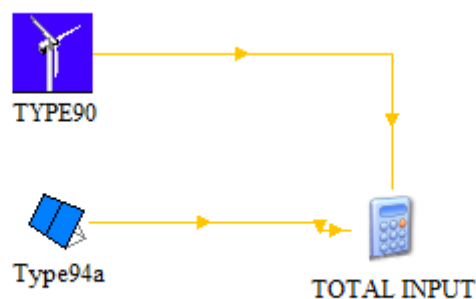
- Σύνδεση μετεωρολογικών δεδομένων – ανεμογεννήτριας – φωτοβολταϊκών



Εικόνα 4.73: Σύνδεση Weather data – Type 94a – Type90

Όμοια τις περιπτώσεις 1 και 2, η ανεμογεννήτρια (TYPE90) συνδέεται με τα μετεωρολογικά δεδομένα της Αθήνας, και δέχεται σαν δεδομένα την εξωτερική θερμοκρασία του αέρα (Ambient Temperature), την ατμοσφαιρική πίεση που επικρατεί (Atmospheric Pressure) και φυσικά την ταχύτητα του ανέμου (Wind Velocity). Τα φωτοβολταϊκά πάνελ (Type94a) συνδέονται με τη σειρά τους με το Weather Data, αφού παρεμβληθεί ένα Calculator για την μετατροπή των μονάδων της θερμοκρασίας περιβάλλοντος από Κελσίου σε Kelvin. Σαν είσοδο τα φωτοβολταϊκά πάνελ δέχονται την θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ambient Temperature) και την ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (Total Incident Radiation).

- Σύνδεση φωτοβολταϊκών και ανεμογεννήτριας με Calculator Total Input

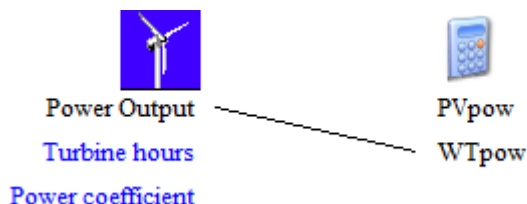


Εικόνα 4.74: Σύνδεση Type90 – Type 94a – Calculator Total Input

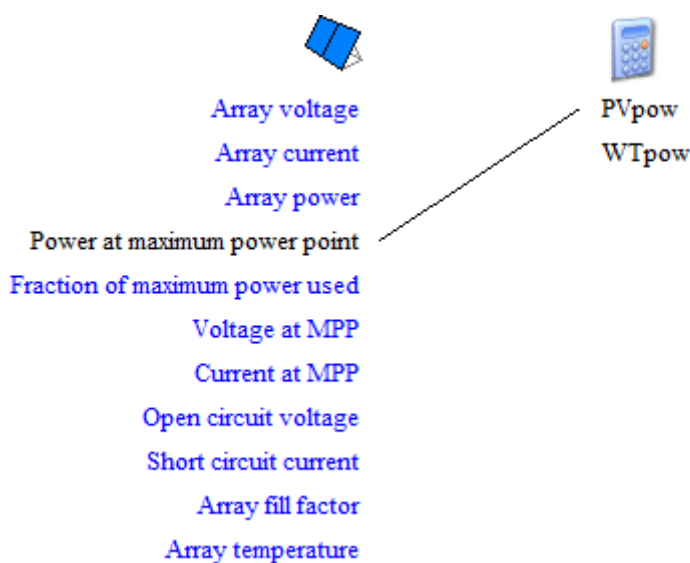


Στο βήμα αυτό, πραγματοποιείται η άθροιση της παραγόμενης ισχύος των φωτοβολταϊκών και της ανεμογεννήτριας σε ένα Calculator. Ακόμη γίνεται μετατροπή μονάδων από Watt σε kJ/hr, καθώς το inverter λειτουργεί με αυτές τις μονάδες μέτρησης.

Επιλέγοντας την επιλογή Connections, παρατηρούμε τις δυο συνδέσεις που προαναφέρθηκαν.



Εικόνα 4.75: Συνδεσμολογία ανεμογεννήτριας – Calculator Total input



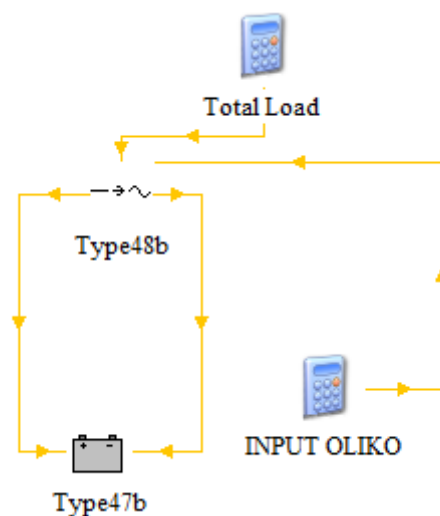
Εικόνα 4.76: Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών – Calculator Total input

Στη συνέχεια, ακολουθεί η μετατροπή μονάδων σε kJ/hr με τη βοήθεια των μεταβλητών PVpower που αναφέρεται στην ηλεκτρική ισχύ που παράγουν τα φωτοβολταϊκά και WTpower που αναφέρεται στην ηλεκτρική ισχύ που παράγει η ανεμογεννήτρια. Τέλος πραγματοποιείται η άθροιση των δυο στη μεταβλητή InputSynolo, η οποία θα σταλεί ως δεδομένο στο inverter.



Εικόνα 4.77: Άθροιση παραγωγής Type90 και Type 94a

- Σύνδεση calculator ηλεκτρικών καταναλώσεων και ηλεκτροπαραγωγής με το σύστημα μπαταρίας – inverter

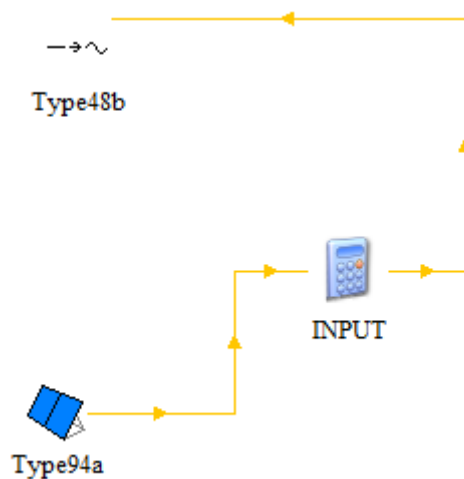


Εικόνα 4.78: Σύνδεση ηλεκτρικού φορτίου και ηλεκτρικής παραγωγής – inverter - μπαταρίας



Οι παράμετροι, οι μετατροπές μονάδων και οι εσωτερικές ρυθμίσεις των συνδέσεων είναι ίδιες με τις προηγούμενες περιπτώσεις, οπότε δεν θα γίνει περαιτέρω αναφορά.

- Σύνδεση φωτοβολταϊκών απευθείας με inverter



Εικόνα 4.81: Σύνδεση Type 94a – inverter

Με το συγκεκριμένο βήμα, η ισχύς που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στέλνεται αφού πρώτα μετατραπεί στις κατάλληλες μονάδες με το Calculator INPUT, στο inverter.

- Σύνδεση inverter με ηλεκτρικές καταναλώσεις



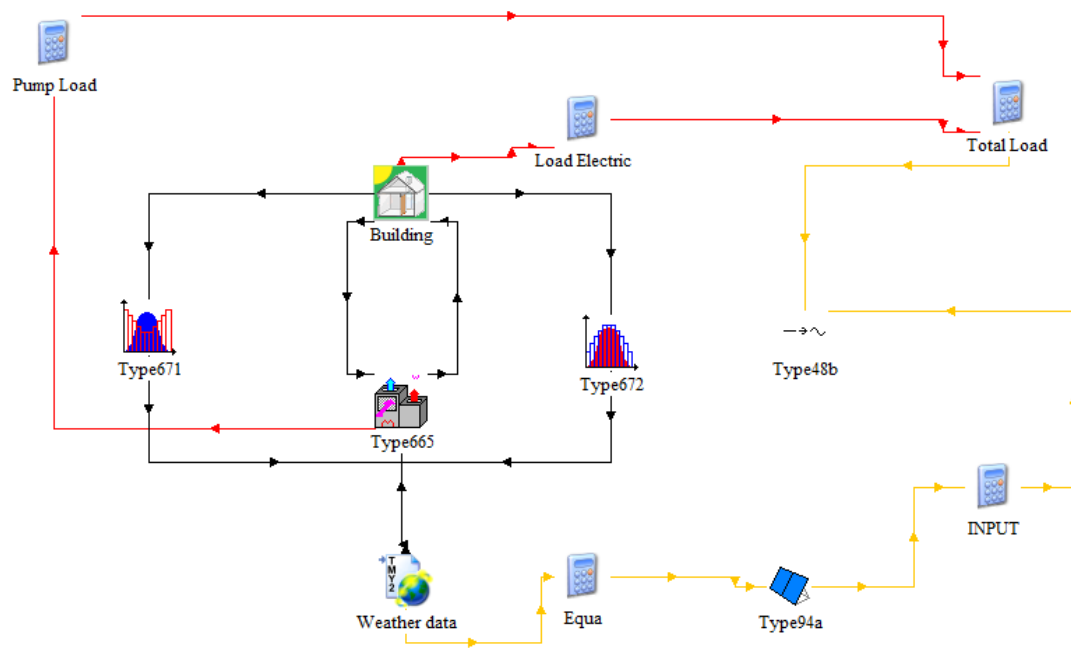
Εικόνα 4.82: Σύνδεση Calculator Total load – inverter

Ταυτόχρονα το inverter δέχεται ως είσοδο την καταναλισκόμενη ενέργεια του κτιρίου, το συνολικό φορτίο που συγκεντρώνεται από το φωτισμό, τις ηλεκτρικές συσκευές και τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας.

#### 4.8 Περίπτωση 5<sup>η</sup> : Χρήση τεχνολογίας Net Metering για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου και βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίου

Στην πέμπτη περίπτωση που εξετάστηκε, έγιναν μεταβολές σε δυο άξονες. Η πρώτη ενέργεια ήταν ο βιοκλιματικός σχεδιασμός του κτιρίου με χρήση φυτεμένης οροφής, καλύτερης μόνωσης, πιο αποδοτικών υαλοπινάκων, που θα περιγραφούν αναλυτικά στη συνέχεια. Η δεύτερη ενέργεια ήταν η επιλογή του συστήματος Net Metering για την κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων, καθώς αποδείχθηκε η βέλτιστη λύση σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα με φωτοβολταϊκά ανεμογεννήτρια και μπαταρία.

Η εγκατάσταση θα είναι στην ουσία ίδια με την περίπτωση 4, όμως με την επιλογή Edit Building θα γίνουν αρκετές βελτιώσεις στο κτίριο.



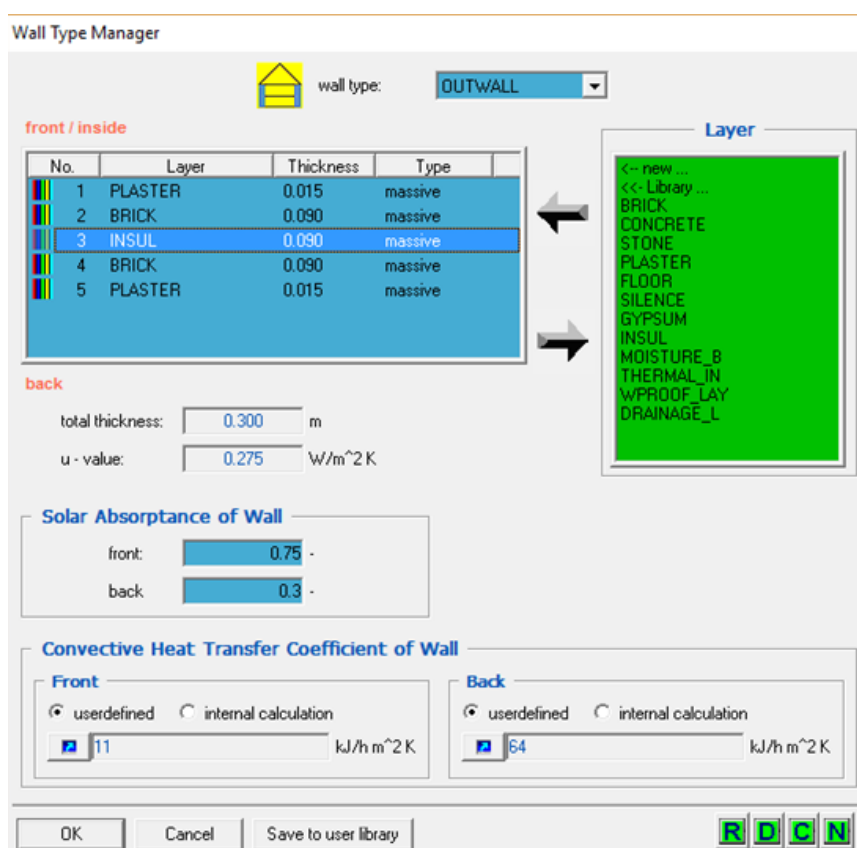
Εικόνα 4.83: Εγκατάσταση 5<sup>ης</sup> περίπτωσης

## Βιοκλιματικός Σχεδιασμός και Ενεργειακή Αναβάθμιση του κτιρίου

Το πρώτο βήμα είναι η επεξεργασία των εξωτερικών τοίχων και της φυτεμένης οροφής. Στους εξωτερικούς τοίχους του συμβατικού κτιρίου χρησιμοποιήθηκαν τα εξής στρώματα:

- ❖ Σοβάς: 15mm
- ❖ Τούβλο: 90mm
- ❖ Μόνωση: 60mm
- ❖ Τούβλο: 90mm
- ❖ Σοβάς: 15mm

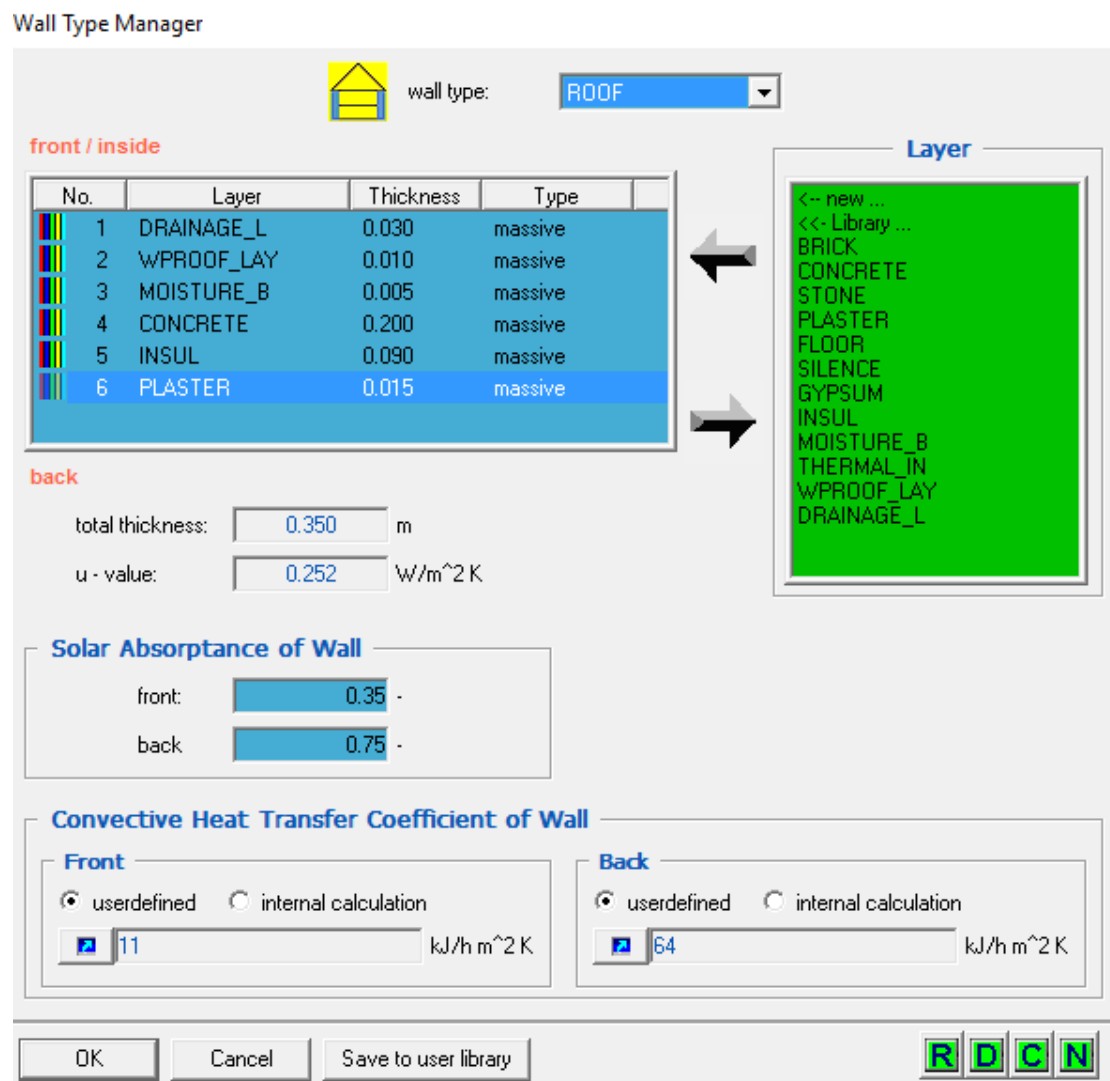
Με την τιμή του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας να είναι  $0.528 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Βασική ιδέα ήταν η μείωση του συντελεστή αυτού. Έτσι χρησιμοποιήθηκε μόνωση 90 mm ενώ τα υπόλοιπα στρώματα παρέμειναν ως έχουν.



Εικόνα 4.84: Επιλογή υλικών τοίχων για βιοκλιματικό σχεδιασμό

Όπως φαίνεται και στην εικόνα πετύχαμε τη μείωση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας για τους εξωτερικούς τοίχους με τη νέα τιμή του να είναι  $0.275 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Όσον αφορά την οροφή, αποφασίσθηκε κυρίως για ενεργειακούς αλλά και περιβαλλοντικούς λόγους να καλύπτεται από βλάστηση. Επιλέχθηκε οροφή εκτατικού τύπου (extensive green roof), η οποία είναι κατάλληλη για εξοικονόμηση ενέργειας στο κτίριο, έχει μικρό σχετικά βάρος ( $150 \text{ kg/m}^2$ ), και χρειάζεται ελάχιστη συντήρηση. Η βλάστηση στις περιπτώσεις αυτές είναι χαμηλή και περιλαμβάνει παχύφυτα, αρωματικά, ποώδη, χλοοτάπητες και φυτά εδαφοκάλυψης με επιφανειακό ριζικό σύστημα. Τα στρώματα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.85: Επιλογή υλικών για φυτεμένη οροφή

Να σημειωθεί ότι έχουμε αύξηση του πάχους της οροφής από 27.5 cm σε 35 cm όμως ταυτόχρονα έχει επιτευχθεί μείωση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας από 0.563 σε 0.252  $W/m^2K$ .

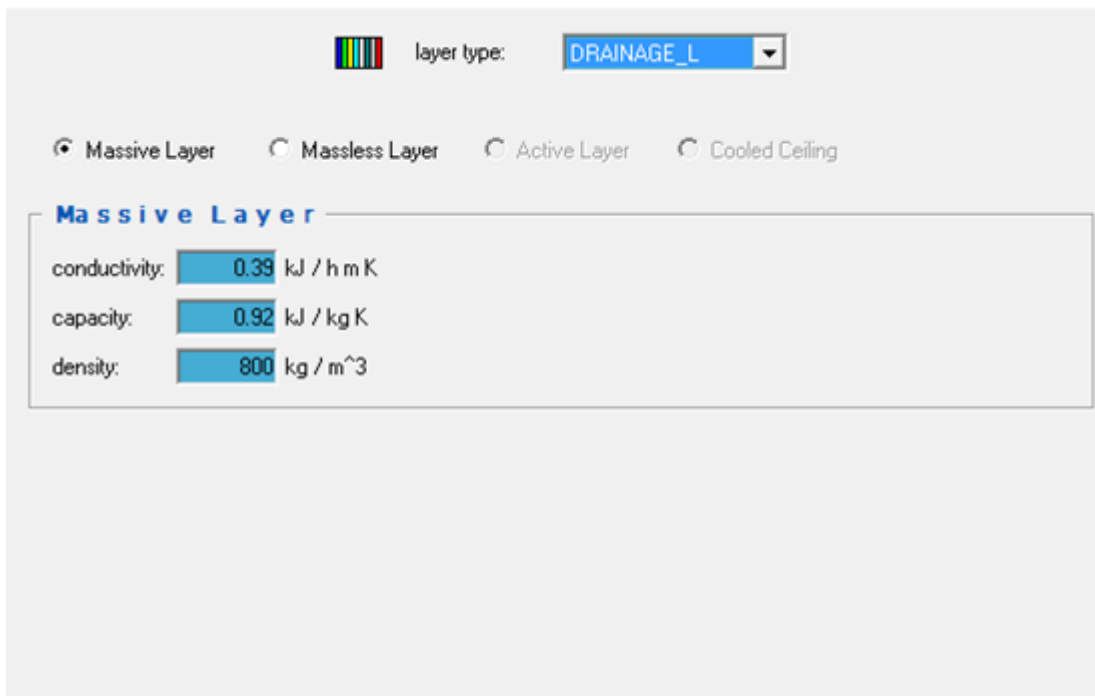
Αναλυτικά τα στρώματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

- ❖ Στρώμα αποξήρανσης : 30mm
- ❖ Αδιάβροχο στρώμα : 10mm
- ❖ Ασπίδα υγρασίας : 5mm
- ❖ Σκυρόδεμα: 200mm
- ❖ Μόνωση: 90mm
- ❖ Σοβάς: 15mm

Τα τρία πρώτα στρώματα δεν υπήρχαν στη βιβλιοθήκη του TRNSYS, αλλά δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια του Layer Type Manager. Παρακάτω αναλύονται οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

- Στρώμα Αποξήρανσης (Drainage Layer)

#### Layer Type Manager



The screenshot shows the Layer Type Manager interface. At the top, there is a color-coded icon and a dropdown menu for 'layer type' set to 'DRAINAGE\_L'. Below this, there are four radio button options: 'Massive Layer' (selected), 'Massless Layer', 'Active Layer', and 'Cooled Ceiling'. A box titled 'Massive Layer' contains the following properties:

conductivity:	0.39	kJ / h m K
capacity:	0.92	kJ / kg K
density:	800	kg / m <sup>3</sup>

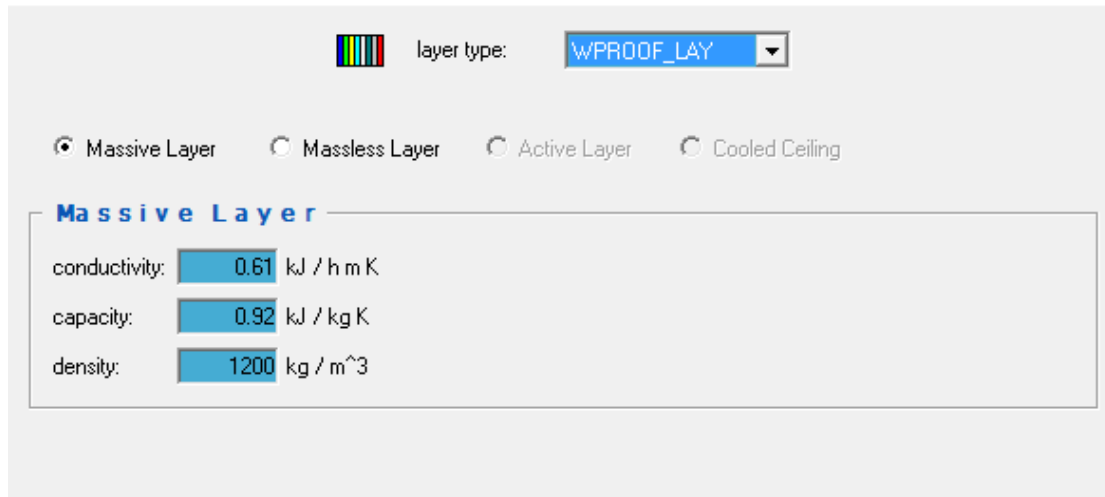
Εικόνα 4.86: Ορισμός ιδιοτήτων στρώματος αποξήρανσης



Το υλικό αυτό έχει θερμική αγωγιμότητα  $0.39 \text{ kJ/hmK}$ , θερμοχωρητικότητα  $0.92 \text{ kJ/kgK}$ , και πυκνότητα  $800 \text{ kg/m}^3$ .

- Αδιάβροχο στρώμα (Waterproof Layer)

#### Layer Type Manager



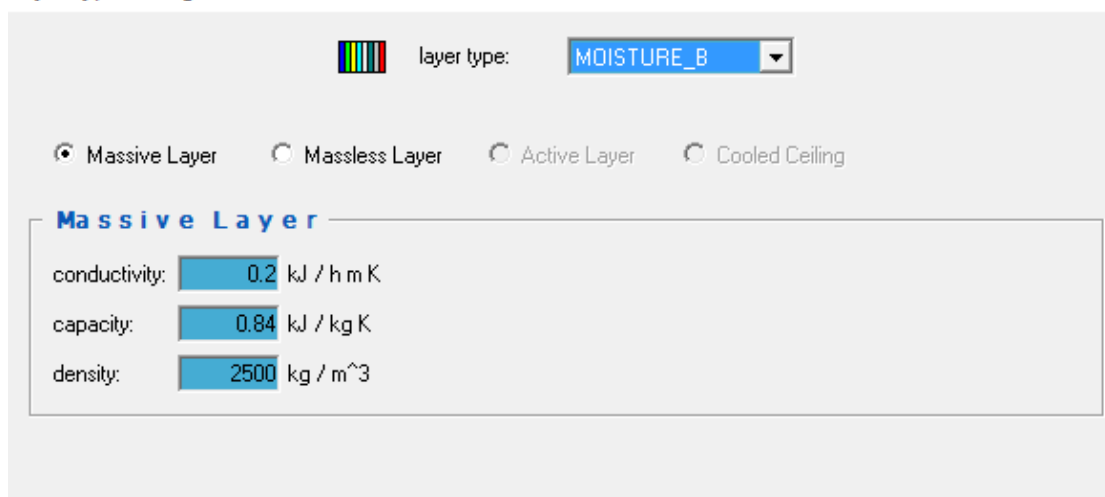
The screenshot shows the 'Layer Type Manager' interface. At the top, there is a 'layer type:' dropdown menu set to 'WPROOF\_LAY'. Below this, there are four radio button options: 'Massive Layer' (selected), 'Massless Layer', 'Active Layer', and 'Cooled Ceiling'. A section titled 'Massive Layer' contains three input fields: 'conductivity: 0.61 kJ / h m K', 'capacity: 0.92 kJ / kg K', and 'density: 1200 kg / m^3'.

Εικόνα 4.87: Ορισμός ιδιοτήτων αδιάβροχου στρώματος

Το υλικό αυτό έχει θερμική αγωγιμότητα  $0.61 \text{ kJ/hmK}$ , θερμοχωρητικότητα  $0.92 \text{ kJ/kgK}$ , και πυκνότητα  $1200 \text{ kg/m}^3$ .

- Ασπίδα υγρασίας (Moisture Barrier)

#### Layer Type Manager



The screenshot shows the 'Layer Type Manager' interface. At the top, there is a 'layer type:' dropdown menu set to 'MOISTURE\_B'. Below this, there are four radio button options: 'Massive Layer' (selected), 'Massless Layer', 'Active Layer', and 'Cooled Ceiling'. A section titled 'Massive Layer' contains three input fields: 'conductivity: 0.2 kJ / h m K', 'capacity: 0.84 kJ / kg K', and 'density: 2500 kg / m^3'.

Εικόνα 4.88: Ορισμός ιδιοτήτων ασπίδας υγρασίας

Το υλικό αυτό έχει θερμική αγωγιμότητα  $0.2 \text{ kJ/hmK}$ , θερμοχωρητικότητα  $0.84 \text{ kJ/kgK}$ , και πυκνότητα  $2500 \text{ kg/m}^3$ .

Επόμενη ενέργεια ήταν η επιλογή καλύτερων ενεργειακά υαλοπινάκων. Στο συμβατικό κτίριο, χρησιμοποιήθηκαν οι υαλοπίνακες της βιβλιοθήκης του TRNSYS με WinID 2003, Insulating Krypton 1.1 71/60, με συντελεστή θερμικής διαπερατότητας  $0.86 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Στο νέο βελτιωμένο κτίριο, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο υαλοπίνακα Pilkington OPTITHERM S, με WinID 12008, που προσφέρει καλύτερη τιμή στο συντελεστή θερμικής διαπερατότητας  $0.59 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Ακόμη έγιναν κάποιες βελτιώσεις στο πλαίσιο του υαλοπίνακα. Ο συντελεστής area frame/window που δίνει το ποσοστό του πλαισίου του υαλοπίνακα επί του συνολικού υαλοπίνακα ορίσθηκε 0.3 έναντι 0.2 που ήταν στο συμβατικό κτίριο ενώ ο συντελεστής ηλιακής απορροφητικότητας του πλαισίου ρυθμίστηκε 0.4 έναντι 0.6 που ήταν πριν. Οι τιμές αυτές προέκυψαν ως βέλτιστες, ύστερα από δοκιμές. Οι υπόλοιπες τιμές παρέμειναν ως έχουν, με εξαίρεση το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του πλαισίου που πήρε τη βελτιωμένη τιμή  $5 \text{ kJ/hm}^2\text{K}$ .

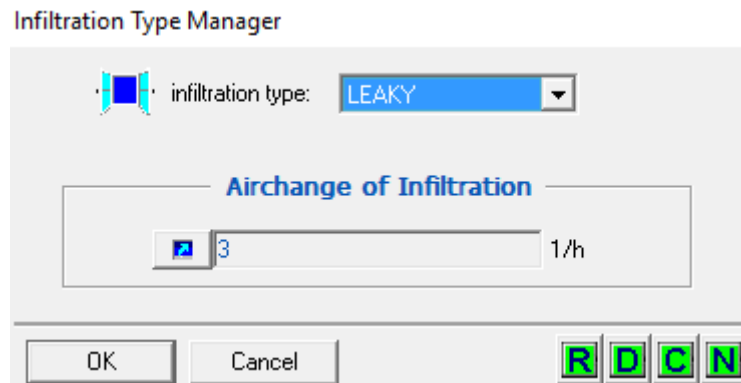
Window Type Manager

The screenshot shows the 'Window Type Manager' interface for a 'DOUBLE' window type. The 'Glazing' section includes: ID number 12008, slope of window 90 degrees, width 0 m, height 0 m, u-value 0.59 W/m<sup>2</sup>K, g-value 0.45 %/100, and ID spacer 0. The 'Convective Heat Transfer Coefficient of Window' section has 'Front (inside)' set to userdefined 11 kJ/h m<sup>2</sup>K and 'Back (outside)' set to userdefined 64 kJ/h m<sup>2</sup>K. The 'Optional Properties of Shading Devices' section includes: internal device 0 h m<sup>2</sup>K/kJ, external device 0 h m<sup>2</sup>K/kJ, reflection coefficient towards window 0.5 %/100, and reflection coefficient towards zone 0.5 %/100. The 'Fraction of abs. Solar Radiation to Zone Air Node (CCISHADE)' is set to 0.5 %/100. The 'Frame' section includes: area frame/window 0.3 %/100, u-value (1/R) 5 kJ/h m<sup>2</sup>K, and solar absorptance 0.4.

Εικόνα 4.89: Ρύθμιση παραμέτρων βελτιωμένου υαλοπίνακα

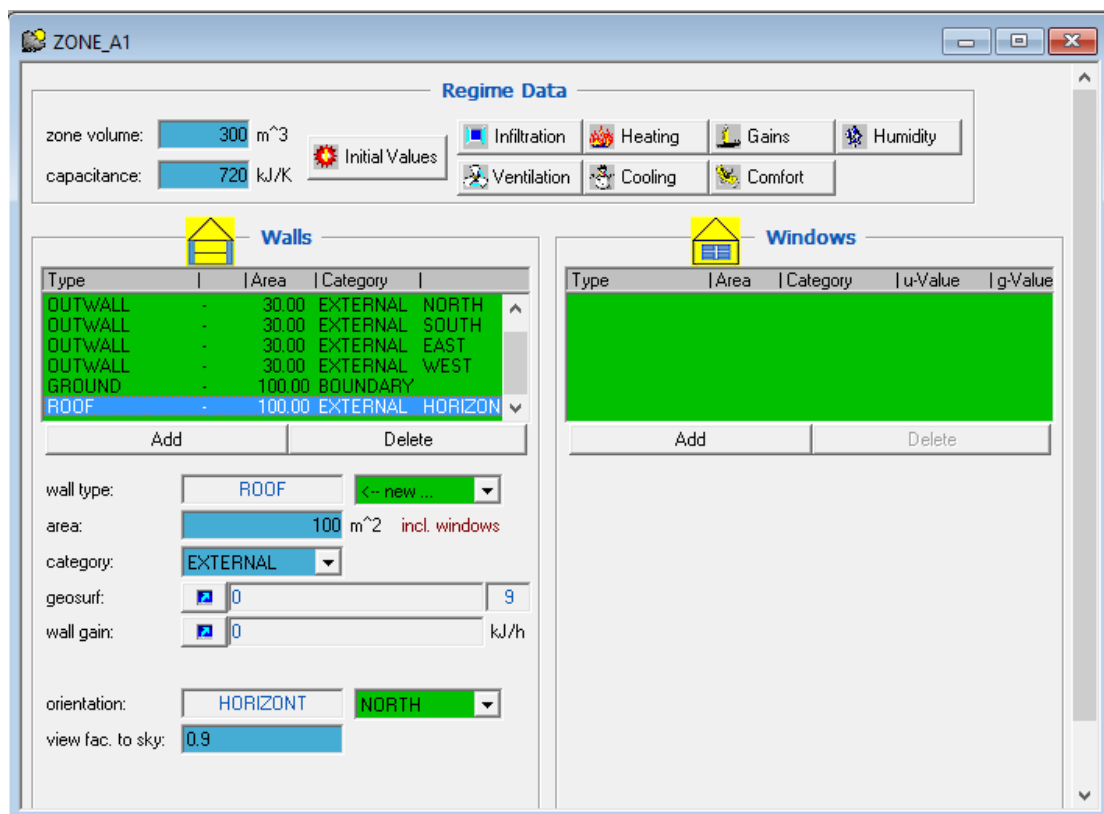
Μια μικρή αλλαγή πραγματοποιήθηκε και στην διείσδυση αέρα μέσα στο κτίριο (Leakage) με τη βοήθεια του Infiltration Type Manager. Συγκεκριμένα, οι εναλλαγές

αέρα την ώρα, ρυθμίστηκαν σε 3/h αντί για 2.5/h που ήταν η ρύθμιση για το συμβατικό κτίριο.



Εικόνα 4.90: Καθορισμός εναλλαγών αέρα για τον αερισμό του χώρου

Τελευταία αλλαγή ήταν η μεταβολή του View Factor to sky στο παράθυρο ZONE\_A1, όπου ορίστηκε 0.9 αντί για 0.5 που είχε ορισθεί στο συμβατικό κτίριο.



Εικόνα 4.91: Ρύθμιση συντελεστή θέασης οροφής

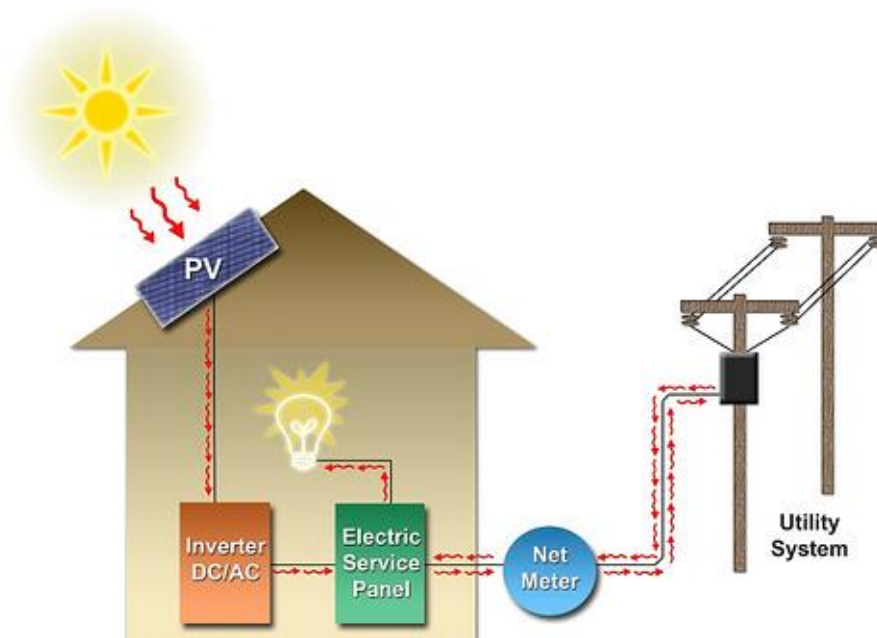
### **Το σύστημα Net Metering ως βέλτιστη λύση για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου**

Με τη σύγκριση, ενεργειακή και οικονομική, όλων των συστημάτων και των πιθανών συνδυασμών τους για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, προέκυψε το συμπέρασμα ότι το Net Metering ήταν η βέλτιστη λύση. Η συνδεσμολογία και η προσομοίωση του συστήματος είναι ακριβώς ίδια με την περίπτωση 4, οπότε δεν γίνεται περαιτέρω αναφορά.

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που έγινε στο TRNSYS. Η προσομοίωση έγινε για χρονική διάρκεια ενός έτους, για να είναι πιο ρεαλιστική και αντικειμενική η αξιολόγησή της. Αρχικά, γίνεται περιγραφή των δομικών στοιχείων του κτιρίου και των φορτίων ψύξης και θέρμανσης. Για τη θέρμανση και την ψύξη του χώρου που μελετήθηκε, αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθεί αντλία θερμότητας. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στις ηλεκτρικές καταναλώσεις του κτιρίου, που προκύπτουν αφενός από τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας και αφετέρου από τον φωτισμό του χώρου και τις ηλεκτρικές συσκευές. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ήταν η κάλυψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερου ποσοστού του ηλεκτρικού φορτίου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν φωτοβολταϊκά πάνελ με ή χωρίς μπαταρία, ανεμογεννήτρια, σε διάφορους συνδυασμούς, ενώ έγινε προσπάθεια για την περαιτέρω μείωση του ηλεκτρικού φορτίου του κτιρίου. Η διαστασιολόγηση των παραπάνω στοιχείων της εγκατάστασης έγινε με κριτήριο τόσο την ελαχιστοποίηση της χρήσης του δικτύου για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου, όσο και την βελτιστοποίηση του κόστους. Παρουσιάζονται αναλυτικά, όλες οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν και στο τέλος γίνεται η αξιολόγηση και σύγκρισή τους, ώστε να βρεθεί η βέλτιστη, ενεργειακά και οικονομικά, λύση.



Εικόνα 5.1: Σύστημα Net Metering [42]

## 5.2 Ανάλυση και περιγραφή του κτιρίου

Το κτίριο αποτελείται από το πάτωμα (GROUND), την οροφή (ROOF) και τους τέσσερις εξωτερικούς τοίχους (OUTWALL). Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς επίσης και οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Είδος υλικού	$k \left( \frac{W}{mK} \right)$	$C_p \left( \frac{kJ}{kgK} \right)$	$\rho \left( \frac{kg}{m^3} \right)$
Θερμομόνωση (Insul)	0.04	0.8	40
Σοβάς (Plaster)	1.389	1.0	2000
Σκυρόδεμα (Concrete)	2.1	0.8	2400
Τούβλο (Brick)	0.889	1.0	1800
Ηχομόνωση (Silence)	0.05	1.44	80
Πάτωμα (Floor)	0.07	1.0	800
Πέτρα (Stone)	1.389	1.0	2000

Πίνακας 5.1 : Ιδιότητες υλικών κτιρίου (συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, ειδική θερμοχωρητικότητα, πυκνότητα)

Στη συνέχεια με τη βοήθεια του TRNSYS, υπολογίζονται αυτόματα οι τιμές της θερμικής διαπερατότητας καθώς επίσης και το πάχος του κάθε τοίχου. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Είδος τοίχου	Πάχος (cm)	$U \left( \frac{W}{m^2K} \right)$
Δάπεδο (Ground)	42.5	0.313
Εξωτερικός (Outwall)	27.0	0.528
Οροφή (Roof)	27.5	0.563

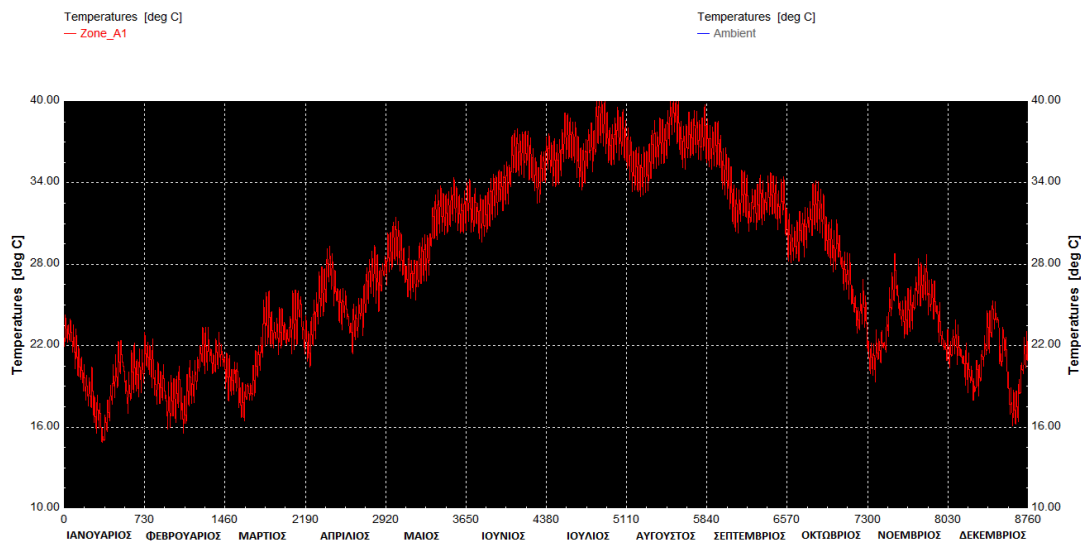
Πίνακας 5.2 : Πάχος και θερμική διαπερατότητα τοίχων

Ακολουθεί ο τελικός πίνακας, στον οποίο παρουσιάζονται συνοπτικά όλες οι παράμετροι του κτιρίου.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εμβαδό	100 m <sup>2</sup>	Φορτίο Συσκευών	1.84 kW
Ύψος	3 m	Άτομα	8
Ανατολικό Παράθυρο	3 m <sup>2</sup>	Φωτισμός	1 kW
Δυτικό Παράθυρο	3 m <sup>2</sup>	Συντελεστής Σκίασης	75%
Νότιο Παράθυρο	6 m <sup>2</sup>		

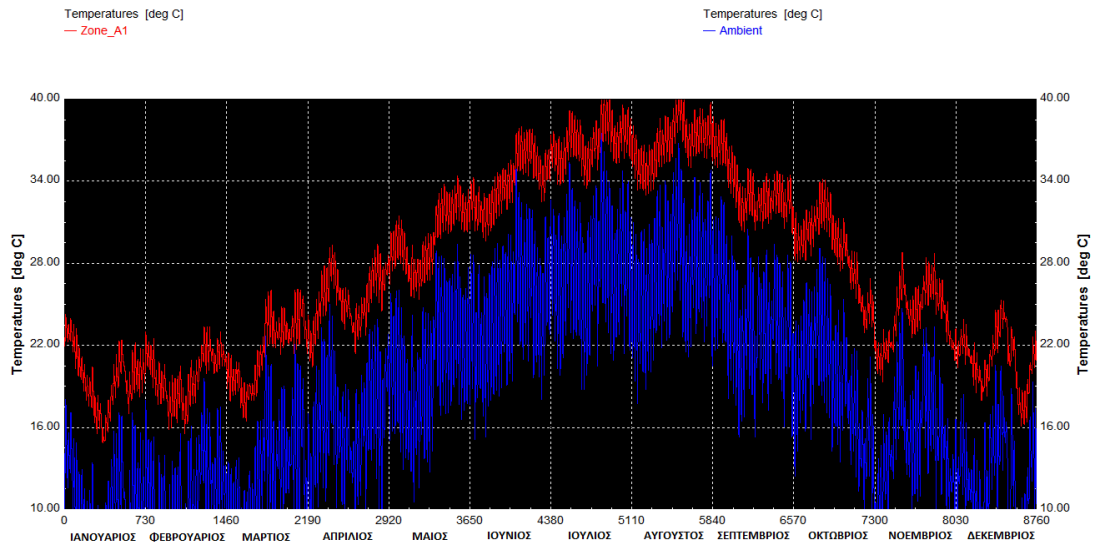
Πίνακας 5.3 : Παράμετροι κατασκευής κτιρίου

Ενδεικτικά, παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό προφίλ του κτιρίου, για όλη τη διάρκεια του έτους, χωρίς να έχει τεθεί σε λειτουργία κάποιο σύστημα θέρμανσης ή ψύξης. Το διάγραμμα αυτό, έχει στόχο να δείξει την επίδραση των υλικών κατασκευής στην εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου, καθώς επίσης και σε ποιο χρονικό σημείο του έτους, χρειάζεται η επέμβαση με κάποιο σύστημα θέρμανσης ή ψύξης έτσι ώστε να επιτευχθούν συνθήκες θερμικής άνεσης μέσα στο κτίριο. Όπως είναι αναμενόμενο, το διάγραμμα δείχνει μεγάλη ανάγκη για θέρμανση τους χειμερινούς μήνες (Νοέμβριο έως Φεβρουάριο) και αντίστοιχα μεγάλη ανάγκη για ψύξη, τους θερινούς μήνες (Μάιο έως Οκτώβριο).



Διάγραμμα 5.1 : Ετήσιο προφίλ θερμοκρασίας κτιρίου

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η σύγκριση της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτιρίου με την εξωτερική θερμοκρασία που επικρατεί στο περιβάλλον. Παρατηρείται ότι, η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου είναι κάθε χρονική στιγμή μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αυτό είναι ένα θετικό στοιχείο για τους χειμερινούς μήνες, όμως είναι ιδιαίτερα αρνητικό για τους καλοκαιρινούς μήνες όπου θα υπάρχει μεγάλη ανάγκη για ψύξη όπως θα φανεί και στη συνέχεια.



Διάγραμμα 5.2: Ετήσια σύγκριση της θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου (Zone\_A1) και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Ambient)

Επόμενο βήμα ο υπολογισμός των ετήσιων φορτίων θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου, από την επιλογή Calculations του TRNSYS.

- Το φορτίο θέρμανσης βρέθηκε:  $Q_{heating} = 3812 \text{ kWh}$
- Το ψυκτικό φορτίο βρέθηκε:  $Q_{cooling} = 16481 \text{ kWh}$

Γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι το ψυκτικό φορτίο του χώρου είναι αρκετά μεγαλύτερο από το φορτίο θέρμανσης, κάτι για το οποίο μας είχε προϊδεάσει και το θερμοκρασιακό προφίλ του χώρου. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη πολλών ηλεκτρικών συσκευών και φωτισμού, οι οποίες έχουν αντίστροφη δράση χειμώνα και καλοκαίρι. Τους καλοκαιρινούς μήνες θερμαίνουν επιπλέον το χώρο οπότε συντελούν στην αύξηση του φορτίου ψύξης, ενώ το χειμώνα η δράση τους είναι κατά κάποιο τρόπο ευεργετική καθώς θερμαίνουν το χώρο και συντελούν στην μείωση του φορτίου θέρμανσης.

Επίσης, υπολογίζεται η ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση της αντλίας για θέρμανση και ψύξη χωριστά:

- Κατανάλωση για θέρμανση:  $Q_{el,heat} = 1189 \text{ kWh}$
- Κατανάλωση για ψύξη:  $Q_{el,cool} = 5830 \text{ kWh}$



Ο συντελεστής συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας για θέρμανση και ψύξη είναι:

- $COP_{heating} = \frac{Q_{heating}}{Q_{el,heat}} = 3.2$

- $COP_{cooling} = \frac{Q_{cooling}}{Q_{el,cool}} = 2.83$

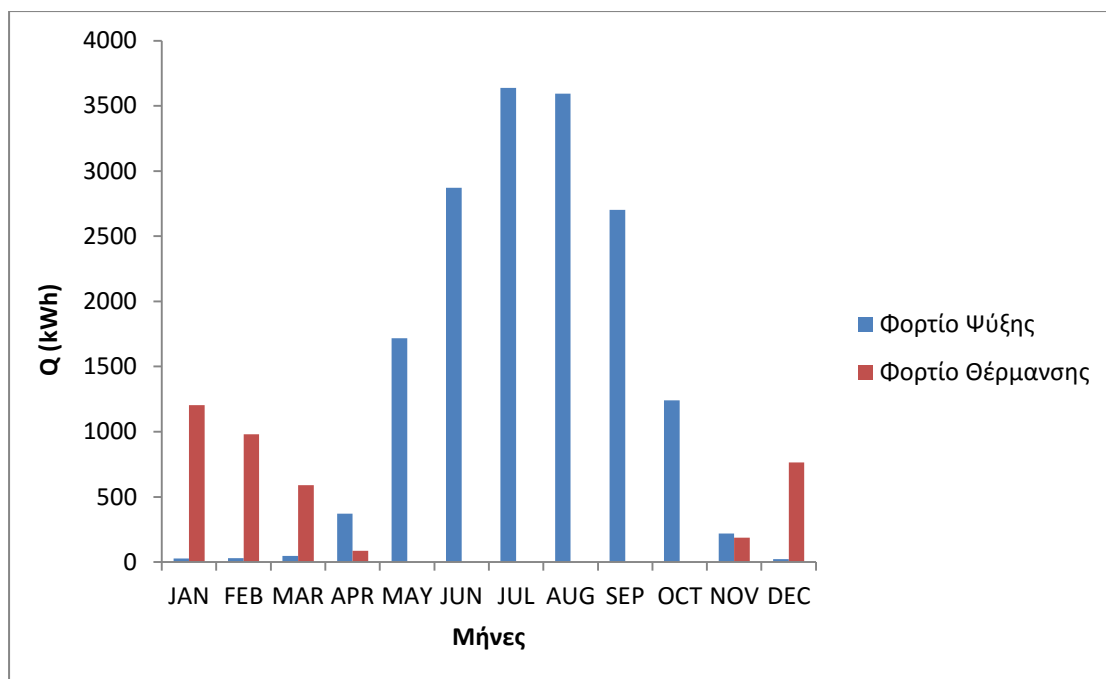
Όπως ήταν αναμενόμενο, ο συντελεστής θερμικής συμπεριφοράς για θέρμανση είναι μεγαλύτερος από τον συντελεστή θερμικής συμπεριφοράς για ψύξη.

Οι υπολογισμοί θα γίνουν και σε μηνιαία βάση, προκειμένου να διαπιστωθεί σε ποιο χρονικό σημείο του έτους, αυξάνονται ή μειώνονται οι ανάγκες του κτιρίου για θέρμανση και ψύξη. Τα φορτία θέρμανσης και ψύξης, για κάθε ένα μήνα του έτους, παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα.

Μήνας	Φορτίο Θέρμανσης (kWh)	Φορτίο Ψύξης (kWh)
Ιανουάριος	1204	0
Φεβρουάριος	979	0
Μάρτιος	590	0
Απρίλιος	87	373
Μάιος	0	1733
Ιούνιος	0	2893
Ιούλιος	0	3666
Αύγουστος	0	3622
Σεπτέμβριος	0	2725
Οκτώβριος	0	1249
Νοέμβριος	187	220
Δεκέμβριος	763	0

Πίνακας 5.4 : Μηνιαία φορτία θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου

Γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι για τη θέρμανση το μέγιστο φορτίο παρουσιάζεται τον Ιανουάριο, ενώ τους μήνες από Μάιο έως και Οκτώβρη το κτίριο δεν παρουσιάζει ανάγκη για θέρμανση. Αντίστοιχα για την ψύξη, το μέγιστο φορτίο παρουσιάζεται τον Ιούλιο ενώ το ελάχιστο τον Δεκέμβριο. Ακολουθεί ιστόγραμμα, στο οποίο απεικονίζονται τα παραπάνω φορτία ανά μήνα.



Διάγραμμα 5.3 : Μηνιαία φορτία ψύξης και θέρμανσης κτιρίου

Επόμενο βήμα, ο υπολογισμός των ηλεκτρικών καταναλώσεων, οι οποίες προκύπτουν από την αντλία θερμότητας και από τις ηλεκτρικές συσκευές και το φωτισμό του κτιρίου. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται όλες οι ηλεκτρικές καταναλώσεις του κτιρίου.

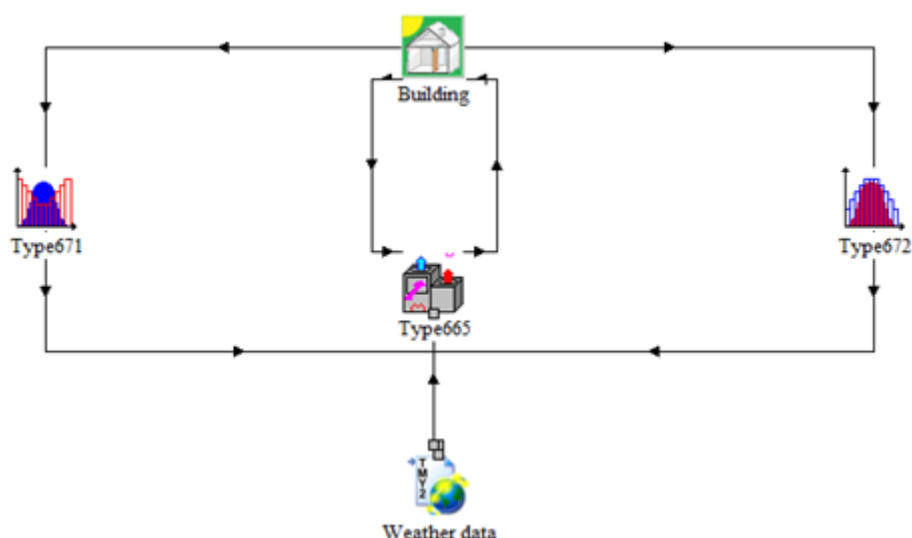
Στοιχείο	Ετήσια Κατανάλωση (kWh)
Αντλία Θερμότητας	7020
Φωτισμός	2610
Συσκευές	6525
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>16155</b>

Πίνακας 5.5 : Ετήσιες καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας

Όπως έχει προαναφερθεί, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο των 16155 kWh, να καλύπτεται όσο το δυνατόν περισσότερο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η χρήση του δικτύου να είναι η ελάχιστη δυνατή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τρόποι με τους οποίους πραγματοποιείται αυτό, και γίνεται αξιολόγηση και σύγκριση όλων των περιπτώσεων που εξετάζονται.

### 5.3 Χρήση Αντλίας Θερμότητας Αέρα-Αέρα για την θέρμανση και την ψύξη του κτιρίου

Η εγκατάσταση της αντλίας θερμότητας είναι η ακόλουθη:



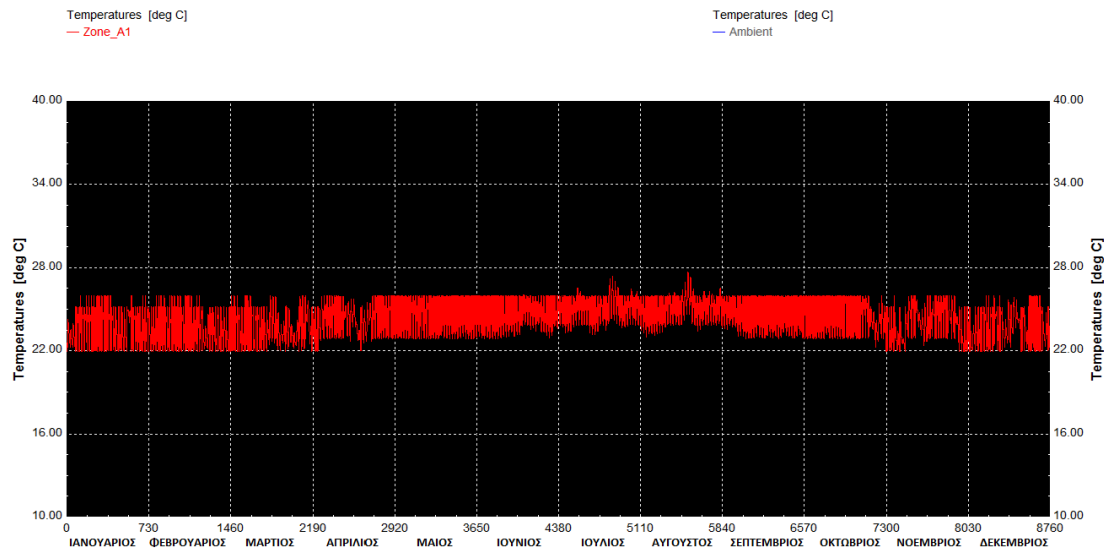
Διάγραμμα 5.4 : Σύστημα θέρμανσης – ψύξης κτιρίου

Όπως έχει προαναφερθεί, η αντλία θερμότητας θα λειτουργεί το χειμώνα για θέρμανση και το καλοκαίρι για ψύξη του χώρου. Η διάταξη περιλαμβάνει ένα θερμοστάτη θέρμανσης και ένα θερμοστάτη ψύξης. Ο πρώτος ενεργοποιεί το σύστημα θέρμανσης όταν κριθεί απαραίτητο, ενώ ο δεύτερος το σύστημα ψύξης. Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται οι παράμετροι και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της αντλίας και των θερμοστατών.

<b>Αντλία Θερμότητας</b>	
Συνολική Παροχή Αέρα	0.5 m <sup>3</sup> /s
Ονομαστική Ισχύς εσωτερικού ανεμιστήρα	186 W
Ονομαστική Ισχύς εξωτερικού ανεμιστήρα	207 W
<b>Θερμοστάτες</b>	
Θερμοκρασία Ενεργοποίησης Θέρμανσης	22 °C
Θερμοκρασία Ενεργοποίησης Ψύξης	26 °C

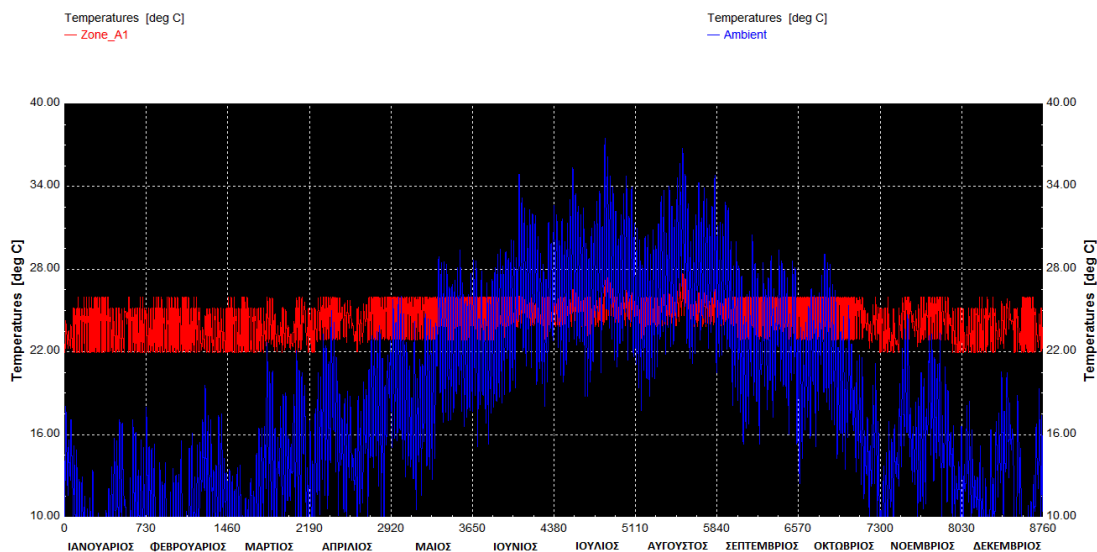
Πίνακας 5.6 : Παράμετροι λειτουργίας αντλίας θερμότητας και θερμοστατών

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό προφίλ στο εσωτερικό του κτιρίου για όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ έχει τεθεί πλέον σε λειτουργία το σύστημα θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου. Στόχος της απεικόνισης αυτής, είναι να φανεί το μέγεθος της επίδρασης της αντλίας θερμότητας στο θερμοκρασιακό προφίλ τόσο τους χειμερινούς μήνες όσο και τους καλοκαιρινούς.



Διάγραμμα 5.4 : Θερμοκρασιακό προφίλ στο εσωτερικό του χώρου με αντλία θερμότητας σε λειτουργία

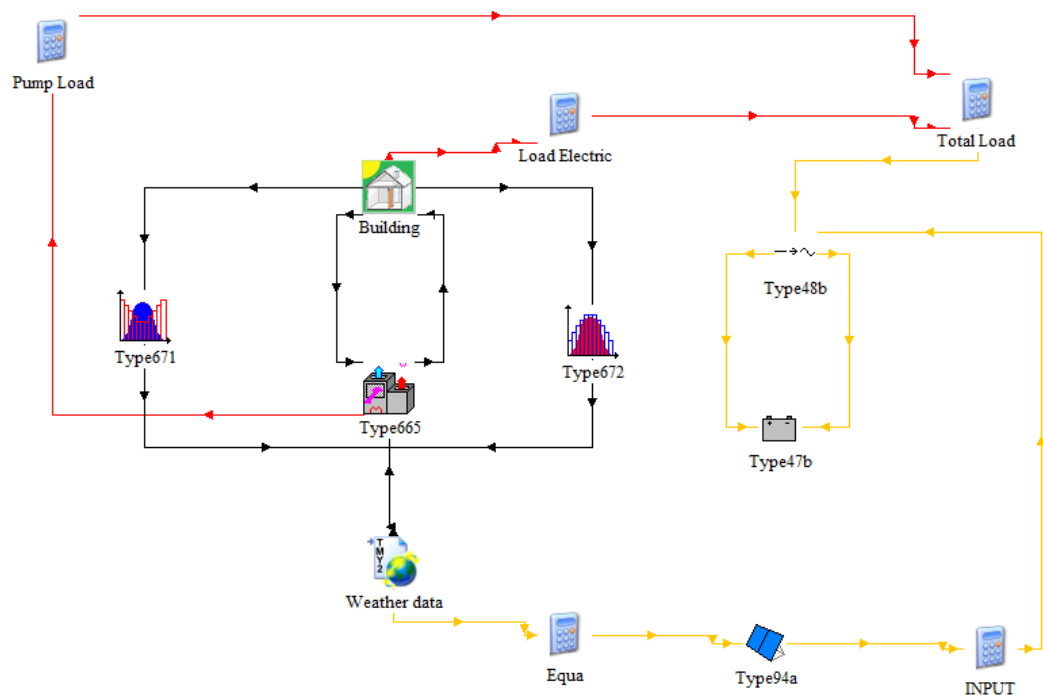
Ενδιαφέρον έχει και η απεικόνιση του θερμοκρασιακού προφίλ στο εσωτερικού χώρου, συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Είναι εμφανής η διατήρηση συνθηκών θερμικής άνεσης στο εσωτερικού χώρου, παρά τις ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες του περιβάλλοντος τους καλοκαιρινούς και τους χειμερινούς μήνες.



Διάγραμμα 5.5 : Θερμοκρασιακό προφίλ στο εσωτερικό του χώρου (Zone\_A1) συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας (Ambient), με αντλία θερμότητας σε λειτουργία.

## 5.4 Χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου

Η πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε ήταν η χρήση φωτοβολταϊκών με μπαταρία και inverter.



Εικόνα 5.2: Διάταξη φωτοβολταϊκών πάνελ με μπαταρία

Η συγκεκριμένη εγκατάσταση αποτελεί μια επένδυση η οποία εξετάζεται τόσο από ενεργειακή όσο και από οικονομική σκοπιά, προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Από ενεργειακής απόψεως, ο αντικειμενικός στόχος είναι το ετήσιο ηλεκτρικό φορτίο των 16155 kWh, να καλύπτεται σε ένα πολύ υψηλό ποσοστό (της τάξεως του 90-95%) από τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Όπως είναι φυσιολογικό, η αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας των φωτοβολταϊκών οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, κάτι που σε πρώτη φάση φαίνεται ικανοποιητικό καθώς μας οδηγεί σε ελαχιστοποίηση της χρήσης του δικτύου. Όμως η απεριόριστη αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας, αποτελεί μια ουτοπία καθώς αυξάνει σημαντικά το κόστος, κατά κύριο λόγο εξαιτίας των πάνελ, αλλά και των υπόλοιπων εξαρτημάτων όπως η μπαταρία και το inverter. Οπότε κρίνεται αναγκαίο να βρεθεί μια χρυσή τομή ανάμεσα στην ενεργειακή και την οικονομική βελτιστοποίηση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μέθοδοι με τις οποίες έγινε αυτή η διερεύνηση.

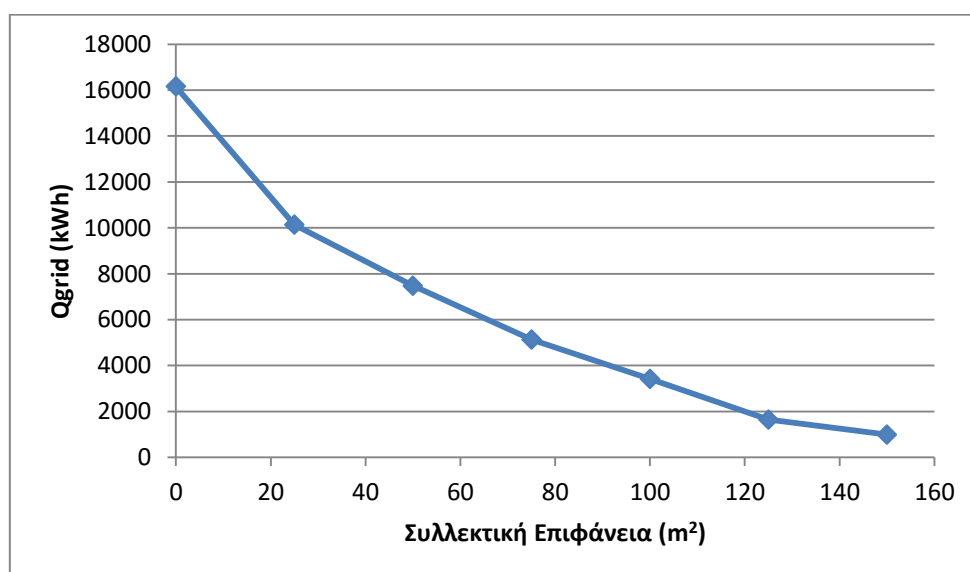
Πρώτο βήμα, ήταν η εύρεση της συλλεκτικής επιφάνειας με την οποία επιτυγχάνεται μικρό ποσοστό χρήσης δικτύου. Η διερεύνηση έγινε για συλλεκτικές επιφάνειες  $A_c$ , συγκεκριμένα 0, 25, 50, 75, 100, 125 και 150  $m^2$ . Στον πίνακα που

ακολουθεί φαίνεται η ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται από τα φωτοβολταϊκά  $Q_{el}$  και η ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται από το δίκτυο  $Q_{grid}$ , για τις διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες.

Συλλεκτική Επιφάνεια $A_c(m^2)$	$Q_{el}(kWh)$	$Q_{grid}(kWh)$
0	0	16158
25	5844	10314
50	8679	7478
75	11026	5132
100	12741	3417
125	14518	1640
150	15165	993

Πίνακας 5.7 : Ηλεκτρική Ενέργεια από φωτοβολταϊκά και δίκτυο για διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες

Όπως διαπιστώνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί, η ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται από το δίκτυο, μειώνεται όσο μεγαλύτερη είναι η συλλεκτική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιούνται.



Διάγραμμα 5.6 : Ετήσια ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται από το δίκτυο συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας

Το επόμενο μέγεθος που θα μας απασχολήσει είναι το ποσοστό κάλυψης των αναγκών της εγκατάστασης από τα φωτοβολταϊκά, που θα συμβολιστεί με  $f$ .

$$f = \left(1 - \frac{Q_{grid}}{Q_{total}}\right) \cdot 100\% \quad (5.1)$$

Όπου  $Q_{total}$  η συνολική ηλεκτρική ενέργεια από δίκτυο και φωτοβολταϊκά που προορίζεται για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου του κτιρίου. Ισχύει:

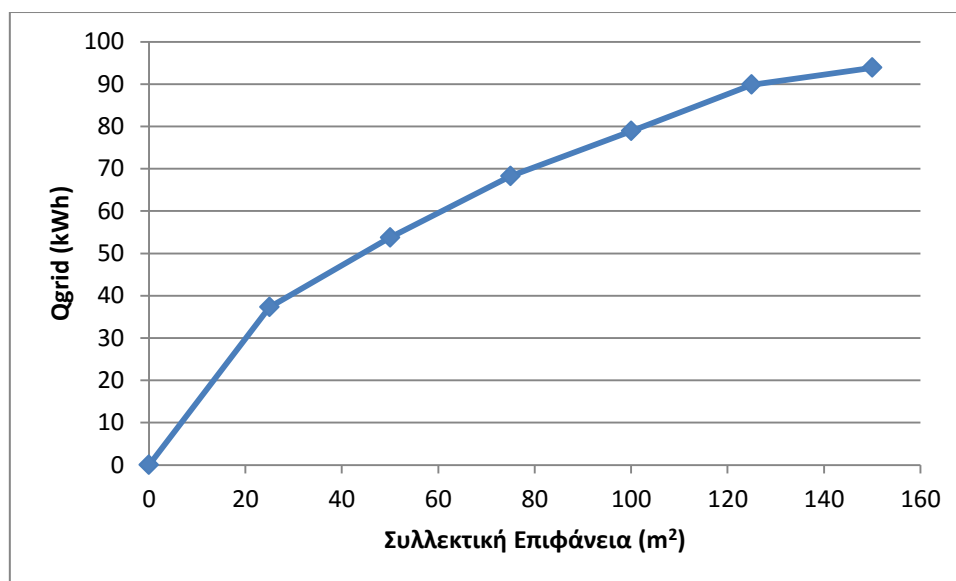
$$Q_{total} = Q_{grid} + Q_{el} \quad (5.2)$$

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το ποσοστό κάλυψης των αναγκών της εγκατάστασης  $f$  για διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες.

Συλλεκτική Επιφάνεια $A_c(m^2)$	$f(\%)$
0	0
25	51,89
50	53,72
75	68,24
100	78,86
125	89,85
150	93,86

Πίνακας 5.8 : Ενεργειακή κάλυψη από τα φωτοβολταϊκά συναρτήσει συλλεκτικής επιφάνειας

Όπως ήταν αναμενόμενο, η ενεργειακή κάλυψη από τα φωτοβολταϊκά αυξάνεται όσο αυξάνεται η συνολική επιφάνεια των συλλεκτών.



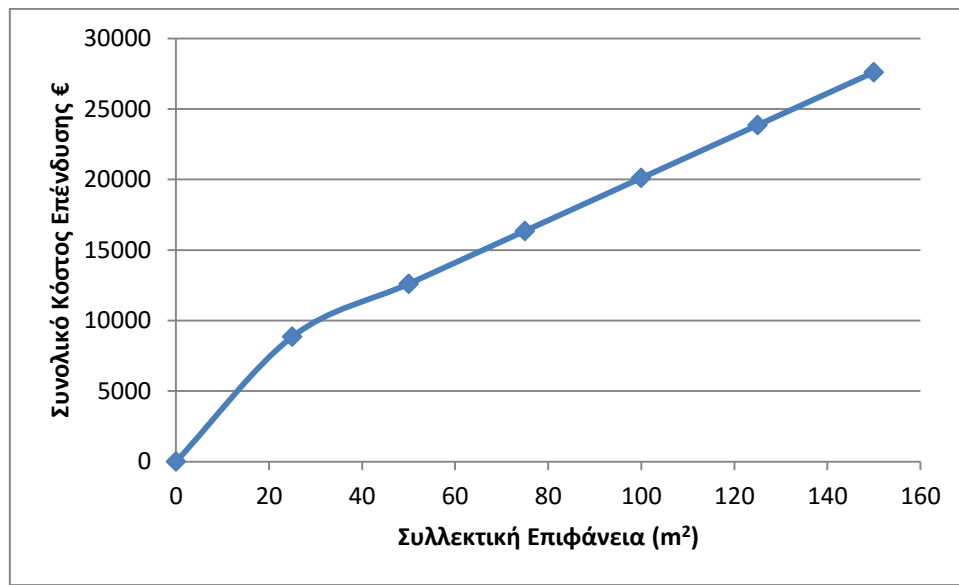
Διάγραμμα 5.7 : Ποσοστό ενεργειακής κάλυψης από τα φωτοβολταϊκά συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας

#### Κοστολόγηση εγκατάστασης

- Κόστος φωτοβολταϊκών: 150 €/m<sup>2</sup>
- Κόστος inverter: 1500€

- Κόστος εργασίας: 1000€
- Κόστος μπαταρίας: 2600€ για 2 μπαταρίες
- Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας: 0.2 €/kWh

Τα παραπάνω συνθέτουν το συνολικό κόστος επένδυσης της εγκατάστασης  $C_o$ , το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με τη συλλεκτική επιφάνεια.



Διάγραμμα 5.8 : Συνολικό κόστος επένδυσης συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το Καθαρό Παρόν Κόστος (Net Present Cost) της επένδυσης, το οποίο υπολογίζεται με παρόμοιο τρόπο με την Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value) και ουσιαστικά εκφράζει το συνολικό κόστος της επένδυσης ανηγμένο στην παρούσα κατάσταση. Ο σκοπός είναι να συμπεριληφθεί στη μελέτη το κόστος του χρήματος, παράμετρος που θα μεταβληθεί σε βάθος 25ετίας.

$$NPC = C_o + C_t \cdot \frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N} \quad (5.3)$$

Όπου:

- $C_o$  το αρχικό κόστος εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών σε €
- $C_t$  το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας σε € και ισχύει

$$C_t = 0.2 \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \cdot X \cdot E(\text{kWh}) \quad (5.4)$$



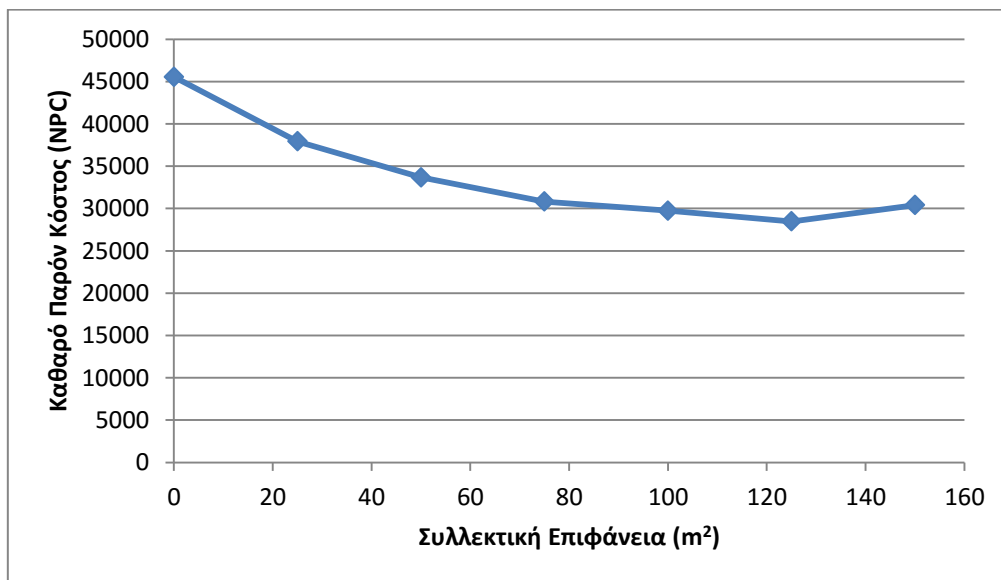
Όπου  $E$  η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο,  $0,2 \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}}\right)$  το κόστος του ρεύματος σήμερα και  $X$  ο συντελεστής μεταβλητότητας του χρήματος κατά τη διάρκεια της 25ετίας, για τον οποίο ισχύει:

$$X = \frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N} \quad (5.5)$$

- $N$  η περίοδος που εξετάζεται η επένδυση (25 χρόνια)
- $r$  το ποσοστό μεταβολής του κόστους του χρήματος που λαμβάνεται 5%

Συλλεκτική Επιφάνεια $A_c(m^2)$	Κόστος Εγκατάστασης PV (€)	$\frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N}$	Κόστος Ηλεκτρικού Ρεύματος (€)	$NPC$
0	0	14,093	45546	45546
25	8850	14,093	29073	37923
50	12600	14,093	21079	33679
75	16350	14,093	14466	30816
100	20100	14,093	9632	29732
<b>125</b>	<b>23850</b>	<b>14,093</b>	<b>4623</b>	<b>28472</b>
150	27600	14,093	2799	30399

Πίνακας 5.9 : Υπολογισμός καθαρού παρόντος κόστους (NPC) της επένδυσης



Διάγραμμα 5.9 : Καθαρό Παρόν Κόστος επένδυσης ανάλογα με τη συλλεκτική επιφάνεια

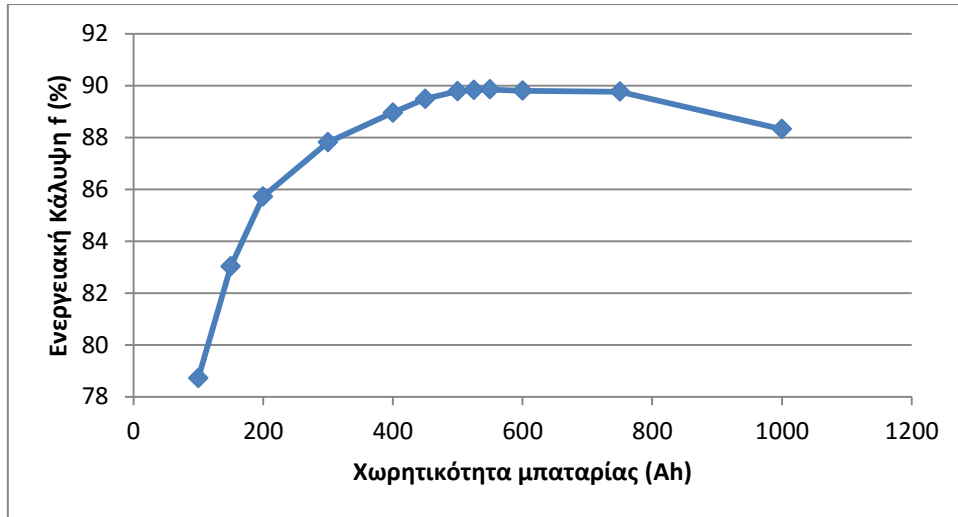
Όπως υποδεικνύεται και από το διάγραμμα, η συλλεκτική επιφάνεια για την οποία έχουμε ελαχιστοποίηση του Καθαρού Παρόντος Κόστους (NPC) άρα και τη βέλτιστη οικονομικά λύση, είναι η επιφάνεια  $A_c = 125 m^2$ . Η επιφάνεια αυτή επιλέγεται, καθώς εκτός από βέλτιστη οικονομικά είναι και βέλτιστη ενεργειακά. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.8, αφενός εξασφαλίζει ενεργειακή κάλυψη κοντά στο στόχο του 90% (για την ακρίβεια 89.85%) κι αφετέρου προσφέρει αύξηση ενεργειακής κάλυψης της τάξεως του 11% σε σχέση με την αμέσως μικρότερη συλλεκτική επιφάνεια που εξετάσθηκε (των  $100 m^2$ ) ενώ είναι σχετικά κοντά σε ενεργειακή κάλυψη (4% διαφορά) με την αμέσως επόμενη (των  $150 m^2$ ).

Να σημειωθεί ότι κατά τη διερεύνηση της εγκατάστασης έγινε βελτιστοποίηση για κάθε συλλεκτική επιφάνεια ως προς τη χωρητικότητα της μπαταρίας που χρησιμοποιήθηκε. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται η βελτιστοποίηση για την επιφάνεια των  $125 m^2$  που είναι και αυτή που επιλέχθηκε τελικώς.

Cell Energy Capacity (Ah)	Ετήσια ηλεκτρική ενέργεια από PV (kWh)	Ετήσια ηλεκτρική ενέργεια από δίκτυο (kWh)	Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)	Ενεργειακή Κάλυψη (%)
100	12718	3438	16156	78.71
150	13415	2741	16156	83.03
200	13850	2307	16157	85.72
300	14188	1969	16157	87.81
400	14373	1785	16158	88.95
450	14459	1699	16158	89.48
500	14507	1651	16158	89.78
525	14515	1643	16158	89.83
<b>550</b>	<b>14518</b>	<b>1640</b>	<b>16158</b>	<b>89.85</b>
600	14511	1648	16159	89.80
750	14504	1654	16158	89.76
1000	14271	1887	16158	88.32

Πίνακας 5.10 : Βελτιστοποίηση χωρητικότητας μπαταρίας

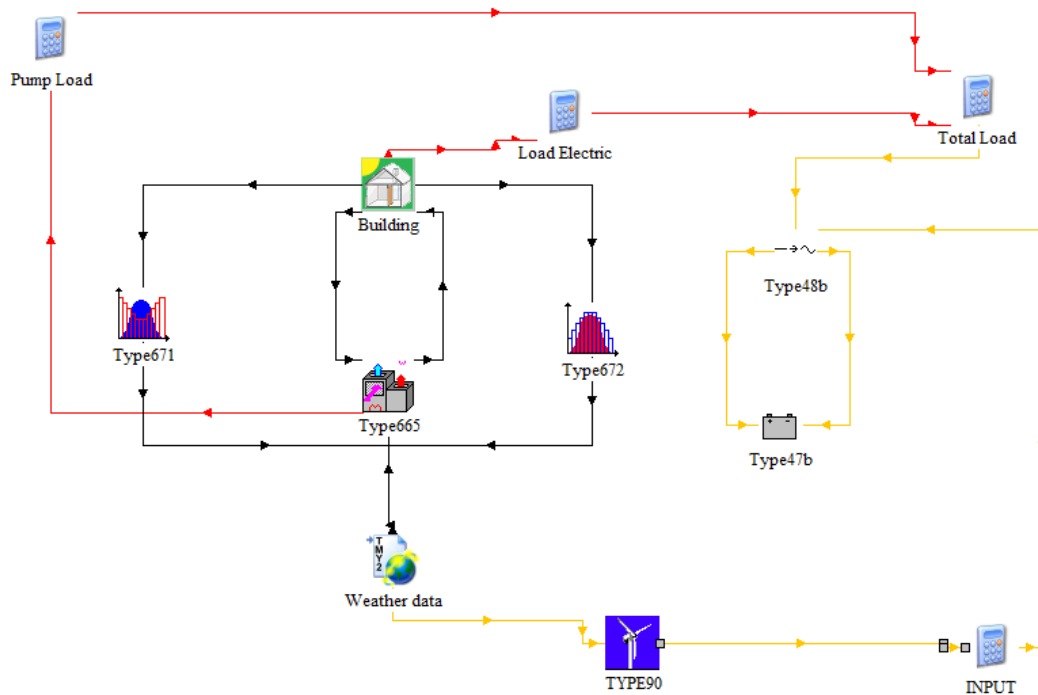
Παρατηρείται ότι η βέλτιστη χωρητικότητα της μπαταρίας (Cell Energy Capacity) για την οποία μεγιστοποιείται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά είναι  $550 Ah$ . Το διάγραμμα που ακολουθεί, δείχνει το σημείο μεγιστοποίησης της ενεργειακής κάλυψης.



Διάγραμμα 5.10: Ενεργειακή κάλυψη από φωτοβολταϊκά επιφάνειας  $125 \text{ m}^2$  συναρτήσει χωρητικότητας της μπαταρίας

### 5.5 Χρήση οικιακής ανεμογεννήτριας για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου

Η δεύτερη περίπτωση που εξετάσθηκε ήταν η εγκατάσταση οικιακής ανεμογεννήτριας με μπαταρία και inverter.



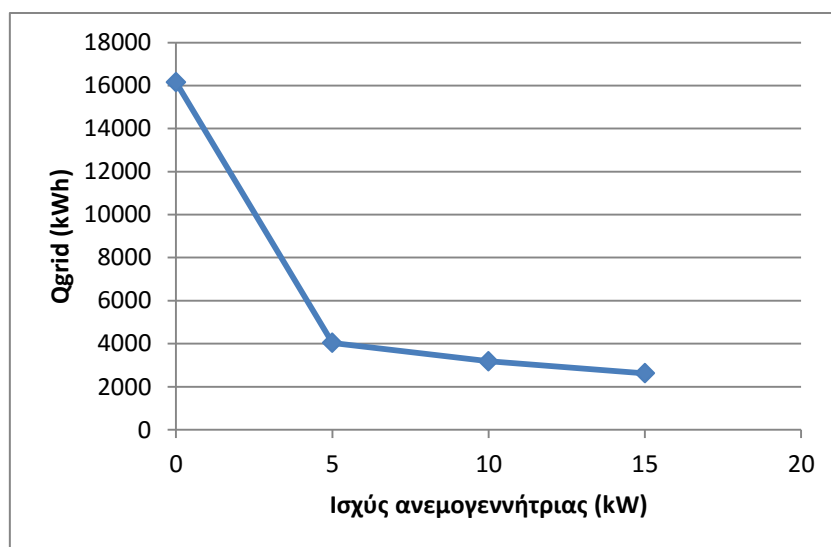
Εικόνα 5.3 : Διάταξη ανεμογεννήτριας με μπαταρία- inverter

Όπως και στην πρώτη περίπτωση, ο στόχος είναι να υπάρξει ισορροπία ανάμεσα στην ενεργειακά και την οικονομικά βέλτιστη λύση. Εξετάζονται ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 5, 10 και 15 kW , προκειμένου να καλυφθεί εν μέρει το ηλεκτρικό φορτίο του κτιρίου. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται από την ανεμογεννήτρια  $Q_{el}$  και η ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται από το δίκτυο  $Q_{grid}$  , για τις τρεις διαφορετικές ανεμογεννήτριες.

Ονομαστική ισχύς ανεμογεννήτριας (kW)	$Q_{el}(kWh)$	$Q_{grid}(kWh)$
0	0	16158
5	12124	4034
10	12980	3178
15	13537	2621

Πίνακας 5.11 : Ετήσια ηλεκτρική ενέργεια από ανεμογεννήτρια και δίκτυο συναρτήσει της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας

Όπως διαπιστώνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί, όσο μεγαλύτερης ισχύος ανεμογεννήτρια χρησιμοποιείται, τόσο μικρότερη είναι η ενέργεια που λαμβάνεται από το δίκτυο.



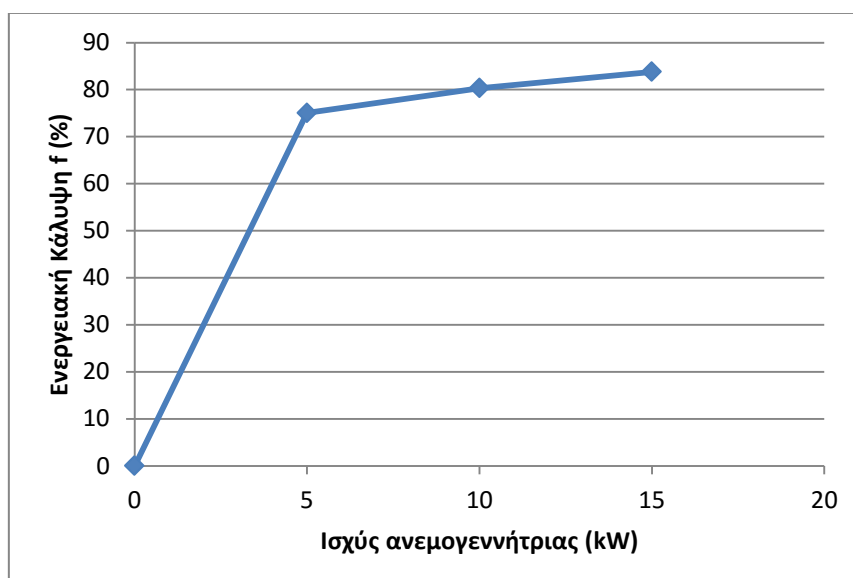
Διάγραμμα 5.11 : Ετήσια ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται από το δίκτυο συναρτήσει της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ενεργειακή κάλυψη  $f$ , για τα διάφορα μεγέθη ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιούνται.

Ονομαστική ισχύς ανεμογεννήτριας (kW)	$f(\%)$
0	0
5	75,04
10	80,33
15	83,78

Πίνακας 5.12 : Ενεργειακή κάλυψη από την ανεμογεννήτρια συναρτήσει της ονομαστικής ισχύος της

Όπως ήταν αναμενόμενο, η ενεργειακή κάλυψη από την ανεμογεννήτρια αυξάνεται όσο αυξάνεται η ονομαστική ισχύς της.

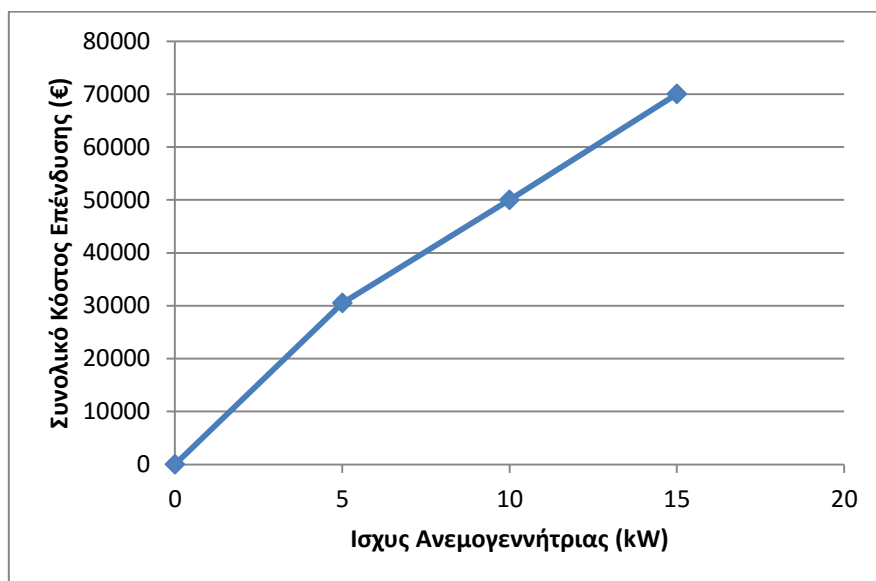


Διάγραμμα 5.12 : Ποσοστό ενεργειακής κάλυψης από την ανεμογεννήτρια για ονομαστικές ισχύς 5,10,15 kW

#### Κοστολόγηση εγκατάστασης [43]

- Κόστος ανεμογεννήτριας 5 kW: 25000 €
- Κόστος ανεμογεννήτριας 10 kW: 44500 €
- Κόστος ανεμογεννήτριας 15 kW: 64500 €
- Κόστος inverter: 1500€
- Κόστος εργασίας: 1000€
- Κόστος μπαταρίας: 3000€ για 2 μπαταρίες
- Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας: 0.2 €/kWh

Τα παραπάνω συνθέτουν το συνολικό κόστος επένδυσης της εγκατάστασης  $C_o$ , το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος της ανεμογεννήτριας.



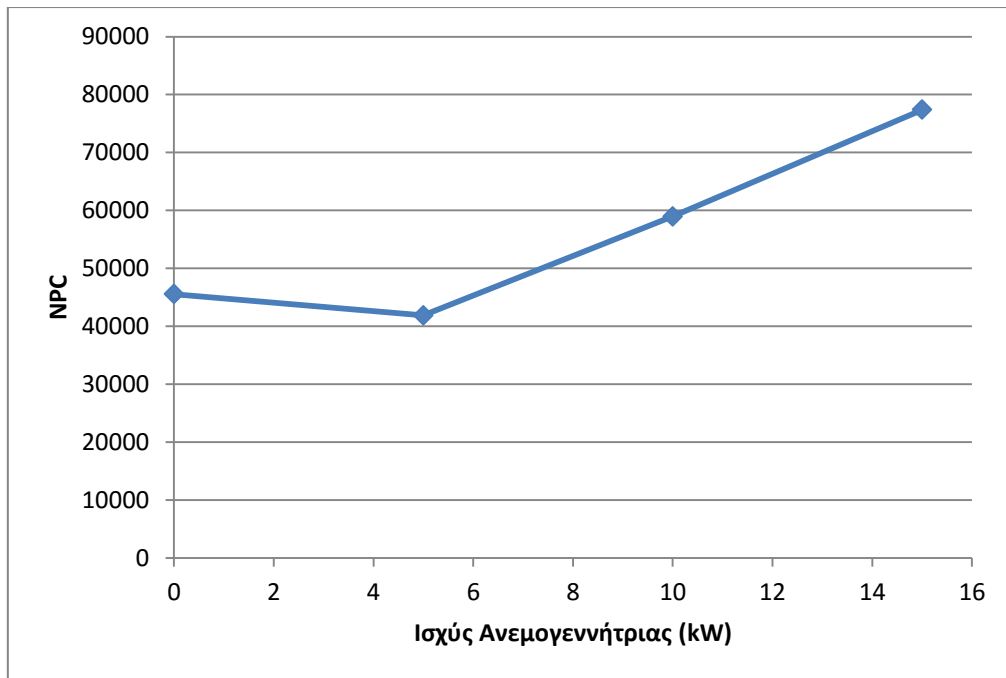
Διάγραμμα 5.13: Συνολικό κόστος επένδυσης ανάλογα με το μέγεθος της ανεμογεννήτριας

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το Καθαρό Παρόν Κόστος (NPC) της επένδυσης όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, με χρήση της εξίσωσης (5.3). Και σε αυτή την περίπτωση η περίοδος που εξετάζεται η επένδυση είναι 25 χρόνια, το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος  $0.2 \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right)$  ενώ ο συντελεστής  $r$  λαμβάνεται 5%. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα της οικονομικής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε.

Ονομαστική ισχύς ανεμογεννήτριας (kW)	Κόστος Εγκατάστασης Α/Γ (€)	$\frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N}$	Κόστος Ηλεκτρικού Ρεύματος (€)	<i>NPC</i>
0	0	14,093	45546	45546
<b>5</b>	<b>30500</b>	<b>14,093</b>	<b>11370</b>	<b>41870</b>
10	50000	14,093	8958	58958
15	70000	14,093	7388	77388

Πίνακας 5.13 : Υπολογισμός Καθαρού Παρόντος Κόστους (NPC) της επένδυσης

Ακολουθεί η απεικόνιση της μεταβολής, του Καθαρού Παρόντος Κόστους (NPC) συναρτήσει της ονομαστικής ισχύος της εκάστοτε ανεμογεννήτριας.



Διάγραμμα 5.14 : Καθαρό Παρόν Κόστος επένδυσης ανάλογα με την ισχύ της ανεμογεννήτριας

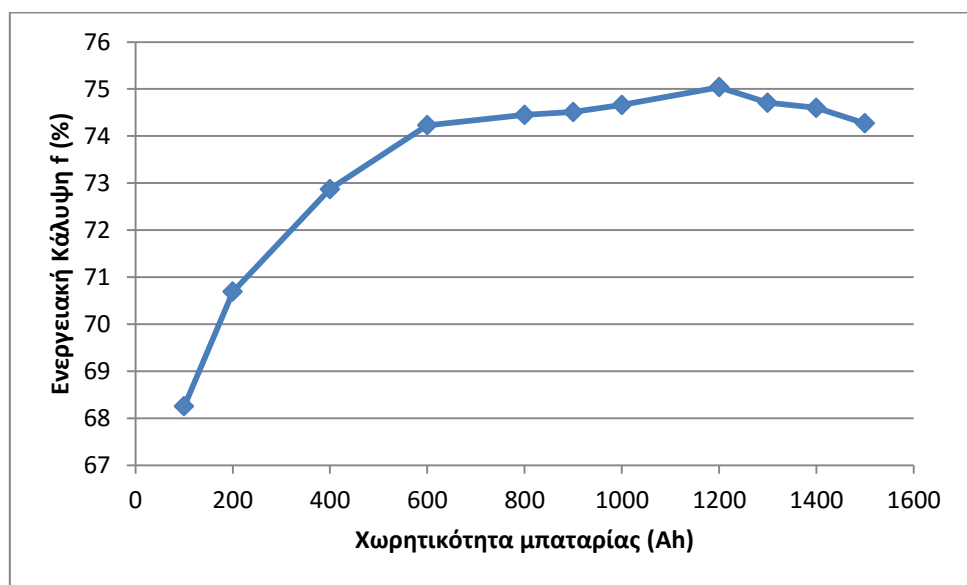
Όπως υποδεικνύεται και από το διάγραμμα, η ονομαστική ισχύς για την οποία έχουμε ελαχιστοποίηση του Καθαρού Παρόντος Κόστους (NPC) άρα και τη βέλτιστη οικονομικά λύση, είναι 5 kW. Από ενεργειακής απόψεως, η ανεμογεννήτρια των 5 kW, προσφέρει ενεργειακή κάλυψη 75.04%. Η τιμή της ενεργειακής κάλυψης δεν είναι το ίδιο υψηλή όπως στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών. Παρόλα αυτά, η χρήση των ανεμογεννητριών 10 kW και 15 kW, κρίνεται οικονομικά ασύμφορη καθώς το κόστος αυξάνεται ραγδαία, ενώ και η ανύψωση στην ενεργειακή κάλυψη δεν είναι σημαντική.

Κατά τη διερεύνηση της εγκατάστασης έγινε και εδώ βελτιστοποίηση για κάθε ισχύ ανεμογεννήτριας ως προς τη χωρητικότητα της μπαταρίας που χρησιμοποιήθηκε. Παρουσιάζεται η βελτιστοποίηση για την ανεμογεννήτρια των 5 kW, καθώς οι άλλες δυο κρίθηκαν ακατάλληλες.

Cell Energy Capacity (Ah)	Ετήσια ηλεκτρική ενέργεια από Α/Γ (kWh)	Ετήσια ηλεκτρική ενέργεια από δίκτυο (kWh)	Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)	Ενεργειακή Κάλυψη (%)
100	11027	5130	16157	68.25
200	11421	4736	16157	70.69
400	11775	4383	16158	72.87
600	11994	4163	16158	74.23
800	12030	4128	16158	74.45
900	12040	4118	16158	74.51
1000	12064	4094	16158	74.66
<b>1200</b>	<b>12124</b>	<b>4034</b>	<b>16158</b>	<b>75.04</b>
1300	12071	4086	16157	74.71
1400	12054	4103	16157	74.60
1500	12001	4157	16158	74.27

Πίνακας 5.14 : Βελτιστοποίηση χωρητικότητας μπαταρίας

Παρατηρείται ότι η βέλτιστη χωρητικότητα της μπαταρίας (Cell Energy Capacity) για την οποία μεγιστοποιείται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ανεμογεννήτρια είναι 1200 Ah, δηλαδή κάτι παραπάνω από διπλάσια σε σχέση με τη χωρητικότητα που απαιτούσαν τα φωτοβολταϊκά. Το διάγραμμα που ακολουθεί, δείχνει το σημείο μεγιστοποίησης της ενεργειακής κάλυψης.

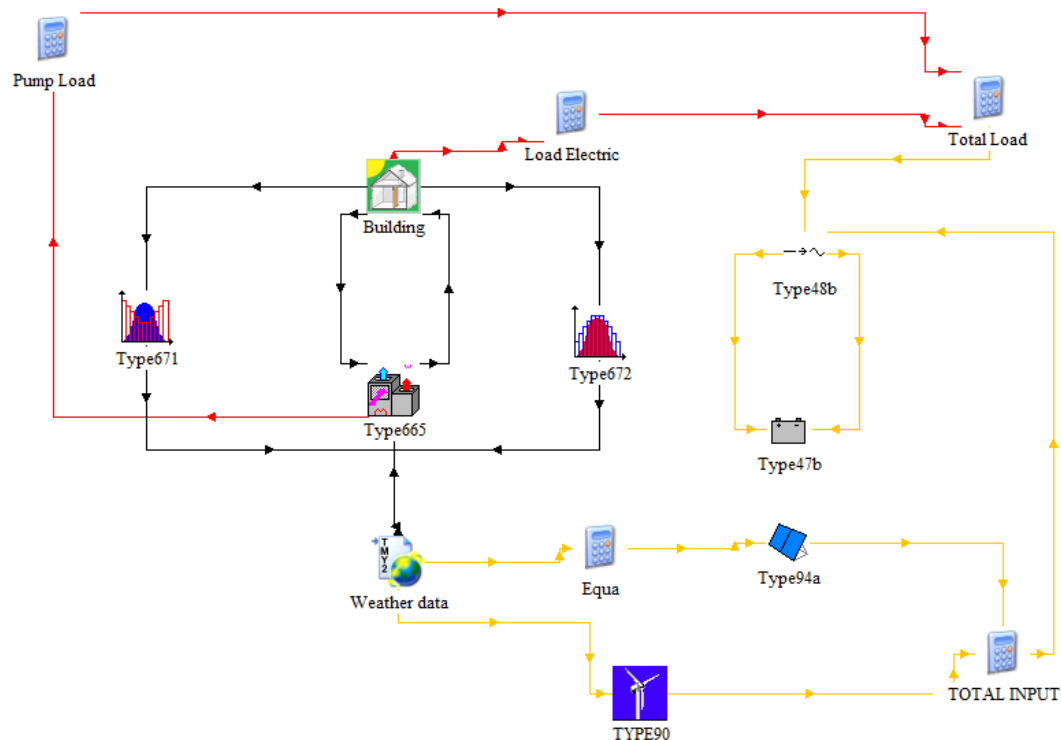


Διάγραμμα 5.15: Ενεργειακή κάλυψη από ανεμογεννήτρια ισχύος 5 kW συναρτήσει χωρητικότητας της μπαταρίας



## 5.6 Χρήση συνδυασμού ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκών πάνελ για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου

Η επόμενη περίπτωση που εξετάζεται είναι ο συνδυασμός ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκών, υπό την παρουσία inverter και μπαταρίας, προκειμένου να γίνει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου του κτιρίου.



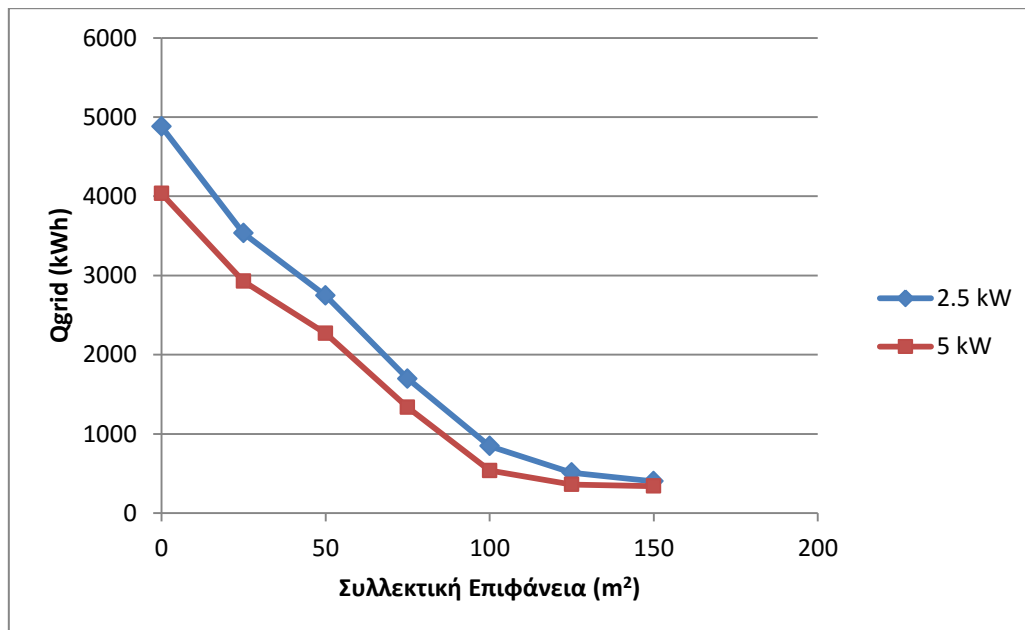
Εικόνα 5.4 : Διάταξη φωτοβολταϊκών – ανεμογεννήτριας με μπαταρία – inverter

Στην περίπτωση αυτή το ηλεκτρικό φορτίο θα καλύπτεται σε ένα ποσοστό από τα φωτοβολταϊκά και στο υπόλοιπο από την ανεμογεννήτρια. Η διερεύνηση γίνεται για συλλεκτικές επιφάνειες φωτοβολταϊκών 25, 50, 75, 100, 125, 150 σε συνδυασμό με ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 2.5, 5, 10, 15 kW. Ωστόσο, παρουσιάζονται μόνο οι περιπτώσεις της ανεμογεννήτριας των 2.5 kW και των 5 kW, καθώς οι ανεμογεννήτριες των 10 και 15 kW ήταν εξαιρετικά δαπανηρές και κρίθηκαν ακατάλληλες για το κτίριο αυτό. Η ανεμογεννήτρια σε συνδυασμό με τα φωτοβολταϊκά παράγουν ετησίως ηλεκτρική ενέργεια  $Q_{el}$ , η οποία σε συνδυασμό με ένα μικρό ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο ηλεκτροδότησης  $Q_{grid}$ , καλύπτει τις ανάγκες του κτιρίου σε ηλεκτρισμό. Ακολουθεί πίνακας στον οποίο συνοψίζονται τα αποτελέσματα.

Συλλεκτική Επιφάνεια $A_c(m^2)$	Ισχύς ανεμογεννήτριας (kW)	$Q_{el}(kWh)$	$Q_{grid}(kWh)$
0	2.5	11279	4879
25		12625	3533
50		13412	2746
75		14461	1697
100		15313	845
125		15648	510
150		15757	401
0	5	12124	4034
25		13229	2928
50		13890	2268
75		14823	1335
100		15622	536
125		15797	361
150		15818	340

Πίνακας 5.15: Ετήσια ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ και δίκτυο για όλες τους συνδυασμούς συλλεκτικής επιφάνειας Φ/Β και ονομαστικής ισχύος Α/Γ

Στο γράφημα που ακολουθεί διαπιστώνεται ότι με την ανεμογεννήτρια των 5 kW έχουμε σταθερά μικρότερη χρήση του δικτύου.



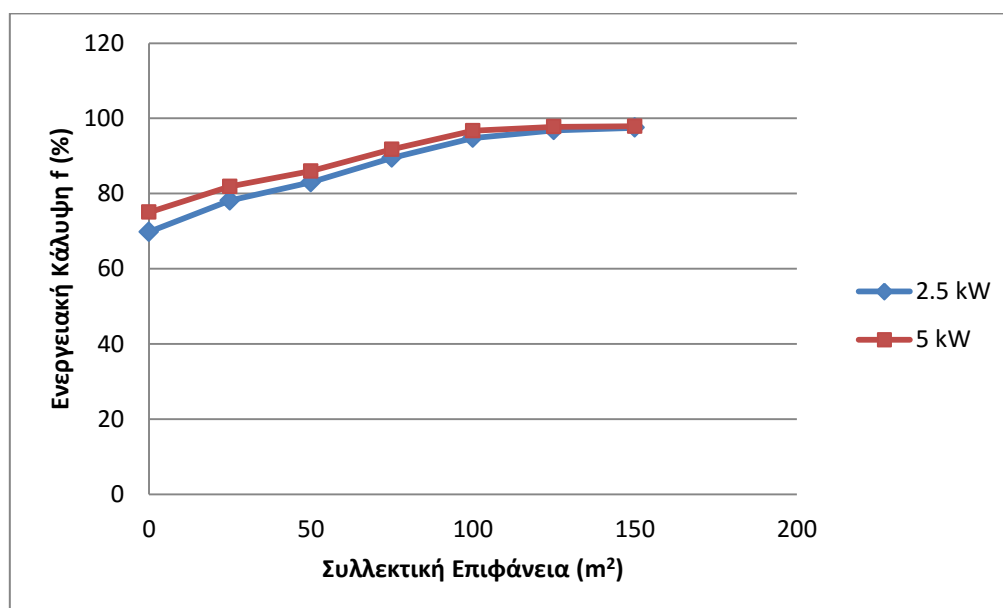
Διάγραμμα 5.16: Ετήσια ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται από το δίκτυο συναρτήσει συλλεκτικής επιφάνειας Φ/Β και ονομαστικής ισχύος Α/Γ

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ενεργειακή κάλυψη  $f$ , για όλους τους συνδυασμούς ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών.

Συλλεκτική Επιφάνεια $A_c(m^2)$	Ισχύς ανεμογεννήτριας ( $kW$ )	$f(\%)$
0	2.5	69,81
25		78,14
50		83,01
75		89,5
100		94,77
125		96,85
150		97,52
0	5	75,04
25		81,88
50		85,97
75		91,74
100		96,68
125		97,77
150		97,9

Πίνακας 5.16: Ενεργειακή κάλυψη από ανεμογεννήτρια και φωτοβολταϊκά

Η ενεργειακή κάλυψη όπως είναι φυσιολογικό αυξάνεται όσο αυξάνεται η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας και η συλλεκτική επιφάνεια των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών πάνελ.

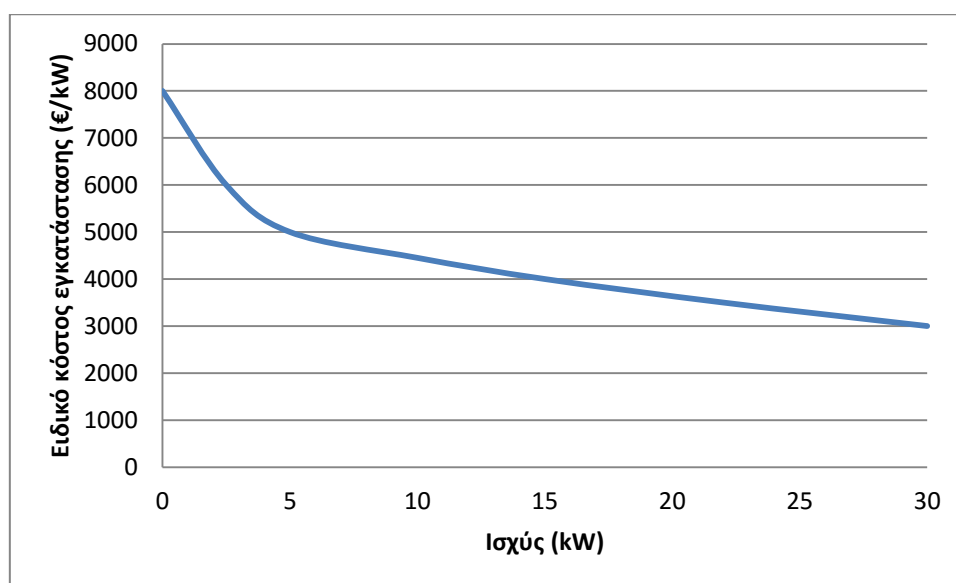


Διάγραμμα 5.17: Ποσοστό ενεργειακής κάλυψης από Φ/Β και Α/Γ

### Κοστολόγηση εγκατάστασης [43]

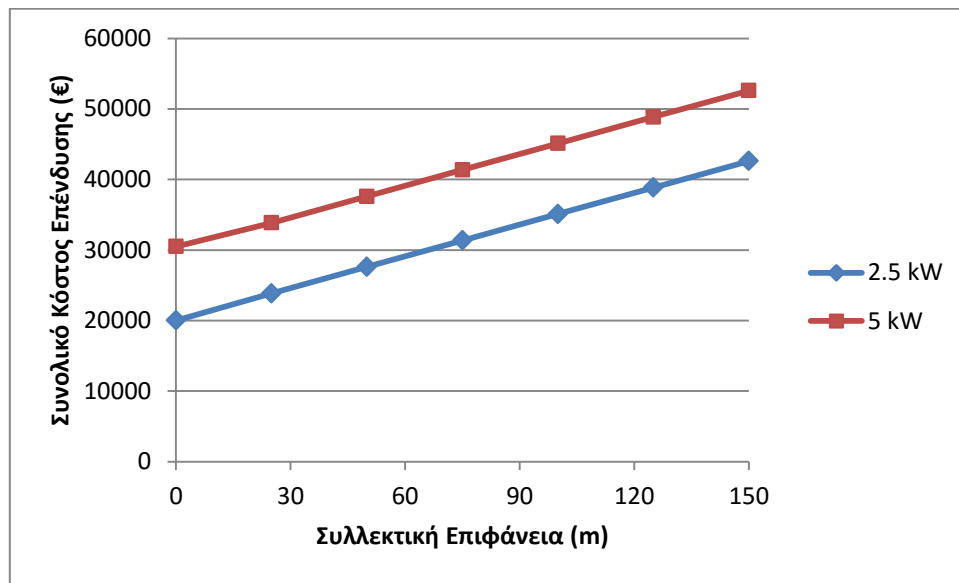
- Κόστος ανεμογεννήτριας 2.5 kW : 15000€
- Κόστος ανεμογεννήτριας 5 kW : 25000 €
- Κόστος inverter : 1500€
- Κόστος μπαταρίας: 2600€ για 2 μπαταρίες
- Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας: 0.2 €/kWh

Να σημειωθεί ότι κατά την κοστολόγηση των ανεμογεννητριών, λήφθηκε υπόψη η οικονομία κλίμακος. Από τις τιμές των ανεμογεννητριών παρατηρείται ότι δεν έχουν το ίδιο κόστος ανά kW, αλλά αντίθετα το κόστος μειώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος τους. Το διάγραμμα που ακολουθεί είναι ενδεικτικό.



Διάγραμμα 5.18 : Οικονομία κλίμακος

Στη συνέχεια υπολογίζεται το συνολικό κόστος της επένδυσης για κάθε συνδυασμό ανεμογεννήτριας (2.5 ή 5 kW) και συλλεκτικής επιφάνειας φωτοβολταϊκών (25, 50, 75, 100, 125, 150 m<sup>2</sup>). Όπως είναι επόμενο, η χρήση της ανεμογεννήτριας των 5 kW έχει ως αποτέλεσμα ένα σταθερά αυξημένο κόστος σε σχέση με την ανεμογεννήτρια των 2.5 kW, ανεξαρτήτως της συλλεκτικής επιφάνειας, ενώ αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας επιφέρει αύξηση του κόστους. Το γράφημα που ακολουθεί είναι ενδεικτικό.



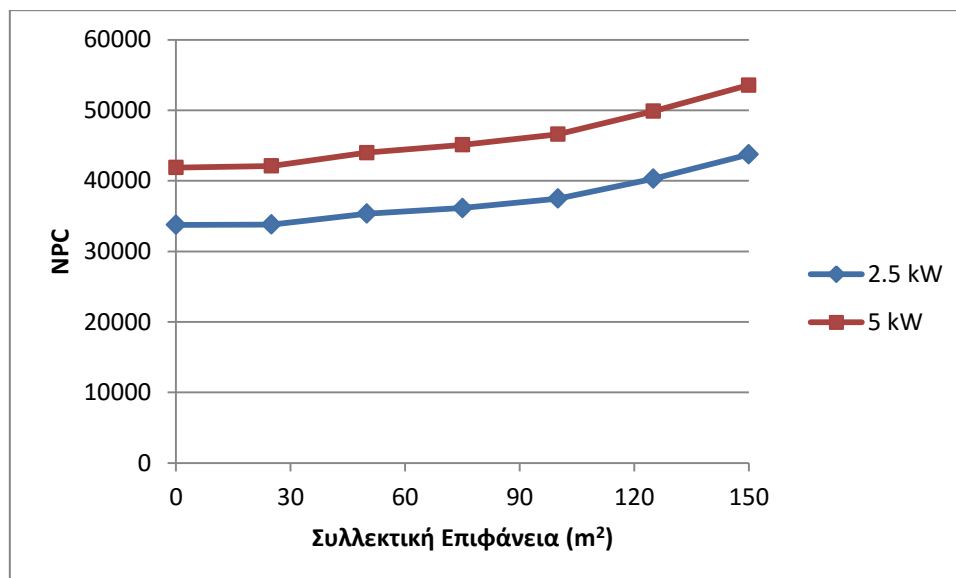
Διάγραμμα 5.19: Συνολικό κόστος επένδυσης ανάλογα με την ισχύ της Α/Γ και τη συλλεκτική επιφάνεια των Φ/Β

Στη συνέχεια με χρήση της εξίσωσης (5.3) υπολογίζεται το Καθαρό Παρόν Κόστος (NPC) της επένδυσης. Όλοι οι παράμετροι έχουν την ίδια τιμή με την προηγούμενη περίπτωση.

Συλλεκτική Επιφάνεια $A_c(m^2)$	Ισχύς Α/Γ (kW)	Ποσοστό Χρήσης Δικτύου (%)	Κόστος Εγκατάστασης Α/Γ & Φ/Β (€)	Κόστος Λειτουργίας (€)	NPC
0	2.5	30,19	20000	13753	33753
25		21,86	23850	9956	33809
50		16,99	27600	7740	35340
<b>75</b>		<b>10,50</b>	<b>31350</b>	<b>4783</b>	<b>36133</b>
100		5,23	35100	2382	37482
125		3,15	38850	1437	40287
150		2,48	42600	1130	43730
<hr/>					
0	5	24,96	30500	11370	41871
25		18,12	33850	8253	42103
50		14,03	37600	6393	43993
75		8,26	41350	3763	45113
100		3,32	45100	1511	46611
125		2,23	48850	1017	49867
150		2,10	52600	958	53558

Πίνακας 5.17 : Υπολογισμός καθαρού παρόντος κόστους

Ακολουθώς γίνεται απεικόνιση του Καθαρού Παρόντος Κόστους της επένδυσης, ανάλογα με τη συλλεκτική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιούνται και την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας.

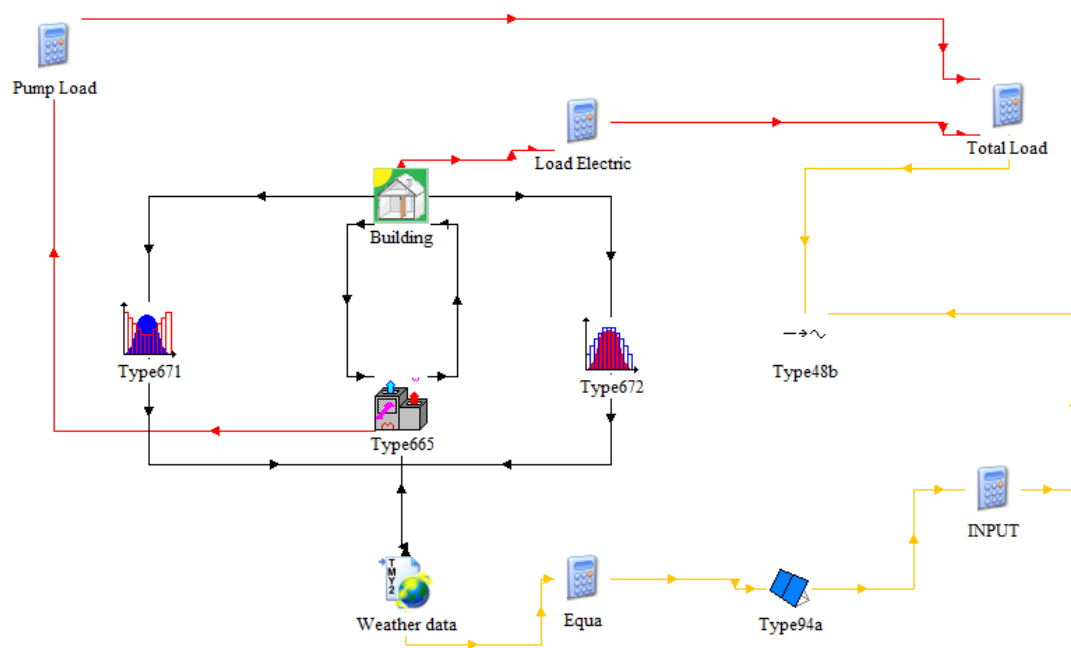


Διάγραμμα 5.19 : Καθαρό Παρόν Κόστος επένδυσης ανάλογα με την ισχύ της Α/Γ και τη συλλεκτική επιφάνεια των Φ/Β

Εξετάζοντας το γράφημα του Καθαρού Παρόντος Κόστους προκύπτουν διάφορα συμπεράσματα. Αρχικά, δεν υπάρχει κάποιο σημείο στο οποίο η καμπύλη να παρουσιάζει ελάχιστο, άρα εκ πρώτης όψews δεν υπάρχει κάποια απόλυτα βέλτιστη οικονομική λύση. Η τελική λύση που θα επιλεγεί σε αυτή την περίπτωση, θα είναι συνδυασμός ενεργειακού και οικονομικού οφέλους. Η ενεργειακή κάλυψη που έχουμε σαν στόχο είναι περίπου 90% , ενώ το κόστος πρέπει να διατηρηθεί όσο το δυνατόν χαμηλότερα. Η λύση που κρίνεται πιο συμφέρουσα συνολικά είναι η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ συνολικής επιφάνειας 75 m<sup>2</sup> σε συνδυασμό με ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 2.5 kW. Η επιλογή αυτή εκτός του ότι έχει πολύ μικρές ανάγκες για ηλεκτροδότηση από το δίκτυο (10.5%), εξοικονομεί χώρο σε σχέση με την εγκατάσταση των 125 m<sup>2</sup> φωτοβολταϊκών για παράδειγμα που παρέχει την ίδια ενεργειακή κάλυψη. Ωστόσο, είναι πιο δαπανηρή λύση καθώς το κόστος ανέρχεται σε 36133€ έναντι 28481€ . Παρόλα αυτά είναι αξιόλογη περίπτωση λόγω της οικονομίας χώρου που προσφέρει, χαρακτηριστικό μείζονος σημασίας ειδικά για αστικά κέντρα.

## 5.7 Χρήση του συστήματος Net Metering για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου

Η επόμενη περίπτωση που εξετάζεται είναι το σύστημα αυτοπαραγωγής με ενεργειακό συμψηφισμό (Net Metering). Η εγκατάσταση αυτή περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πάνελ με τα οποία παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς όμως την παρουσία μπαταρίας. Έτσι, στην περίπτωση που η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από την κατανάλωση η περισσευούμενη ενέργεια παρέχεται δωρεάν στο δίκτυο. Αν η παραγωγή είναι μικρότερη από την κατανάλωση, η διαφορά καλύπτεται από το δίκτυο ηλεκτροδότησης. Η εγκατάσταση απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



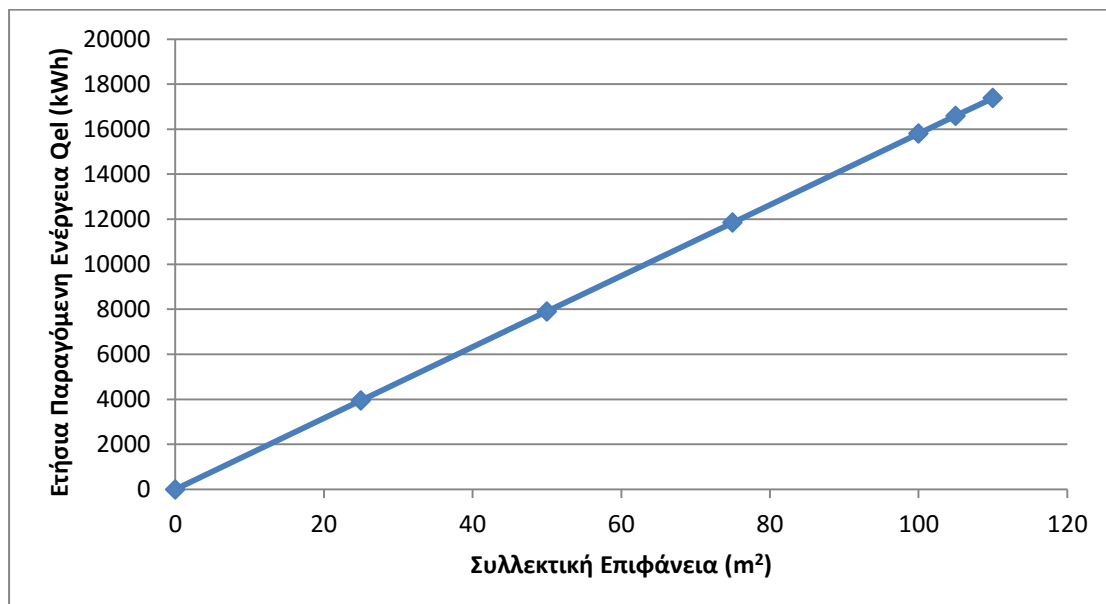
Εικόνα 5.5 : Διάταξη συστήματος Net Metering

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, έτσι και εδώ, στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της χρήσης δικτύου. Έγινε διερεύνηση για συλλεκτικές επιφάνειες 25, 50, 75, 100, 105 και 110 m<sup>2</sup>. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται από τα φωτοβολταϊκά  $Q_{el}$  και η ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται από το δίκτυο  $Q_{grid}$ , για τις διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες.

Συλλεκτική Επιφάνεια $A_c(m^2)$	$Q_{el}(kWh)$	$Q_{grid}(kWh)$
0	0	16155
25	3950	12205
50	7901	8254
75	11852	4303
100	15803	352
105	16593	0
110	17383	0

Πίνακας 5.18 : Ετήσια παραγόμενη ενέργεια από το σύστημα Net Metering συναρτήσει συλλεκτικής επιφάνειας Φ/Β

Όπως γίνεται αντιληπτό και από το διάγραμμα που ακολουθεί η αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας των φωτοβολταϊκών, οδηγεί σε μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης οι συλλεκτικές επιφάνειες των 105 και 110 m<sup>2</sup> , επιτυγχάνουν μηδενική χρήση δικτύου, καθώς ολόκληρο το ηλεκτρικό φορτίο του κτιρίου καλύπτεται από το σύστημα Net Metering και ένα ποσό ενέργειας επιστρέφεται στο δίκτυο.



Διάγραμμα 5.20 : Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια συναρτήσει συλλεκτικής επιφάνειας Φ/Β με το σύστημα Net Metering

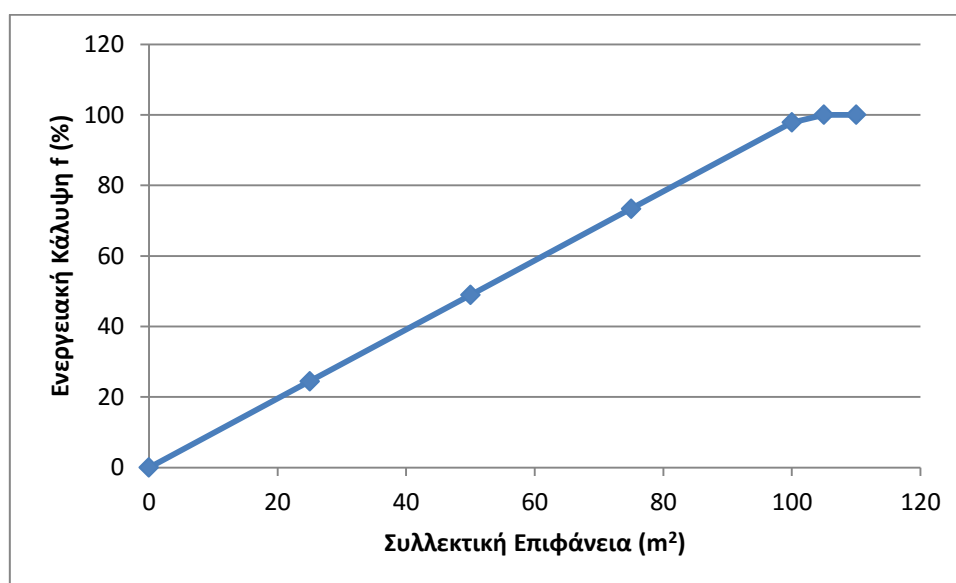


Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το ποσοστό κάλυψης των αναγκών της εγκατάστασης  $f$  για διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες.

Συλλεκτική Επιφάνεια $A_c(m^2)$	$f(\%)$
0	0
25	24,45
50	48,91
75	73,36
100	97,82
105	100
110	100

Πίνακας 5.19 : Ενεργειακή κάλυψη από τα φωτοβολταϊκά συναρτήσει συλλεκτικής επιφάνειας

Όπως ήταν αναμενόμενο, η ενεργειακή κάλυψη από τα φωτοβολταϊκά αυξάνεται όσο αυξάνεται η συνολική επιφάνεια των συλλεκτών.



Διάγραμμα 5.21 : Ποσοστό ενεργειακής κάλυψης από τα φωτοβολταϊκά συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας

Σε πρώτη φάση επιλέγεται η επιφάνεια των 105 m<sup>2</sup>, η οποία προσφέρει 100% ενεργειακή κάλυψη. Για τη συγκεκριμένη συλλεκτική επιφάνεια, πραγματοποιείται διερεύνηση ως προς την κλίση του συλλέκτη προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη κλίση που οδηγεί σε μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Ο πίνακας που ακολουθεί είναι ενδεικτικός.

Κλίση Συλλέκτη (°)	Ετήσια Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (kWh)
0	14969
5	15462
10	15867
15	16183
20	16410
25	16547
<b>30</b>	<b>16593</b>
35	16549
40	16415
45	16191
50	15880
55	15483
60	15001
65	14438
70	13797
75	13082
80	12300
85	11456
90	10561

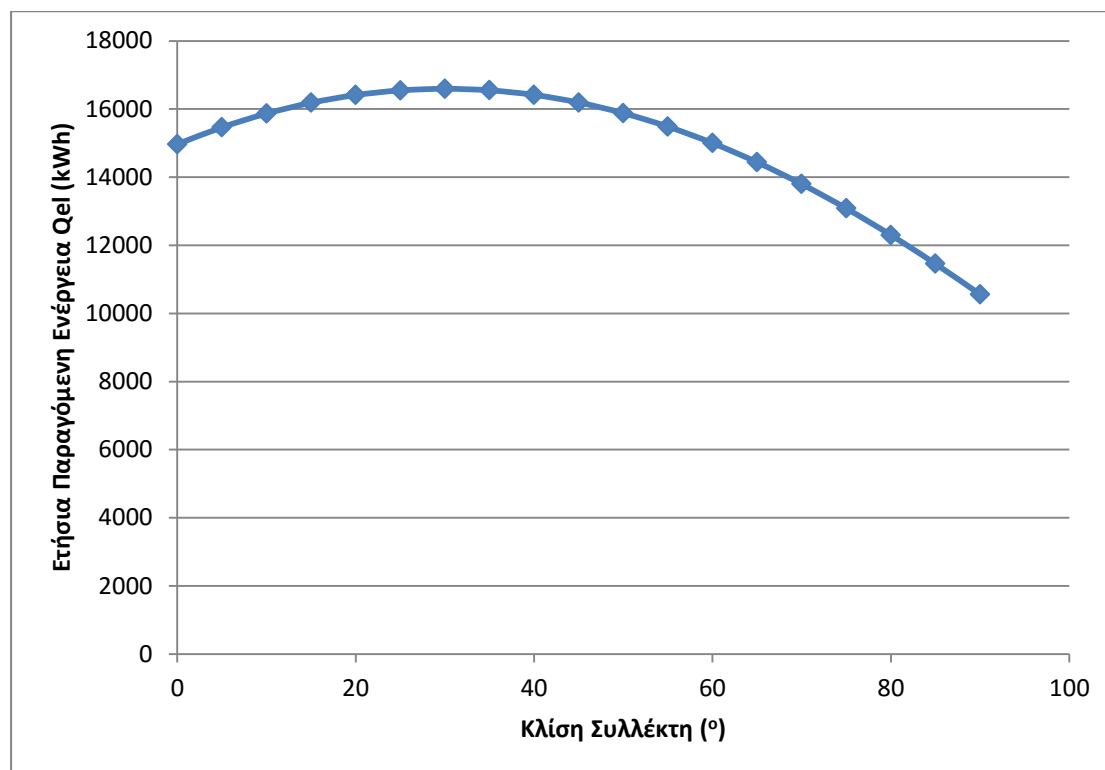
Πίνακας 5.20 : Βελτιστοποίηση κλίσης συλλέκτη στο διάστημα 0-90 μοιρών

Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στην εύρεση της βέλτιστης κλίσης, πραγματοποιήθηκε αναλυτική διερεύνηση στο διάστημα 25-35° όπου φαίνεται εκ πρώτης όψεως ότι παρουσιάζεται η βέλτιστη κλίση.

Κλίση Συλλέκτη (°)	Ετήσια Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (kWh)
25	16547
26	16563
27	16576
28	16585
29	16591
<b>30</b>	<b>16593</b>
31	16591
32	16586
33	16577
34	16565
35	16549

Πίνακας 5.21: Βελτιστοποίηση κλίσης συλλέκτη στο διάστημα 25-35 μοιρών

Αποδεικνύεται ότι η κλίση που επιτυγχάνει μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ετήσια βάση, είναι η κλίση των 30 ° . Ακολουθεί γραφική απεικόνιση.



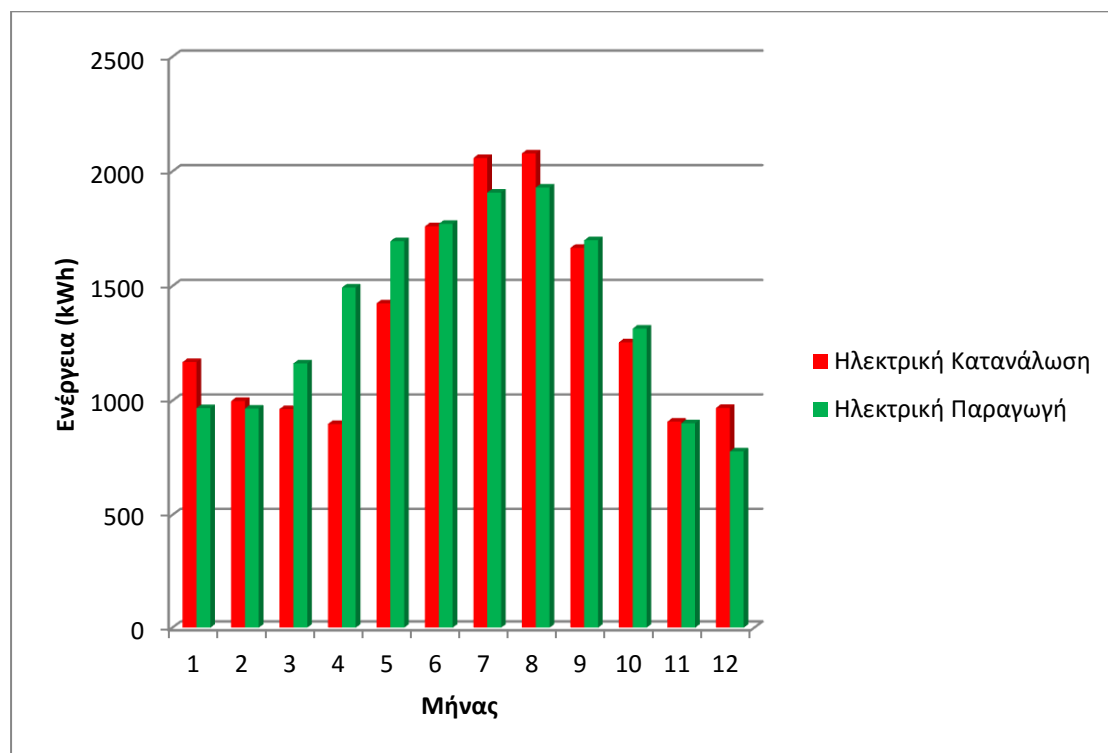
Διάγραμμα 5.22 : Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει της κλίσης συλλέκτη

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μηνιαία ανάλυση για την παραγόμενη και την καταναλισκόμενη ενέργεια με το σύστημα Net Metering. Σκοπός της διερεύνησης ανά μήνα, είναι να διαπιστωθεί σε ποια σημεία του έτους υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας (οπότε επιστρέφεται ένα ποσό στο δίκτυο) και σε ποια σημεία υπάρχει έλλειμμα (οπότε υπάρχει ζήτηση από το δίκτυο για ηλεκτροδότηση). Να σημειωθεί ότι η μηνιαία ανάλυση έχει πραγματοποιηθεί για συλλεκτική επιφάνεια φωτοβολταϊκών πάνελ 105 m<sup>2</sup> . Όπως φαίνεται στον πίνακα και στο διάγραμμα που ακολουθεί τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Ιούλιο, Αύγουστο, Νοέμβρη και Δεκέμβρη έχουμε έλλειμμα ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ τους υπόλοιπους 6 μήνες έχουμε περίσσεια. Συνολικά πάντως, η χρήση δικτύου είναι μηδενική.

Μήνας	Ηλεκτρική Κατανάλωση (kWh)	Ηλεκτρική Παραγωγή (kWh)	Διαφορά	Χαρακτηρισμός
Ιανουάριος	1169	968	-201	Έλλειμμα
Φεβρουάριος	999	966	-33	Έλλειμμα
Μάρτιος	964	1163	199	Περίσσεια
Απρίλιος	899	1494	595	Περίσσεια
Μάιος	1425	1696	271	Περίσσεια
Ιούνιος	1761	1772	11	Περίσσεια
Ιούλιος	2059	1908	-151	Έλλειμμα
Αύγουστος	2079	1930	-149	Έλλειμμα
Σεπτέμβριος	1667	1700	33	Περίσσεια
Οκτώβριος	1255	1315	60	Περίσσεια
Νοέμβριος	909	902	-7	Έλλειμμα
Δεκέμβριος	969	779	-190	Έλλειμμα
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>16155</b>	<b>16593</b>	<b>438</b>	<b>ΠΕΡΙΣΣΕΙΑ</b>

Πίνακας 5.22 : Μηνιαία Ανάλυση για την παραγόμενη και την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια

Το ιστόγραμμα που ακολουθεί είναι ενδεικτικό.

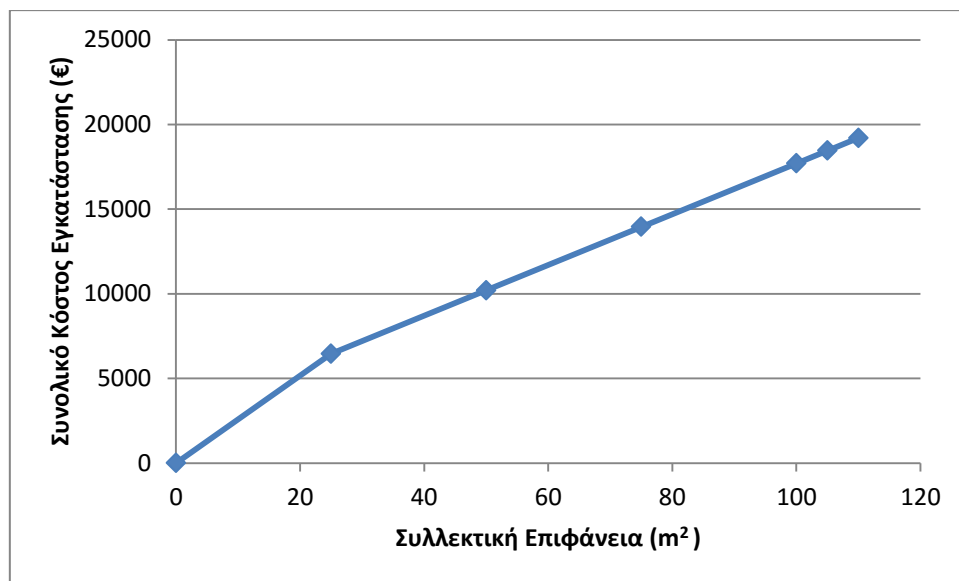


Διάγραμμα 5.23 : Μηνιαία παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια με το σύστημα Net Metering

### Κοστολόγηση εγκατάστασης

- Κόστος φωτοβολταϊκών:  $150 \text{ €/m}^2$
- Κόστος inverter:  $1500\text{€}$
- Κόστος εργασίας:  $1000\text{€}$
- Κόστος μετρητών (counters):  $200 \text{ €}$
- Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας:  $0.2 \text{ €/kWh}$

Τα παραπάνω συνθέτουν το συνολικό κόστος επένδυσης της εγκατάστασης  $C_o$ , το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με τη συλλεκτική επιφάνεια.



Διάγραμμα 5.24 : Συνολικό κόστος επένδυσης συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το Καθαρό Παρόν Κόστος (NPC) της επένδυσης με τη βοήθεια της εξίσωσης (5.3)

$$NPC = C_o + C_t \cdot \frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N} \quad (5.3)$$

Όπου:

- $C_o$  το αρχικό κόστος εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών σε €
- $C_t$  το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας σε € και ισχύει:

$$C_t = 0.2 \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \cdot X \cdot E(\text{kWh}) \quad (5.4)$$

Όπου  $E$  η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο,  $0.2 \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right)$  το κόστος του ρεύματος σήμερα και  $X$  ο συντελεστής μεταβλητότητας του χρήματος κατά τη διάρκεια της 25ετίας, για τον οποίο ισχύει:

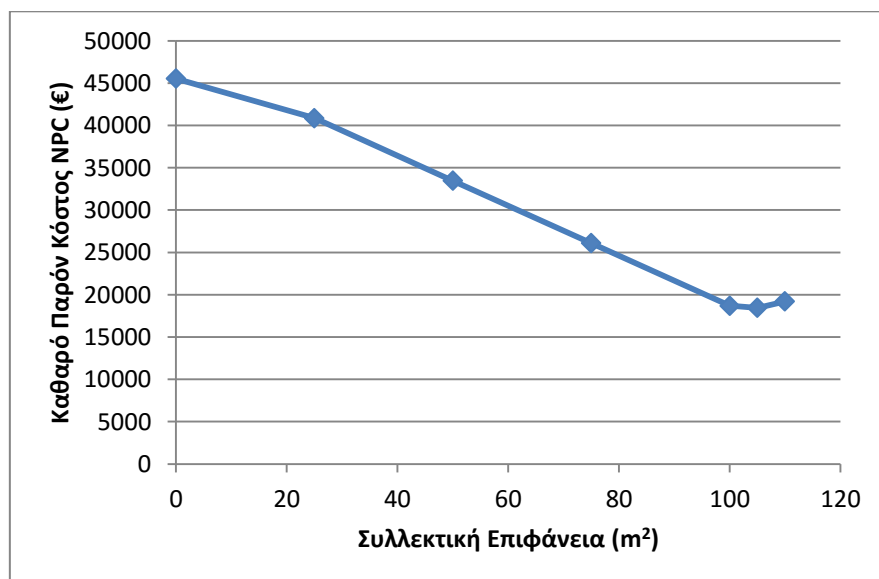
$$X = \frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N} \quad (5.5)$$

- $N$  η περίοδος που εξετάζεται η επένδυση (25 χρόνια)
- $r$  το ποσοστό μεταβολής του κόστους του χρήματος που λαμβάνεται 5%

Συλλεκτική Επιφάνεια $A_c (m^2)$	Κόστος Εγκατάστασης PV (€)	$\frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N}$	Κόστος λειτουργίας (€)	$NPC$
0	0	14,094	45537	45537
25	6450	14,094	34403	40853
50	10200	14,094	23266	33466
75	13950	14,094	12129	26079
100	17700	14,094	992	18692
<b>105</b>	<b>18450</b>	<b>14,094</b>	<b>0</b>	<b>18450</b>
110	19200	14,094	0	19200

Πίνακας 5.23 : Υπολογισμός καθαρού παρόντος κόστους

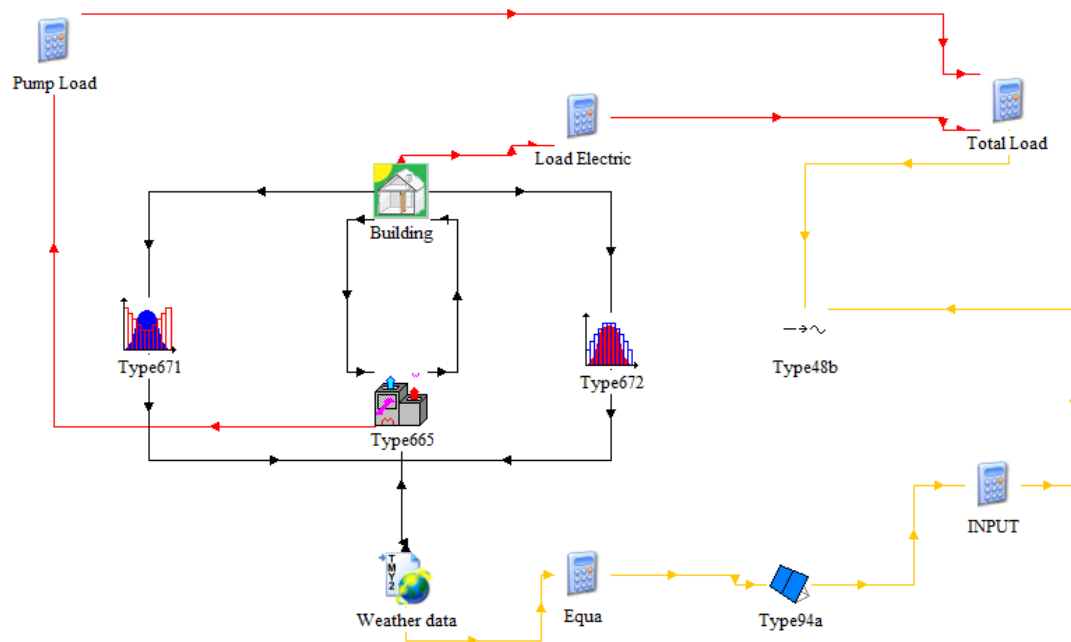
Ακολουθεί γράφημα που δείχνει τη μεταβολή του καθαρού παρόντος κόστους συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας.



Διάγραμμα 5.25 : Καθαρό Παρόν Κόστος επένδυσης ανάλογα με τη συλλεκτική επιφάνεια

## 5.8 Χρήση τεχνολογίας Net Metering για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου και βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίου

Η εγκατάσταση του συστήματος Net Metering είναι ακριβώς ίδια με της ενότητας 5.7. Η ουσιαστική διαφορά εντοπίζεται στον βιοκλιματικό σχεδιασμό που έχει πραγματοποιηθεί στην περίπτωση αυτή με σκοπό να αναβαθμιστεί ενεργειακά το κτίριο και να υπάρξει μείωση των φορτίων του. Οι όποιες αλλαγές έγιναν, είχαν σχέση με το εικονίδιο Building και σχετίζονταν με το κτίριο. Η υπόλοιπη εγκατάσταση παρέμεινε ίδια όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 5.6 : Διάταξη συστήματος Net Metering και αναβαθμισμένου κτιρίου

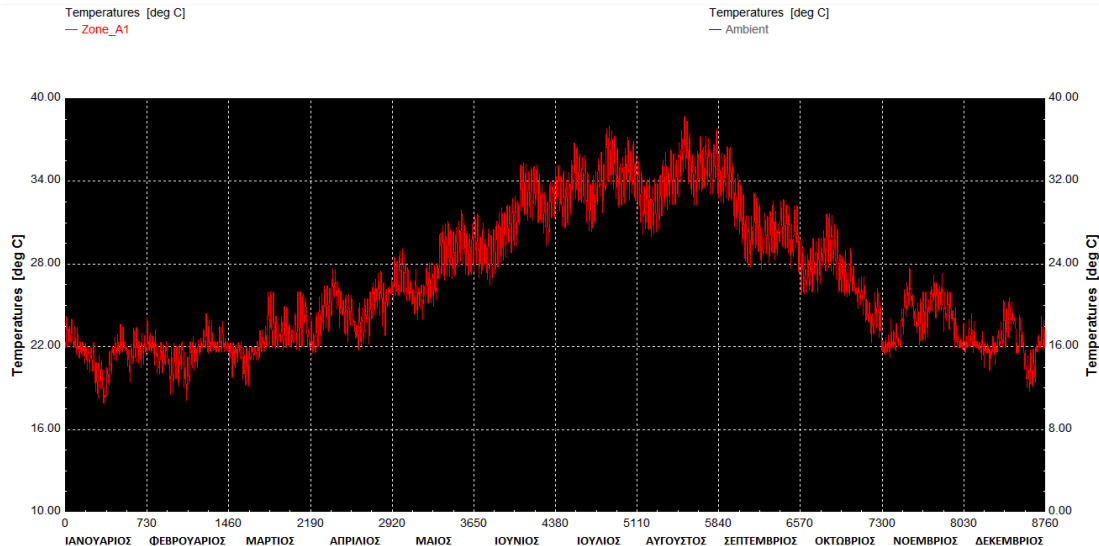
Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν μεταβολές στους τοίχους του κτιρίου με την προσθήκη καλύτερης μόνωσης και αποδοτικότερων υλικών, κάτι που είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας. Στο ίδιο μήκος κύματος κινήθηκαν και οι μεταβολές στους υαλοπίνακες με χρήση αποδοτικότερων υαλοπινάκων και βελτιστοποίηση των τιμών των συντελεστών σκίασης και θέασης από τον ήλιο. Τέλος αυξήθηκε ελάχιστα η διείσδυση αέρα σε 3 εναλλαγές ανά ώρα. Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται όλες οι τιμές των κατασκευαστικών στοιχείων του αναβαθμισμένου κτιρίου.

Τοίχοι						
Είδος Τοίχου	Υλικά Κατασκευής	$k \left( \frac{W}{mK} \right)$	$C_p \left( \frac{kJ}{kgK} \right)$	$\rho \left( \frac{kg}{m^3} \right)$	Συνολικό Πάχος (mm)	$U \left( \frac{W}{m^2K} \right)$
Δάπεδο	Πάτωμα	0.07	1.0	800	425	0.243
	Πέτρα	1.389	1.0	2000		
	Ηχομόνωση	0.05	1.44	80		
	Σκυρόδεμα	2.1	0.8	2400		
	Θερμομόνωση	0.04	0.8	40		
Εξωτ. Τοίχος	Σοβάς	1.389	1.0	2000	300	0.275
	Τούβλο	0.889	1.0	1800		
	Θερμομόνωση	0.04	0.8	40		
Φυτεμένη Οροφή	Βλάστηση	-	-	-	350	0.252
	Στρώμα Αποξήρασης	0.1083	0.92	800		
	Αδιάβροχο Στρώμα	0.1694	0.92	1200		
	Ασπίδα Υγρασίας	0.055	0.84	2500		
	Σκυρόδεμα	2.1	0.8	2400		
	Θερμομόνωση	0.04	0.8	40		
	Σοβάς	1.389	1.0	2000		
Υαλοπίνακες						
Είδος Τοίχου	Κατεύθυνση	Διαστάσεις (m <sup>2</sup> )	$U \left( \frac{W}{m^2K} \right)$	Συντελεστής Σκίασης	Συντελεστής Θέασης ουρανού	
Εξωτ. Τοίχος	Βοράς	0	0.59	75%	50%	
	Δύση	3				
	Ανατολή	3				
	Νότος	6				
Αερισμός						
Εναλλαγές / ώρα			3			

Πίνακας 5.24 : Κατασκευαστικά στοιχεία ενεργειακά αναβαθμισμένου κτιρίου

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό προφίλ στο εσωτερικό του κτιρίου. Φυσικά, το προφίλ αυτό δεν έχει σχέση με τις πραγματικές θερμοκρασίες που θα επικρατούν στο χώρο, καθώς έχει απενεργοποιηθεί το σύστημα θέρμανσης και ψύξης το οποίο θα εξασφαλίζει συνθήκες θερμικής άνεσης για τα άτομα που βρίσκονται στο χώρο. Το διάγραμμα αυτό έχει ως σκοπό να δείξει την βελτιωμένη εικόνα των θερμοκρασιών και την επίδραση των νέων υλικών κατασκευής του κτιρίου, σε σχέση με το Διάγραμμα 5.1 που απεικονίζει το θερμοκρασιακό προφίλ του συμβατικού κτιρίου.





Διάγραμμα 5.26 : Ετήσιο θερμοκρασιακό προφίλ στο εσωτερικό του ενεργειακά αναβαθμισμένου κτιρίου

Επόμενο βήμα ο υπολογισμός των ετήσιων φορτίων θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου, από την επιλογή Calculations του TRNSYS.

- Το φορτίο θέρμανσης βρέθηκε:  $Q_{heating} = 3441 \text{ kWh}$
- Το ψυκτικό φορτίο βρέθηκε:  $Q_{cooling} = 14878 \text{ kWh}$

Όπως ήταν αναμενόμενο το αναβαθμισμένο ενεργειακά κτίριο έχει μικρότερα φορτία θέρμανσης και ψύξης σε σχέση με το συμβατικό. Ωστόσο, και σε αυτή την περίπτωση το φορτίο ψύξης παραμένει αρκετά υψηλότερο από το φορτίο θέρμανσης. Τα χαμηλότερα φορτία θέρμανσης και ψύξης μας επιτρέπουν να χρησιμοποιήσουμε αντλία θερμότητας μικρότερου μεγέθους. Στη συνέχεια, αφού ρυθμιστεί το scale της αντλίας, υπολογίζεται η ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση της για θέρμανση και ψύξη, η οποία είναι σαφώς χαμηλότερη από την κατανάλωση της μεγαλύτερης αντλίας που χρησιμοποιήθηκε στο συμβατικό κτίριο.

- Κατανάλωση για θέρμανση:  $Q_{el,heat} = 1040 \text{ kWh}$
- Κατανάλωση για ψύξη:  $Q_{el,cool} = 4782 \text{ kWh}$

Ο συντελεστής συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας για θέρμανση και ψύξη είναι:

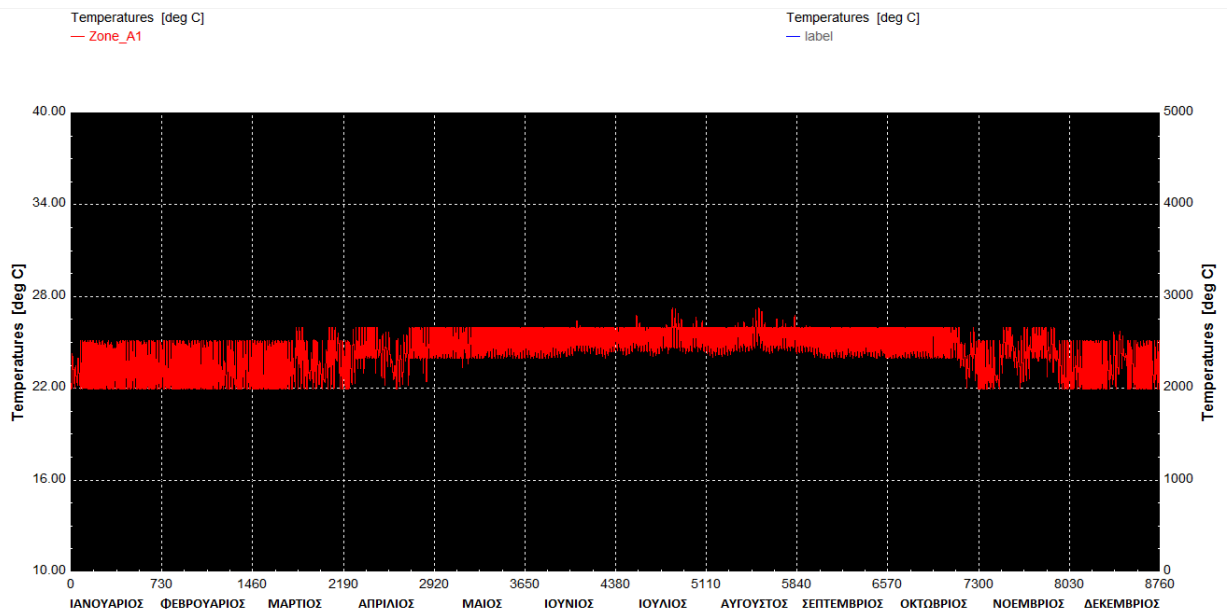
- $COP_{heating} = \frac{Q_{heating}}{Q_{el,heat}} = 3.308$
- $COP_{cooling} = \frac{Q_{cooling}}{Q_{el,cool}} = 3.11$

Όπως ήταν αναμενόμενο, και εδώ ο συντελεστής θερμικής συμπεριφοράς για θέρμανση είναι μεγαλύτερος από τον συντελεστή θερμικής συμπεριφοράς για ψύξη. Σε σχέση με το συμβατικό κτίριο, οι συντελεστές COP για ψύξη και θέρμανση παρουσίασαν μικρή αύξηση. Επόμενο βήμα, ο υπολογισμός των ηλεκτρικών καταναλώσεων, οι οποίες προκύπτουν από την αντλία θερμότητας και από τις ηλεκτρικές συσκευές και το φωτισμό του κτιρίου. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται όλες οι ηλεκτρικές καταναλώσεις του κτιρίου.

Στοιχείο	Ετήσια Κατανάλωση (kWh)
Αντλία Θερμότητας	5822
Φωτισμός	2610
Συσκευές	6525
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>14957</b>

Πίνακας 5.25 : Ετήσιες καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας

Ακολουθεί η απεικόνιση των θερμοκρασιών στο εσωτερικό του κτιρίου με ενεργοποιημένο το σύστημα θέρμανσης – ψύξης.

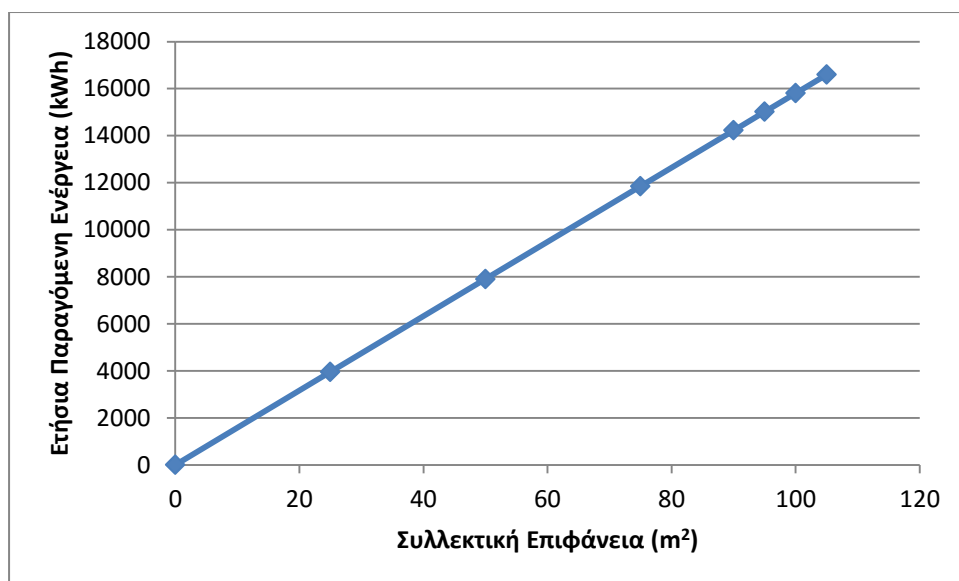


Διάγραμμα 5.27 : Ετήσιο θερμοκρασιακό προφίλ στο εσωτερικό του κτιρίου με λειτουργία της αντλίας θερμότητας

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, έτσι και εδώ, στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της χρήσης δικτύου. Το ηλεκτρικό φορτίο προς κάλυψη, μετά τις μεταβολές που έγιναν στα κατασκευαστικά στοιχεία του κτιρίου και τη χρήση αντλίας θερμότητας μικρότερης κατανάλωσης, είναι 14957 kWh. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί το σύστημα Net Metering. Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση για συλλεκτικές επιφάνειες 25, 50, 75, 90, 95, 100, 105 και 110 m<sup>2</sup>. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται από τα φωτοβολταϊκά  $Q_{el}$  και η ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται από το δίκτυο  $Q_{grid}$ , για τις διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες.

Συλλεκτική Επιφάνεια $A_c(m^2)$	$Q_{el}(kWh)$	$Q_{grid}(kWh)$
0	0	14957
25	3950	11007
50	7901	7056
75	11852	3105
90	14222	735
95	15013	0
100	15803	0
105	16593	0

Πίνακας 5.26 : Ετήσια παραγόμενη ενέργεια από το σύστημα Net Metering συναρτήσει συλλεκτικής επιφάνειας Φ/Β



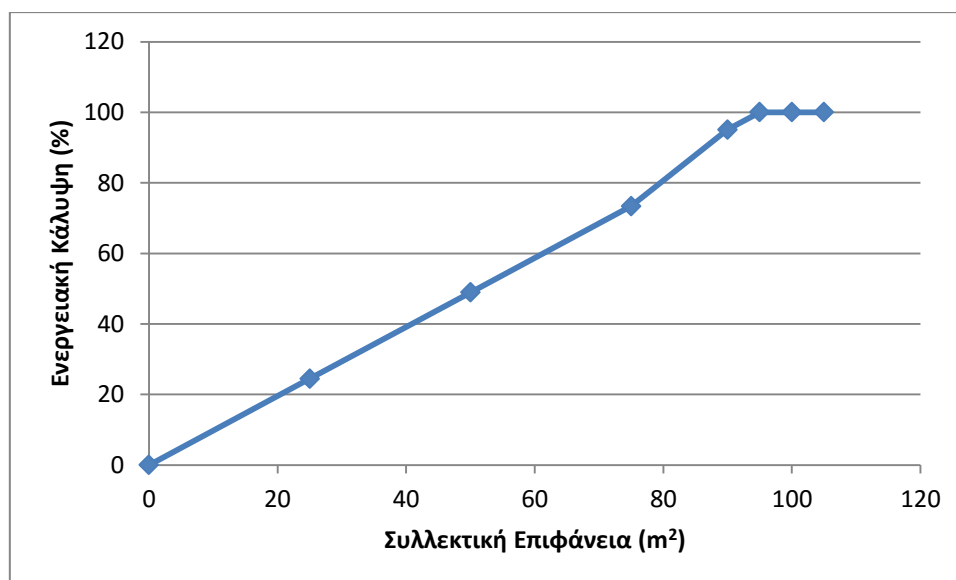
Διάγραμμα 5.28 : Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια συναρτήσει συλλεκτικής επιφάνειας Φ/Β με το σύστημα Net Metering

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, με συλλεκτικές επιφάνειες πάνω από 95 m<sup>2</sup> η χρήση δικτύου είναι μηδενική. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το ποσοστό κάλυψης των αναγκών της εγκατάστασης  $f$  για διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες.

Συλλεκτική Επιφάνεια $A_c(m^2)$	$f(\%)$
0	0
25	24,45
50	48,91
75	73,36
90	95,08
95	100
100	100
105	100

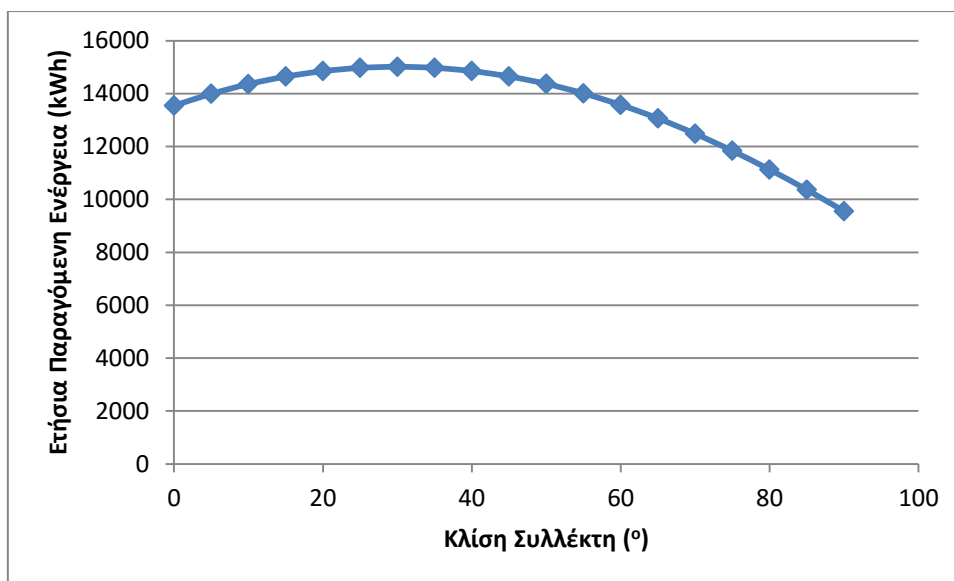
Πίνακας 5.27 : Ενεργειακή κάλυψη από τα φωτοβολταϊκά συναρτήσει συλλεκτικής επιφάνειας

Όπως ήταν αναμενόμενο, η ενεργειακή κάλυψη από τα φωτοβολταϊκά αυξάνεται όσο αυξάνεται η συνολική επιφάνεια των συλλεκτών.



Διάγραμμα 5.29 : Ποσοστό ενεργειακής κάλυψης από τα φωτοβολταϊκά συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας

Σε πρώτη φάση επιλέγεται η επιφάνεια των 95 m<sup>2</sup>, η οποία προσφέρει 100% ενεργειακή κάλυψη. Για τη συγκεκριμένη συλλεκτική επιφάνεια, πραγματοποιήθηκε και εδώ, διερεύνηση ως προς την κλίση του συλλέκτη προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη κλίση που οδηγεί σε μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Ακολουθεί γραφική απεικόνιση.



Διάγραμμα 5.30 : Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει της κλίσης συλλέκτη

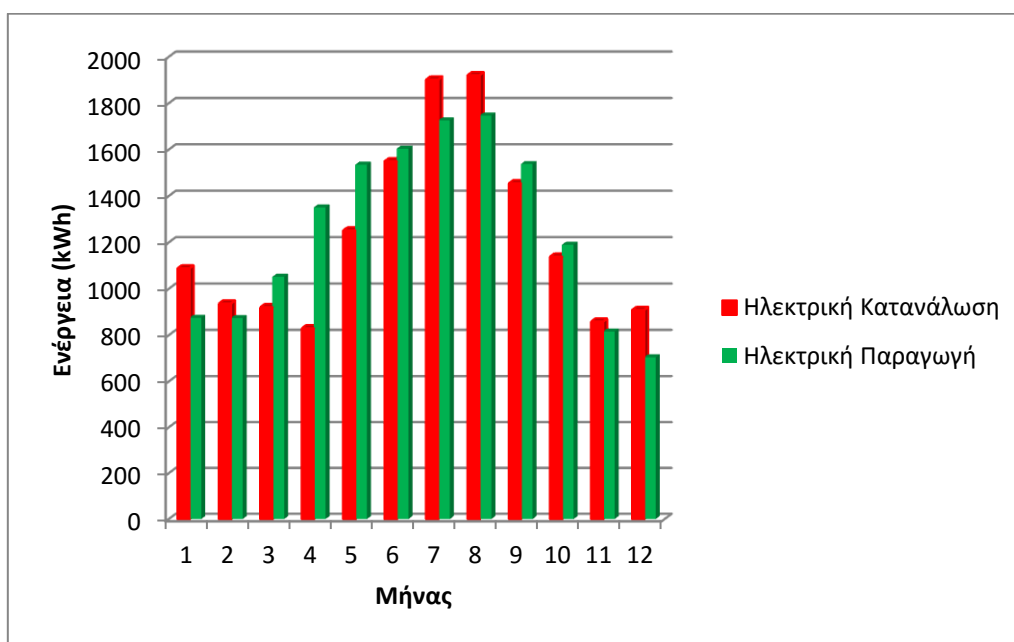
Αποδεικνύεται ότι η κλίση που επιτυγχάνει μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ετήσια βάση, είναι η κλίση των 30 °

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μηνιαία ανάλυση για την παραγόμενη και την καταναλισκόμενη ενέργεια με το σύστημα Net Metering. Για την ανάλυση αυτή έχει επιλεγθεί συλλεκτική επιφάνεια 95 m<sup>2</sup>.

Μήνας	Ηλεκτρική Κατανάλωση (kWh)	Ηλεκτρική Παραγωγή (kWh)	Διαφορά	Χαρακτηρισμός
Ιανουάριος	1102	875	-227	Έλλειμμα
Φεβρουάριος	949	874	-75	Έλλειμμα
Μάρτιος	934	1052	118	Περίσσεια
Απρίλιος	842	1351	509	Περίσσεια
Μάιος	1268	1535	267	Περίσσεια
Ιούνιος	1570	1604	34	Περίσσεια
Ιούλιος	1927	1726	-201	Έλλειμμα
Αύγουστος	1946	1747	-199	Έλλειμμα
Σεπτέμβριος	1474	1538	64	Περίσσεια
Οκτώβριος	1154	1190	36	Περίσσεια
Νοέμβριος	870	816	-54	Έλλειμμα
Δεκέμβριος	921	705	-216	Έλλειμμα
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>14957</b>	<b>15013</b>	<b>56</b>	<b>ΠΕΡΙΣΣΕΙΑ</b>

Πίνακας 5.28 : Μηνιαία Ανάλυση για την παραγόμενη και την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια

Το ιστόγραμμα που ακολουθεί είναι ενδεικτικό.



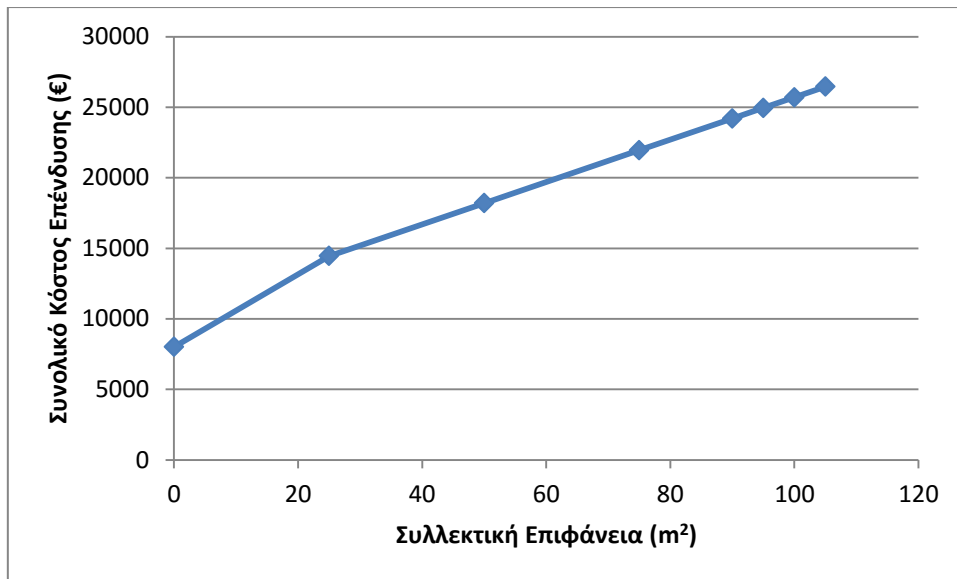
Διάγραμμα 5.31 : Μηνιαία παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια με το σύστημα Net Metering

Από το γράφημα παρατηρείται ότι το κτίριο, τους χειμερινούς και θερινούς μήνες που υπάρχουν μεγάλες απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη αντίστοιχα παρουσιάζει έλλειμμα ηλεκτρικής ενέργειας, αφού καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια από αυτή που παράγεται από το σύστημα Net Metering. Αντίθετα, τους μήνες του φθινοπώρου και της άνοιξης όπου οι απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη είναι μικρές, υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας.

#### Κοστολόγηση εγκατάστασης

- Κόστος φωτοβολταϊκών:  $150 \text{ €/m}^2$
- Κόστος inverter: 1500€
- Κόστος εργασίας: 1000€
- Κόστος μετρητών (counters): 200 €
- Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας:  $0.2 \text{ €/kWh}$
- Κόστος φυτεμένης οροφής:  $80 \text{ €/m}^2$

Τα παραπάνω συνθέτουν το συνολικό κόστος επένδυσης της εγκατάστασης  $C_o$ , το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με τη συλλεκτική επιφάνεια.



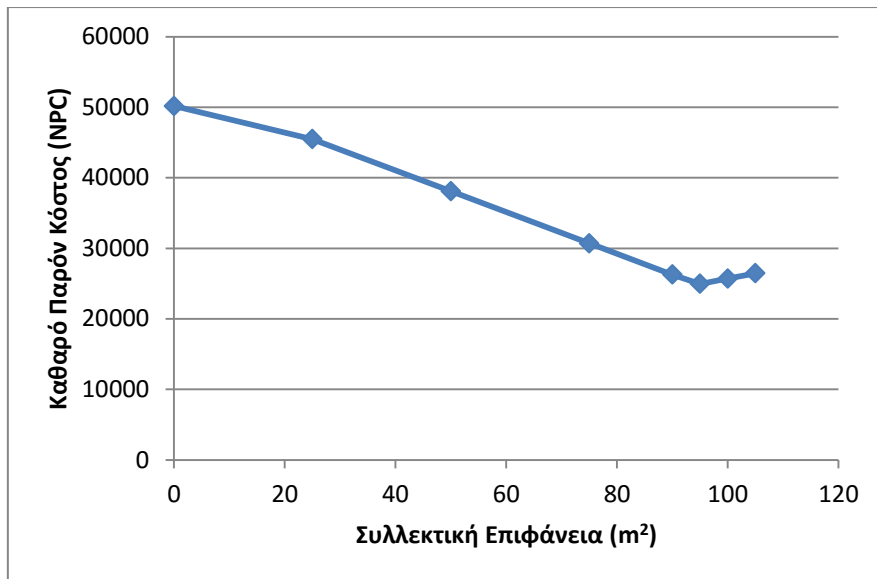
Διάγραμμα 5.32 : Συνολικό κόστος επένδυσης συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το Καθαρό Παρόν Κόστος (NPC) της επένδυσης με τη βοήθεια της εξίσωσης (5.3) και συμπληρώνεται ο ακόλουθος πίνακας.

Συλλεκτική Επιφάνεια $A_c(m^2)$	Κόστος Εγκατάστασης (€)	$\frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N}$	Κόστος λειτουργίας (€)	<i>NPC</i>
0	8000	14,094	42161	50161
25	14450	14,094	31026	45476
50	18200	14,094	19889	38089
75	21950	14,094	8752	30702
90	24200	14,094	2072	26272
<b>95</b>	<b>24950</b>	<b>14,094</b>	<b>0</b>	<b>24950</b>
100	25700	14,094	0	25700
105	26450	15,094	0	26450

Πίνακας 5.29 : Υπολογισμός καθαρού παρόντος κόστους

Η οικονομική ανάλυση επιβεβαιώνει ότι η βέλτιστη λύση αυτής της περίπτωσης είναι η χρήση συλλεκτικής επιφάνειας 95 m<sup>2</sup> που έχει το χαμηλότερο καθαρό παρόν κόστος και ταυτόχρονα προσφέρει μηδενική χρήση δικτύου. Ακολουθεί γράφημα που απεικονίζει τη μεταβολή του Net Present Cost συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας.



Διάγραμμα 5.33 : Καθαρό Παρόν Κόστος επένδυσης ανάλογα με τη συλλεκτική επιφάνεια

### 5.9 Ενεργειακή και οικονομική σύγκριση των εγκαταστάσεων

Στις προηγούμενες ενότητες πραγματοποιήθηκε αναλυτική περιγραφή και διερεύνηση όλων των περιπτώσεων. Υπενθυμίζεται ότι οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν ήταν οι εξής:

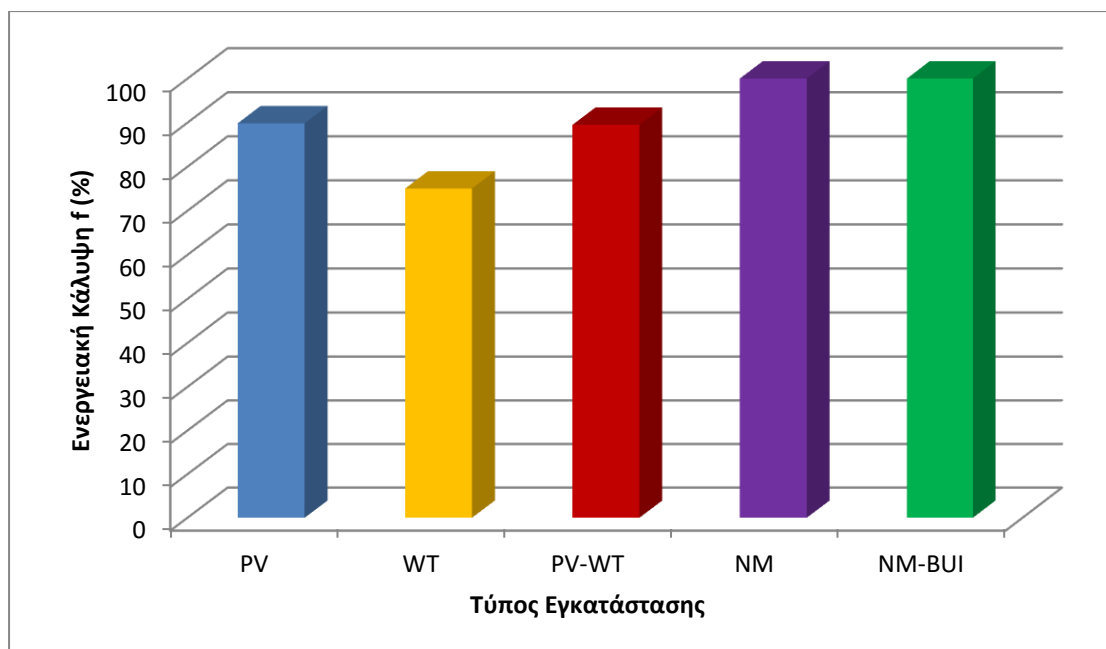
- 1) Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών με μπαταρία (PV)
- 2) Εγκατάσταση ανεμογεννήτριας με μπαταρία (WT)
- 3) Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών & ανεμογεννήτριας (PV-WT)
- 4) Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών με σύστημα Net Metering (NM)
- 5) Εγκατάσταση Net Metering & Ενεργειακή Αναβάθμιση Κτιρίου (NM-BUI)

Αρχικά θα γίνει σύγκριση των παραπάνω περιπτώσεων από ενεργειακή σκοπιά. Να σημειωθεί ότι η σύγκριση θα πραγματοποιηθεί ανάμεσα στις βέλτιστες λύσεις της κάθε εγκατάστασης, προκειμένου να ευρεθεί η βέλτιστη όλων. Το μέγεθος που μας ενδιαφέρει κυρίως, κατά την ενεργειακή σύγκριση των περιπτώσεων, είναι το ποσοστό ενεργειακής κάλυψης  $f$ .



Τύπος Εγκατάστασης	Χαρακτηριστικά Εγκατάστασης	Ενεργειακή Κάλυψη f
PV	Συλλεκτική Επιφάνεια 125 m <sup>2</sup>	89.85%
WT	Ανεμογεννήτρια ισχύος 5 kW	75.04%
PV-WT	Συλλεκτική Επιφάνεια 75 m <sup>2</sup> & Ανεμογεννήτρια ισχύος 2.5 kW	89.5%
NM	Συλλεκτική Επιφάνεια 105 m <sup>2</sup>	100%
NM-BUI	Συλλεκτική Επιφάνεια 95 m <sup>2</sup>	100%

Πίνακας 5.30: Σύγκριση ενεργειακής κάλυψης όλων των εγκαταστάσεων (βέλτιστες περιπτώσεις)

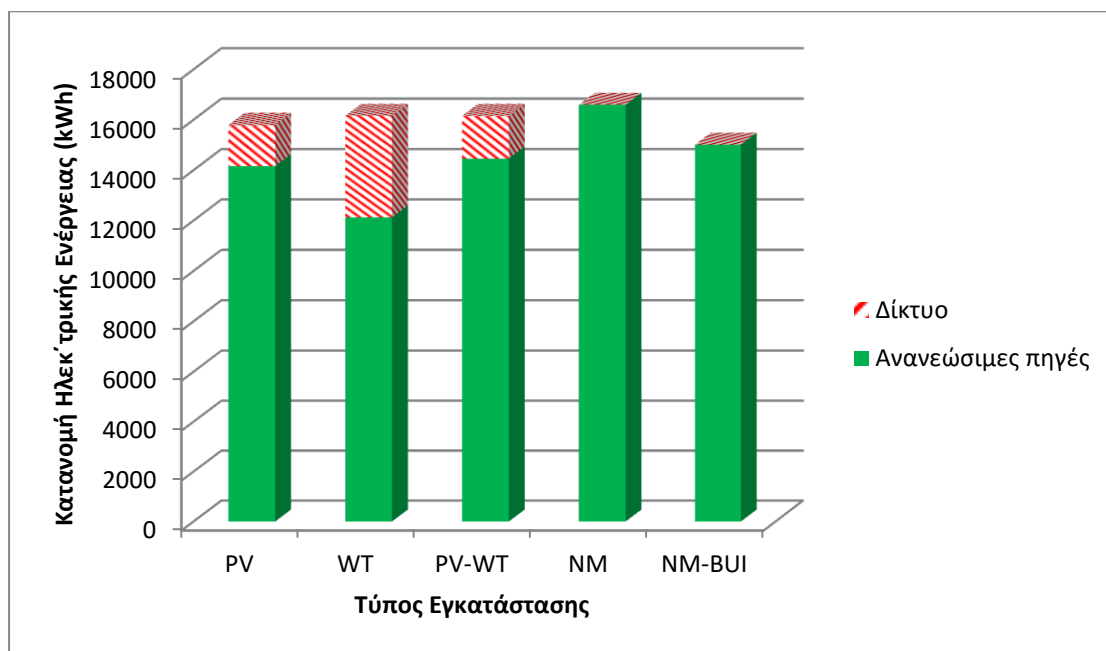


Διάγραμμα 5.34: Σύγκριση ενεργειακής κάλυψης όλων των εγκαταστάσεων (βέλτιστες περιπτώσεις)

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει το κτίριο, σε ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές και σε ενέργεια από το δίκτυο. Να σημειωθεί ότι οι δυο τελευταίες εγκαταστάσεις οι οποίες χρησιμοποιούν το σύστημα Net Metering έχουν μηδενική χρήση δικτύου.

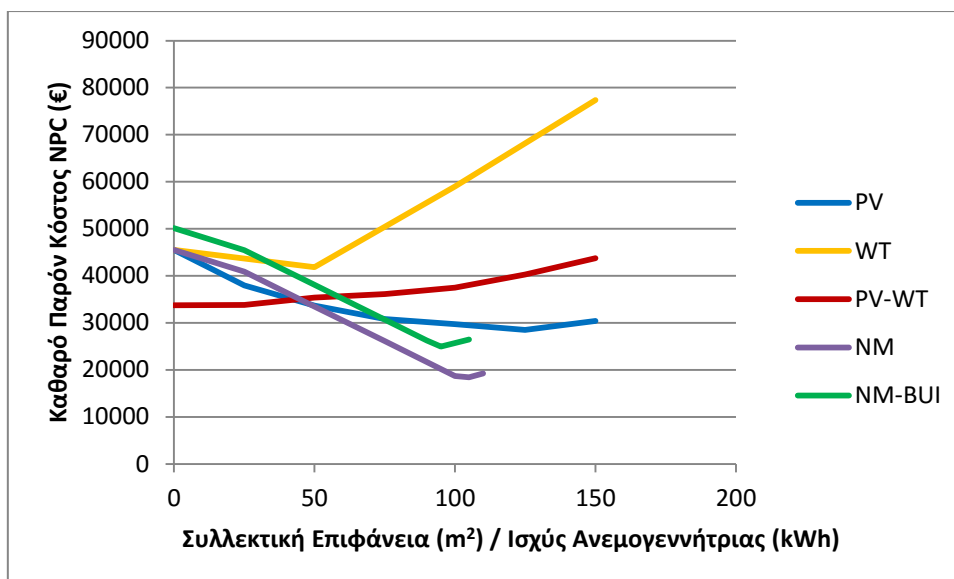
Τύπος Εγκατάστασης	Χαρακτηριστικά	Κατανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας (kWh)	
		Ανανεώσιμα	Δίκτυο
PV	Συλλεκτική Επιφάνεια 125 m <sup>2</sup>	Ανανεώσιμα	14518
		Δίκτυο	1640
WT	Ανεμογεννήτρια ισχύος 5 kW	Ανανεώσιμα	12124
		Δίκτυο	4034
PV-WT	Συλλεκτική Επιφάνεια 75 m <sup>2</sup> & Ανεμογεννήτρια ισχύος 2.5 kW	Ανανεώσιμα	14461
		Δίκτυο	1697
NM	Συλλεκτική Επιφάνεια 105 m <sup>2</sup>	Ανανεώσιμα	16593
		Δίκτυο	0
NM-BUI	Συλλεκτική Επιφάνεια 95 m <sup>2</sup>	Ανανεώσιμα	15013
		Δίκτυο	0

Πίνακας 5.31: Κατανομή ηλεκτρικής ενέργειας όλων των εγκαταστάσεων (βέλτιστες περιπτώσεις)



Διάγραμμα 5.35: Κατανομή ηλεκτρικής ενέργειας όλων των εγκαταστάσεων (βέλτιστες περιπτώσεις)

Στη συνέχεια, ακολουθεί η σύγκριση των παραπάνω εγκαταστάσεων από οικονομικής σκοπιάς, η οποία έχει και τη μεγαλύτερη βαρύτητα καθώς πρόκειται για μια επένδυση. Σε πρώτη φάση θα απεικονισθεί η μεταβολή του Καθαρού Παρόντος Κόστους (NPC) συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας αλλά και του μεγέθους της ανεμογεννήτριας, για όλες τις εγκαταστάσεις που εξετάστηκαν.



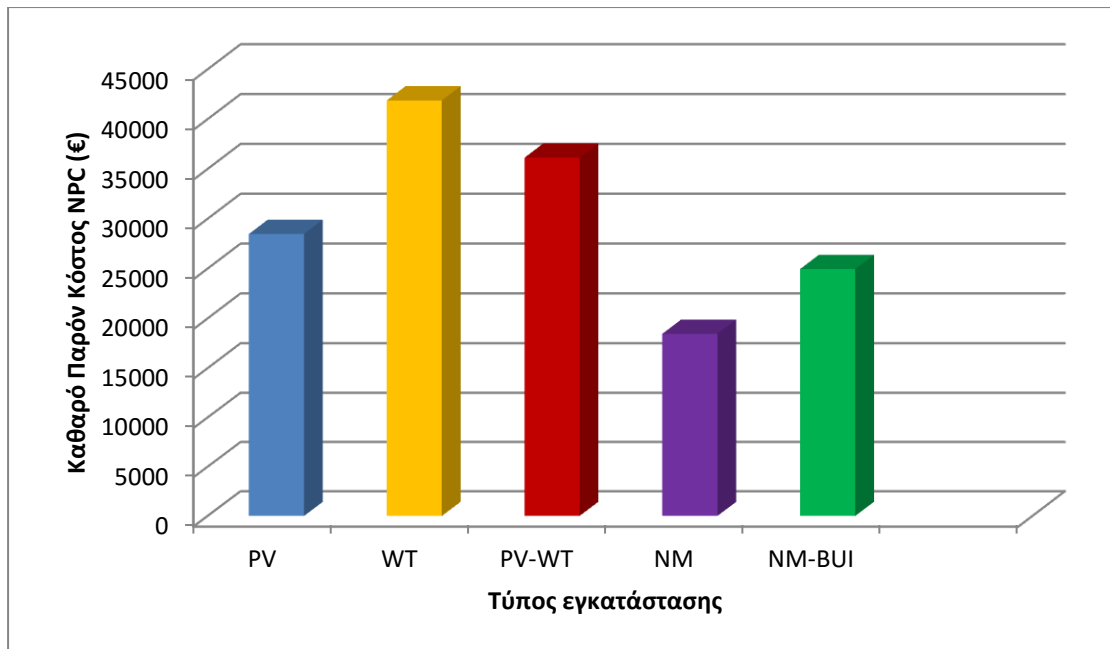
Διάγραμμα 5.36: Μεταβολή καθαρού παρόντος κόστους συναρτήσει συλλεκτικής επιφάνειας και ισχύος ανεμογεννήτριας

Η κάθε μεταβολή, όπως φαίνεται παραπάνω παρουσιάζει ελάχιστο σε κάποιο σημείο. Σκοπός μας, είναι να συγκρίνουμε τις ελάχιστες τιμές αυτές, προκειμένου να βρούμε την βέλτιστη οικονομικά λύση, η οποία θα ελαχιστοποιεί το κόστος.

Τύπος Εγκατάστασης	Χαρακτηριστικά	Καθαρό Παρόν Κόστος NPC(€)
PV	Συλλεκτική Επιφάνεια 125 m <sup>2</sup>	28472
WT	Ανεμογεννήτρια ισχύος 5 kW	41870
PV-WT	Συλλεκτική Επιφάνεια 75 m <sup>2</sup> & Ανεμογεννήτρια ισχύος 2.5 kW	36133
NM	Συλλεκτική Επιφάνεια 105 m <sup>2</sup>	18450
NM-BUI	Συλλεκτική Επιφάνεια 95 m <sup>2</sup>	24950

Πίνακας 5.32: Καθαρό Παρόν Κόστος όλων των εγκαταστάσεων

Όπως διαπιστώνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί, η εγκατάσταση η οποία παρουσιάζει το μικρότερο συνολικό κόστος είναι το σύστημα Net Metering με φωτοβολταϊκά πάνελ συλλεκτικής επιφάνειας 105 m<sup>2</sup>.

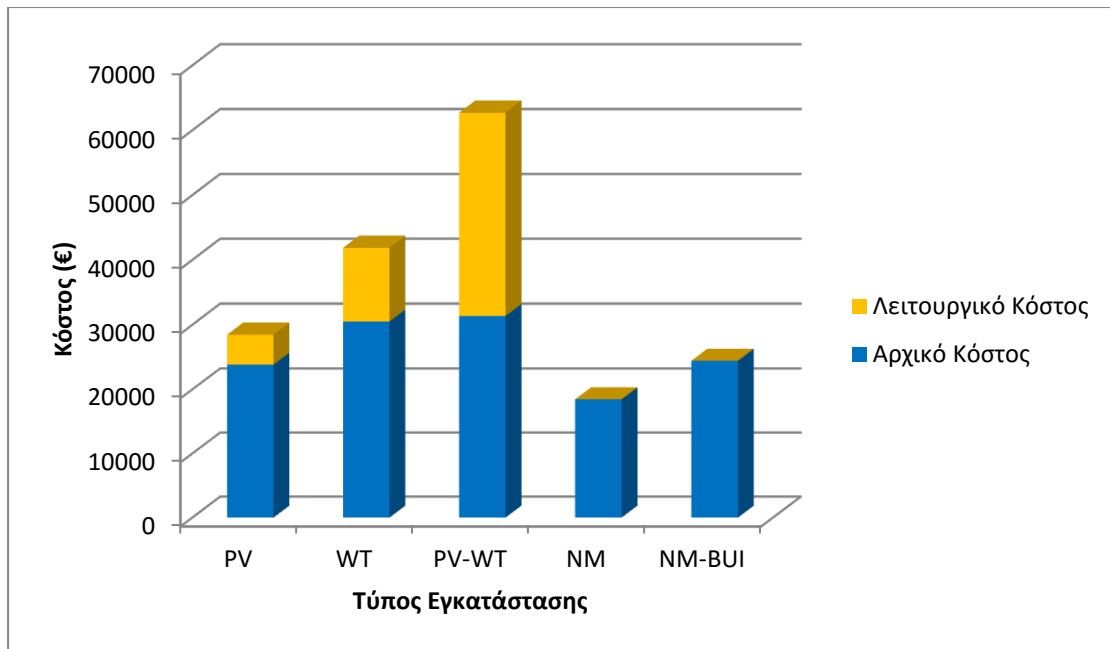


Διάγραμμα 5.37: Καθαρό παρόν κόστος όλων των εγκαταστάσεων (βέλτιστες περιπτώσεις)

Επιπρόσθετα, θα γίνει μια κατανομή του συνολικού κόστους σε αρχικό κόστος επένδυσης και σε κόστος λειτουργίας. Με τον όρο αρχικό κόστος επένδυσης αναφερόμαστε στο χρηματικό κεφάλαιο που δαπανήθηκε για την κατασκευή της εγκατάστασης (αγορά πάνελ ή ανεμογεννήτριας, inverter, μπαταριών και φυσικά το κόστος εργασίας). Το κόστος λειτουργίας αναφέρεται στο κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει πλήρης ενεργειακή κάλυψη από την εγκατάσταση.

Τύπος Εγκατάστασης	Χαρακτηριστικά	Κόστος (€)	
		Αρχικό	Λειτουργικό
PV	Συλλεκτική Επιφάνεια 125 m <sup>2</sup>	Αρχικό	23850
		Λειτουργικό	4623
WT	Ανεμογεννήτρια ισχύος 5 kW	Αρχικό	30500
		Λειτουργικό	11370
PV-WT	Συλλεκτική Επιφάνεια 75 m <sup>2</sup> & Ανεμογεννήτρια ισχύος 2.5 kW	Αρχικό	31350
		Λειτουργικό	4783
NM	Συλλεκτική Επιφάνεια 105 m <sup>2</sup>	Αρχικό	18450
		Λειτουργικό	0
NM-BUI	Συλλεκτική Επιφάνεια 95 m <sup>2</sup>	Αρχικό	24450
		Λειτουργικό	0

Πίνακας 5.33: Αρχικό Κόστος Επένδυσης και Κόστος Λειτουργίας όλων των εγκαταστάσεων



Διάγραμμα 5.38: Αρχικό Κόστος Επένδυσης και Κόστος Λειτουργίας όλων των εγκαταστάσεων (βέλτιστες περιπτώσεις)

Παρατηρούμε ότι η χρήση της ανεμογεννήτριας αυξάνει σημαντικά το κόστος λειτουργίας, καθώς υπάρχει αρκετή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, επομένως προκύπτει κόστος αγοράς. Επίσης το σύστημα Net Metering εκμηδενίζει το κόστος λειτουργίας καθώς δεν απαιτείται αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάσθηκε ένα κτίριο διαστάσεων 100 m<sup>2</sup> στην πόλη της Αθήνας, το οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως χώρος γραφείων επιχείρησης στην οποία εργάζονται 8 εργαζόμενοι. Στόχος της εργασίας ήταν το κτίριο αυτό να είναι ενεργειακά αυτόνομο τόσο από πλευράς θέρμανσης και ψύξης όσο και από πλευράς ηλεκτρικών καταναλώσεων. Για την θέρμανση και την ψύξη του χώρου χρησιμοποιήθηκε αντλία θερμότητας αέρα-αέρα, της οποίας η ηλεκτρική κατανάλωση σε συνδυασμό με τις ηλεκτρικές καταναλώσεις που προκύπτουν από τις ηλεκτρικές συσκευές και το φωτισμό του χώρου, αποφασίσθηκε να καλυφθούν όσο το δυνατόν περισσότερο, από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως ο ήλιος και ο άνεμος. Χρησιμοποιήθηκαν για αυτό το λόγο, φωτοβολταϊκά πάνελ (με ή χωρίς μπαταρία) και ανεμογεννήτριες μικρού μεγέθους. Συγκεκριμένα οι περιπτώσεις στις οποίες καταλήξαμε ύστερα από αναλυτική διερεύνηση, ήταν οι εξής για μια επένδυση διάρκειας 25 ετών:

- 1) Φωτοβολταϊκά πάνελ με μπαταρία, συνολικής συλλεκτικής επιφάνειας 125 m<sup>2</sup>, τα οποία παρέχουν ενεργειακή κάλυψη 89.85% και το συνολικό κόστος τους εκτιμάται σε 28472€.
- 2) Ανεμογεννήτρια με μπαταρία, ονομαστικής ισχύος 5 kW, η οποία παρέχει ενεργειακή κάλυψη 75.04% και το συνολικό κόστος της εκτιμάται σε 41870€.
- 3) Φωτοβολταϊκά πάνελ συνολικής συλλεκτικής επιφάνειας 75 m<sup>2</sup> σε συνδυασμό με ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 2.5 kW, παρουσία μπαταρίας, τα οποία παρέχουν ενεργειακή κάλυψη 89.5% και το συνολικό τους κόστος εκτιμάται σε 36133€.
- 4) Φωτοβολταϊκά πάνελ αυτοπαραγωγής χωρίς μπαταρία (Net Metering), συνολικής συλλεκτικής επιφάνειας 105 m<sup>2</sup>, τα οποία παρέχουν ενεργειακή κάλυψη 100% και το συνολικό κόστος τους εκτιμάται σε 18450€.
- 5) Εγκατάσταση φυτεμένης οροφής στο κτίριο και ενεργειακή αναβάθμιση του σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκά πάνελ χωρίς μπαταρία (Net Metering), συνολικής συλλεκτικής επιφάνειας 95 m<sup>2</sup>, τα οποία παρέχουν ενεργειακή κάλυψη 100% και το συνολικό κόστος τους εκτιμάται σε 24950€.

Τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν, ήταν τα ακόλουθα:

- Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ πετυχαίνει αρκετά υψηλό ποσοστό ενεργειακής κάλυψης, της τάξεως του 90% και φαίνεται ότι αποτελούν μια αρκετά αξιόπιστη ανανεώσιμη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας 5 kW, παρέχει το μικρότερο ποσοστό ενεργειακής κάλυψης 75% σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Επομένως η χρήση της ανεμογεννήτριας ως μοναδική πηγή κάλυψης του ηλεκτρικού φορτίου του κτιρίου, κρίνεται μάλλον ακατάλληλη.

- Ωστόσο, η χρήση της ανεμογεννήτριας 2.5 kW επικουρικά και σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκά πάνελ 75 m<sup>2</sup> αποτελεί μια αξιόλογη λύση καθώς πετυχαίνει υψηλό ποσοστό ενεργειακής κάλυψης κοντά στο 90% ενώ παράλληλα προσφέρει εξοικονόμηση χώρου και ευελιξία σε σχέση με την περίπτωση που χρησιμοποιήθηκαν μόνο πάνελ.
- Η περίπτωση των φωτοβολταϊκών πάνελ για αυτοπαραγωγή (Net Metering) κρίνεται η βέλτιστη ενεργειακά καθώς καθιστά το κτίριο ενεργειακά αυτόνομο (100% ενεργειακή κάλυψη).
- Η 5<sup>η</sup> περίπτωση στην οποία πραγματοποιήθηκε ενεργειακή αναβάθμιση του κτιρίου και εγκαταστάθηκε φυτεμένη οροφή, μειώνει τα φορτία θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου.
- Στην περίπτωση αυτή, υπήρχε περιθώριο να χρησιμοποιηθεί αντλία μικρότερης ισχύος, κάτι που συντελεί στην μείωση της ηλεκτρικής κατανάλωσης της αντλίας και κατ' επέκταση των ηλεκτρικών καταναλώσεων του κτιρίου.
- Από οικονομικής σκοπιάς, η χρήση της ανεμογεννήτριας κατά κανόνα αυξάνει σημαντικά το κόστος. Αυτό φαίνεται στις περιπτώσεις 2 και 3 που είναι οι πιο δαπανηρές.
- Συγκεκριμένα, η χρήση μόνο της ανεμογεννήτριας 5 kW, κρίνεται οικονομικά ασύμφορη καθώς ανεβάζει το κόστος στις 41870€ για μόλις 75% ενεργειακή κάλυψη, ενώ και στην περίπτωση που λειτουργεί βοηθητικά σε συνδυασμό με τα φωτοβολταϊκά, αυξάνει σημαντικά το κόστος στις 36133€ έναντι 28472€ που κοστίζει η εγκατάσταση μόνο φωτοβολταϊκών πάνελ, για την ίδια ενεργειακή κάλυψη (90%).
- Η 4<sup>η</sup> περίπτωση με το σύστημα Net Metering στο συμβατικό κτίριο, κρίνεται βέλτιστη τόσο ενεργειακά, καθώς προσφέρει 100% ενεργειακή κάλυψη δηλαδή πλήρη αυτονομία, όσο και οικονομικά καθώς το κόστος ανέρχεται σε 18450€.
- Η ενεργειακή αναβάθμιση του κτιρίου και η κατασκευή φυτεμένης οροφής, παρόλο που έχει θετικά αποτελέσματα στον ενεργειακό τομέα, όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί μια μάλλον δαπανηρή επένδυση καθώς το κόστος αυξάνεται πάνω από 6000€ σε σχέση με την περίπτωση ενός συμβατικού κτιρίου. Το μεγαλύτερο μερίδιο ευθύνης σε αυτό φέρεται να έχει η φυτεμένη οροφή, της οποίας το κόστος ανέρχεται σε 80 €/m<sup>2</sup>, τιμή απαγορευτική και δυσανάλογη με τα ενεργειακά οφέλη που παρέχει.

Συνεπώς, η λύση που κρίνεται βέλτιστη τόσο ενεργειακά όσο και οικονομικά είναι η χρήση της τεχνολογίας Net Metering, η οποία καθιστά το κτίριο 100% αυτόνομο ενεργειακά και ταυτόχρονα είναι η πιο βιώσιμη οικονομικά λύση.

Θα ήταν σκόπιμο στο σημείο αυτό να γίνουν κάποιες ενδεικτικές προτάσεις για έρευνα στο μέλλον, σχετικά με το τρέχον αντικείμενο:

- Χρήση υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας για μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων. Συγκεκριμένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ηλιακοί συλλέκτες ή γεωθερμία για την τροφοδότηση της αντλίας θερμότητας.
- Χρήση καινοτόμων συστημάτων συμπαραγωγής ή τριπαραγωγής για κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου με μειωμένο κόστος και περιβαλλοντικά οφέλη.
- Χρήση φυτεμένων τοίχων (living walls) στα πλαίσια του βιοκλιματικού σχεδιασμού του κτιρίου.



## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε οικιστικά σύνολα – Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών ενέργειας (ΚΑΠΕ)
- 2) [blacklemag.com/design/the-advantages-of-bioclimate-architecture/](http://blacklemag.com/design/the-advantages-of-bioclimate-architecture/)
- 3) [blog.familyhomeplans.com/zSolar-Passive-home](http://blog.familyhomeplans.com/zSolar-Passive-home)
- 4) [www.asiagreenbuildings.com/tag/lighting-control-system/](http://www.asiagreenbuildings.com/tag/lighting-control-system/)
- 5) [Science.howstuffworks.com/environmental/green-science/green-rooftop.htm](http://Science.howstuffworks.com/environmental/green-science/green-rooftop.htm)
- 6) Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends , K. Vijayaraghavan ,Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai 600036, India
- 7) “Προσομοίωση θερμικής συμπεριφοράς κτιρίου με φυτεμένη οροφή”, Μαρία Γ. Μηλιάδη, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2010
- 8) A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions, Paulo Cesar Tabares-Velasco , Jelena Srebric, Department of Architectural Engineering, The Pennsylvania State University, United States
- 9) Θερμομονωτική επάρκεια κτηριακού κελύφους Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2, Α΄ έκδοση
- 10) [www.energeiaki-drasi.gr/thermomonososi.html](http://www.energeiaki-drasi.gr/thermomonososi.html)
- 11) “Προδιαγραφές ιδιοτήτων θερμομονωτικών υλικών” , Έργο: “Σχεδιασμός & Ανάπτυξη Καινοτόμων Προϊόντων Πετροβάμβακα για την Ενεργειακή Αναβάθμιση Υφιστάμενων και Νεόδμητων Κτιρίων”
- 12) “Τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας” Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. , Θεματική Ενότητα ΔΕ4
- 13) [http://www.ucsusa.org/clean\\_energy/technology\\_and\\_impacts/energy\\_technologies/how-solar-energy-works.html](http://www.ucsusa.org/clean_energy/technology_and_impacts/energy_technologies/how-solar-energy-works.html)
- 14) [www.sustainablesolutions.co.nz/article/photovoltaic-modules](http://www.sustainablesolutions.co.nz/article/photovoltaic-modules)
- 15) [Ecmweb.com/green-building/calculating-current-ratings-photovoltaic-modules](http://Ecmweb.com/green-building/calculating-current-ratings-photovoltaic-modules)
- 16) “Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων” , ΤΕΕ ΤΚΜ, Θεσσαλονίκη Απρίλιος 2011
- 17) Helarco.gr , Hellenic Association of photovoltaic companies
- 18) ΚΑΠΕ, Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία, Εφαρμογές στην Ελλάδα
- 19) ΚΑΠΕ, Η αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα
- 20) Μπεργελές Γ.,1994, “Ανεμοκινητήρες”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα
- 21) Modelling and Simulation of a 12MW active-stall constant speed wind farm , Lucian Mihet-Popa, Voicu Groza
- 22) Hau E. ,2010, “Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics” 2<sup>nd</sup> edition Springer
- 23) [Solarelectricityhandbook.com/Solar-Articles/wind-turbines.html](http://Solarelectricityhandbook.com/Solar-Articles/wind-turbines.html)
- 24) [www.solaripedia.com](http://www.solaripedia.com)
- 25) [www.dias-financial.gr/net-metering](http://www.dias-financial.gr/net-metering)
- 26) [Cleantechnica.com/2016/01/31/net-metering-disconnect](http://Cleantechnica.com/2016/01/31/net-metering-disconnect)
- 27) [www.karouzos.gr/index-3-1.php#tabs2-1](http://www.karouzos.gr/index-3-1.php#tabs2-1)

- 28) Φ.Ε.Κ. Α' Ν4203-2013 "Ρυθμίσεις θεμάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και άλλες διατάξεις"
- 29) [www.sma.de/en/partners/knowledgebase/pv-inverters-basic-facts-for-planning-pv-systems.html](http://www.sma.de/en/partners/knowledgebase/pv-inverters-basic-facts-for-planning-pv-systems.html)
- 30) [www.rudgeenergy.co.uk/solar-pv/inverters](http://www.rudgeenergy.co.uk/solar-pv/inverters)
- 31) Javier Bernabe Mohedano Martinez : "Batteries in PV systems" , Wroclaw University of Technology
- 32) [www.solardirect.com/pv/batteries/batteries.htm](http://www.solardirect.com/pv/batteries/batteries.htm)
- 33) Χρηματοπούλου Μ. , 'Προσομοίωση ηλιακά υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας' , Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2009
- 34) [https://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_Pump](https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_Pump)
- 35) [www.greanpeace.org/greece/el/antlia-thermotitas](http://www.greanpeace.org/greece/el/antlia-thermotitas)
- 36) [www.aua.gr](http://www.aua.gr)
- 37) <http://www.technotec.gr>
- 38) [www.reuk.co.uk/otherimages/air-source-heat-pump.gif](http://www.reuk.co.uk/otherimages/air-source-heat-pump.gif)
- 39) [www.weiku.com/products/split\\_household\\_heat\\_pump\\_for\\_domestic.html](http://www.weiku.com/products/split_household_heat_pump_for_domestic.html)
- 40) [www.alibaba.com](http://www.alibaba.com)
- 41) [web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/01-GettingStarted.pdf](http://web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/01-GettingStarted.pdf)
- 42) [www.eqmagpro.com/madhya\\_pradesh\\_policy\\_for\\_net\\_metered\\_renewable\\_energy\\_applications\\_2016](http://www.eqmagpro.com/madhya_pradesh_policy_for_net_metered_renewable_energy_applications_2016)
- 43) [www.windustry.com/how\\_much\\_do\\_wind\\_turbines\\_cost](http://www.windustry.com/how_much_do_wind_turbines_cost)