



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Διερεύνηση επεμβάσεων για την εξοικονόμηση ενέργειας  
σε πανεπιστημιακό κτίριο**

Διπλωματική Εργασία

Κοθώνα Δέσποινα

Επιβλέποντες: Μπαργιώτας Δημήτριος

Τσουκαλάς Ελευθέριος

Σταμούλης Γεώργιος

Βόλος 2020



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Διερεύνηση επεμβάσεων για την εξοικονόμηση ενέργειας  
σε πανεπιστημιακό κτίριο**

Διπλωματική Εργασία

Κοθώνα Δέσποινα

Επιβλέποντες: Μπαργιώτας Δημήτριος

Τσουκαλάς Ελευθέριος

Σταμούλης Γεώργιος

Βόλος 2020



**UNIVERSITY OF THESSALY**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING**

**Investigation of interventions for energy savings in a  
university building**

Diploma Thesis

Despoina Kothona

Supervisors: Bargiotas Dimitrios

Tsoukalas Eleftherios

Stamoulis Georgios

Volos 2020

**ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ  
ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ**

«Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής».

Ο/Η Δηλών/ούσα

(Υπογραφή)

Κοθώνα Δέσποινα

Ημερομηνία:

*Στον αδερφό μου και  
τους γονείς μου*

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και συνέβαλαν στην προσπάθεια που κατέβαλα. Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους επιβλέποντες της εργασίας. Ιδιαίτερα όμως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δημήτρη Μπαργιώτα. Το ενδιαφέρον και η καθοδήγησή του σε κάθε βήμα αποτέλεσαν καταλυτικούς παράγοντες για την υλοποίηση της εργασίας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον κ. Δημήτρη Ζημέρη που στάθηκε δίπλα μου καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου. Κατάφερε να δημιουργήσει ένα άψογο κλίμα συνεργασίας, καθοδηγώντας με σε κάθε δυσκολία που παρουσιαζόταν, ενώ δεν δίστασε να μου συμπαρασταθεί και να με συμβουλέψει πολλές φορές σαν πατέρας. Ο χρόνος που μου αφιέρωσε και η θέλησή του αποτέλεσαν καταλυτικό παράγοντα συμβάλλοντας τα μέγιστα για την ποιοτική ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Άγγελο Μπουχουρά για την προθυμία του να προσφέρει την βοήθεια και τις γνώσεις του για οποιοδήποτε θέμα και οποιαδήποτε στιγμή. Πίστεψε σε μένα και συνέβαλε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στην πορεία και την εξέλιξή μου. Τον γνώρισα ως Υπότροφο του τμήματος και στο παρόν κείμενο τον αναφέρω με τον τίτλο του Επίκουρου Καθηγητή.

Ξεχωριστή θέση κρατάω για την Ιφιγένεια Σκαλίδη που στάθηκε δίπλα μου τα τελευταία χρόνια. Ο δυναμισμός της, οι γεμάτες θετική ενέργεια σκέψεις της και η συμπαράστασή της με βοήθησαν πολλές φορές να ξεπεράσω τις δυσκολίες που παρουσιαζόντουσαν και να καταφέρω να ολοκληρώσω τον κύκλο των προπτυχιακών σπουδών. Πέρα από την στήριξή της όμως θα ήθελα να την ευχαριστήσω και για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθώς μαζί καταφέραμε να κάνουμε σημαντικά βήματα.

Κλείνοντας, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για τους γονείς μου. Χωρίς την συμπαράσταση και την αγάπη τους δεν θα είχα καταφέρει να φτάσω εδώ που είμαι σήμερα. Η διπλωματική μου αφιερώνεται σε εκείνους και

ιδιαίτερα στον αδερφό μου που με στήριξε και συνεχίζει να με στηρίζει με κάθε δυνατό τρόπο.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογική ανάπτυξη έχει άμεσο επακόλουθο την αύξηση ενεργειακής ζήτησης. Εξαιτίας των συμβατικών καυσίμων που χρησιμοποιούνται κατά βάση στην ηλεκτροπαραγωγική διαδικασία παρατηρείται μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπών αερίων ρύπων. Προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, οι νέες νομοθετικές διατάξεις που αφορούν την ενέργεια και το περιβάλλον στοχεύουν στην μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος των κτηρίων. Οι βασικές συνιστώσες για την επίτευξη του στόχου είναι δύο. Η πρώτη αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα των κτηρίων με σκοπό την μείωση ή ακόμα και τον μηδενισμό της ενέργειας που απαιτούν από το δίκτυο. Η δεύτερη αφορά διατάξεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από ιδιώτες και όχι μόνο, με σκοπό την ιδιοκατανάλωση της παραγόμενης ενέργειας. Ο κτηριακός τομέας αναμένεται να διαδραματίσει καίριο ρόλο τα επόμενα χρόνια, καθώς η αναβάθμιση των υφιστάμενων υποδομών και οι τεχνικές οδηγίες κατασκευής των νέων κτηρίων, μπορούν να επιφέρουν σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων.



## **ABSTRACT**

The technological expansion has direct impact on energy demand increasement. Due to the conventional fuels used primarily in power generation, is observed a higher percentage of greenhouse gas (GHG) emissions. In order to reduce carbon dioxide emissions, the new regulations, related to the energy and climate changes, aims to decrease energy footprint of buildings. There are two key components to achieving the goal. The first refers to the energy efficiency of buildings, in order to reduce or even eliminate the energy required by the grid. The second concerns the production of electricity through Renewable Energy Sources by the consumers so that the produced energy will be consumed for the building demands. The building sector is expected to play a key role in the coming years, as upgrading existing infrastructure and technical guidelines for the construction of new buildings can bring about a significant reduction in GHG emissions.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|            |  |    |
|------------|--|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....  | 1  |
| 1.1        | Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας .....                          | 1  |
| 1.2        | Δομή διπλωματικής εργασίας .....                                 | 1  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 | ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΤΗΡΙΟΥ.....                               | 3  |
| 2.1        | Εισαγωγή.....  | 3  |
| 2.2        | Ελληνική νομοθεσία για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων .....  | 4  |
| 2.3        | Ενεργειακός σχεδιασμός του κτηρίου αναφοράς.....                 | 5  |
| 2.3.1      | Αρχιτεκτονικός σχεδιασμός.....                                   | 5  |
| 2.3.2      | Ενεργειακός σχεδιασμός ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων .....  | 6  |
| 2.4        | Ενεργειακή κατανάλωση κτηρίου .....                              | 10 |
| 2.4.1      | Υπολογισμός κατανάλωσης πρώτου σεναρίου .....                    | 15 |
| 2.4.2      | Υπολογισμός κατανάλωσης δεύτερου σεναρίου.....                   | 18 |
| 2.4.3      | Υπολογισμός κατανάλωσης τρίτου σεναρίου .....                    | 20 |
| 2.4.4      | Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση .....                               | 21 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 | ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΩΤΙΣΤΙΚΩΝ ΦΘΟΡΙΟΥ ΜΕ LED.....                     | 25 |
| 3.1        | Εισαγωγή.....  | 25 |
| 3.2        | Υπολογισμός φορτίων φωτισμού με χρήση του λογισμικού DIALux..... | 26 |
| 3.3        | Αποτελέσματα φωτομετρικής μελέτης .....                          | 34 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 | ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΟΙΧΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΜΕ ΚΛΕΙΣΤΗ.....                | 35 |
| 4.1        | Εισαγωγή.....  | 35 |
| 4.2        | Περιγραφή συστημάτων αντλιών θερμότητας εδάφους.....             | 35 |
| 4.2.1      | Αντλία θερμότητας.....   | 35 |
| 4.2.2      | Σύνδεση σωληνώσεων στο υπέδαφος.....                             | 39 |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| 4.3        | Εισαγωγή στο λογισμικό RetScreen και σχεδιασμός του συστήματος.....               | 41  |
| 4.3.1      | Ψυκτικό και θερμικό φορτίο .....  | 43  |
| 4.3.2      | Ενεργειακό μοντέλο .....  | 47  |
| 4.3.3      | Αποτελέσματα κλειστού γεωθερμικού συστήματος .....                                | 49  |
| 4.4        | Σύγκριση υφιστάμενου γεωθερμικού συστήματος με το κλειστό σύστημα γεωθερμίας..... | 50  |
| 4.4.1      | Οικονομική βιωσιμότητα αντικατάστασης ανοιχτής με κλειστή γεωθερμία               | 51  |
| <br>       |   |     |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 | ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....  | 52  |
| 5.1        | Εισαγωγή.....   | 52  |
| 5.2        | Νομικό πλαίσιο και ενεργειακός συμψηφισμός – Net Metering .....                   | 56  |
| 5.3        | Εισαγωγή στο λογισμικό PnSyst και στις δυνατότητές του.....                       | 57  |
| 5.3.1      | Σχεδιασμός του συστήματος.....  | 62  |
| 5.3.2      | Υπολογισμός απωλειών και συνολική παραγωγή του συστήματος.....                    | 67  |
| 5.4        | Διάρκεια ζωής και οικονομική μελέτη του συστήματος.....                           | 74  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 | ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ .....                                      | 83  |
| 6.1        | Εισαγωγή στην τεχνολογία των ανεμογεννητριών .....                                | 83  |
| 6.2        | Οικιστικές ανεμογεννήτριες .....  | 87  |
| 6.2.1      | Νομικό πλαίσιο και ενεργειακός συμψηφισμός – Net Metering.....                    | 87  |
| 6.3        | Εισαγωγή στο λογισμικό RetScreen4 και στις δυνατότητές του.....                   | 88  |
| 6.3.1      | Σχεδιασμός συστήματος ανεμογεννητριών.....  | 90  |
| 6.3.2      | Υπολογισμός απωλειών και συνολική παραγωγή συστήματος .....                       | 95  |
| 6.4        | Διάρκεια ζωής και οικονομική μελέτη συστήματος.....                               | 97  |
| 6.5        | Υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών – ανεμογεννητριών.....                             | 99  |
| 6.5.1      | Οικονομική μελέτη υβριδικού συστήματος.....                                       | 100 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....   | 102 |

|  |     |
|--|-----|
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....   | 104 |
| Παράρτημα Α Πίνακες Τεχνικών οδηγιών ΚΕΝΑΚ.....                          | 106 |
| Παράρτημα Β Βασικοί ορισμοί και τυπολόγιο φωτομετρίας.....               | 112 |
| Παράρτημα Γ Τυπολόγιο υπολογισμού γεωθερμικού συστήματος .....           | 116 |
| Παράρτημα Δ Τυπολόγιο υπολογισμού παραγωγής φωτοβολταϊκών πλαισίων ..... | 119 |
| Παράρτημα Ε Τυπολόγιο υπολογισμού παραγωγής ανεμογεννητριών .....        | 121 |

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται μία συνοπτική παρουσίαση του αντικειμένου της εργασίας, της δομής και του στόχου που εξυπηρετεί. Ακόμα, γίνεται μία σύντομη αναφορά στα κεφάλαια που ακολουθούν για πληροφόρηση του αναγνώστη.

Οι ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενεργειακής ζήτησης. Η ηλεκτροπαραγωγή στο διασυνδεδεμένο σύστημα της χώρας, σύμφωνα με την ενημέρωση που πραγματοποιεί η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) για την συμβολή κάθε ενεργειακής πηγής στο συνολικό μείγμα καυσίμου, στηρίζεται κυρίως σε συμβατικά καύσιμα (λιγνίτης και φυσικό αέριο). Η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων έχει ως άμεσο επακόλουθο την αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), χημική ένωση που συμβάλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και τις έντονες κλιματολογικές αλλαγές.

Αντικείμενο της διπλωματικής αποτελεί η μελέτη μεθόδων μείωσης και εξοικονόμησης ενέργειας στο νέο κτήριο του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η μεν μείωση αφορά την αντικατάσταση των ήδη εγκατεστημένων συστημάτων με συστήματα ενεργειακά αποδοτικότερα. Από την άλλη πλευρά εξετάστηκαν τα αποτελέσματα που επιφέρει η εγκατάσταση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο κτήριο.

### 1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από τρία βασικά μέρη: τον υπολογισμό ενεργειακής κατανάλωσης του κτηρίου, την μελέτη εγκατάστασης συστημάτων με μεγαλύτερο συντελεστή απόδοσης από τα ήδη εγκατεστημένα και την παραγωγή ενέργειας κάνοντας χρήση ανανεώσιμων πηγών. Στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο υπολογίστηκε η ετήσια ενεργειακή ζήτηση του κτηρίου. Ακολούθως, στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μελέτη εγκατάστασης φωτιστικών LED προκειμένου να μελετηθεί το ποσοστό μείωσης της καταναλισκόμενης ενέργειας. Στο Κεφάλαιο 4 μελετάται το σενάριο

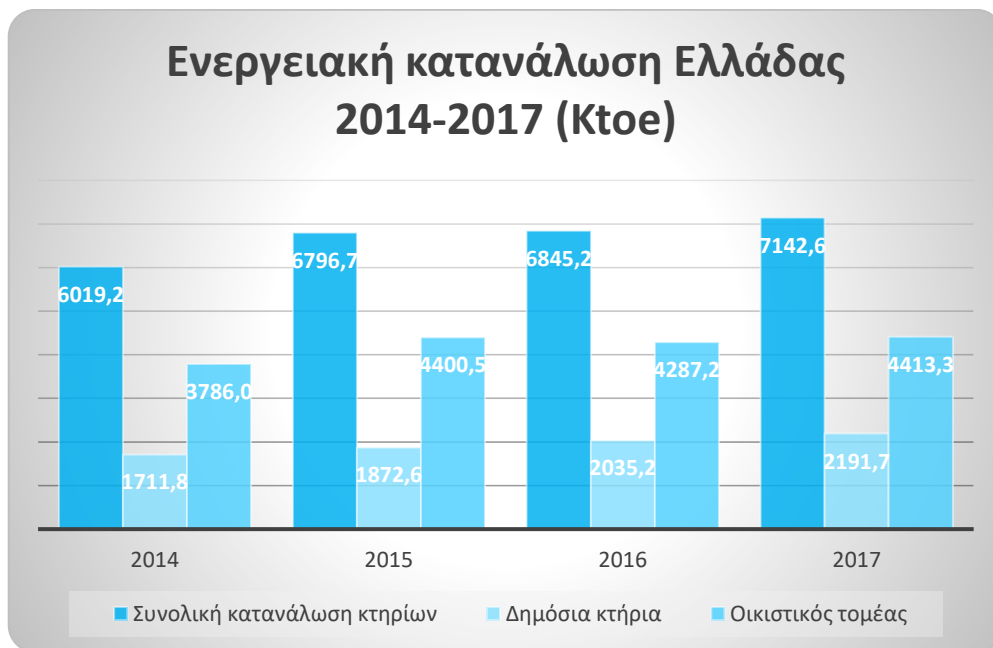
αντικατάστασης του ανοιχτού γεωθερμικού συστήματος, που είναι ήδη εγκατεστημένο, με κλειστού τύπου. Τέλος, στα Κεφάλαια 5 και 6 γίνεται σχεδιασμός και μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων και ανεμογεννητριών στο κτήριο αναφοράς.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΤΗΡΙΟΥ

#### 2.1 Εισαγωγή

Η συνεχής αναβάθμιση του βιοτικού επιπέδου έχει άμεσο αντίκτυπο στην αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων στον κτηριακό τομέα. Στην Ελλάδα, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στον κτηριακό τομέα, σύμφωνα με τα ενεργειακά στατιστικά στοιχεία του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, παρουσιάζει μία αύξηση από το 2014-2017 της τάξης του 5%. Πιο συγκεκριμένα, τα δημόσια κτήρια καταναλώνουν σχεδόν το 30%, της προαναφερθείσας ενέργειας, με μία ετήσια αύξηση 8%, ενώ πάνω από το 50% καταναλώνεται στον οικιστικό τομέα. Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1. [1]



Σχήμα 2.1: Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση κτηριακού τομέα

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο και σύμφωνα με τα δεδομένα της Ευρωπαϊκής επιτροπής για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων, ο κτηριακός τομέας είναι υπεύθυνος για το 40% της κατανάλωσης της παραγόμενης ενέργειας και το 36% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Πάνω από το 35% των κτηρίων θεωρούνται παλιές κατασκευές, ενώ το 75% του κτηρίου είναι ενεργειακά αναποτελεσματικό. Ταυτόχρονα, μόνο το 0,4-1,2% του

κτίσματος αναβαθμίζεται κάθε χρόνο (ποσοστό που εξαρτάται από την χώρα κατασκευής του). Η ενεργειακή αναβάθμιση των υφιστάμενων κτηρίων, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και να διαδραματίσει καίριο ρόλο στην διεύθυνση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς θα μπορούσε να μειώσει την συνολική κατανάλωση ενέργειας της Ευρωπαϊκής ένωσης κατά 5-6% και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά, περίπου 5%. [2]

Μία νέα προσέγγιση για την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτηρίων είναι τα «Κτήρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης» (Near Zero Energy Buildings - NZEB). Τα κτήρια αυτά αποτελούν έναν συνδυασμό του σωστού κτηριακού σχεδιασμού, μειώνοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτηρίου, και της εγκατάστασης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, σε συνδυασμό με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ελαχιστοποιώντας την ενεργειακή ζήτηση. Αυτή η ιδέα άρχισε να εμφανίζεται στην βιβλιογραφία ως μία μορφή εξέλιξης των ενεργειακά αποδοτικών κτηρίων και προϋποθέτει να έχουν ετήσιο ισοζύγιο μηδενικής ενέργειας. [3]

## **2.2 Ελληνική νομοθεσία για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων**

Η Κατασκευή των κτηρίων στην Ελλάδα βασίζεται στον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (ΚΕΝΑΚ). Ο ΚΕΝΑΚ ενσωματώνει τον ολοκληρωμένο ενεργειακό σχεδιασμό στην μελέτη των κτηρίων, συμβάλλοντας στην βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης, στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην προστασία του περιβάλλοντος. Με αυτό τον τρόπο η ελληνική νομοθεσία πλέον συμβαδίζει με την Οδηγία 2002/91/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου της 16<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 2002 «Για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων» (ΕΕ L1 της 4.1.2003). [4]

Ειδικότερα, ο ΚΕΝΑΚ στοχεύει στην μείωση της κατανάλωσης της συμβατικής ενέργειας του κτηρίου για ψύξη, θέρμανση, κλιματισμό, παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ΖΝΧ) και φωτισμό. Παράλληλα, διασφαλίζει τις συνθήκες άνεσης και ποιότητας για τους χρήστες στο εσωτερικό των κτηρίων.

Με την Αρ. ΔΕΠΕΑ/οικ. 178581 των Υπουργών Οικονομικών και Περιβάλλοντος και Ενέργειας, εγκρίθηκε ο νέος Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (ΚΕΝΑΚ), ο



οποίος δημοσιεύτηκε στο ΦΕΚ Β' 2367/12-7-2017. Η εφαρμογή του κανονισμού στηρίζεται στις Τεχνικές Οδηγίες του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος (ΤΟΤΕΕ). [5]

## **2.3 Ενεργειακός σχεδιασμός του κτηρίου αναφοράς**

Ο ενεργειακός σχεδιασμός του νέου κτηρίου των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Βόλου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον Νόμο 3361-«Μέτρα για την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτηρίων» ΦΕΚ 89/19 Μαΐου 2008. Βασικές κατηγορίες του ενεργειακού σχεδιασμού αποτελούν ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός και ο σχεδιασμός των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων του κτηρίου αναφοράς. [4]

### **2.3.1 Αρχιτεκτονικός σχεδιασμός**

Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός του κτηρίου έγινε με βάση τον προαναφερθείσα νόμο σύμφωνα με το Άρθρο 3, παρ. 2. Ο προσανατολισμός του κτηρίου είναι νοτιοανατολικός (αζιμούθιο  $-30^\circ$ ) ενώ τα ανοίγματα προβλέφθηκαν με βέλτιστο τρόπο ώστε να ικανοποιούν τα παρακάτω κριτήρια:

- Τα νότια ανοίγματα δέχονται μεγαλύτερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας την χειμερινή περίοδο, ενώ με το κατάλληλο οριζόντιο σκίαστρο, ελάχιστη το καλοκαίρι.
- Τα ανοίγματα στον βορρά συνεισφέρουν στην καλύτερη ποιότητα φωτισμού καθώς δέχονται διάχυτη και όχι άμεση ακτινοβολία. Συνιστώνται για τους καλοκαιρινούς μήνες όμως η επιφάνειά τους θα πρέπει να είναι περιορισμένη καθώς εμφανίζουν μεγάλες απώλειες και ελάχιστα κέρδη τον χειμώνα. Ο βορινός προσανατολισμός θεωρείται κατάλληλος για χωροθέτηση εργαστηρίων και χώρων εργασίας.
- Τα ανατολικά και δυτικά ανοίγματα θα πρέπει να αποφεύγονται καθώς παρουσιάζουν την χειρότερη συμπεριφορά σε όλη την διάρκεια του έτους.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι χώροι του κτηρίου και ο προσανατολισμός των ανοιγμάτων τους:

**Πίνακας 2.1:** Προσανατολισμός ανοιγμάτων των επιμέρους χώρων

| Χώροι                            | Προσανατολισμός Ανοιγμάτων |
|----------------------------------|----------------------------|
| Αίθουσα διδασκαλίας 1            | ΒΔ                         |
| Εργαστήριο Η/Υ 1                 | ΒΔ                         |
| Αίθουσα Μαθημάτων Προπτυχιακού 1 | ΒΔ                         |
| Εξειδικευμένα Εργαστήρια 1       | ΒΔ                         |
| Χώρος Τεχνικής Υποστήριξης 1     | ΒΔ                         |
| Γραφείο Τεχνικής Υποστήριξης     | ΒΔ                         |
| Εξειδικευμένα Εργαστήρια 2       | ΒΔ                         |
| Αίθουσα Μαθημάτων Προπτυχιακών 2 | ΒΔ                         |
| Γραφεία Καθηγητών                | ΝΑ                         |

### 2.3.2 Ενεργειακός σχεδιασμός ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων

Ο υπολογισμός της ηλεκτρολογικής μελέτης του κτηρίου πραγματοποιήθηκε το έτος 2012 και βασίστηκε στο Ελληνικό Πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384 “Απαιτήσεις για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις”, καθώς και στο Άρθρο 3, παρ. 3. Σύμφωνα με αυτό, ο ενεργειακός σχεδιασμός των ηλεκτρομηχανολογικών (Η/Μ) εγκαταστάσεων αφορά τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης και το σύστημα τεχνητού φωτισμού. [6]

Απαραίτητο στοιχείο σε ένα κτήριο είναι ο σχεδιασμός του συστήματος κλιματισμού. Οι βασικές λειτουργίες που επιτελεί το σύστημα είναι:

- Θέρμανση: πρόσθεση θερμικής ενέργειας στον αέρα του κλιματιζόμενου χώρου.
- Ψύξη: αφαίρεση θερμικής ενέργειας από τον αέρα του κλιματιζόμενου χώρου.
- Ύγρανση: πρόσθεση υγρασίας (νερού) στον αέρα του κλιματιζόμενου χώρου.
- Αφύγρανση: αφαίρεση υγρασίας (νερού) από τον αέρα του κλιματιζόμενου χώρου.
- Ανανέωση του αέρα: διαδικασία απαγωγής του αέρα του κλιματιζόμενου χώρου και εισαγωγή ατμοσφαιρικού αέρα.

- Καθαρισμός του αέρα: διεργασία βελτίωσης της ποιότητας του εισαγόμενου ατμοσφαιρικού αέρα αφαιρώντας σωματιδιακές και βιολογικές προσμίξεις.

Σε όλους του κλιματιζόμενους χώρους του κτηρίου αναφοράς η θέρμανση και η ψύξη πραγματοποιείται με τοπικές μονάδες ανεμιστήρα (Fan Coil Unit – FCU). Τα FCU επιτυγχάνουν την θέρμανση και την ψύξη των χώρων μέσω εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα, και τροφοδοτούνται από το αντίστοιχο θερμό ή κρύο νερό που προέρχονται από τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης.

Για τον υπολογισμό των συστημάτων Θέρμανσης και Ψύξης ενός κτηρίου λαμβάνεται υπόψιν η κλιματική ζώνη της επικράτειας στην οποία ανήκει. Οι κλιματικές ζώνες στις οποίες διαιρείται η Ελλάδα, σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ, είναι τέσσερις (Α, Β, Γ και Δ), με σειρά κατάταξης από την θερμότερη (Ζώνη Α) στην ψυχρότερη (Ζώνη Δ) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2. Βασικό κριτήριο διαμόρφωσής τους είναι οι βαθμομέρες θέρμανσης. Ο Βόλος βρίσκεται στην Β κλιματική ζώνη με προβλεπόμενη περίοδο θέρμανσης από 1η Νοεμβρίου μέχρι 15η Απριλίου και προβλεπόμενη περίοδο ψύξης από 1η Ιουνίου μέχρι 15η Σεπτεμβρίου. [6]

**Πίνακας 2.2:** Διαχωρισμός της ελληνικής επικράτειας σε κλιματικές ζώνες κατά νομούς:

| <b>ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ</b> | <b>ΝΟΜΟΙ</b>  |
|-----------------------|---|
| ZΩΝΗ Α                | Ηρακλείου, Χανίων, Ρεθύμνου, Λασιθίου, Κυκλάδων, Δωδεκανήσου, Σάμου, Μεσσηνίας, Λακωνίας, Αργολίδας, Ζακύνθου, Κεφαλληνίας & Ιθάκης, Κύθηρα & νησιά Σαρωνικού (Αττικής), Αρκαδίας (πεδινή).               |
| ZΩΝΗ Β                | Αττικής (εκτός Κυθήρων & νησιών Σαρωνικού), Κορινθίας, Ηλείας, Αχαΐας, Αιτωλοακαρνανίας, Φθιώτιδας, Φωκίδας, Βοιωτίας, Ευβοίας, Μαγνησίας, Λέσβου, Χίου, Κέρκυρας, Λευκάδας, Θεσπρωτίας, Πρέβεζας, Άρτας. |
| ZΩΝΗ Γ                | Αρκαδίας (ορεινή), Ευρυτανίας, Ιωαννίνων, Λάρισας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Πιερίας, Ημαθίας, Πέλλας, Θεσσαλονίκης, Κιλκίς, Χαλκιδικής, Σερρών (εκτός ΒΑ τμήματος), Καβάλας, Ξάνθης, Ροδόπης, Έβρου.          |
| ZΩΝΗ Δ                | Γρεβενών, Κοζάνης, Καστοριάς, Φλώρινας, Σερρών (ΒΑ τμήμα), Δράμας.  |

Τα συστήματα ψύξης είναι εκείνα που έχουν τις υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις στα δημόσια κτήρια. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να γίνει σωστή διαστασιολόγηση και επιλογή του κατάλληλου συστήματος. Βασικά κριτήρια για την επιλογή ενός συστήματος ψύξης είναι ο συντελεστής απόδοσης και το κόστος εγκατάστασης. Όσο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης τόσο μειώνεται η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την κάλυψη των ψυκτικών φορτίων.

Στο κτήριο για την κάλυψη του ψυκτικού φορτίου έγινε υπολογισμός εγκατάστασης δύο ανοικτών γεωθερμικών αντλιών και δύο αντλιών αέρα-νερού (ψύκτες). Τα γεωθερμικά συστήματα παρουσιάζουν υψηλό βαθμό απόδοσης ενώ από την άλλη πλευρά οι ψύκτες είναι συστήματα με χαμηλότερο συντελεστή απόδοσης από το γεωθερμικό σύστημα και απαιτούν μεγαλύτερο ποσό ενέργειας. Οι ψύκτες σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σε θέση να καλύψουν το 100% του ψυκτικού φορτίου, σε περίπτωση βλάβης των γεωθερμικών αντλιών, όμως υπό φυσιολογικές συνθήκες καλύπτουν μόνο την αιχμή του φορτίου, όταν αυτή εμφανιστεί.

Η τοποθεσία του κτηρίου επέτρεπε την εγκατάσταση γεωθερμίας. Έτσι, πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός εγκατάστασης δύο γεωθερμικών αντλιών. Οι δύο αντλίες δεν είναι όμοιες και δεν καλύπτουν το ίδιο ποσοστό φορτίου. Η ηλεκτρική ισχύς της πρώτης αντλίας είναι 130kW με συντελεστή απόδοσης 4.4%, κατά την περίοδο θέρμανσης του κτηρίου, και 5.2%, κατά την περίοδο ψύξης του κτηρίου. Από την άλλη πλευρά, η δεύτερη αντλία έχει ηλεκτρική ισχύ 90kW με συντελεστή απόδοσης 3.8% και 5% για την περίοδο θέρμανσης και ψύξης αντίστοιχα. Συνολικά, οι δύο γεωθερμικές αντλίες είναι σε θέση να καλύψουν θερμικό φορτίο ισχύος 258.4kW και ψυκτικό φορτίο ισχύος 222.7kW.

Παρόλο που η γεωθερμική αντλία είναι ικανή να καλύψει το θερμικό φορτίο του κτηρίου, πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός και εγκατάσταση δύο λέβητων αερίου λαμβάνοντας υπόψιν δύο βασικούς παράγοντες. Αρχικά, ο λέβητας αερίου, ως μηχανή εσωτερικής καύσης, έχει την ικανότητα θέρμανσης των χώρων απαιτώντας πολύ μικρότερο ποσό ενέργειας. Επιπλέον, οι λέβητες έχουν την ικανότητα κάλυψης θερμικού φορτίου ακόμα και σε περίπτωση διακοπή ρεύματος, κάτι που δεν συμβαίνει στις

γεωθερμικές αντλίες. Επομένως, για τους λόγους που αναφέρθηκαν, η θέρμανση του κτηρίου βασίζεται αποκλειστικά στους λέβητες.

Οι απαιτήσεις του κτηρίου σε εξαερισμό καλύπτονται από δύο διαφορετικά συστήματα. Στα γραφεία, στις αίθουσες διδασκαλίας, στα εργαστήρια και στους διαδρόμους έχει πραγματοποιηθεί μελέτη εγκατάστασης τοπικών ανάλλακτων αέρα – αέρα. Από την άλλη, ο αερισμός των αμφιθεάτρων πραγματοποιείται με κεντρικές κλιματιστικές μονάδες (ΚΚΜ). Και τα δύο συστήματα έχουν την δυνατότητα ανάκτησης του φορτίου ενθαλπίας του αερισμού με ποσοστό 58% - 66% και 50% - 60% αντίστοιχα.

Η βασική διαφορά των δύο συστημάτων έγκειται στον προκλιματισμό του νωπού αέρα που εισέρχεται στους χώρους. Στα αμφιθέατρα, με την χρήση ΚΚΜ επιτυγχάνεται ο προκλιματισμός του νωπού αέρα στο 100% , με αποτέλεσμα ο εισερχόμενος στον χώρο αέρας να έχει την επιθυμητή θερμοκρασία και το επιθυμητό ποσοστό υγρασίας. Από την άλλη πλευρά, με την εγκατάσταση εναλλακτών υπάρχει μόνο η δυνατότητα ανάκτησης ενός μέρους της ενθαλπίας του φορτίου αερισμού (58% - 66%), έχοντας την ικανότητα η θερμοκρασία του εισαγόμενου αέρα να φτάσει το 75% της επιθυμητής. Το φορτίο αερισμού που δεν ανακτάται από τον εναλλάκτη καλύπτεται από την προσαύξηση του φορτίου των FCU σε ποσοστό έως και 35% σε σχέση με το βασικό φορτίο της μονάδας.

Η φωτοτεχνική μελέτη του κτηρίου πραγματοποιήθηκε με φωτιστικά φθορίου. Η επιλογή του τύπου των φωτιστικών βασίστηκε αποκλειστικά στην τιμή τους. Ως γνωστόν οι λαμπτήρες φθορίου έχουν μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος σε σύγκριση με τα φωτιστικά Διόδου Εκπομπής Φωτός (Light Emitting Diode, LED), τα οποία απαιτούν λιγότερη ενέργεια και παρέχουν καλύτερη ομοιομορφία. Παρόλα αυτά, όταν έγινε η μελέτη η τιμή των LED ήταν υψηλή και αποτρεπτική για την επιλογή τους.

Τέλος, στο κτήριο έχει γίνει μελέτη εγκατάστασης συστήματος αυτοματισμού. Τα συστήματα αυτοματισμού τόσο σε κατοικίες όσο και σε δημόσια κτήρια συμβάλουν σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην ενεργειακή αποδοτικότητα, έχοντας την ικανότητα μείωσης της καταναλισκόμενης ενέργειας έως και 15%.

Ο κύριος αυτοματισμός που εφαρμόστηκε στο κτήριο είναι ο έλεγχος στάθμης φωτισμού. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα ο φωτισμός να μην λειτουργεί στην ονομαστική του ισχύ αλλά να παρέχει τόση ισχύ ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις

των χώρων σε φωτιστική ισχύ και σε ομοιομορφία (στην περίπτωση αιθουσών διδασκαλίας 500 Lux και 0.6 ομοιομορφία) σε συνδυασμό με το φυσικό φως. Στον Πίνακα Α.1 του Παραρτήματος Α παρατίθενται οι απαιτήσεις σε φωτισμό των χώρων ανάλογα με την χρήση τους σύμφωνα με τις τεχνικές οδηγίες του ΚΕΝΑΚ.

Συστήματα αυτοματισμού εφαρμόστηκαν και στο σύστημα κλιματισμού. Ο έλεγχος των FCU των επιμέρους χώρων πραγματοποιείται μέσω χειριστηρίων τα οποία έχουν και τον ρόλο του θερμοστάτη. Ελέγχουν την έναρξη των FCU με βάση την μέτρηση της θερμοκρασίας του χώρου και ρυθμίζουν την ταχύτητα του ανεμιστήρα. Επιπλέον οι εναλλάκτες αέρα για τον αερισμό και εξαερισμό των χώρων ελέγχονται από αισθητήρα παρουσίας ώστε να εντέλλεται η έναρξή τους μόνο κατά την παρουσία ατόμων στο χώρο οπότε και είναι απαραίτητες οι εναλλαγές νωπού προκλιματισμένου αέρα. Με αντίστοιχα αισθητήρια θερμοκρασίας και υγρασίας ελέγχεται και η έναρξη των FCU για την κάλυψη του επιπλέον φορτίου του αερισμού.

## 2.4 Ενεργειακή κατανάλωση κτηρίου

Προκειμένου να καθοριστούν οι συνθήκες λειτουργίας του κτηρίου, στον κτηριοδομικό κανονισμό, τα κτήρια ταξινομούνται σε κατηγορίες ανάλογα με την χρήση τους. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες των κτηρίων καθώς και οι χρήσεις της κάθε κατηγορίας.

**Πίνακας 2.3:** Ταξινόμηση των κτηρίων σύμφωνα με τη χρήση τους για τις ανάγκες της παρούσας τεχνικής οδηγίας.

| <b>Βασικές κατηγορίες κτηρίων</b> | <b>Χρήσεις κτηρίων που περιλαμβάνονται στις κατηγορίες</b>   |
|-----------------------------------|--|
| Κατοικίας                         | Μονοκατοικία, πολυκατοικία (κτήριο με περισσότερα του ενός ανεξάρτητα διαμερίσματα).   |
| Προσωρινής διαμονής               | Ξενοδοχείο, ξενώνας, οικοτροφείο και κοιτώνας.   |
| Συνάθροισης κοινού                | Χώρος συνεδρίων, χώρος εκθέσεων, μουσείο, χώρος συναυλιών, θέατρο, κινηματογράφος, αίθουσα δικαστηρίων, κλειστό γυμναστήριο, κλειστό κολυμβητήριο, εστιατόριο, ζαχαροπλαστείο, καφενείο, τράπεζα, αίθουσα πολλαπλών χρήσεων. |
| Εκπαίδευσης                       | Νηπιαγωγείο, πρωτοβάθμια εκπαίδευση, δευτεροβάθμια εκπαίδευση, τριτοβάθμια εκπαίδευση, αίθουσα διδασκαλίας, φροντιστήριο.  |

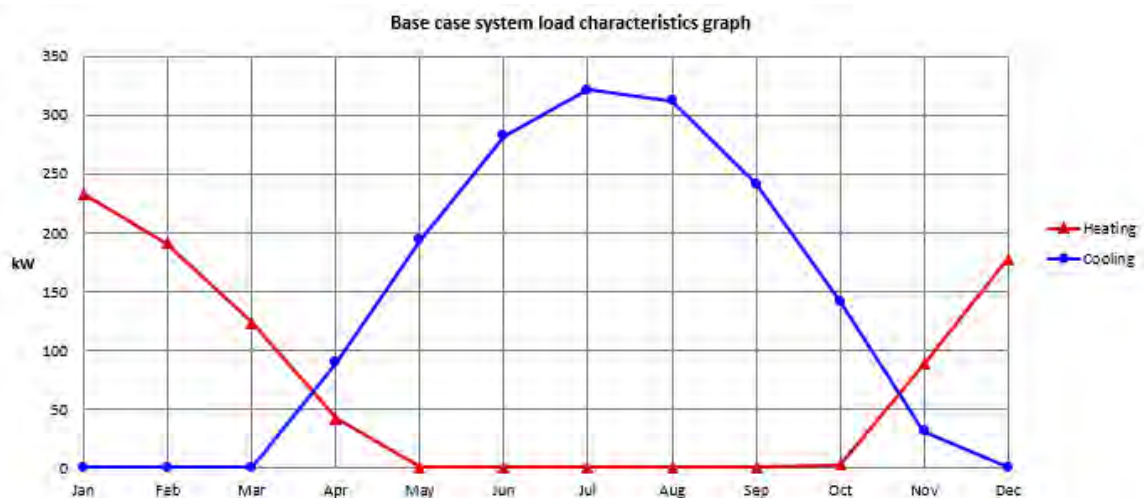
|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Υγείας και κοινωνικής πρόνοιας | Νοσοκομείο, κλινική, αγροτικό ιατρείο, υγειονομικός σταθμός, κέντρο υγείας, ιατρείο, ψυχιατρείο, ίδρυμα ατόμων με ειδικές ανάγκες, ίδρυμα χρονίως πασχόντων, οίκος ευγηρίας, βρεφοκομείο, βρεφικός σταθμός, παιδικός σταθμός. |
| Σωφρονισμού                    | Κρατητήριο, αναμορφωτήριο, φυλακή.  |
| Εμπορίου                       | Κατάστημα, εμπορικό κέντρο, αγοράς και υπεραγοράς, φαρμακείο, κουρείο και κομμωτήριο, ινστιτούτο γυμναστικής.   |
| Γραφείων                       | Γραφείο, βιβλιοθήκη.  |

Ανάλογα λοιπόν με την κατηγορία που ανήκει το κτήριο αναφοράς καθορίζεται και ο τρόπος λειτουργίας του. Οι συνθήκες λειτουργίας των κτηρίων παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα Α.1 του Παραρτήματος Α. Ο υπολογισμός της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης του κτηρίου βασίστηκε στις τεχνικές οδηγίες που περιέχονται στον Πίνακα Α.2 του Παραρτήματος Α, όπου παρουσιάζονται αναλυτικά οι συνθήκες λειτουργίας των κτηρίων, και πραγματοποιήθηκε με βάση τις ακόλουθες οδηγίες του ΚΕΝΑΚ [6]:

- Για τα πανεπιστημιακά κτήρια το προβλεπόμενο ωράριο λειτουργίας είναι πενθήμερο με 13 ώρες ημερήσιας χρήσης από τον Σεπτέμβριο μέχρι τον Ιούνιο.
- Η τοποθεσία του κτηρίου βρίσκεται στην Β κλιματική ζώνη με προβλεπόμενη περίοδο θέρμανσης από 1η Νοεμβρίου μέχρι 15η Απριλίου και προβλεπόμενη περίοδο ψύξης από 1η Ιουνίου μέχρι 15η Σεπτεμβρίου.
- η ψύξη, η θέρμανση και ο αερισμός των χώρων προβλέπονται μόνο κατά τις ώρες λειτουργίας του κτηρίου.

Μία ακόμη παραδοχή αφορά το σύστημα κλιματισμού του κτηρίου αναφοράς. Στο Σχήμα 2.2 αναπαριστάτε το ψυκτικό και θερμικό φορτίο του κτηρίου. Θα πρέπει να τονιστεί ότι ο σχεδιασμός των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης έγινε με βάση τον πλήρη ταυτοχρονισμό των φορτίων. Αυτό λειτουργεί σαν δικλείδα ασφαλείας, εξασφαλίζοντας την επιτυχημένη κάλυψη των αναγκών του κτηρίου ακόμα και σε συνθήκες με μεγάλη ζήτηση. Παρόλα αυτά για τον υπολογισμό της απαιτούμενης

ενέργειας του κτηρίου, λαμβάνοντας υπόψιν την ετήσια λειτουργία του κτηρίου σύμφωνα με τον κανονισμό του ΚΕΝΑΚ, είναι ξεκάθαρο ότι το μέγιστο φορτίο ψύξης ακόμα και στον πλήρη ταυτοχρονισμό εμφανίζεται τον Ιούλιο, δηλαδή σε περίοδο όπου το κτήριο δεν λειτουργεί. Επιπλέον, ακόμη και τους μήνες λειτουργίας του πανεπιστημίου που είναι απαραίτητη η ψύξη του, το φορτίο δεν θα ξεπεράσει σε ταυτοχρονισμό το ποσοστό του 70%. Επομένως, θεωρείται ότι οι γεωθερμικές αντλίες είναι σε θέση να καλύψουν το φορτίο βάση, ενώ οι ψύκτες λειτουργούν μόνο για την κάλυψη του φορτίου αιχμής, όταν αυτό εμφανιστεί.



Σχήμα 2.2: Ετήσια καμπύλη ψυκτικού και θερμικού φορτίου

Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκειμένου να υπολογίσουμε την ενεργειακή κατανάλωση του κτηρίου, απαραίτητη είναι η δημιουργία τριών σεναρίων. Το πρώτο σενάριο καλύπτει την χειμερινή περίοδο από 1η Νοεμβρίου μέχρι 15 Απριλίου. Στην διάρκεια αυτής της περιόδου το κτήριο έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις σε φωτισμό, λόγω της μικρότερης διάρκειας της ημέρας, και ανάγκη κάλυψης θερμικού φορτίου. Το δεύτερο σενάριο καλύπτει την περίοδο από μέσα Μάϊου μέχρι τέλος Ιουνίου και το πρώτο δεκαπενθήμερο του Σεπτεμβρίου. Η περίοδος επιλέχθηκε με βάση τις απαιτήσεις του κτηρίου σε ψύξη και η διάρκειά της σύμφωνα με το ωράριο λειτουργίας που προβλέπει ο ΚΕΝΑΚ. Τέλος το τρίτο σενάριο, αφορά την περίοδο από 16 Απριλίου και το πρώτο δεκαπενθήμερο του Μάϊου που η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε συνδυασμό με τα εσωτερικά θερμικά κέρδη, έχουν ως αποτέλεσμα την επίτευξη θερμικής άνεσης στους χώρους της εγκατάστασης.



Για τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης του κτηρίου ελήφθη υπόψιν το ωρολόγιο πρόγραμμα χειμερινού και εαρινού εξαμήνου του ακαδημαϊκού έτους 2018-2019. Η περίοδος του χειμερινού εξαμήνου είναι από 24/9/2018 έως 21/12/2018 με συνολική διάρκεια 13 εβδομάδες. Ακολουθούν δύο εβδομάδες διακοπών (23/12/2018 - 7/1/2019) και δύο εβδομάδες τυχόν αναπληρώσεων (8/1/2019 – 20/1/2019), ενώ η διάρκεια της εξεταστικής είναι τρεις εργάσιμες εβδομάδες (21/1/2019 - 8/2/2019). Το εαρινό εξάμηνο έχει επίσης διάρκεια δεκατριών εβδομάδων, ξεκινά στις 11/2/2019 και λήγει στις 24/5/2019, ενώ στην περίοδο αυτή μεσολαμβάνουν δύο εβδομάδες διακοπών (22/4/2019 - 3/5/2019). Ακολουθεί μία εβδομάδα αναπληρώσεων (4/5/2019 – 2/5/2019) και κατόπιν ακολουθεί εξεταστική που διαρκεί τρεις εργάσιμες εβδομάδες (3/6/2019 – 21/6/2019). Έτσι από τις 22/6/2019 μέχρι την επαναληπτική εξεταστική του Σεπτεμβρίου (2/9/2019 – 20/9/2019) τα αμφιθέατρα, τα εργαστήρια και οι αίθουσες διδασκαλίας δεν βρίσκονται σε λειτουργία. Τα παραπάνω συνοψίζονται στον Πίνακα 2.4.

**Πίνακας 2.4:** Ακαδημαϊκό Ημερολόγιο 2018-2019

| Χειμερινό Εξάμηνο      |   |
|------------------------|---|
| Έναρξη μαθημάτων       | Δευτέρα 24/09/2018                            |
| Λήξη μαθημάτων         | Παρασκευή 21/12/2018                          |
| Διάρκεια               | 13 Εβδομάδες                                  |
| Περίοδος Εξετάσεων     | Δευτέρα 21/01/2019 – Παρασκευή 8/02/2019      |
| Εορτές & Αργίες        | Κυριακή 28/10/2018 (Εθνική Επέτειος)          |
|                        | Σάββατο 17/11/2018 (Πολυτεχνείο)              |
|                        | Πέμπτη 6/12/2018 (Αγ. Νικολάου)               |
|                        | Κυριακή 06/01/2019 (Θεοφάνια)                 |
|                        | Τετάρτη 30/01/2019 (Τριών Ιεραρχών)           |
| Διακοπές Χριστουγέννων | Κυριακή 23/12/2018 έως και Δευτέρα 07/01/2019 |
| Εαρινό Εξάμηνο         |   |

|                         |  |
|-------------------------|--|
| Έναρξη μαθημάτων        | Δευτέρα 11/02/2019                                 |
| Λήξη μαθημάτων          | Παρασκευή 24/05/2019                               |
| Διάρκεια                | 13 Εβδομάδες                                       |
| Περίοδος Εξετάσεων      | Δευτέρα 03/06/2019 – Παρασκευή 21/06/2019          |
| Εορτές & Αργίες         | Δευτέρα 11/03/2019 (Καθαρά Δευτέρα)                |
|                         | Δευτέρα 25/03/2019 (25η Μαρτίου)                   |
|                         | Τετάρτη 01/05/2019 (Πρωτομαγιά)                    |
|                         | Δευτέρα 17/06/2019 (Αγίου Πνεύματος)               |
| Διακοπές Πάσχα          | Μ. Δευτέρα 22/04/2019 έως και Παρασκευή 03/05/2019 |
| Επαναληπτική Εξεταστική |  |
| Έναρξη                  | 02/09/2019   |
| Λήξη                    | 20/09/2019   |
| Διάρκεια                | 3 Εβδομάδες  |

Οι διαλέξεις πραγματοποιούνται σε 10 διαφορετικές αίθουσες, δύο εκ των οποίων είναι εργαστήρια υπολογιστών και ακόμη δύο εξειδικευμένα εργαστήρια. Η αντιστοιχία των αιθουσών στο νέο κτήριο παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.5.

**Πίνακας 2.5:** Αντιστοιχία Αιθουσών Διδασκαλίας

| Αίθουσες Διδασκαλίας | Αίθουσες διδασκαλίας νέου κτηρίου |
|----------------------|-----------------------------------|
| Κορδάτου             | Αμφιθέατρο 3                      |
| Σαράτση              | Αμφιθέατρο 1                      |
| Αίθουσα Σ            | Αίθουσα προπτυχιακών 1            |
| Εργαστήριο Α1        | Εργαστήριο Υ/Η 2                  |
| Εργαστήριο Α3        | Εργαστήριο Υ/Η 1                  |

|               |                            |
|---------------|----------------------------|
| Αίθουσα Γ1    | Αίθουσα προπτυχιακών 2     |
| Εργαστήριο Β2 | Εξειδικευμένο Εργαστήριο 1 |
| Εργαστήριο Γ2 | Εξειδικευμένο Εργαστήριο 2 |
| Αίθουσα Δ1    | Αίθουσα προπτυχιακών 1 ή 2 |
| Αίθουσα Δ2    | Αίθουσα προπτυχιακών 1 ή 2 |

Και στα τρία σενάρια που αναφέρθηκαν, κατά την λειτουργία των αμφιθεάτρων οι ετεροχρονισμοί των φορτίων φωτισμού είναι σχεδόν μηδενικοί. Αυτό έγκειται στο γεγονός ότι ο φυσικός φωτισμός είναι ελάχιστος.

#### 2.4.1 Υπολογισμός κατανάλωσης πρώτου σεναρίου

Η πρώτη περίοδος περιλαμβάνει την διδασκαλία μαθημάτων τόσο του χειμερινού όσο και του εαρινού εξαμήνου. Επομένως οι ενεργειακές απαιτήσεις του κτηρίου θα υπολογιστούν ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας της κάθε αίθουσας ξεχωριστά. Ο υπολογισμός της ενεργειακής κατανάλωσης κάθε αίθουσας έγινε με βάση τις ώρες λειτουργίας της. Για παράδειγμα, στο αμφιθέατρο Κορδάτου πραγματοποιούνται μαθήματα 18 ώρες εβδομαδιαίως. Το ωράριο λειτουργίας φαίνεται στον Πίνακα 2.6, όπου το πράσινο χρώμα δηλώνει την διεξαγωγή μαθημάτων. Με βάση τον πίνακα αντιστοιχίας αιθουσών που αναφέρθηκε παραπάνω το ωράριο λειτουργίας του Αμφιθεάτρου 3 ταυτίζεται με αυτό του Αμφιθεάτρου Κορδάτου.

**Πίνακας 2.6:** Ωράριο Λειτουργίας Αμφιθεάτρου Κορδάτου

| Αμφιθέατρο Κορδάτου - Λειτουργία |         |       |         |        |           |
|----------------------------------|---------|-------|---------|--------|-----------|
|                                  | Δευτέρα | Τρίτη | Τετάρτη | Πέμπτη | Παρασκευή |
| 8:00                             |         |       |         |        |           |
| 9:00                             |         |       |         |        |           |
| 10:00                            |         |       |         |        |           |
| 11:00                            |         |       |         |        |           |
| 12:00                            |         |       |         |        |           |

|       |  |  |  |  |  |
|-------|--|--|--|--|--|
| 13:00 |  |  |  |  |  |
| 14:00 |  |  |  |  |  |
| 15:00 |  |  |  |  |  |
| 16:00 |  |  |  |  |  |
| 17:00 |  |  |  |  |  |
| 18:00 |  |  |  |  |  |
| 19:00 |  |  |  |  |  |
| 20:00 |  |  |  |  |  |
| 21:00 |  |  |  |  |  |

Ο Πίνακας 2.7 παριστά την ωριαία ενεργειακή κατανάλωση του Αμφιθεάτρου 3. Ο πίνακας αυτός σε συνδυασμό με την λειτουργία του χώρου, δηλαδή με τον πίνακα που παρουσιάστηκε παραπάνω, καθορίζουν την εβδομαδιαία ενεργειακή κατανάλωση του χώρου.

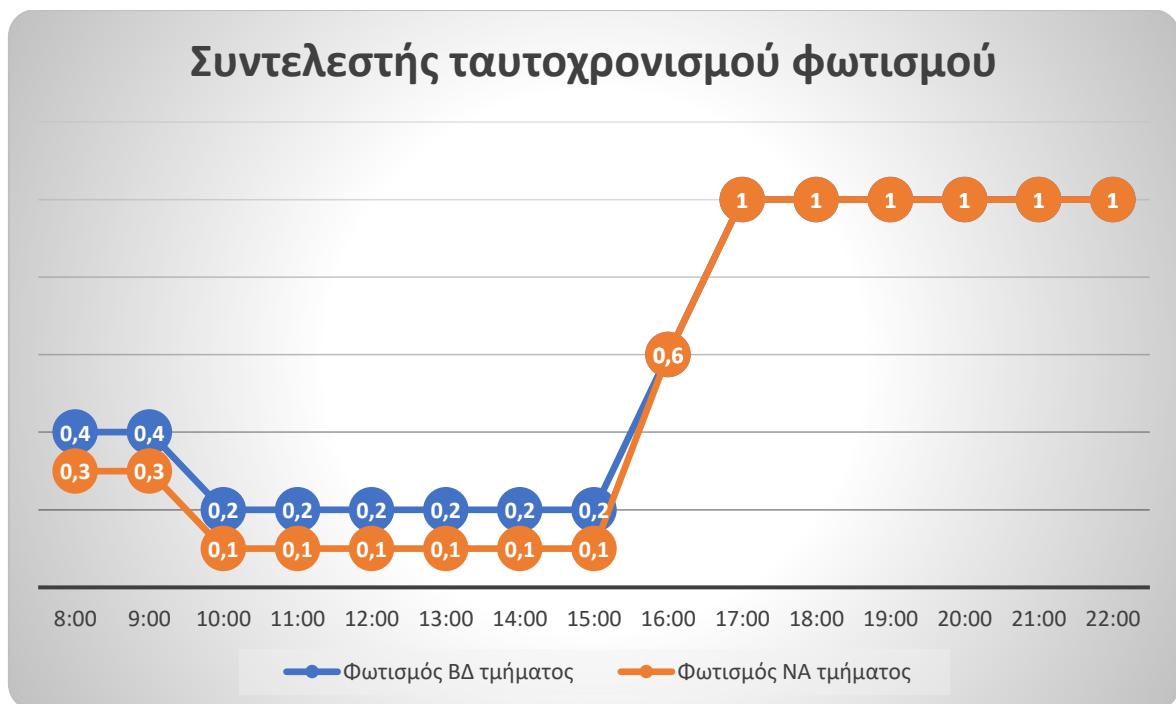
**Πίνακας 2.7:** Υπολογισμός ωριαίας κατανάλωσης ενέργειας Αμφιθεάτρου 3 (kW)

|                       | 8:00  | 9:00  | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 | 20:00 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ΦΩΤΙΣΜΟΣ              | 3,130 | 3,130 | 3,130 | 3,130 | 3,130 | 3,130 | 3,130 | 3,130 | 3,130 | 3,130 | 3,130 | 3,130 | 3,130 |
| ΡΕΥΜΑΤΟΔΟΤΕΣ          | 2,496 | 2,496 | 2,496 | 2,496 | 2,496 | 2,496 | 2,496 | 2,496 | 2,496 | 2,496 | 2,496 | 2,496 | 2,496 |
| FAN COILS             | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 0,300 |
| CONTROL ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ  | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 |
| ΜΕΓΑΦΩΝΟ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,500 |
| Συνολική κατανάλωση   | 6,626 | 6,626 | 6,626 | 6,626 | 6,626 | 6,626 | 6,626 | 6,626 | 6,626 | 6,626 | 6,626 | 6,626 | 6,626 |

Για τον υπολογισμό των επιμέρους φορτίων του κάθε χώρου ελήφθησαν υπόψιν δύο βασικοί συντελεστές: ο συντελεστής ταυτοχρονισμού του φωτισμού καθώς και ο συντελεστής ταυτοχρονισμού των ρευματοδοτών. Για παράδειγμα, στο Αμφιθέατρο 3 ο ετεροχρονισμός των ρευματοδοτών παραμένει σταθερός στην διάρκεια της ημέρας. Παρόλο που η εγκατεστημένη ισχύς των ρευματοδοτών είναι 15,6KW, στην πραγματικότητα το νούμερο είναι υπερδιαστασιοποιημένο. Σε ένα αμφιθέατρο δεν θα λειτουργήσουν ποτέ όλοι οι ρευματοδότες με την μέγιστη ισχύ. Ένα μικρό ποσοστό των

φοιτητών θα χρησιμοποιήσει φορητό υπολογιστή κατά την διάρκεια των διαλέξεων, καθώς στα αμφιθέατρα και στις αίθουσες πραγματοποιείται η θεωρία των μαθημάτων. Ο ταυτοχρονισμός που προβλέπει ο μελετητής της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης είναι 0,8 ( $0,8 \cdot 15,6 = 12,48\text{KW}$ ), ενώ ο ταυτοχρονισμός των ρευματοδοτών σπάνια θα είναι πάνω από το 20% του ήδη εκτιμώμενου. Επομένως, το τελικό ταυτοχρονισμένο φορτίο των ρευματοδοτών είναι περίπου 2,5 KW. Με παρόμοιο τρόπο υπολογίστηκε το τελικό φορτίο των ρευματοδοτών για τους υπόλοιπους χώρους. Βασικό κριτήριο, για τον ετεροχρονισμό τους, αποτέλεσε η χρήση του κάθε χώρου.

Όσον αφορά τον ταυτοχρονισμό του φωτισμού λαμβάνονται υπόψιν διαφορετικές τιμές στην διάρκεια της ημέρας ανάλογα με τον προσανατολισμό των χώρων και την θέση του ηλίου. Έτσι, στο πρώτο σενάριο, λόγω της μικρής διάρκειας της ημέρας, ο φωτισμός μετά την πέμπτη μεσημβρινή θεωρείται απαραίτητος με μηδενικό ετεροχρονισμό, ανεξαρτήτου προσανατολισμού. Κατά την διάρκεια της ημέρας για τους χώρους με ΒΔ προσανατολισμό προβλέπεται ένας ετεροχρονισμός 0,8 (δηλαδή ο ταυτοχρονισμός είναι 0,2) ενώ για τους χώρους με ΒΑ προσανατολισμό προβλέπεται ετεροχρονισμός 0,9 (ταυτοχρονισμός 0,1). Τα παραπάνω συνοψίζονται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Συντελεστής ταυτοχρονισμού φωτισμού

Όπως ήδη αναφέρθηκε οι θερμικές ανάγκες του κτηρίου καλύπτονται από τον λέβητα αερίου. Ο λέβητας, μαζί με τους κυκλοφορητές και τις αντλίες λυμάτων έχουν ονομαστική εγκατεστημένη ισχύ 14,2KW. Ο ταυτοχρονισμός των επιμέρους τμημάτων ελήφθη 0,7, 0,4 και 0,7 αντίστοιχα καθώς το κτήριο δεν είναι σε πλήρη λειτουργία όλη την διάρκεια της ημέρας. Αποτέλεσμα των παραπάνω ταυτοχρονισμών είναι η τελική προβλεπόμενη ισχύς για την θέρμανση να φτάσει τα 6,13KW. Τέλος ο ταυτοχρονισμός των ανελκυστήρων, ο οποίος είναι ίδιος για όλα τα σενάρια, ελήφθη 0,2.

Στον Πίνακα 2.8 παρουσιάζονται συνολικά οι ταυτοχρονισμοί των επιμέρους φορτίων που ελήφθησαν υπόψιν για τον υπολογισμό του πρώτου σεναρίου.

**Πίνακας 2.8:** Συντελεστής ταυτοχρονισμού ανά είδος φορτίου

| <b>Είδος Φορτίου</b> | <b>Συντελεστής ταυτοχρονισμού</b>                   |
|----------------------|---|
| Φωτισμός             | 0,1 - 1<br>Ανάλογα με την ώρα λειτουργίας του χώρου |
| Ρευματοδότες         | 0,2 - 0,8<br>Ανάλογα με την χρήση του χώρου         |
| Λέβητας              | 0,7   |
| Κυκλοφορητές         | 0,4   |
| Ανελκυστήρες         | 0,2   |

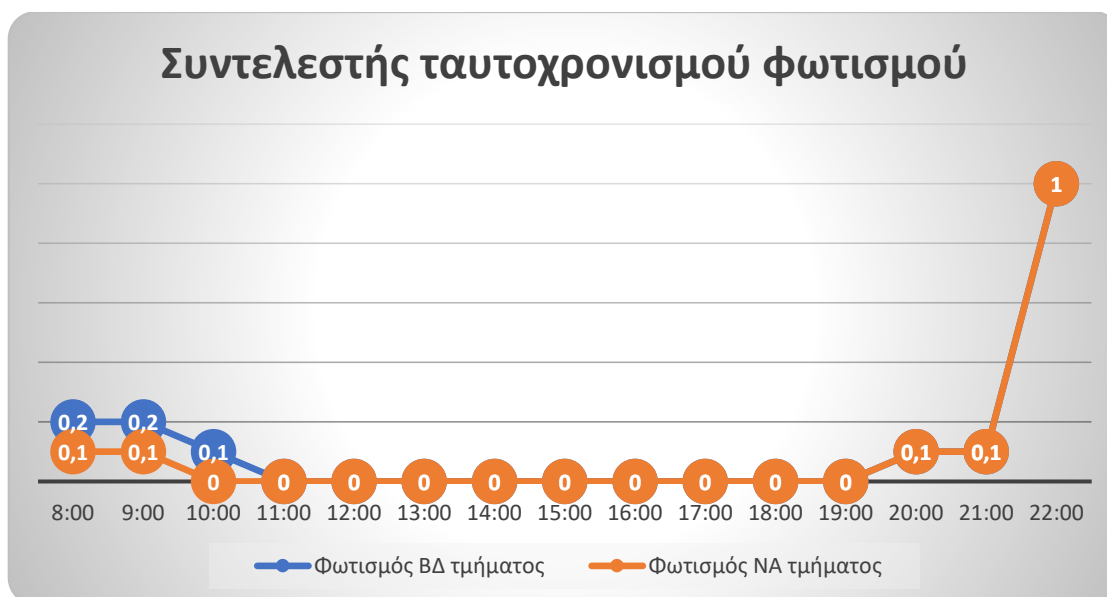
Εφαρμόζοντας επομένως τις παραπάνω παραδοχές το πρώτο σενάριο λειτουργίας έχει διάρκεια 18 εβδομάδων και σε αυτή την περίοδο το κτίριο εκτιμάται ότι καταναλώνει 108,2MWh.

#### 2.4.2 Υπολογισμός κατανάλωσης δεύτερου σεναρίου

Η περίοδος του δεύτερου σεναρίου είναι περίοδος εξεταστικής. Περιλαμβάνει την εξεταστική περίοδο του Ιουνίου καθώς και την επαναληπτική εξεταστική του Σεπτεμβρίου. Έτσι, ο υπολογισμός των ενεργειακών καταναλώσεων βασίστηκε στο πρόγραμμα εξεταστικής του εαρινού εξαμήνου και στο πρόγραμμα της επαναληπτικής εξεταστικής του Σεπτεμβρίου αντίστοιχα. Ο υπολογισμός της ενεργειακής κατανάλωσης του δεύτερου σεναρίου έγινε με τον ίδιο τρόπο που πραγματοποιήθηκε για το πρώτο.

Αρχικά έγινε αντιστοιχία των αιθουσών και στην συνέχεια υπολογισμός της κατανάλωσης κάθε χώρου ανάλογα με το ωράριο διεξαγωγής των εξετάσεων.

Βασική διαφορά του πρώτου και του δεύτερου σεναρίου αποτελεί το φορτίο του φωτισμού και το φορτίο των ρευματοδοτών. Ο φωτισμός, λόγω της μεγάλης διάρκειας της ημέρας, απαιτεί μεγαλύτερο ετεροχρονισμό. Για το βορειοδυτικό τμήμα ο συντελεστής ταυτοχρονισμού είναι μηδενικός από τις 11:00 έως τις 19:00 ενώ για το νοτιοανατολικό τμήμα δεν θεωρείται να υπάρχει φορτίο από τις 10:00 έως τις 19:00. Η επιλογή αυτών των συντελεστών οφείλεται στην μεγαλύτερη καμπύλη του ηλίου και στην μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας. Στο Σχήμα 2.4 αναπαρίστανται οι ταυτοχρονισμοί που αναφέρθηκαν. Επιπλέον, οι ρευματοδότες των αμφιθεάτρων και των αιθουσών διδασκαλίας έχουν μηδενικό ταυτοχρονισμό καθώς δεν προβλέπεται χρήση υπολογιστή κατά την εξέταση μαθήματος. Εξαιρέση αποτελούν τα εργαστήρια στα οποία η εξέταση πραγματοποιείται στους υπολογιστές.



Σχήμα 2.4: Συντελεστής ταυτοχρονισμού φωτισμού

Επιπλέον, στο δεύτερο σενάριο απαραίτητη θεωρείται η κάλυψη των ψυκτικών φορτίων του χώρου. Όπως ήδη αναφέρθηκε η γεωθερμική αντλία καλύπτει το ψυκτικό φορτίο βάσης και οι ψύκτες το φορτίο αιχμής όταν αυτό εμφανίζεται. Η μελέτη γίνεται με βάση την λειτουργία του κτηρίου σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ. Επομένως θεωρήθηκε ότι δεν θα υπάρξουν τόσο υψηλές απαιτήσεις σε ψύξη ώστε να τεθούν σε λειτουργία οι δύο ψύκτες. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες άλλωστε εμφανίζονται τους μήνες Ιούλιο και

Αύγουστο, σε περίοδο δηλαδή όπου το κτήριο δεν βρίσκεται σε λειτουργία. Επομένως οι απαιτήσεις του κτηρίου σε ψύξη καλύπτονται εξ ολοκλήρου από την γεωθερμική αντλία.

Η διεξαγωγή των εξετάσεων περιλαμβάνει αίθουσες όπως η Μ και η Α που δεν αναφέρθηκαν στον Πίνακα 2.3. Σε αυτή την περίπτωση θεωρήθηκε ότι οι εξετάσεις των αιθουσών αυτών διεξάγονται στην Αίθουσα προπτυχιακών 1.

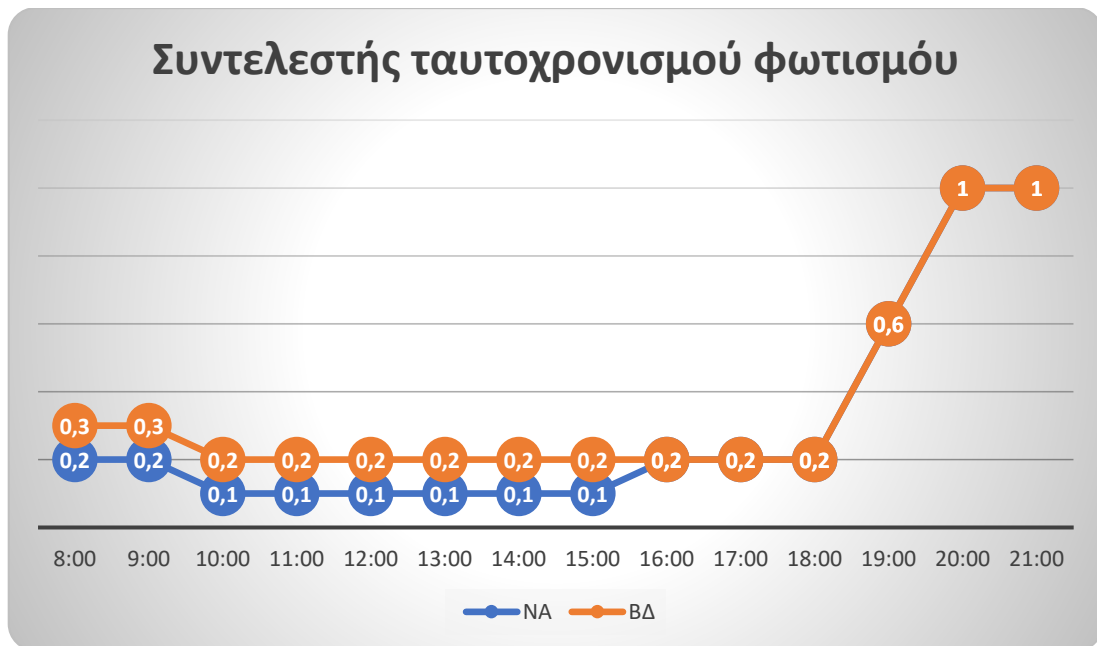
Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω και με τον ίδιο τρόπο που έγινε ο υπολογισμός για τις ενεργειακές απαιτήσεις του πρώτου σεναρίου, το δεύτερο σενάριο έχει διάρκεια 6 εβδομάδων και η ενεργειακή κατανάλωση του κτηρίου εκτιμάται στις 38,8MWh.

#### 2.4.3 Υπολογισμός κατανάλωσης τρίτου σεναρίου

Το τρίτο σενάριο αποτελεί ειδική περίπτωση. Η περιόδός του περιλαμβάνει τόσο μαθήματα εαρινού όσο και μαθήματα χειμερινού εξαμήνου. Επειδή περιλαμβάνει τους μήνες της άνοιξης και του φθινοπώρου, όπου η εξωτερική θερμοκρασία είναι ιδανική και συμβάλει στην θερμική άνεση των χώρων, κατά την διάρκειά του το κτήριο έχει ελάχιστες, ενώ σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ μηδενικές απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης.

Μείωση, συγκριτικά με το πρώτο σενάριο, παρατηρείται και στο φορτίο του φωτισμού. Οι συντελεστές ταυτοχρονισμού των φορτίων φωτισμού φαίνονται στο Σχήμα 2.5. Ο συντελεστής ταυτοχρονισμού των ρευματοδοτών ωστόσο συμπίπτει με αυτόν του πρώτου σεναρίου ανάλογα με την χρήση του εκάστοτε χώρου.





Σχήμα 2.5: Συντελεστής ταυτοχρονισμού φωτισμού

Με τον ίδιο τρόπο λοιπόν που υπολογίστηκαν τα δύο προηγούμενα σενάρια, το τρίτο σενάριο λειτουργίας καλύπτει εννέα εβδομάδες λειτουργίας στην διάρκεια των οποίων το κτήριο καταναλώνει 50,1MWh.

#### 2.4.4 Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα η ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια φτάνει τις 197,1MWh. Στην αρχή του κεφαλαίου ωστόσο έγινε αναφορά στο σύστημα αυτόματου ελέγχου που έχει εγκατασταθεί στο κτήριο λαμβάνοντας ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας 10%. Επομένως συνυπολογίζοντας και τα συστήματα αυτοματισμού η τελική καταναλισκόμενη ενέργεια φτάνει τις 177,39MWh.

Τα βασικότερα φορτία του κτηρίου είναι οι ρευματοδότες, ο φωτισμός, τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης, οι τοπικές μονάδες ανεμιστήρα (FCU), οι τοπικοί εναλλάκτες, οι κεντρικές κλιματιστικές μονάδες (ΚΚΜ) καθώς και τα συστήματα ελέγχου (control αυτοματισμού). Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζονται τα ποσοστά ενεργειακής κατανάλωσης, στην διάρκεια του έτους, των προαναφερθέντων φορτίων. Όπως είναι εμφανές το μεγαλύτερο ποσοστό κατανάλωσης εμφανίζεται στους ρευματοδότες, για την λειτουργία των μηχανημάτων, ενώ το αμέσως επόμενο σύστημα σε ενεργειακή κατανάλωση

φαίνεται να είναι η γεωθερμική αντλία. Τέλος, ο φωτισμός είναι ένα ακόμα από τα φορτία που παρουσιάζουν σημαντική κατανάλωση.



Σχήμα 2.6: Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση των βασικών φορτίων

Στο Σχήμα 2.7, από την άλλη πλευρά, παρουσιάζεται η ενεργειακή κατανάλωση κάθε σεναρίου. Την μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση παρουσιάζει το δεύτερο σενάριο, το οποίο, όπως ήδη αναφέρθηκε, περιλαμβάνει μόνο τις εξεταστικές περιόδους.



Σχήμα 2.7: Ενεργειακή κατανάλωση σεναρίων (MWh)

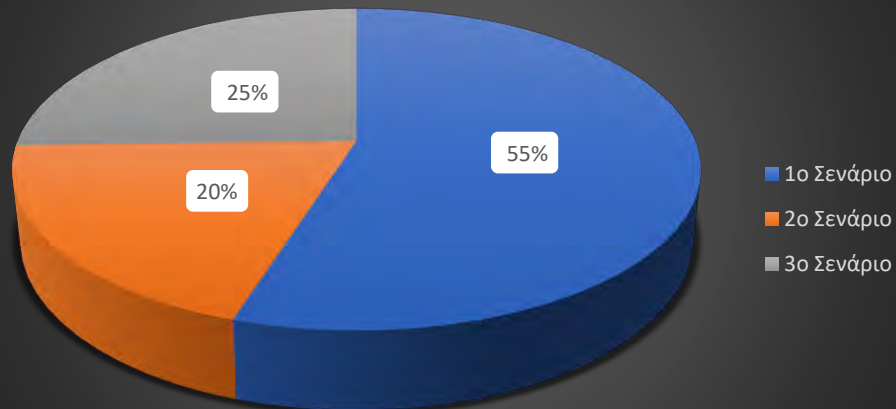
Θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι τα τρία σενάρια έχουν διαφορετική χρονική έκταση. Το πρώτο σενάριο έχει έκταση δεκαοκτώ εβδομάδων, το δεύτερο έξι και το τρίτο εννέα. Το ποσοστό διάρκειας κάθε σεναρίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Χρονική διάρκεια των τριών σεναρίων

Παρόλο που το δεύτερο σενάριο έχει διάρκεια μόνο έξι εβδομάδων παρατηρείται ότι κατά την περίοδο αυτή το κτήριο καταναλώνει το 20% της συνολικής ετήσιας ενέργειας, παρόλο που το φορτίο των ρευματοδοτών λόγω εξεταστικής περιόδου είναι αρκετά μειωμένο. Αυτό οφείλεται στη λειτουργία των συστημάτων ψύξης και αποδεικνύει αυτό που αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, δηλαδή ότι τα συστήματα ψύξης είναι εκείνα με τις μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις σε ένα κτήριο. Στην περίπτωση που το ψυκτικό φορτίο καλύπτονταν εξολοκλήρου από τους ψύκτες, η συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση υπολογίζεται στις 181,07MWh. Η αύξηση της κατανάλωσης δικαιολογείται λόγω του μικρότερου βαθμού απόδοσης του συστήματος. Σε αυτή την περίπτωση το δεύτερο σενάριο θα κατανάλωνε το 21% της ετήσιας απαιτούμενης ενέργειας όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9.

## Ενεργειακή κατανάλωση (KWh)



Σχήμα 2.9: Ενεργειακή κατανάλωση κτηρίου με χρήση ψυκτών στο δεύτερο σενάριο

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΩΤΙΣΤΙΚΩΝ ΦΘΟΡΙΟΥ ΜΕ LED

#### 3.1 Εισαγωγή

Ένα από τα βασικά φορτία του κτηρίου το οποίο λειτουργεί σε ετήσια βάση, όπως αποδείχτηκε στην ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου, αποτελεί ο φωτισμός. Όπως αναφέρθηκε η φωτομετρική μελέτη πραγματοποιήθηκε με φωτιστικά φθορίου. Στο παρόν κεφάλαιο επομένως θα πραγματοποιηθεί εκ νέου φωτοτεχνική μελέτη, αντικαθιστώντας τα φωτιστικά φθορισμού με LED προκειμένου να γίνει εκ νέου υπολογισμός των ενεργειακών απαιτήσεων του κτηρίου και να υπολογιστεί το ποσό της εξοικονομούμενης ενέργειας.

Η τεχνολογία των LED αναπτύχθηκε την δεκαετία του 60', ενώ ο πρώτος λαμπτήρας κατασκευάστηκε κατά την δεκαετία του 70'. Το κόστος του ήταν αρκετά υψηλό για εμπορική χρήση μέχρι και τα μέσα του 1990. Παρόλα αυτά, τα προϊόντα τεχνολογίας LED παρουσιάζουν μία σειρά πλεονεκτημάτων που τα καθιστούν πολύ ανταγωνιστικά σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες φωτιστικών [7]:

- Έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής
- Απαιτούν λιγότερη ενέργεια για την λειτουργία τους
- Εμφανίζουν μειωμένη παραγωγή θερμότητας
- Είναι ανθεκτικότερες
- Δεν δημιουργούν φαινόμενα τρεμοσβήματος
- Έχουν μεγαλύτερη εκπομπή φωτός
- Παρουσιάζουν σταθερή και υψηλή απόδοση φωτός

Παρόλα τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν ωστόσο, το οικονομικό κομμάτι ήταν εκείνο που έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην επιλογή φωτιστικών για το κτήριο.

Ο φωτισμός αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι σε μια ηλεκτρολογική εγκατάσταση. Παρόλο που σε μία κατοικία αντιμετωπίζεται με πολύ απλό τρόπο, επιλέγοντας τυποποιημένα φωτιστικά για την κάλυψη των αναγκών, στον τριτογενή τομέα απαιτείται

φωτοτεχνική μελέτη. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η κάλυψη δύο βασικών φωτομετρικών μεγεθών:

- Μέση ένταση φωτισμού (lux).
- Ομοιομορφία του φωτισμού ανηγμένη στην επιφάνεια του φωτιζόμενου χώρου.

Ο νέος κανονισμός του ΚΕΝΑΚ περιλαμβάνει τα δύο βασικά στοιχεία της φωτομετρικής μελέτης που αναφέρθηκαν παραπάνω. Συνεπώς, ο υπολογισμός του φωτισμού στον τριτογενή τομέα αποκτά ιδιαίτερη βαρύτητα καθώς απαιτείται πλέον έκδοση άδειας δόμησης. Οι καθορισμένες τιμές της μέσης έντασης και της ομοιομορφίας των χώρων σύμφωνα με τον κανονισμό, διαφοροποιούνται ανάλογα με την χρήση του και παρατίθενται στο Πίνακα Α.2 του Παραρτήματος Α.

Η χειροκίνητη επίλυση την φωτοτεχνικής μελέτης αποτελεί μια επίπονη και ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία. Για την διευκόλυνση του μελετητή επομένως αναπτύχθηκαν λογισμικά προκειμένου να διεξάγονται μελέτες ακριβείας. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα είναι:

- Dialux: ελεύθερο ευρωπαϊκό λογισμικό το οποίο συμπεριλαμβάνει βιβλιοθήκη φωτιστικών μεγάλων εταιριών
- Calculux: λογισμικό της Philips
- Φωτοτεχνία της 4M/ADAPT-FCALC

Στο Παράρτημα Β αναφέρονται το τυπολόγιο και οι βασικοί ορισμοί της φωτομετρίας. Επομένως συνίσταται ο αναγνώστης να το συμβουλευτείται όπου το κρίνει απαραίτητο.

### **3.2 Υπολογισμός φορτίων φωτισμού με χρήση του λογισμικού DIALux**

Η μελέτη φωτισμού πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό DIALux 4.13 (Εικόνα 3.1). Το DIALux αποτελεί ένα επαγγελματικό λογισμικό σχεδιασμού, υπολογισμού και προσομοίωσης του φωτισμού σε δωμάτια, ορόφους κτήρια και υπαίθριες σκηνές. Διατίθεται δωρεάν και χρησιμοποιείται ως εργαλείο σχεδιασμού από επαγγελματίες σχεδιαστές φωτισμού παγκοσμίως.



Εικόνα 3.1: Dialux 4.13

Αρχικά, με την χρήση του λογισμικού σχεδιάζεται ο χώρος (ύψος, μήκος, πλάτος) (Σχήμα 3.1), ενώ δεν παραλείπεται η επιλογή, ανάλογα με τον χώρο και σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ, του επίπεδου εργασίας. Στην περίπτωση των αιθουσών διδασκαλίας και γενικά των χώρων όπου υπάρχουν γραφεία επιλέγεται ως επίπεδο εργασίας το ύψος του γραφείου, δηλαδή τυπικά τα 0,8cm. Στην συνέχεια ορίζεται ως ζώνη περιφέρειας τα 0,5cm. Στην πραγματικότητα, η ομοιομορφία του φωτισμού του χώρου εξετάζεται σε απόσταση 0,5cm από τον τοίχο.

**Πρόγραμμα επεξεργασίας χώρου**

Διαστάσεις του περιγεγραμμένου κύβου

Μήκος:  m Πλάτος:  m

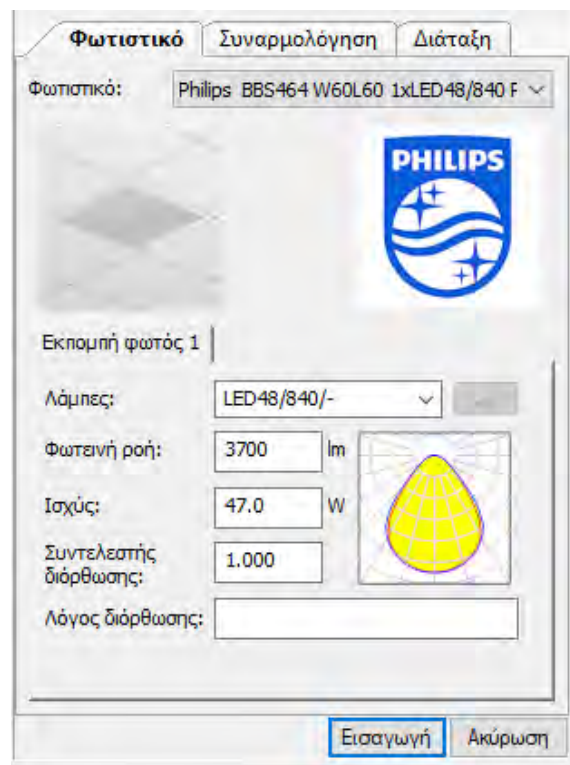
Ύψος:  m  Συντεταγμένες επιφάνειας  
 Παγκόσμιες συντεταγμένες

|       | x      | y      | l      |
|-------|--------|--------|--------|
| 1     | -0.000 | -0.000 | 14.000 |
| 2     | 14.000 | 0.000  | 7.000  |
| 3     | 14.000 | 7.000  | 14.000 |
| 4     | 0.000  | 7.000  | 7.000  |
| ----> |        |        |        |

Σχήμα 3.1: Αρχικοποίηση γεωμετρίας χώρου

Τέλος, γίνεται επιλογή των φωτιστικών, το ύψος συναρμολόγησης (αριθμός φωτιστικών σε σειρά και παράλληλα) και μέσω της έκθεσης που δημιουργεί το πρόγραμμα διαπιστώνεται αν καλύπτονται οι προδιαγραφές του KENAK ή θα πρέπει να πραγματοποιηθούν αλλαγές.

Όταν ο χρήστης ξεκινήσει να εισάγει τα φωτιστικά στον χώρο αρχικά θα πρέπει να επιλέξει το είδος του φωτιστικού. Το λογισμικό ανάλογα με το επιλεγθέν φωτιστικό παρέχει το διάγραμμα της πολικής κατανομής της έντασης του φωτισμού καθώς και δεδομένα σχετικά με την τιμή της φωτεινής ροής και την ισχύ του (Σχήμα 3.2). Αυτό διευκολύνει τον χρήστη, όταν περάσει στο επόμενο στάδιο και κληθεί να επιλέξει το πλήθος και την συνδεσμολογία των φωτιστικών, να μην έχει μεγάλη απόκλιση από τις προδιαγραφές του KENAK.

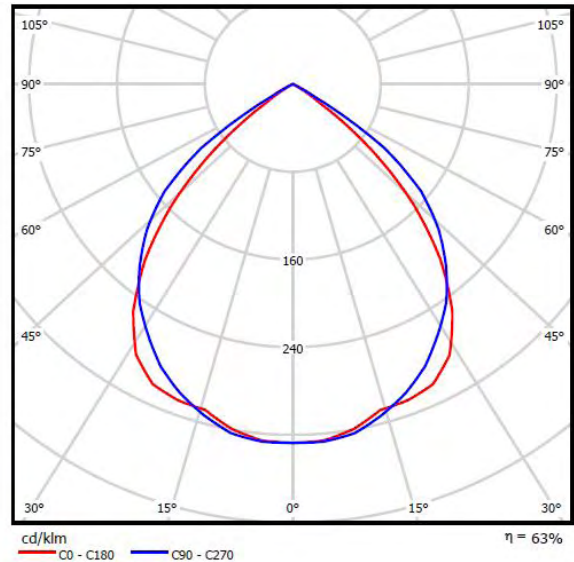


Σχήμα 3.2: Δεδομένα επιλεγμένου φωτιστικού

Τα φωτιστικά που εγκαταστάθηκαν στους χώρους διδασκαλίας, είναι φωτιστικά σκαφάκι παράλληλης διατομής 2x58 (PETRIDIS 332163 LP2S 552x58W T26), με βαθμό απόδοσης 63% ( $\eta = 63\%$ ). Στο δεξί μέρος του Σχήματος 3.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα της πολικής κατανομής της έντασης, το οποίο περιγράφει την κατανομή της φωτεινής έντασης στον χώρο. Η κόκκινη καμπύλη δηλώνει την κατανομή σε άξονα παράλληλο

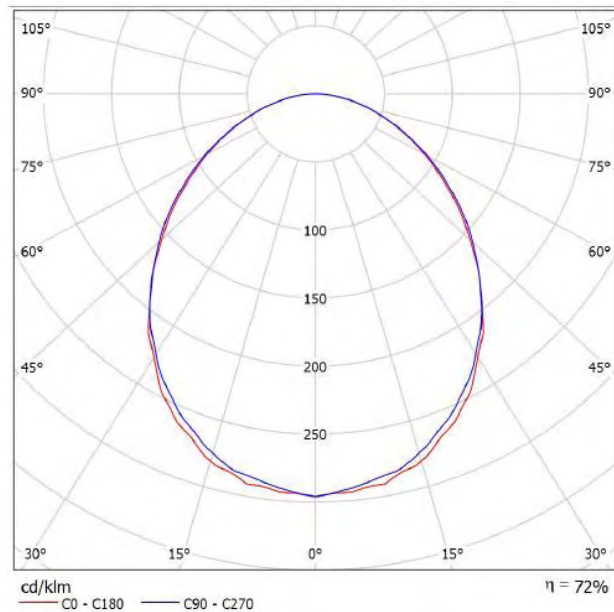


προς την οροφή ενώ η μπλε σε άξονα κάθετο προς την οροφή. Και στις δύο περιπτώσεις η κατανομή της έντασης του φωτός είναι συμμετρική, ενώ η στερεά γωνία του φωτιστικού σώματος φτάνει τις 100° με κέντρο συμμετρίας τις 0°.



**Σχήμα 3.3:** Φωτιστικό PETRIDIS 332163 LP2S 552x58W T26 (1.000)

Τα παραπάνω φωτιστικά αντικαταστάθηκαν με φωτιστικά LED BRIGHT SPECIAL LIGHTING - E.U. DOUBLE LOUVRE 2X32W, επίσης παράλληλης διατομής, με βαθμό απόδοσης 72% ( $\eta = 72\%$ ). Βασική διαφορά ανάμεσα στους δύο τύπους φωτιστικών αποτελεί η στερεά γωνία. Στα φωτιστικά LED που επιλέχθηκαν, η στερεά γωνία της φωτεινής ροής είναι σχεδόν 140°, ενώ η κατανομή της φωτεινής έντασης είναι συμμετρική παρουσιάζοντας μεγαλύτερη ομοιομορφία όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.4. Αποτέλεσμα, των όσων αναφέρθηκαν, είναι η απαίτηση λιγότερων φωτιστικών σωμάτων για την κάλυψη των απαιτήσεων του χώρου σε φωτισμό.



**Σχήμα 3.4:** Φωτιστικό BRIGHT SPECIAL LIGHTING - E.U. DOUBLE LOUVRE 2X32W

Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω συνοψίζονται στο ακόλουθο παράδειγμα που αφορά την Αίθουσα Διδασκαλίας 1. Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η έκθεση της μελέτης του χώρου (Περίληψη), όπως αυτή προκύπτει μέσω του λογισμικού, με τα φωτιστικά φθορίου που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Αρχικά παρουσιάζεται η κάτοψη του χώρου πάνω στην οποία σημειώνεται η ζώνη περιφέρειας, οι διαστάσεις του χώρου και η συναρμολόγηση των φωτιστικών. Κατόπιν δηλώνεται το ύψος του χώρου, το ύψος συναρμολόγησης των φωτιστικών και το επίπεδο εργασίας (ύψος συντήρησης).

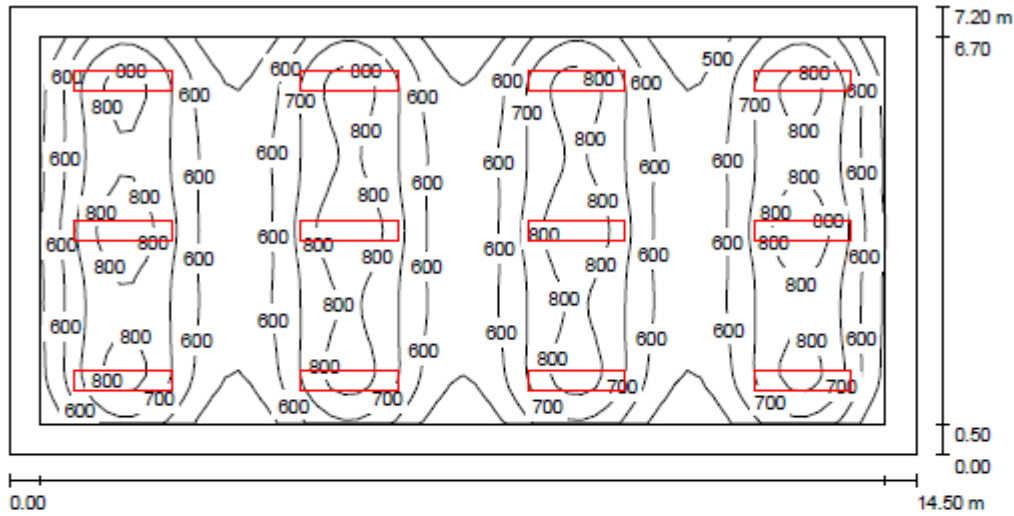
Στη συνέχεια της έκθεσης ακολουθεί ένας πίνακας. Στην πρώτη στήλη δηλώνονται οι επιφάνειες του χώρου (επίπεδο εργασίας, οροφή, δάπεδο, τοίχοι). Ακολουθούν οι στήλες με τον συντελεστή ανάκλασης ( $\rho[\%]$ ) της κάθε επιφάνειας, και οι στήλες που δηλώνουν τον μέσο όρο ( $E_m[lx]$ ), την ελάχιστη ( $E_{min}[lx]$ ) και την μέγιστη ( $E_{max}[lx]$ ) τιμή της φωτεινής έντασης αντίστοιχα σε κάθε επιφάνεια. Η τελευταία στήλη του πίνακα δηλώνει τον συντελεστή ομοιομορφίας φωτισμού των επιφανειών.

Στο τέλος της έκθεσης γίνεται αναφορά στον τύπο των φωτιστικών σωμάτων. Όπως είναι φανερό, η μελέτη έχει πραγματοποιηθεί με δώδεκα τεμάχια ενός τύπου φωτιστικού (PETRIDIS 332163 LP2S 552x58W T26), με συνολική φωτεινή ροή φωτιστικών 79.073 lm, συνολική φωτεινή ροή λαμπτήρων 124.800 lm και συνολική ισχύς φωτιστικών 1.608 KW. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι για το υπολογισμό της συνολικής φωτεινής

ροής των φωτιστικών σωμάτων έχει ληφθεί υπόψιν, μέσω της βιβλιοθήκης του προγράμματος, η επίδραση του καλύμματος του φωτιστικού σώματος στην αρχική φωτεινή ροή (lm) της φωτεινής πηγής. Κλείνοντας, μέσω της έκθεσης παρατίθεται και η εγκατεστημένη ισχύς ανά  $m^2$  (Ειδικό φορτίο σύνδεσης:  $15.040 \text{ W/m}^2$ ). Ανάλογα με την χρήση του χώρου το ειδικό φορτίο σύνδεσης έχει όρια στις τιμές που μπορεί να λάβει. Στον Πίνακα Α.3 του Παραρτήματος Α παρατίθενται οι τιμές του ειδικού φορτίου ανάλογα με τις απαιτήσεις σε στάθμη φωτισμού του χώρου χρήσης σύμφωνα με τις τεχνικές οδηγίες του ΚΕΝΑΚ.

Τρία είναι τα βασικά μεγέθη που εξετάζονται προκειμένου να κριθεί αν η επιλογή του τύπου και του αριθμού των φωτιστικών σωμάτων είναι η κατάλληλη. Το πρώτο είναι ο μέσος όρος της φωτεινής έντασης που αναφέρεται στο επίπεδο εργασίας. Κατόπιν εξετάζουμε την ομοιομορφία του φωτισμού στο επίπεδο εργασίας και τέλος το ειδικό φορτίο σύνδεσης. Στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12464.1 – 2011, αναφέρονται λεπτομερώς τα επίπεδα έντασης του φωτισμού, καθώς και οι επιπλέον πληροφορίες που σχετίζονται με τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, για τον σχεδιασμό του συστήματος φωτισμού και την επιλογή της επιφάνειας εργασίας. Έτσι για τις αίθουσες διδασκαλίας τριτοβάθμιας εκπαίδευσης, η στάθμη του γενικού φωτισμού ορίζεται στα  $500 \text{ lx}$  με συντελεστή ομοιομορφίας τουλάχιστον 0,6. Όπως είναι φανερό, η στάθμη του φωτισμού είναι στα επιθυμητά όρια ( $E_m = 663 \text{ lx}$ ,  $E_{\text{min}}/E_m = 0,620$ ), παρόλα αυτά θα πρέπει να εξετασθεί και το ειδικό φορτίο σύνδεσης. Ανάλογα με την στάθμη του φωτισμού του κτηρίου αναφοράς καθορίζεται και η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού ( $\text{W/m}^2$ ). Έτσι για ελάχιστη στάθμη  $500 \text{ lx}$  η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς ορίζεται στα  $16 \text{ W/m}^2$ , το οποίο επίσης καλύπτεται.

## Αίθουσες 1,2 Β' ορόφου / Περίληψη



Ύψος χώρου: 2.700 m, Ύψος συναρμολόγησης: 2.780 m, Συντελεστής συντήρησης: 0.80

Τιμές σε Lux, Κλίμακα 1:104

| Επιφάνεια        | $\rho$ [%] | $E_m$ [lx] | $E_{min}$ [lx] | $E_{max}$ [lx] | $E_{min} / E_m$ |
|------------------|------------|------------|----------------|----------------|-----------------|
| Επίπεδο εργασίας | /          | 663        | 411            | 888            | 0.620           |
| Δάπεδο           | 20         | 566        | 268            | 733            | 0.475           |
| Οροφή            | 70         | 103        | 69             | 120            | 0.663           |
| Τοίχοι (4)       | 47         | 200        | 71             | 387            | /               |

### Επίπεδο εργασίας:

Ύψος: 0.850 m  
Κάνναβος: 64 x 32 Σημεία  
Περιφερική ζώνη: 0.500 m

### UGR

Αριστερός τοίχος  
Κάτω τοίχος  
(CIE, SHR = 0.25.)

Κατά μήκος- Εγκάρσια προς τον άξονα φωτιστικών  
16 17  
16 17

### Κατάλογος τεμαχίων φωτιστικών

| Αρ. | Τεμάχια | Ονομασία (Συντελεστής διόρθωσης)         | $\Phi$ [lm] | P [W] |
|-----|---------|--|-------------|-------|
| 1   | 12      | PETRIDIS 332163 LP2S 552x58W T26 (1.000) | 10400       | 134.0 |

Συνολικά: 124800 1608.0

Ειδικό φορτίο σύνδεσης:  $15.40 \text{ W/m}^2 = 2.32 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$  (Βασική επιφάνεια:  $104.40 \text{ m}^2$ )

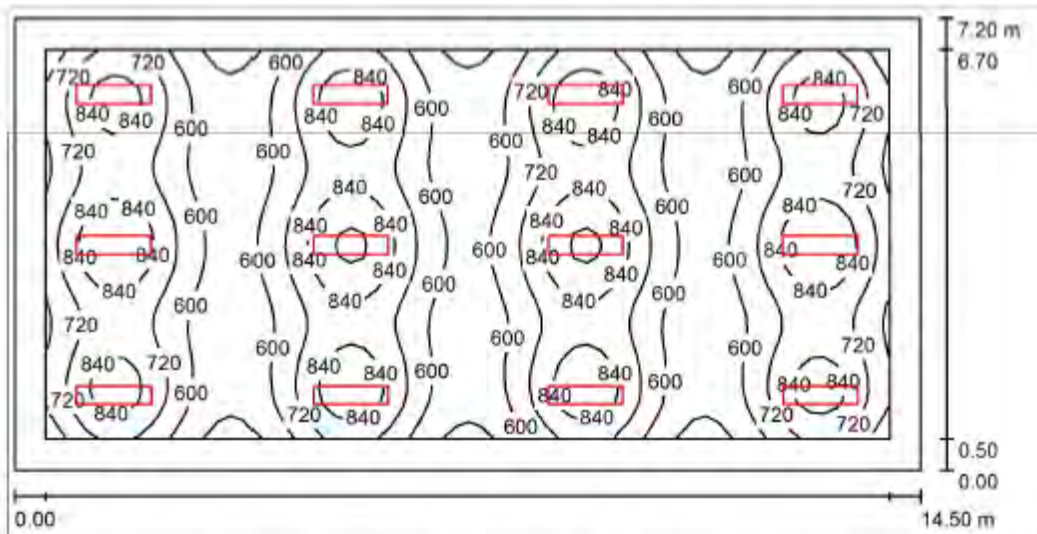
**Σχήμα 3.5:** Φωτομετρική έκθεση Αίθουσας Διδασκαλίας 1 μέσω του λογισμικού DIALux για φωτιστικά φθορίου

Ακολούθως, στο Σχήμα 3.6, παρουσιάζεται η έκθεση της φωτομετρικής μελέτης με την χρήση των φωτιστικών LED Φωτιστικό BRIGHT SPECIAL LIGHTING - E.U. DOUBLE LOUVRE 2X32W. Αρχικά, θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα της φωτομετρίας βρίσκονται μέσα στο πλαίσιο που ορίζει ο KENAK (μέσος όρος φωτεινής έντασης  $500 \text{ lx}$ , συντελεστής ομοιομορφίας 0,6 και ειδικό φορτίο σύνδεσης  $16 \text{ W/m}^2$ ).

Συγκριτικά με τα φωτιστικά φθορίου, παρατηρούμε αύξηση τόσο στον μέσο όρο της έντασης του φωτιστικού όσο και στην ομοιομορφία, καθώς και σημαντική μείωση στην

ειδική εγκατεστημένη ισχύ ( $W/m^2$ ). Η φωτομετρική μελέτη πραγματοποιήθηκε αρχικά με εννέα τεμάχια φωτιστικών σωμάτων, η οποία κάλυπτε οριακά τον μέσο όρο της φωτεινής έντασης (568lx), ο συντελεστής ομοιορφίας ωστόσο δεν ξεπερνούσε το 0,578. Έτσι, έγινε εκ νέου μελέτη του χώρου με αύξηση του αριθμού των τεμαχίων. Στην δεύτερη περίπτωση οι απαιτήσεις του χώρου σε φωτισμό έχουν καλυφθεί με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 853,2W, μειώνοντας στο 50% το φορτίο φωτισμού του χώρου.

### 1.11 Αίθουσα διδασκαλίας / Περίληψη



Ύψος χώρου: 2.700 m, Ύψος συναρμολόγησης: 2.700 m, Συντελεστής συντήρησης: 0.80

Τιμές σε Lux, Κλίμακα 1:104

| Επιφάνεια        | $\rho$ [%] | $E_m$ [lx] | $E_{min}$ [lx] | $E_{max}$ [lx] | $E_{min} / E_m$ |
|------------------|------------|------------|----------------|----------------|-----------------|
| Επίπεδο εργασίας | /          | 701        | 440            | 996            | 0.627           |
| Δάπεδο           | 20         | 588        | 352            | 746            | 0.598           |
| Οροφή            | 70         | 129        | 106            | 156            | 0.821           |
| Τοίχοι (4)       | 47         | 324        | 137            | 510            | /               |

| Επίπεδο εργασίας:        | UGR                | Κατά μήκος- | Εγκάρσια | προς τον άξονα |
|--------------------------|--------------------|-------------|----------|----------------|
| Ύψος: 0.850 m            | Αριστερός τοίχος   | 22          | 23       | φωτιστικών     |
| Κάναβος: 64 x 32 Σημεία  | Κάτω τοίχος        | 22          | 22       |                |
| Περιφερική ζώνη: 0.500 m | (CIE, SHR = 0.25.) |             |          |                |

#### Κατάλογος τεμαχίων φωτιστικών

| Αρ. | Τεμάχια | Ονομασία (Συντελεστής διόρθωσης)                           | $\Phi$ (Φωτιστικό) [lm] | $\Phi$ (Λάμπες) [lm] | P [W] |
|-----|---------|--|-------------------------|----------------------|-------|
| 1   | 12      | BRIGHT SPECIAL LIGHTING - E.U. DOUBLE LOUVRE 2X32W (1.000) | 7687                    | 10680                | 71.1  |
|     |         |  | Συνολικά: 92249         | Συνολικά: 128160     | 853.2 |

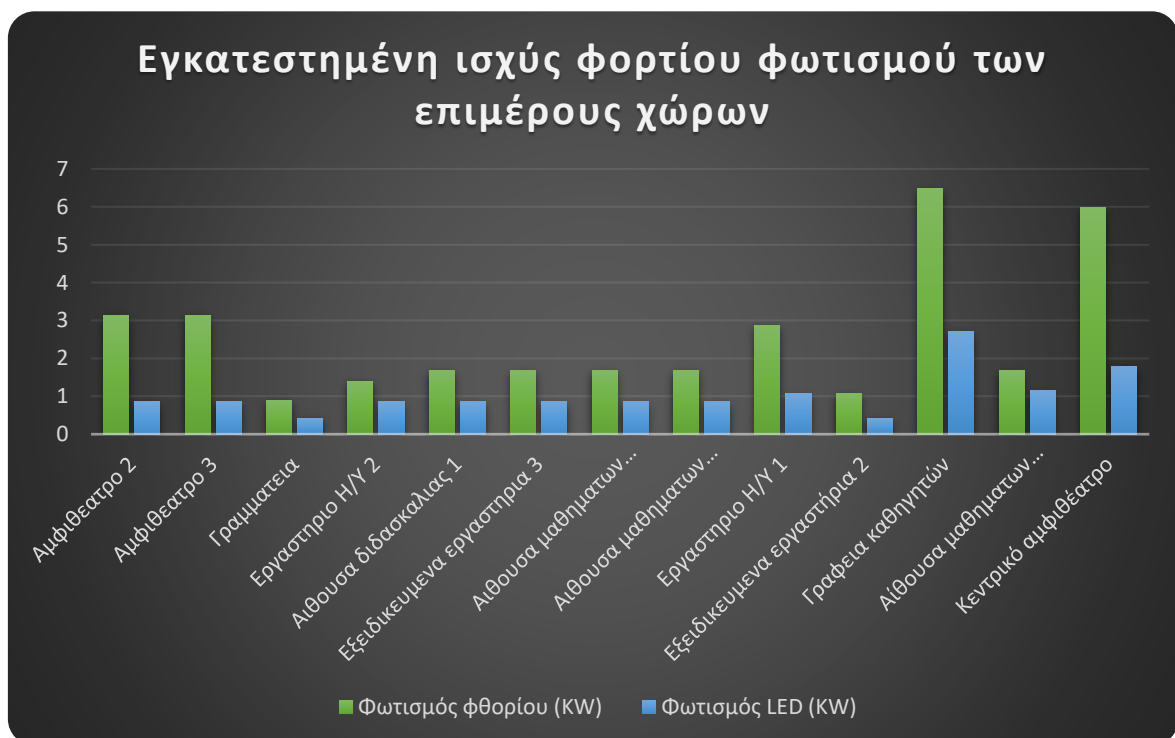
Ειδικό φορτίο σύνδεσης:  $8.17 W/m^2 = 1.17 W/m^2/100 lx$  (Βασική επιφάνεια: 104.40  $m^2$ )

Σχήμα 3.6: Φωτομετρική έκθεση Αίθουσας Διδασκαλίας 1 μέσω του λογισμικού DIALux για φωτιστικά φθορίου

### 3.3 Αποτελέσματα φωτομετρικής μελέτης

Όπως είναι αναμενόμενο, η εγκατεστημένη ισχύς του φορτίου του φωτισμού εμφανίζει μείωση σε όλους τους χώρους με την εγκατάσταση φωτιστικών LED, με την μεγαλύτερη εξοικονόμηση να παρουσιάζεται στα αμφιθέατρα του τμήματος και στην συνολική εγκατεστημένη ισχύ του φωτισμού των γραφείων. Δεν έχει νόημα η αναλυτική παρουσίαση των φωτομετρικών μελετών κάθε χώρου ξεχωριστά καθώς το παράδειγμα που ήδη αναφέρθηκε είναι ιδιαίτερα αντιπροσωπευτικό.

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται το φορτίο φωτισμού των χώρων. Το φορτίο των φωτιστικών φθορίου αναπαριστάτε με πράσινο χρώμα ενώ το φορτίο των φωτιστικών LED με μπλε. Εν τέλει, έπειτα από την αντικατάσταση των φωτιστικών σωμάτων, παρατηρήθηκε μείωση, στην ονομαστική εγκατεστημένη ισχύς του φορτίου φωτισμού, της τάξης του 59,5%.



**Σχήμα 3.7:** Εγκατεστημένη ισχύς φορτίου φωτισμού, των επιμέρους χώρων, με φωτιστικά φθορίου και φωτιστικά LED

Ενώ η αρχική ετήσια κατανάλωση του κτηρίου ήταν 177,39MWh, με την αντικατάσταση των φωτιστικών σωμάτων σε LED, η νέα ετήσια ενεργειακή κατανάλωση μειώθηκε στις 161,3 MWh. Η τελική καταναλισκόμενη ισχύς του κτηρίου αναφοράς σημείωσε μείωση της τάξης του 8,9%.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΟΙΧΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΜΕ ΚΛΕΙΣΤΗ

#### 4.1 Εισαγωγή

Η διατήρηση της θερμικής άνεσης ενός κτηρίου απαιτεί σημαντικά ποσά ενέργειας. Τα διαφορετικά συστήματα ψύξης και θέρμανσης απαιτούν ενέργεια που προέρχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο καθώς και από στερεά και αέρια καύσιμα. Τα γεωθερμικά συστήματα από την άλλη πλευρά αποτελούν μία από τις τεχνολογίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργεια εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια που απορροφάτε από την γη με σκοπό την θέρμανση και την ψύξη των κτηρίων, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Λόγω της μειωμένης μετάδοσης της θερμότητας και της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του εδάφους, η θερμοκρασία του μεταβάλλεται με αργούς ρυθμούς. Ως συνέπεια της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας τα ύδατα του εδάφους διατηρούν μία σταθερή θερμοκρασία η οποία είναι σε τέτοιο επίπεδο ώστε να μπορεί να εξασφαλίσει την θερμική άνεση των χώρων. Η γεωθερμικές αντλίες έχουν την ικανότητα να παρέχουν στο κτήριο θέρμανση χαμηλής θερμοκρασίας απορροφώντας θερμότητα από το έδαφος, ενώ σε περιόδους με απαιτήσεις κάλυψης ψυκτικού φορτίου ακολουθούν την αντίστροφη διαδικασία. [8]

#### 4.2 Περιγραφή συστημάτων αντλιών θερμότητας εδάφους

Τα συστήματα αντλιών θερμότητας εδάφους αποτελούνται από τρία βασικά μέρη: την αντλία θερμότητας, τον γεωεναλλάκτη και το εσωτερικό σύστημα διανομής θερμότητας ή ψύξης.

##### 4.2.1 Αντλία θερμότητας

Η αντλία θερμότητας μεταφέρει τη θερμότητα μεταξύ του συστήματος διανομής θέρμανσης / ψύξης και των υπογείων σωληνώσεων και αποτελεί το βασικό δομικό στοιχείο του γεωθερμικού συστήματος. Ο πιο συνηθισμένος τύπος αντλίας θερμότητας που χρησιμοποιείται στα συστήματα γεωθερμίας είναι "νερού-αέρα", κυμαίνεται από 3,5 kW έως 35 kW ψυκτικής χωρητικότητας. Ο χαρακτηρισμός "νερού-αέρα" πρακτικά

υποδηλώνει ότι το ρευστό που μεταφέρει θερμότητα από και προς το υπόγειο δίκτυο σωληνώσεων είναι νερό ή μίγμα νερού / αντιψυκτικού και ότι το σύστημα διανομής θερμότητας μέσα στο κτίριο βασίζεται σε ζεστό ή κρύο αέρα.

Η αντλία θερμότητας είναι μία μονάδα της οποίας το εισερχόμενο ρευστό έχει χαμηλότερη θερμοκρασία σε περιόδους θέρμανσης, ενώ αντίθετα κατά την περίοδο ψύξης το υγρό έχει υψηλότερη θερμοκρασία. Με αυτό τον τρόπο ως «αποθήκη θερμότητας» χρησιμοποιείται το κτήριο αναφοράς ή το έδαφος. Τα μηχανολογικά μέρη της αντλίας θερμότητας είναι τα εξής:

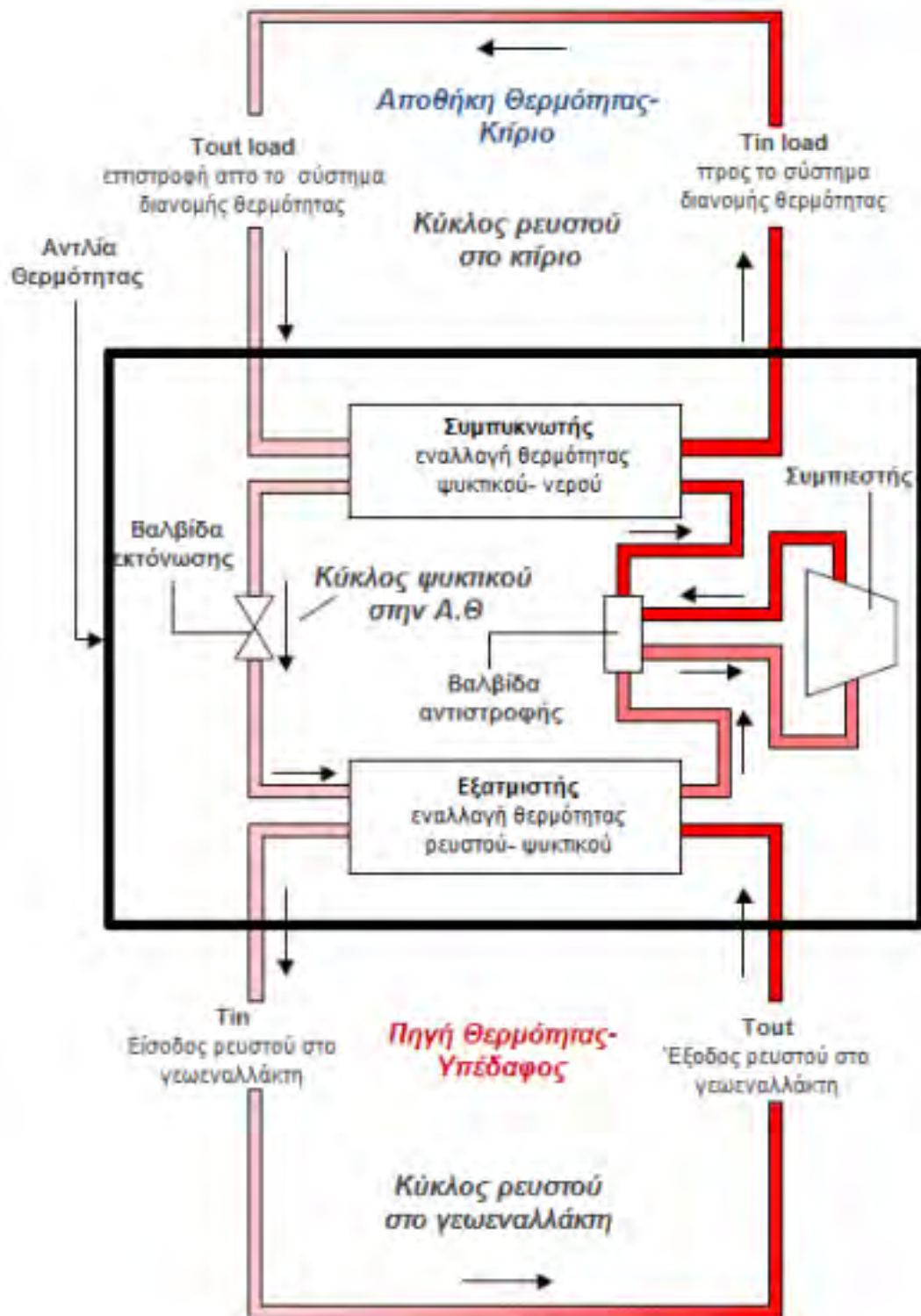
- Συμπιεστής
- Συμπυκνωτής
- Εξατμιστής
- Βαλβίδα εκτόνωσης
- Βαλβίδα αντιστροφής

Το ψυκτικό υγρό όταν βρίσκεται στην αέρια κατάσταση, συμπιέζεται και κυκλοφορεί στο σύστημα μέσω του συμπιεστή. Μετά την έξοδο του συμπιεστή το θερμό και συμπιεσμένο αέριο ψύχεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας – τον συμπυκνωτή- έως ότου συμπυκνωθεί σε ένα υγρό υψηλής πίεσης και μέσης θερμοκρασίας. Το συμπυκνωμένο ψυκτικό μέσο έπειτα περνά μέσα από μια συσκευή μείωσης της πίεσης (Βαλβίδα Εκτόνωσης). Μέσω αυτής της συσκευής, το υγρό χαμηλής πίεσης περνά στον εναλλάκτη θερμότητας, τον εξατμιστή, όπου το ψυκτικό μέσο εξατμίζεται σε αέριο μέσω απορρόφησης θερμότητας. Το ψυκτικό επιστρέφει στον συμπιεστή και ο κύκλος αρχίζει ξανά.

Η αρχή λειτουργίας της αντλίας θερμότητας βασίζεται στον ψυκτικό κύκλο ο οποίος είναι ένας αένας κύκλος εκτόνωσης και συμπίεσης του υγρού που ονομάζεται εργαζόμενο μέσο. Θα πρέπει να τονιστεί ότι ο ψυκτικός είναι ο μοναδικός κύκλος που υφίσταται. Το μόνο που αναστρέφεται είναι ο ρόλος του εξατμιστή και του συμπυκνωτή ανάλογα με την περίοδο θέρμανσης ή ψύξης. Σε αυτό το σημείο η εναλλαγή των δύο τμημάτων πραγματοποιείται με την βαλβίδα αντιστροφής η οποία είναι μία τετράοδη βαλβίδα. Στα Σχήματα 4.1 και 4.2 παρατηρείται η λειτουργία της αντλίας θερμότητας κατά την περίοδο θέρμανσης και κατά την περίοδο ψύξης, αντίστοιχα.

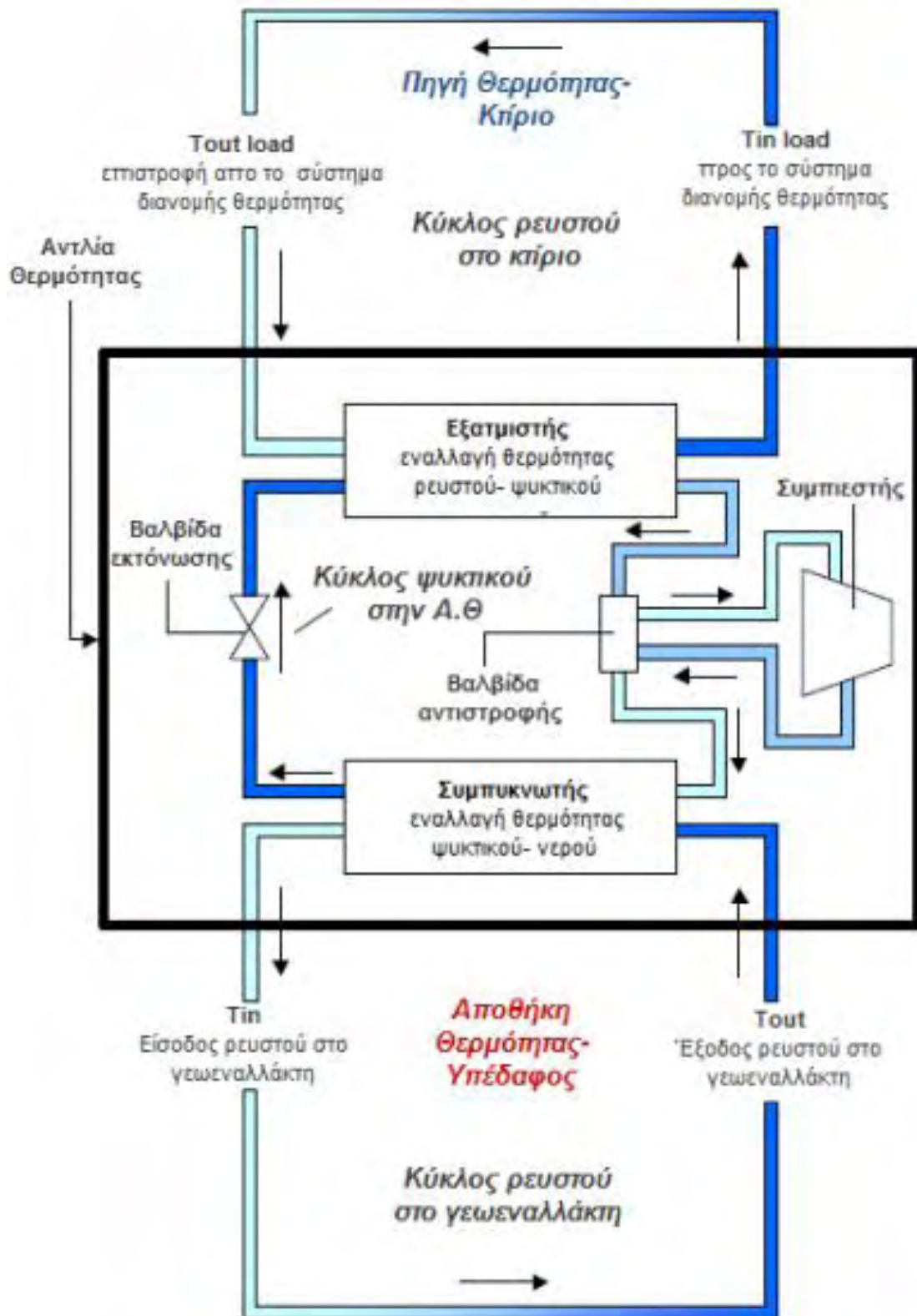


## Λειτουργία Θέρμανσης



Σχήμα 4.1: Αρχή λειτουργίας αντλίας θερμότητας κατά την περίοδο θέρμανσης

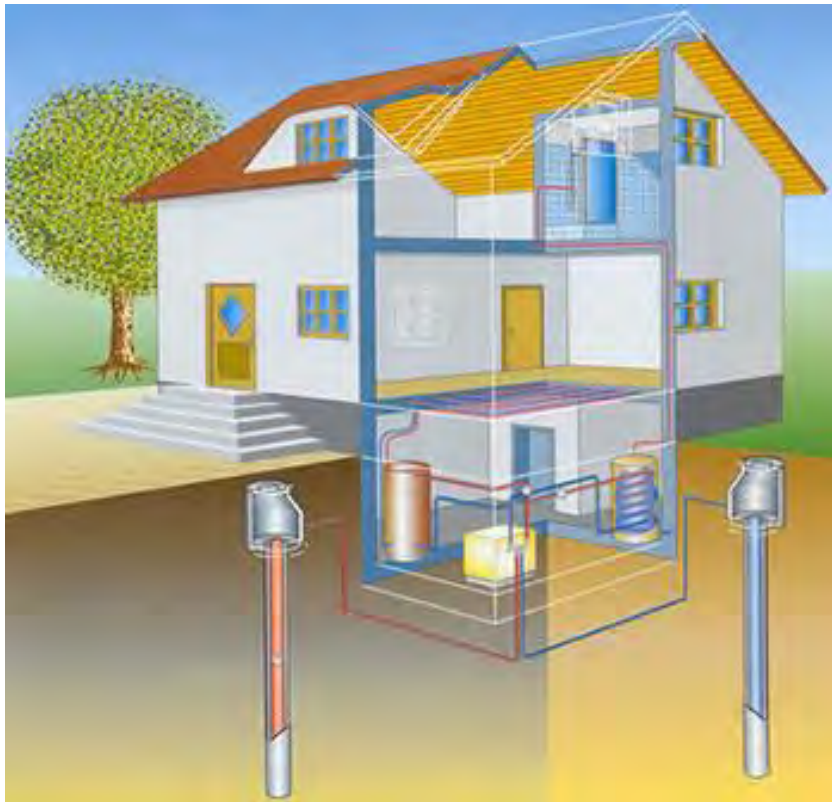
## Λειτουργία Ψύξης



Σχήμα 4.2: Αρχή λειτουργίας γεωθερμικής αντλίας κατά την διάρκεια ψύξης

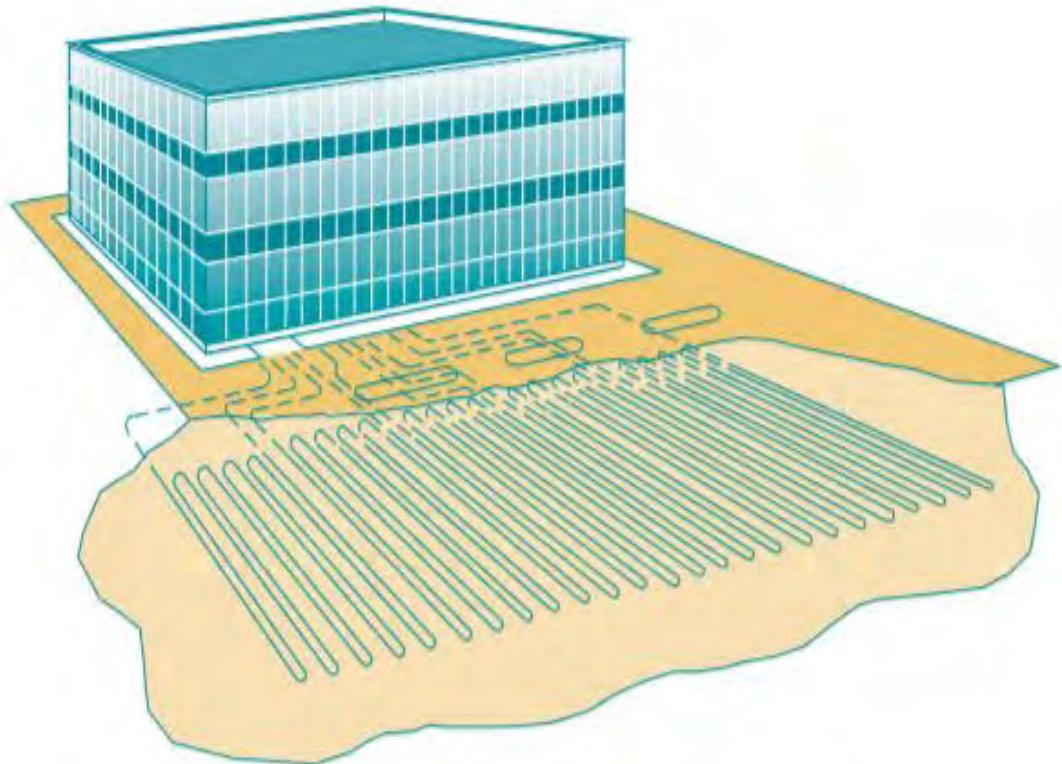
#### 4.2.2 Σύνδεση σωληνώσεων στο υπέδαφος

Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των σωληνώσεων στο υπέδαφος παρατηρούνται τρεις βασικοί τύποι γεωθερμικών συστημάτων. Ο πρώτος τύπος αποτελεί τα ανοιχτά συστήματα. Σε αυτά, το νερό του υπεδάφους αντλείται από μία γεώτρηση και αφότου γίνει η προσθήκη ή απόρριψη θερμότητας στην αντλία, επιστρέφει και πάλι στο έδαφος μέσω δεύτερης γεώτρησης. Οι δύο γεωτρήσεις έχουν απόσταση τουλάχιστον 15m προκειμένου να αποφευχθεί η αλλαγή θερμοκρασίας των υπόγειων υδάτων. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται σχηματικά το ανοιχτό γεωθερμικό σύστημα.



**Σχήμα 4.3:** Σχηματική αναπαράσταση ανοιχτής γεωθερμίας

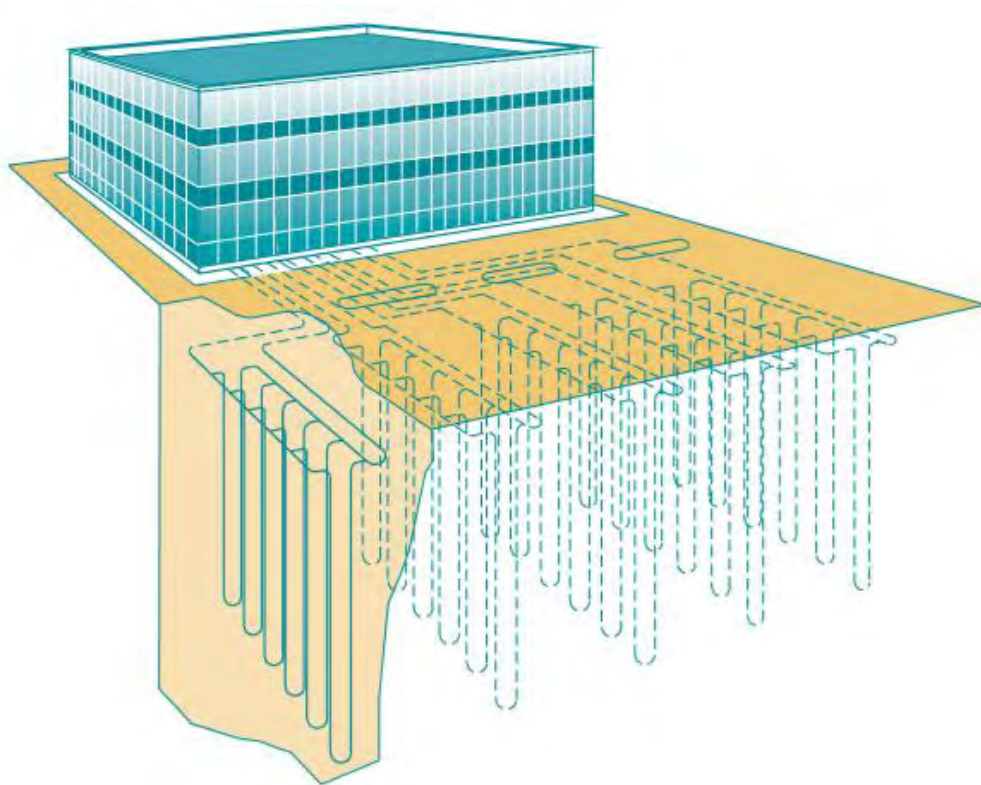
Η οριζοντίου τύπου γεωθερμία αποτελεί την δεύτερη κατηγορία και παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4. Αποτελούνται από σωληνώσεις κλειστού βρόγχου οι οποίες τοποθετούνται οριζόντια στο έδαφος σε βάθος 1-2m, ώστε να μην επηρεάζονται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Τυπικά απαιτούνται 35-55m σωληνώσεων ανά kW θερμικής και ψυκτικής χωρητικότητας και όπως είναι προφανές, αυτός ο τύπος γεωθερμίας απαιτεί μεγάλη έκταση για την εγκατάσταση των σωληνώσεων.



**Σχήμα 4.4:** Γεωθερμικό σύστημα οριζοντίου τύπου

Τέλος, τα συστήματα κατακόρυφου τύπου αποτελούνται από σωληνώσεις τοποθετημένες κατακόρυφα στο έδαφος ενώ η μεταξύ τους σύνδεση είναι κλειστού βρόγχου. Εκτείνονται σε βάθος 45-150m και περιλαμβάνουν έναν ή δύο κλειστούς βρόγχους σωληνώσεων τύπου U. Η τιμή κατασκευής αυτού του είδους γεωθερμίας είναι μεγαλύτερη από οριζοντίου τύπου αλλά προτιμάται σε μεγάλα κτήρια καθώς απαιτεί μικρότερη έκταση εγκατάστασης. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις τις ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), οργανισμό που ασχολείται αποκλειστικά με την προώθηση της τεχνολογίας ελέγχου εσωτερικών χώρων στον τομέα της θέρμανσης του εξαερισμού και του κλιματισμού (HVAC), η ελάχιστη προβλεπόμενη απόσταση μεταξύ των U σωληνώσεων είναι 6m.





Σχήμα 4.5: Γεωθερμικό σύστημα κάθετου τύπου

### 4.3 Εισαγωγή στο λογισμικό RetScreen και σχεδιασμός του συστήματος

Το Λογισμικό Διαχείρισης Καθαρής Ενέργειας Ret Screen είναι ένα πακέτο λογισμικού που δημιουργήθηκε από την Κυβέρνηση του Καναδά. Το RetScreen4 αποτελεί την αρχική, δωρεάν έκδοση, η οποία στην πραγματικότητα αποτελεί ένα φύλλο υπολογισμού στο Excel κάνοντας χρήση μακροεντολών. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται το περιβάλλον υπολογισμού για το γεωθερμικό σύστημα.



Εικόνα 4.1: Αρχική σελίδα μοντέλου υπολογισμού γεωθερμικού συστήματος

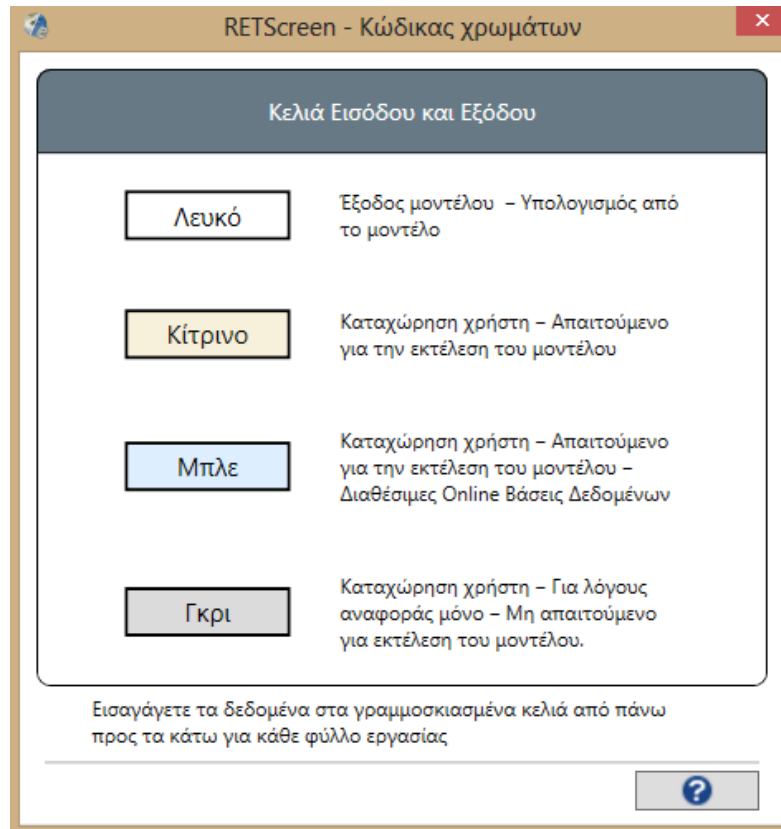
Το λογισμικό επιτρέπει την ολοκληρωμένη αναγνώριση, αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της τεχνικής και οικονομικής βιωσιμότητας δυνητικών έργων ανανεώσιμης ενέργειας και ενεργειακής απόδοσης, καθώς επίσης και τη μέτρηση και επαλήθευση της πραγματικής απόδοσης των εγκαταστάσεων και την αναγνώριση των ευκαιριών εξοικονόμησης/ παραγωγής ενέργειας.

Η ανάλυση της γεωθερμικής μελέτης του παρόντος κεφαλαίου πραγματοποιείται σε έξι στάδια. Το κάθε στάδιο περιλαμβάνεται σε κάθε ένα από τα φύλλα υπολογισμού που περιέχονται στο αρχείο. Συνοπτικά τα στάδια αποτελούνται από τον υπολογισμό του ενεργειακού μοντέλου, τον καθορισμό του ψυκτικού και θερμικού φορτίου, την ανάλυση κόστους, την ανάλυση εκπομπών, την οικονομική ανάλυση και την ανάλυση επικινδυνότητας.

Η ανάλυση επικινδυνότητας και η ανάλυση εκπομπών αποτελούν προαιρετικά στάδια. Καθώς η ανάλυση επικινδυνότητας αφορά την αβεβαιότητα στις εκτιμήσεις διαφόρων βασικών παραμέτρων μπορεί να επηρεάσει την οικονομική βιωσιμότητα του έργου, δεν αποτελεί κομμάτι μελέτης της παρούσας διπλωματικής καθώς το κτήριο αναφοράς είναι δημόσιο.

Κάτι τελευταίο που θα πρέπει να αναφερθεί πριν γίνει η αρχικοποίηση του συστήματος μας είναι ότι το Ret Screen Expert διαθέτει χρωματική κωδικοποίηση (color coding) για

να κάνει την επιφάνεια διεπαφής (UI) πιο φιλική στον χρήστη: με τον χρωματισμό των κελιών γίνεται διαχωρισμός τους στα στοιχεία που απαιτούν συμπλήρωση για τον υπολογισμό του συστήματος και σε εκείνα που δεν είναι απαραίτητο να αρχικοποιηθούν. Στην Εικόνα 4.2 επεξηγείται ο χρωματικός κώδικας των κελιών.



Εικόνα 4.2: Χρωματικός κώδικας κελιών

#### 4.3.1 Ψυκτικό και θερμικό φορτίο

Παρόλο που το φύλλο υπολογισμού του ενεργειακού μοντέλου (Energy Model) είναι πρώτο στην λίστα των διαθέσιμων φύλλων υπολογισμού, ο χρήστης ξεκινά την αρχικοποίηση από το δεύτερο φύλλο που αναφέρεται στα απαιτούμενα προς κάλυψη θερμικά και ψυκτικά φορτία (Heating and Cooling Load). Στην Εικόνα 4.3 παρατηρείται η διάταξη του φύλλου.

| Site Conditions                           | Estimate | Notes/Range                                    |
|---|----------|--|
| Nearest location for weather data         | Volos    | <a href="#">See Weather Database</a>           |
| Heating design temperature                | -0.4     | -40.0 to 15.0                                  |
| Cooling design temperature                | 32.1     | 10.0 to 40.0                                   |
| Average summer daily temperature range    | 5.0      | 5.0 to 15.0                                    |
| Cooling humidity level                    | High     |  |
| Latitude of project location              | 40.6     | -90.0 to 90.0                                  |
| Mean earth temperature                    | 18.0     | <a href="#">Visit NASA satellite data site</a> |
| Annual earth temperature amplitude        | 22.2     | 5.0 to 20.0                                    |
| Depth of measurement of earth temperature | 0.0      | 0.0 to 3.0                                     |

| Building Heating and Cooling Load | Estimate        | Notes/Range |
|-----------------------------------|-----------------|-------------|
| Type of building                  | Commercial      |             |
| Available information             | Energy use data |             |
| Design heating load               | 240.0           |             |
|                                   | kW              |             |
|                                   | 0.819           |             |
|                                   | million Btu/h   |             |
| Annual heating energy demand      | 7.9             |             |
|                                   | MWh             |             |
|                                   | 26.9            |             |
|                                   | million Btu     |             |
| Design cooling load               | 244.0           |             |
|                                   | kW              |             |
|                                   | 69.4            |             |
|                                   | ton (cooling)   |             |
| Annual cooling energy demand      | 15.5            |             |
|                                   | MWh             |             |
|                                   | 52.8            |             |
|                                   | million Btu     |             |

Εικόνα 4.3: Φύλλο υπολογισμού "Θερμικό και Ψυκτικό φορτίο"

Το πρώτο βήμα είναι ο καθορισμός της γεωγραφικής περιοχής του κτηρίου. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την γεωγραφική του περιοχή μέσω της βάσης δεδομένων του λογισμικού. Όπως στην Εικόνα 4.3 έχει επιλεγθεί ως περιοχή εγκατάστασης του συστήματος η πόλη του Βόλου. Με αυτό τον τρόπο το λογισμικό εισάγει αυτόματα τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής μέσω της βάσης κλιματικών δεδομένων της NASA. Η θερμοκρασία σχεδιασμού θέρμανση (Heating Design Temperature) και ψύξης (Cooling Design Temperature) όπως επίσης και η μέση ημερήσια καλοκαιρινή διακύμανση της θερμοκρασίας (Average summer daily temperature range) αποτελούν πεδία που συμπληρώνονται αυτόματα μετά τον καθορισμό της περιοχής μέσω των κλιματολογικών δεδομένων.

Σε επόμενο βήμα αρχικοποίησης του συστήματος ο χρήστης καλείται να επιλέξει μέσω μίας αναπτυσσόμενης λίστας το επίπεδο υγρασίας (Cooling Humidity Level). Το πρόγραμμα διαθέτει τρεις επιλογές: χαμηλό, μεσαίο και υψηλό επίπεδο. Τα ψυκτικά φορτία κλιματισμού αποτελούνται από δύο συνιστώσες: τα αισθητά και τα λανθάνοντα φορτία. Τα αισθητά φορτία αφορούν την διατήρηση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα ενώ τα λανθάνοντα φορτία αναφέρονται στην διατήρηση της υγρασίας ή της περιεκτικότητας σε νερό του αέρα εσωτερικού χώρου. Το μεγαλύτερο μέρος του λανθάνοντος φορτίου προέρχεται από εισαγωγή νωπού αέρα στον χώρο και από τα άτομα που βρίσκονται στο εσωτερικό του. Το επίπεδο υγρασίας που επιλέγεται



χρησιμοποιείται στο μοντέλο για τον υπολογισμό του λανθάνοντος θερμικού φορτίου από την εισαγωγή νωπού ατμοσφαιρικού αέρα. Ο Πίνακας 4.1 δείχνει το λόγο του λανθάνοντος προς το αισθητό φορτίο, για τον αέρα του περιβάλλοντος υπό θερμοκρασία 30° C, που χρησιμοποιείται στο μοντέλο σύμφωνα με το επιλεγμένο επίπεδο υγρασίας. Στην παρούσα μελέτη το επίπεδο υγρασίας ορίστηκε ως «Μεσαίο».

**Πίνακας 4.1:** Πίνακας αναλογιών λανθάνουσας προς αισθητής θερμοκρασίας με βάση το επίπεδο υγρασίας

| Επίπεδο υγρασίας | Αναλογία λανθάνουσας προς αισθητής θερμοκρασίας | Σχετική υγρασία για θερμοκρασία περιβάλλοντος 30 ° C |
|------------------|---|--|
| Χαμηλό           | 0,5   | 40%  |
| Μεσαίο           | 1,5   | 50%  |
| Υψηλό            | 2,5   | 60%  |

Η μέση θερμοκρασία της γης (Mean earth temperature), το ετήσιο εύρος θερμοκρασίας της (Annual earth temperature amplitude) καθώς και το βάθος μέτρησης της θερμοκρασίας του εδάφους (Depth of measurement of earth temperature ) καθορίστηκαν από στοιχεία της βάσης κλιματικών δεδομένων της NASA για την περιοχή του Βόλου, όπως αυτά φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

**Πίνακας 4.2:** Κλιματολογικά δεδομένα NASA για την περιοχή του Βόλου

|  |                        | Μονάδα               |                    | Θέση κλιματολογικών δεδομένων   |                              | Τοποθεσία εγκατάστασης            |                              | Πηγή  |   |
|--|------------------------|----------------------|--------------------|---|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---|---|
| Γεωγραφικό πλάτος                        |                        |                      |                    | 39,3  |                              | 39,4                              |                              | NASA  |   |
| Γεωγραφικό μήκος                         |                        |                      |                    | 23,0  |                              | 22,9                              |                              | NASA - Χάρτης                               |   |
| Κλιματική ζώνη                           |                        |                      |                    | 3Α - Θερμό - Υγρό   |                              |                                   |                              | NASA  |   |
| Υψόμετρο                                 |                        | m                    |                    | 36  |                              | 5                                 |                              | NASA  |   |
| Θερμοκρασία θέρμανσης βάσει σχεδιασμού   |                        | °C                   |                    | -0,4  |                              |                                   |                              | NASA  |   |
| Θερμοκρασία ψύξης βάσει σχεδιασμού       |                        | °C                   |                    | 32,1  |                              |                                   |                              | NASA  |   |
| Πλάτος (διακύμανση) θερμοκρασίας εδάφους |                        | °C                   |                    | 22,2  |                              |                                   |                              | NASA  |   |
| Μήνας                                    | Θερμοκρασία αέρα<br>°C | Σχετική υγρασία<br>% | Κατακρήμνιση<br>mm | Ημερήσια ηλιακή<br>ακτινοβολία -<br>Οριζόντια<br>kWh/m <sup>2</sup> /ημ | Ατμοσφαιρική<br>πίεση<br>kPa | Ταχύτητα ανέμου<br>m/Δευτερόλεπτο | Θερμοκρασία<br>εδάφους<br>°C | Βαθμό-ημέρες<br>θέρμανσης<br>18 °C<br>°C-ημ | Βαθμό-ημέρες<br>ψύξης<br>10 °C<br>°C-ημ |
| Ιανουάριος                               | 5,8                    | 70,7%                | 77,36              | 1,84  | 99,6                         | 5,1                               | 4,9                          | 378   | 0                                       |
| Φεβρουάριος                              | 6,4                    | 65,3%                | 63,22              | 2,61  | 99,5                         | 5,2                               | 6,4                          | 325   | 0                                       |
| Μάρτιος                                  | 9,7                    | 57,7%                | 75,16              | 3,74  | 99,3                         | 4,6                               | 10,8                         | 257   | 0                                       |
| Απρίλιος                                 | 14,9                   | 48,3%                | 58,80              | 5,29  | 99,0                         | 4,0                               | 16,9                         | 93  | 147                                     |
| Μαΐος                                    | 20,7                   | 42,0%                | 51,83              | 6,42  | 99,1                         | 3,7                               | 23,4                         | 0   | 332                                     |
| Ιούνιος                                  | 25,6                   | 36,7%                | 39,10              | 7,63  | 99,0                         | 3,5                               | 29,1                         | 0   | 468                                     |
| Ιούλιος                                  | 27,8                   | 36,1%                | 44,53              | 7,51  | 98,9                         | 4,2                               | 31,3                         | 0   | 552                                     |
| Αύγουστος                                | 27,2                   | 38,4%                | 38,37              | 6,70  | 99,0                         | 4,3                               | 30,4                         | 0   | 533                                     |
| Σεπτέμβριος                              | 23,3                   | 42,5%                | 59,79              | 5,14  | 99,2                         | 3,9                               | 25,9                         | 0   | 399                                     |
| Οκτώβριος                                | 17,8                   | 52,3%                | 73,35              | 3,17  | 99,5                         | 4,4                               | 18,9                         | 6   | 242                                     |
| Νοέμβριος                                | 11,7                   | 64,4%                | 102,56             | 1,91  | 99,5                         | 4,7                               | 11,5                         | 189   | 51                                      |
| Δεκέμβριος                               | 7,0                    | 72,3%                | 117,94             | 1,46  | 99,6                         | 5,1                               | 6,1                          | 341   | 0                                       |
| <b>Ετήσιο</b>                            | <b>16,5</b>            | <b>52,2%</b>         | <b>802,01</b>      | <b>4,46</b>   | <b>99,2</b>                  | <b>4,4</b>                        | <b>18,0</b>                  | <b>1.590</b>                                | <b>2.724</b>                            |
| <b>Πηγή</b>                              | NASA                   | NASA                 | NASA               | NASA  | NASA                         | NASA                              | NASA                         | NASA  | NASA                                    |
| Μετρημένο σε                             |                        |                      |                    |   | m                            | 10                                | 0                            |   |   |

Και τα τρία προαναφερθέντα στοιχεία είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό του συστήματος γεωθερμίας. Αρχικά, η μέση θερμοκρασία της γης χρησιμοποιείται από το μοντέλο για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του εδάφους στο βάθος που θα οριστεί ο γεωεναλλάκτης. Για βάθη μεγαλύτερα των 15m η θερμοκρασία που λαμβάνεται για τον υπολογισμό του συστήματος θεωρείται ότι είναι ίση με την μέση θερμοκρασία της γης που ορίστηκε. Από την άλλη πλευρά, το εύρος της θερμοκρασίας της γης χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας που μπορεί να λάβει το έδαφος στην διάρκεια ενός έτους. Τέλος, το βάθος μέτρησης της θερμοκρασίας του εδάφους καθορίζεται από την μετεωρολογική βάση δεδομένων που επιλέχθηκε. Στην εξεταζόμενη περίπτωση επειδή τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν από την NASA το ύψος ορίζεται στο μηδέν.

Στο επόμενο στάδιο καθορίζονται τα ψυκτικά και θερμικά φορτία του χώρου. Αρχικά ο τύπος κτηρίου (Building Type) ορίζεται ως «δημόσιο κτήριο». Στην προκειμένη περίπτωση έχει ήδη πραγματοποιηθεί ψυκτική μελέτη και είναι γνωστό το φορτίο που απαιτεί κάλυψη. Έτσι στο πεδίο της διαθέσιμης πληροφορίας (Available Information) έχει γίνει επιλογή των ήδη υφιστάμενων ενεργειακών δεδομένων. Στην προκειμένη περίπτωση ο τύπος κτηρίου που καθορίστηκε δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα που θα προκύψουν. Η μόνη περίπτωση που απαιτεί προσοχή είναι εκείνη κατά την οποία οι απαιτήσεις του κτηρίου δεν είναι γνωστές και με βάση τα ανοίγματα, τον προσανατολισμό, τα συνολικά τετραγωνικά και την χρήση του κτηρίου γίνεται προσπάθεια εκτίμησης των ψυκτικών και θερμικών φορτίων.

Στην περίπτωση λοιπόν που οι τιμές των ψυκτικών και θερμικών φορτίων είναι γνωστές ο χρήστης θα πρέπει να καθορίσει το θερμικό (Design Heating Load) και ψυκτικό φορτίο (Design Cooling Load). Το λογισμικό χρησιμοποιεί αυτά τα δύο πεδία με σκοπό να καθορίσει το μέγεθος της αντλίας που απαιτείται προκειμένου να καλύψει τις απαιτήσεις του κτηρίου.

Τα πεδία που σχετίζονται με την ετήσια ενεργειακή κατανάλωση του κτηρίου για θέρμανση (Annual heating energy demand) και ψύξη (Annual cooling energy demand). Και οι δύο τιμές χρησιμοποιούνται για την δημιουργία εξισώσεων προκειμένου να υπολογιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η ενεργειακή κατανάλωση του γεωθερμικού

συστήματος. Τα δεδομένα αυτά είναι γνωστά από την μελέτη ενεργειακής κατανάλωσης που πραγματοποιήθηκε στο κτήριο. Έτσι η ετήσια κατανάλωση του κτηρίου σε θέρμανση ορίστηκε στις 7,89MWh και η ετήσια κατανάλωση του κτηρίου σε ψύξη ορίστηκε στις 15,47MWh.

#### 4.3.2 Ενεργειακό μοντέλο

Το φύλλο υπολογισμού του ενεργειακού μοντέλου, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.4, ομαδοποιείται σε τρεις κατηγορίες: στις συνθήκες τοποθεσίας, στα χαρακτηριστικά του συστήματος και στην ετήσια ενεργειακή κατανάλωση. Στις παραγράφους που ακολουθούν αναλύονται οι επιμέρους κατηγορίες.

| RET Screen® Energy Model - Ground-source Heat Pump Project |                |                      | Training & Support                               |
|--|----------------|----------------------|--|
| <b>Site Conditions</b>                                     |                |                      | <b>Estimate</b>                                  |
| Project name   |                | Commercial System    | Notes/Range<br><a href="#">See Online Manual</a> |
| Project location   |                | Nova Scotia, Canada  |  |
| Available land area  | m <sup>2</sup> | 1,378                |  |
| Soil type  | -              | Light soil - damp    |  |
| Design heating load  | kW             | 240,0                | → <a href="#">Complete H&amp;C sheet</a>         |
| Design cooling load  | kW             | 244,0                |  |
| <b>System Characteristics</b>                              |                |                      | <b>Estimate</b>                                  |
| <b>Base Case HVAC System</b>                               |                |                      | <b>Notes/Range</b>                               |
| Building has air-conditioning?                             | yes/no         | Yes                  |  |
| Heating fuel type  | -              | Electricity          |  |
| Heating system seasonal efficiency                         | %              | 100%                 | 55% to 350%                                      |
| Air-conditioner seasonal COP                               | -              | 5,2                  | 2,4 to 5,0                                       |
| <b>Ground Heat Exchanger System</b>                        |                |                      |  |
| System type  | -              | Vertical closed-loop |  |
| Design criteria  | -              | Cooling              |  |
| Typical land area required                                 | m <sup>2</sup> | 1,197                |  |
| Ground heat exchanger layout                               | -              | Standard             |  |
| Total borehole length                                      | m              | 4,182                |  |
| <b>Heat Pump System</b>                                    |                |                      |  |
| Average heat pump efficiency                               | -              | User-defined         | <a href="#">See Product Database</a>             |
| Heat pump manufacturer                                     |                |                      |  |
| Heat pump model  |                |                      |  |
| Standard cooling COP                                       | -              | 5,50                 |  |
| Standard heating COP                                       | -              | 4,40                 |  |
| Total standard heating capacity                            | kW             | 169,2                |  |
|  | million Btu/h  | 0,577                |  |
| Total standard cooling capacity                            | kW             | 252,1                |  |
|  | ton (cooling)  | 71,7                 |  |
| <b>Supplemental Heating and Heat Rejection System</b>      |                |                      |  |
| Suggested supplemental heating capacity                    | kW             | 0,0                  |  |
|  | million Btu/h  | 0,000                |  |
| Suggested supplemental heat rejection                      | kW             | 0,0                  |  |
|  | million Btu/h  | 0,000                |  |
| <b>Annual Energy Production</b>                            |                |                      | <b>Estimate</b>                                  |
| <b>Heating</b>   |                |                      | <b>Notes/Range</b>                               |
| Electricity used   | MWh            | 7,5                  |  |
| Supplemental energy delivered                              | MWh            | 0,0                  |  |
| GSHP heating energy delivered                              | MWh            | 24,8                 |  |
|  | million Btu    | 84,6                 |  |
| Seasonal heating COP                                       | -              | 3,3                  | 2,0 to 5,0                                       |
| <b>Cooling</b>   |                |                      |  |
| Electricity used   | MWh            | 18,6                 |  |
| GSHP cooling energy delivered                              | MWh            | 68,2                 |  |
|  | million Btu    | 232,7                |  |
| Seasonal cooling COP                                       | -              | 3,7                  | 2,0 to 5,5                                       |
| Seasonal cooling EER                                       | (Btu/h)/W      | 12,5                 | 7,0 to 19,0                                      |

Εικόνα 4.4: Φύλλο υπολογισμού ενεργειακού μοντέλου

Αρχικά, στις συνθήκες της τοποθεσίας είναι απαραίτητο να καθορισθεί το συνολικό εμβαδόν ελεύθερης επιφάνειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση των σωληνώσεων του γεωθερμικού συστήματος στο έδαφος καθώς και ο τύπος του εδάφους. Έτσι, το εμβαδόν της ελεύθερης επιφάνειας που διαθέτει το κτήριο αναφοράς, μετά από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο αρχιτεκτονικό σχέδιο, ορίστηκε στα 1.378m<sup>2</sup>. Από την άλλη πλευρά σύμφωνα με γεωλογικά δεδομένα και μετρήσεις ο τύπος του εδάφους καθορίστηκε σε «light soil-damp», δηλαδή έδαφος όχι και τόσο βραχώδη με υπόγεια ύδατα.

Εν συνεχεία, στα χαρακτηριστικά του συστήματος λαμβάνεται υπόψιν ότι το κτήριο δεν διαθέτει κάποιο άλλο σύστημα για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών αναγκών. Επομένως, στην ερώτηση του προγράμματος για την ύπαρξη άλλου συστήματος ορίζεται αρνητική απάντηση (Building has air-conditioning? “No”). Στην περίπτωση που η απάντηση ήταν καταφατική τότε θα γινόταν εκτίμηση, με βάση τον συντελεστή εποχιακής απόδοσης του υφιστάμενου συστήματος, της εξοικονομούμενης ενέργειας που θα υπολογιζόταν με την αντικατάστασή του.

Παρόλα αυτά το υφιστάμενο σύστημα θέρμανσης, που περιλαμβάνει του λέβητες αερίου, ορίστηκε με εποχιακή αποδοτικότητα 80%. Η τιμή ελήφθη από τον πίνακα που παρουσιάζεται στο εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού και αναφέρει ότι ο βαθμός απόδοσης ενός υψηλά αποδοτικού λέβητα κυμαίνεται μεταξύ του 75 - 85%.

Μετά τον καθορισμό της βασικής περίπτωσης θέρμανσης και ψύξης ο χρήστης καλείται αν ορίσει τον τύπο του γεωεναλλάκτη που θα χρησιμοποιηθεί στο γεωθερμικό σύστημα. Αρχικά ορίζεται το οριζόντιο κλειστό σύστημα γεωεναλλάκτη. Κατόπιν, ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει αν το σύστημά του θα πρέπει να καλύψει το θερμικό ή το ψυκτικό φορτίο. Επειδή τα δύο φορτία σε ένα κτήριο δεν είναι ποτέ ίσα επιλέγεται τύπος αντλίας ο οποίος να είναι σε θέση να καλύψει το μεγαλύτερο φορτίο όπου αυτό εμφανίζεται (σε περίοδο θέρμανσης ή ψύξης). Το σύστημα στην εξεταζόμενη περίπτωση επομένως θα πρέπει να είναι ικανό να καλύψει το ψυκτικό φορτίο καθώς είναι μεγαλύτερο από το θερμικό.

Ο καθορισμός του συστήματος του γεωεναλλάκτη ολοκληρώνεται με την οριστικοποίηση της διάταξή του (Ground Heat Exchanger). Το λογισμικό διαθέτει 3 επιλογές: τυπικό, πυκνό και πολύ πυκνό, και αφορά την απόσταση που απέχουν οι γεωτρήσεις μεταξύ τους. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατηρούμε την απόσταση των γεωτρήσεων ανάλογα με τον τύπο που επιλέχθηκε.

**Πίνακας 4.3:** Απόσταση γεωεναλλακτών με βάση τον τύπο

| <b>Διάταξη γεωεναλλακτών</b> | <b>Απόσταση γεωεναλλακτών (m)</b> |
|------------------------------|-----------------------------------|
| Τυπική                       | 6,1                               |
| Πυκνή                        | 3,7                               |
| Πολύ πυκνή                   | 2,4                               |

Παρόλο που όσο μικρότερη είναι η απόσταση των γεωεναλλακτών απαιτείται μικρότερη διαθέσιμη επιφάνεια για την εγκατάστασή του συστήματος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι θα παρατηρηθεί αύξηση στο μήκος των σωληνώσεων. Επιπλέον, η μακροχρόνια ανισορροπία θερμότητας στον εναλλάκτη θερμότητας εδάφους (ψυκτικά φορτία πολύ μεγαλύτερα από τα φορτία θέρμανσης ή αντίστροφα) θα μειώσει σε μεγαλύτερο βαθμό την απόδοση των πυκνών γεωθερμικών εναλλακτών. Όταν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των φορτίων θέρμανσης και ψύξης, θα πρέπει να διερευνηθούν διεξοδικά οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις σε κάθε τύπο διάταξης.

Τέλος, για το προσδιορισμό της αντλίας θερμότητας στο πεδίο του μέσου βαθμού απόδοσης (Average Heat Pump Efficiency), ο χρήστης έχει δύο επιλογές. Η πρώτη είναι να επιλέξει ένα μοντέλο από την βιβλιοθήκη του λογισμικού με συγκεκριμένο βαθμό απόδοσης. Από την άλλη έχει την ικανότητα χωρίς να προσδιορίσει το ακριβές μοντέλο να καθορίσει τον βαθμό απόδοσης της αντλίας που θα εγκατασταθεί. Η μελέτη βασίστηκε στην δεύτερη κατηγορία. Η αντλία θερμότητας λοιπόν θεωρήθηκε ότι έχει εποχιακό συντελεστή απόδοσης για θέρμανση και ψύξη 4,5 και 5,5, αντίστοιχα.

#### 4.3.3 Αποτελέσματα κλειστού γεωθερμικού συστήματος

Λαμβάνοντας υπόψη τα όσα αναφέρθηκαν η καταναλισκόμενη ενέργεια του κλειστού γεωθερμικού συστήματος υπολογίζεται στις 7,5MWh κατά την περίοδο θέρμανσης και 18,5MWh κατά την περίοδο ψύξης. Επιπλέον, με την τυπική διάταξη των γεωεναλλακτών

(απόσταση 6m μεταξύ τους) η απαιτούμενη επιφάνεια για την εγκατάσταση τους υπολογίζεται στα  $1.197\text{m}^2$ , το οποίο είναι ικανοποιητικό μέγεθος αν ληφθεί υπόψιν ότι η διαθέσιμη επιφάνεια υπολογίστηκε στα  $1.378\text{m}^2$ . Τέλος, το συνολικό μήκος των σωληνώσεων είναι 4.182m. Επομένως, αν υπολογιστεί ότι το βάθος εγκατάστασης είναι τα 100m και ο κάθε γεωεναλλάκτης είναι σχήματος 'U' τότε συνολικά απαιτούνται 21 γεωεναλλάκτες.

Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζεται το τυπολόγιο με βάση το οποίο πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί του συστήματος κλειστής γεωθερμίας. Στο ίδιο τυπολόγιο βασίζονται και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το λογισμικό.

#### **4.4 Σύγκριση υφιστάμενου γεωθερμικού συστήματος με το κλειστό σύστημα γεωθερμίας**

Στο κτήριο αναφοράς όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο έχουν ήδη εγκατασταθεί δύο συστήματα γεωθερμίας, με εποχιακό συντελεστή απόδοσης, κατά την περίοδο ψύξης, 4,8 και 5,2 αντίστοιχα. Μετά την μελέτη ενεργειακής κατανάλωσης του κτηρίου εκτιμήθηκε ότι η συνολική ενεργειακή κατανάλωση για την κάλυψη των ψυκτικών φορτίων εκτιμήθηκε στις 6,44MWh.

Επειδή το πρόγραμμα υπολογίζει την συνολική κατανάλωση ενέργειας σε περίοδο ψύξης δεν είναι εφικτό να συγκρίνουμε να τα δύο συστήματα. Για αυτό τον λόγο έγινε εκ νέου σχεδιασμός ενός ανοιχτού γεωθερμικού συστήματος. Μετά την αρχικοποίηση ο βαθμός απόδοσής του ορίστηκε ίσος με τον μέσο όρο των συντελεστών απόδοσης των δύο υφιστάμενων συστημάτων, δηλαδή 4,8. Τα αποτελέσματα της νέας μελέτης έδειξαν ότι η ενεργειακή κατανάλωση του ανοιχτού γεωθερμικού συστήματος για την κάλυψη των ψυκτικών φορτίων είναι 21.3MWh. Η εξοικονομούμενη ενέργεια επομένως από την κλειστή γεωθερμία ανέρχεται στις 2,7MWh.

Το ποσό της εξοικονομούμενης ενέργειας δεν θα πρέπει να προκαλεί εντύπωση. Ήταν αναμενόμενο από την στιγμή που το ήδη εγκατεστημένο σύστημα είχε τόσο υψηλό βαθμό απόδοσης. Στην πραγματικότητα η διαφορά του βαθμού απόδοσης των δύο συστημάτων ήταν μόλις 0,7 μονάδες.

#### 4.4.1 Οικονομική βιωσιμότητα αντικατάστασης ανοιχτής με κλειστή γεωθερμία

Όπως αναλύθηκε παραπάνω με την αντικατάσταση του γεωθερμικού συστήματος από ανοιχτό σε κλειστό επιτυγχάνεται μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά 2,7MWh, δηλαδή το κτήριο εξοικονομεί 321€ περίπου ετησίως. Επομένως θα πρέπει να γίνει υπολογισμός του αρχικού κεφαλαίου που απαιτείται για την εγκατάσταση του κλειστού γεωθερμικού συστήματος και κατόπιν μελέτη για τον καθορισμό της διάρκειας απόσβεσής του.

Βασικό μέρος της κλειστής γεωθερμίας αποτελούν οι γεωτρήσεις με σκοπό την τοποθέτηση των γεωεναλλακτών καθώς και οι σωληνώσεις. Ένα τυπικό κόστος για μία γεώτρηση είναι τα 70€/m. Αν ληφθεί υπόψιν ότι ο κάθε γεωεναλλάκτης απαιτεί βάθος 100m και ότι για το σύστημα υπολογίστηκαν 21 γεωεναλλάκτες τότε το κόστος των γεωτρήσεων ανέρχεται στις 147.000€. Επίσης, στην κλειστή γεωθερμία οι σωλήνες που απαιτούνται είναι 1,25 ιντσών με τιμή αγοράς 8€/m. Συνολικά για το σύστημα απαιτούνται 4.314m. Η συνολική τιμή επομένως για τις σωληνώσεις υπολογίζεται στις 34.512€, με το συνολικό κόστος των δύο τμημάτων να αγγίζει τις 181.512€. Στην τιμή αυτή ελήφθη υπόψιν ότι ο κάθε γεωεναλλάκτης είναι τύπου U και έχει συνολικό μήκος σωλήνα 200m, συνολικά απαιτούνται 21 γεωεναλλάκτες καθώς και οι σωληνώσεις σύνδεσης μεταξύ των γεωεναλλακτών.

Προκύπτει επομένως ότι το αρχικό κόστος επένδυσης που απαιτείται μόνο για την αγορά και την εγκατάσταση των γεωεναλλακτών είναι αποτρεπτικό για την αντικατάσταση του υφιστάμενου γεωθερμικού συστήματος με κλειστό. Με βάση την ετήσια εξοικονομούμενη ενέργεια, το κλειστό γεωθερμικό σύστημα δεν θα καταφέρει να κάνει ποτέ απόσβεση, καθώς εκτιμάται ότι αυτή θα πραγματοποιηθεί σε περισσότερα από 500 έτη από την εγκατάσταση του.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

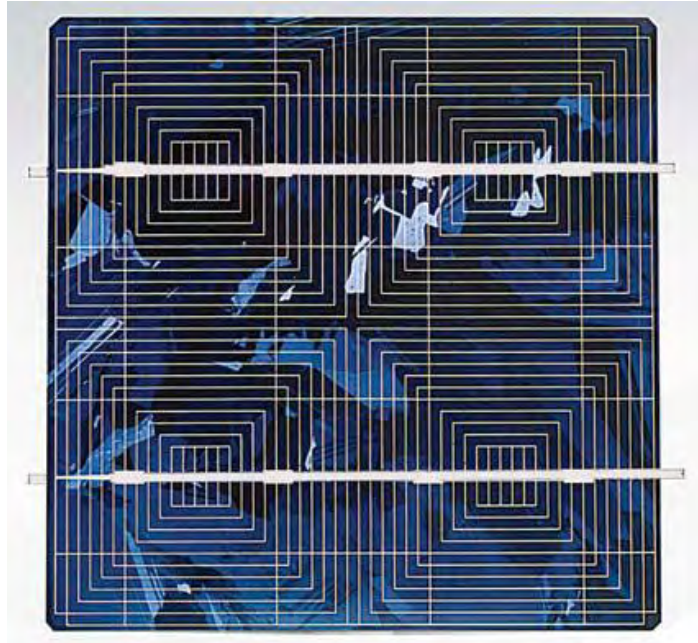
#### 5.1 Εισαγωγή

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία αποτελούν μία από τις τεχνολογίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα κύρια ηλεκτρικά στοιχεία των συστημάτων αποτελούν τα φωτοβολταϊκά πάνελ, οι συσσωρευτές (αν επιλέξουμε σύστημα με δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας), οι αντιστροφείς τάσης, οι μετρητές ενέργειας και οι ρυθμιστές φόρτισης. Σε περιπτώσεις που το κτήριο αναφοράς είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο (on-grid) συνήθως το σύστημα αποθήκευσης (συσσωρευτές και ρυθμιστές φόρτισης) παραλείπεται λόγω του υψηλού κόστους.

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι ένα από τα βασικότερα τμήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Μονάδα δόμησής τους αποτελούν τα φωτοβολταϊκά κελιά (ή φωτοβολταϊκές κυψέλες) (Εικόνα 5.1). Πρόκειται για τεχνητούς ημιαγωγούς, που προέρχονται συνήθως από Πυρίτιο, οι οποίοι ενώνονται σε σειρά με σκοπό να δημιουργήσουν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Οι ημιαγωγοί αυτοί απορροφούν φωτόνια από την ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν μια ηλεκτρική τάση. Στην συνέχεια με την εν σειρά σύνδεση των στοιχείων αυτών προκύπτει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. [9]

Επειδή οι πρώτες εφαρμογές των φωτοβολταϊκών αφορούσαν την φόρτιση μπαταριών, στην αγορά κυκλοφορούν πολλά μοντέλα με τάση εξόδου 12V. Ένα τυπικό πλαίσιο αποτελείται από ένα κύκλωμα 36 φωτοβολταϊκών κελιών συνδεδεμένα σε σειρά, με γυάλινο ή πλαστικό περίβλημα, για την προστασία του από το περιβάλλον. Η επιφάνεια τους μπορεί να φτάσει τα δύο τετραγωνικά μέτρα.





Εικόνα 5.1: Φωτοβολταϊκό κελί

Το κύριο συστατικό των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι το πυρίτιο, ημιαγώγιμο υλικό, το οποίο έχει την ικανότητα μετατροπής της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν ωστόσο και άλλα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, όπως το κάδμιο και το γάλλιο.

Τα φωτοβολταϊκά κελιά που παράγονται με την επεξεργασία των υλικών αυτών ποικίλουν στο πάχος και την απόδοση. Έτσι, με βάση το πάχος του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους έχουμε δύο βασικές κατηγορίες φωτοβολταϊκών στοιχείων: τα στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου και τα στοιχεία λεπτού υμενίου (λεπτών επιστρώσεων). Και οι δύο ομάδες παρουσιάζουν τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Προκειμένου λοιπόν, να επιλεγεί η κατάλληλη τεχνολογία για την εκάστοτε μελέτη, λαμβάνονται υπόψιν οι κλιματικές συνθήκες της περιοχής, όπως η ένταση και η διάρκεια της ηλιοφάνειας, τυχόν σκιάσεις καθώς και το κόστος επένδυσης.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου είναι τα πιο ευρέως διαδεδομένα. Το πυρίτιο (Si) είναι το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο στην βιομηχανία για την κατασκευή τους. Ο μεγάλος βαθμός απόδοσης των πλαισίων αυτών, σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες είναι ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της κατηγορίας. Έτσι, το πυρίτιο αποτελεί πλέον την πρώτη ύλη για το 90% της αγοράς φωτοβολταϊκών.

Τα κρυσταλλικού πυριτίου φωτοβολταϊκά στοιχεία διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCristalline, sc-Si)
- Φωτοβολταϊκά κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCristalline Silicon, mc-Si)
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)

Ενώ τα φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών επιστρώσεων (thin film) διακρίνονται σε:

- Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)
- Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)
- Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Τα πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου, και κυρίως τα μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά, είναι εκείνα που χρησιμοποιούνται ευρέως στις εγκαταστάσεις. Οι δύο κατηγορίες ωστόσο παρουσιάζουν βασικές διαφορές ως προς το κόστος και την απόδοση. Παρόλο που τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου επιτυγχάνουν βαθμό απόδοσης 20%-21%, το κόστος τους είναι υψηλό. Αυτό οφείλεται στην διαδικασία παραγωγής τους, η οποία είναι ακριβότερη και δυσκολότερη, καθώς το πυρίτιο κρυσταλλώνεται στο ίδιο πλέγμα. Τα στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου από την άλλη, παρουσιάζουν βαθμό απόδοσης έως 18% ενώ το κόστος τους είναι χαμηλότερο από τα μονοκρυσταλλικά, καθώς η παραγωγή τους δεν είναι τόσο πολύπλοκη.

Από την δεύτερη κατηγορία φωτοβολταϊκών, εκείνα που επιλέγονται κυρίως είναι τα άμορφου πυριτίου τα οποία αποτελούν μία νέα τεχνολογία. Συγκριτικά με τα δύο στοιχεία που προαναφέρθηκαν, τα φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου παρουσιάζουν βαθμό απόδοσης 6%-8%. Τα δύο βασικά τους πλεονεκτήματα είναι ότι η παραγόμενη ενέργεια δεν επηρεάζεται από τις υψηλές θερμοκρασίες και η απόδοσή τους είναι υψηλή ακόμα και σε συνθήκες με διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά). Παρόλα αυτά, η ενεργειακή πυκνότητα των στοιχείων αυτών είναι χαμηλή, καθώς απαιτείται διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου για την παραγωγή ίδιας

ποσότητας ενέργειας. Τέλος η τιμή τους είναι χαμηλή εξαιτίας της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που απαιτείται για την παραγωγή τους. [10]

Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει πιο εύκολα η σύγκριση μεταξύ των τεχνολογιών και των τύπων φωτοβολταϊκών πλαισίων ανάλογα με την απόδοση, την διαθέσιμη επιφάνεια και την μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας.

**Πίνακας 5.1:** Συγκριτικός Πίνακας Φωτοβολταϊκών Τεχνολογιών

| Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών            |                     |                   |                    |
|--|---------------------|-------------------|--------------------|
| Τύπος  | Μονοκρυσταλλικά     | Πολυκρυσταλλικά   | Λεπτού υμενίου     |
| Απόδοση  | 11-21%              | 11-18%            | a-Si: 6-8%         |
|  |                     |                   | μ-Si: 8,1-8,5%     |
|  |                     |                   | CIS-CIGS: 6-11%    |
|  |                     |                   | CdTe: 6-11,1%      |
| Απαιτούμενη επιφάνεια ανά KWp                            | 5,5-9m <sup>2</sup> | 7-9m <sup>2</sup> | 9-25m <sup>2</sup> |
| Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (KWh ανά KWp)             | 1300                | 1300              | 1300-1.450         |
| Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (KWh ανά m <sup>2</sup> ) | 145-235             | 145-185           | 50-160             |

Η τάση που παράγεται στην έξοδο ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι συνεχής (DC). Προκειμένου λοιπόν η παραγόμενη ενέργεια να είναι αξιοποιήσιμη είναι αναγκαία η μετατροπή της τάσης σε εναλλασσόμενη. Ο αντιστροφέας (inverter) είναι η ηλεκτρονική συσκευή που τοποθετείται στο φωτοβολταϊκό σύστημα με σκοπό να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πάνελ σε ενέργεια κατάλληλων χαρακτηριστικών για την τροφοδοσία φορτίων.

Οι αντιστροφείς των διασυνδεδεμένων συστημάτων διαχωρίζονται, με βάση το είδος τάσης που παράγουν, σε μονοφασικούς και σε τριφασικούς αντιστροφείς. Έτσι, ανάλογα με το μοντέλο και την εγκατάσταση, η τάση τροφοδοσίας μπορεί να είναι 12, 24, 48 ή άλλη, ενώ η τάση εξόδου είναι 230 ή 400 (για τα ευρωπαϊκά δεδομένα).

## 5.2 Νομικό πλαίσιο και ενεργειακός συμψηφισμός – Net Metering

Η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων από αυτοπαραγωγούς, πραγματοποιείται με βάση την εφαρμογή του ενεργειακού συμψηφισμού (Net Metering), σύμφωνα με την υπ' αριθ. ΑΠΕΗΛ/Α/Φ1/οικ.24461 (ΦΕΚ Β' 3583/31.12.2014) Υπουργική Απόφαση. Ως ενεργειακός συμψηφισμός θεωρείται ο συμψηφισμός της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τον φωτοβολταϊκό σταθμό με την ενέργεια που καταναλώνεται στις εγκαταστάσεις του αυτοπαραγωγού. Αφορά φωτοβολταϊκά συστήματα που είναι εγκατεστημένα στον ίδιο χώρο με την εγκατάσταση κατανάλωσης. Στον ενεργειακό συμψηφισμό δεν είναι υποχρεωτικό η παραγόμενη ενέργεια να ταυτοχρονίζεται την καταναλισκόμενη. [11]

Η υπουργική απόφαση για την αυτοπαραγωγή ρεύματος προβλέπει ένα όριο εγκατεστημένης ισχύος στα συστήματα. Σύμφωνα με αυτό, η προβλεπόμενη μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς είναι έως 20kW. Εάν η συμφωνημένη ισχύς κατανάλωσης ξεπερνά το τελευταίο, τότε σε αυτή την περίπτωση η εγκατάσταση μπορεί να φτάσει μέχρι το 50% της συμφωνημένης ισχύος της εγκατάστασης κατανάλωσης (σε kVA). Σε ειδική κατηγορία κατατάσσονται αυτοπαραγωγοί μέσης τάσης, νομικά πρόσωπα, δημοσίου ή ιδιωτικού δικαίου, που επιδιώκουν κοινωφελείς ή άλλου δημοσίου συμφέροντος σκοπούς, γενικής ή τοπικής εμβέλειας, και Ενεργειακές Κοινότητες, όπου η ισχύς κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μπορεί να ανέρχεται έως και στο 100% του αθροίσματος της συμφωνημένης ισχύος του συνόλου των συμψηφιζόμενων καταναλώσεων. [12]

Τα βασικά τμήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων, όπως αναφέρθηκαν και στην αρχή του κεφαλαίου, είναι τα πάνελ και οι αντιστροφείς. Προκειμένου να γίνει σύνδεση όμως του φωτοβολταϊκού συστήματος στο δίκτυο απαραίτητη θεωρείται η ύπαρξη ενός δεύτερου μετρητή ενέργειας. Στην Εικόνα 5.2 αναπαριστάτε η σύνδεση του φωτοβολταϊκού συστήματος με το δίκτυο. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ συνδέονται με τον αντιστροφέα τάσης και στην συνέχεια πραγματοποιείται σύνδεση του αντιστροφέα με τον μετρητή 1, ο οποίος καταγράφει την παραγόμενη ενέργεια των φωτοβολταϊκών. Εάν η ενέργεια που παράγεται από το σύστημα δεν καταναλωθεί την ίδια χρονική στιγμή από το κτίριο, διοχετεύεται στο δίκτυο μέσω του μετρητή 2 (ρολόι ΔΕΗ). Ο δεύτερος

μετρητής είναι διπλής κατεύθυνσης και υπολογίζει την ενέργεια που εισέρχεται από το δίκτυο καθώς και την ενέργεια που εξέρχεται προς αυτό.



Εικόνα 5.2: Net Metering - Σχεδιάγραμμα συνδεσμολογίας και τρόπος λειτουργίας

Η σύμβαση συμψηφισμού υπογράφεται μεταξύ του προμηθευτή και του αυτοπαραγωγού. Η διάρκεια της είναι 25 έτη, ξεκινώντας να ισχύει από την ημερομηνία που ενεργοποιήθηκε η σύνδεση του φωτοβολταϊκού συστήματος.

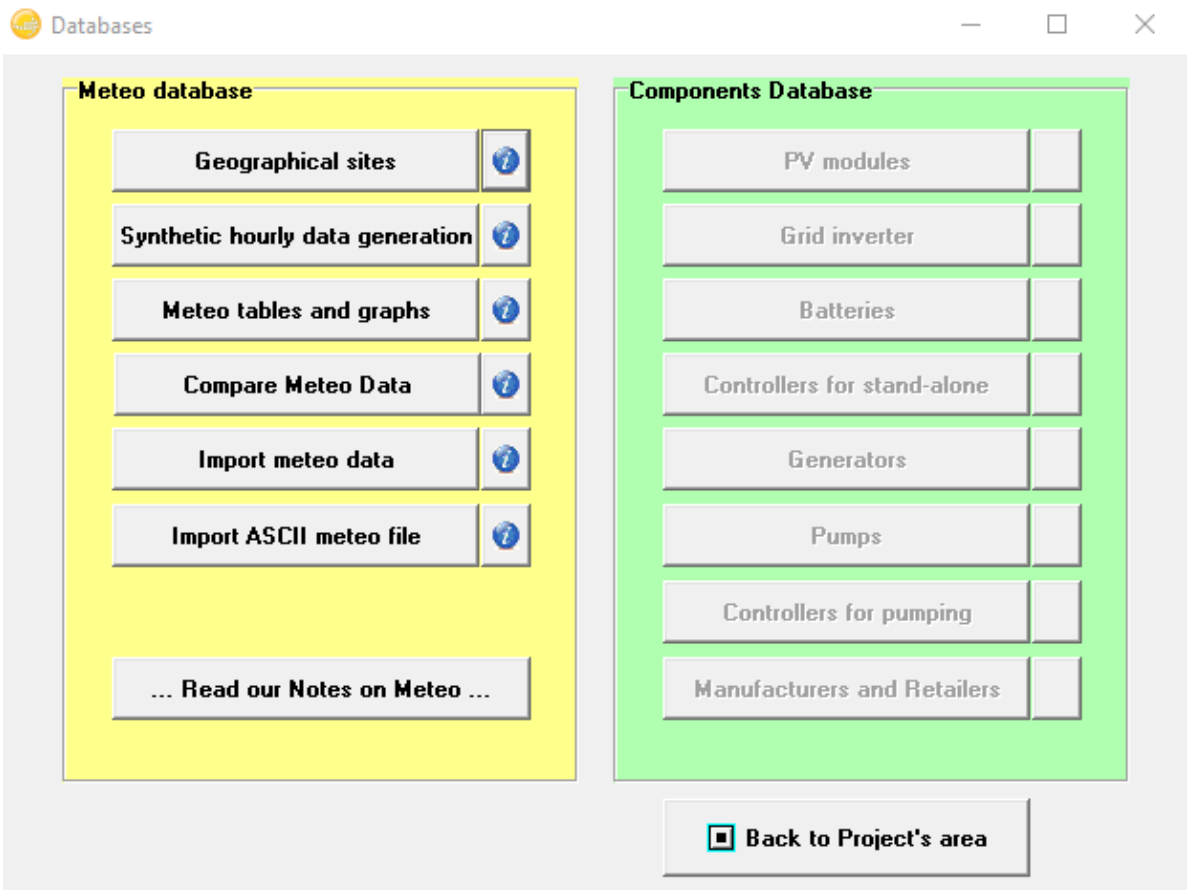
### 5.3 Εισαγωγή στο λογισμικό PnSyst και στις δυνατότητές του

Η μελέτη, η διαστασιολόγηση και η ανάλυση του φωτοβολταϊκού συστήματος για το κτήριο αναφοράς πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό PnSyst. Αρχικά, το λογισμικό παρέχει πολλές δυνατότητες που εξαρτώνται από το είδος της εγκατάστασης: διασυνδεδεμένη (grid-connected) ή όχι (stand-alone). Η Εικόνα 5.3 παρουσιάζει την αρχική σελίδα του λογισμικού. Στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ότι το κτήριο αναφοράς είναι διασυνδεδεμένο. Θα ήταν ανούσιο η πραγματοποίηση της μελέτης με σκοπό την ανεξάρτηση από τον παραγωγό, καθώς είναι αδύνατο να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες του κτηρίου μόνο με φωτοβολταϊκό σύστημα.



Εικόνα 5.3: Επιλογή διασύνδεσης της μελέτης

Μετά την επιλογή διασύνδεσης ο χρήστης καλείται να καθορίσει την περιοχή της εγκατάστασης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.4, προκειμένου να υπολογιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η παραγόμενη ενέργεια γίνεται χρήση των μετεωρολογικών δεδομένων. Το πρόγραμμα διαθέτει δύο μετεωρολογικές βάσεις δεδομένων: την MeteoNorm 7.1 [1994-2006] και την NASA-SSE satellite data , 1983-2005. Για την μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από το MeteoNorm 7.1, η οποία είναι και η προτεινόμενη βάση του λογισμικού.

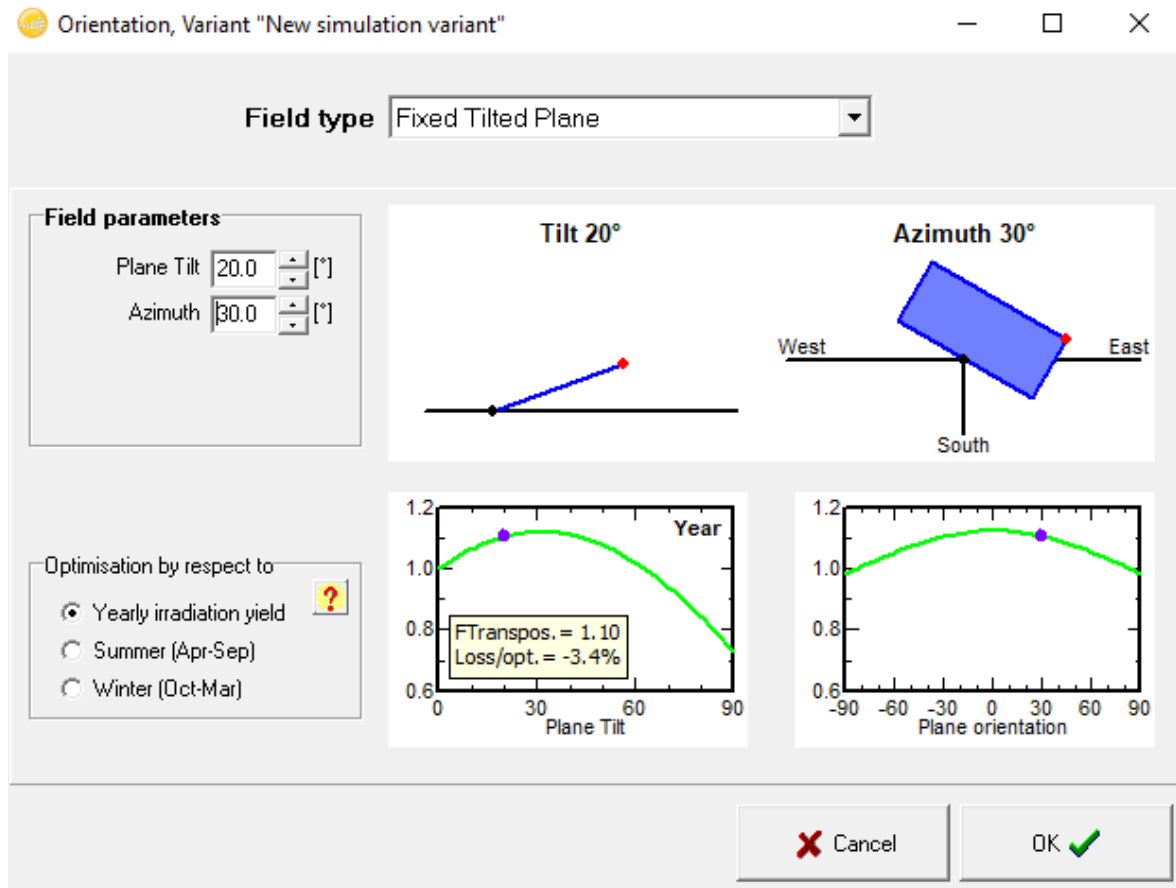


Εικόνα 5.4: Επιλογή γεωγραφικής περιοχής

Η τελευταία αρχικοποίηση που απαιτεί το λογισμικό προκειμένου να περάσει ο χρήστης στο κυρίως μέρος, που είναι η επιλογή των στοιχείων (πάνελ και αντιστροφείς), είναι ο καθορισμός της κλίσης (Plane tilt) και του προσανατολισμού (Azimuth) των πάνελ. Με ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να γίνει η αρχικοποίηση του αζιμούθιου. Το αζιμούθιο ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του Νότου και της επιφάνειας του συλλέκτη. Αυτή η γωνία θεωρείται αρνητική όταν η επιφάνεια του πάνελ είναι προς την ανατολή ενώ ορίζεται ως θετική στην αντίθετη περίπτωση.

Ο προσανατολισμός και η κλίση των πάνελ παίζουν καθοριστικό ρόλο στην παραγωγή του συστήματος. Έτσι το λογισμικό, λαμβάνοντας υπόψιν την γεωγραφική περιοχή που επιλέχθηκε, έχει την ικανότητα να προτείνει την βέλτιστη κλίση στον χρήστη και κατόπιν εκείνος αποφασίζει ανάλογα με τις ανάγκες και τους περιορισμούς της εγκατάστασης αν θα την ακολουθήσει. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 5.5 φαίνεται πως η κλίση των πάνελ ορίστηκε στις  $20^\circ$  και ο προσανατολισμός του στις  $30^\circ$  (Νοτιοδυτικός). Οι δύο καμπύλες που υπάρχουν δηλώνουν την παραγωγή των πάνελ. Η πρώτη δηλώνει την παραγωγή

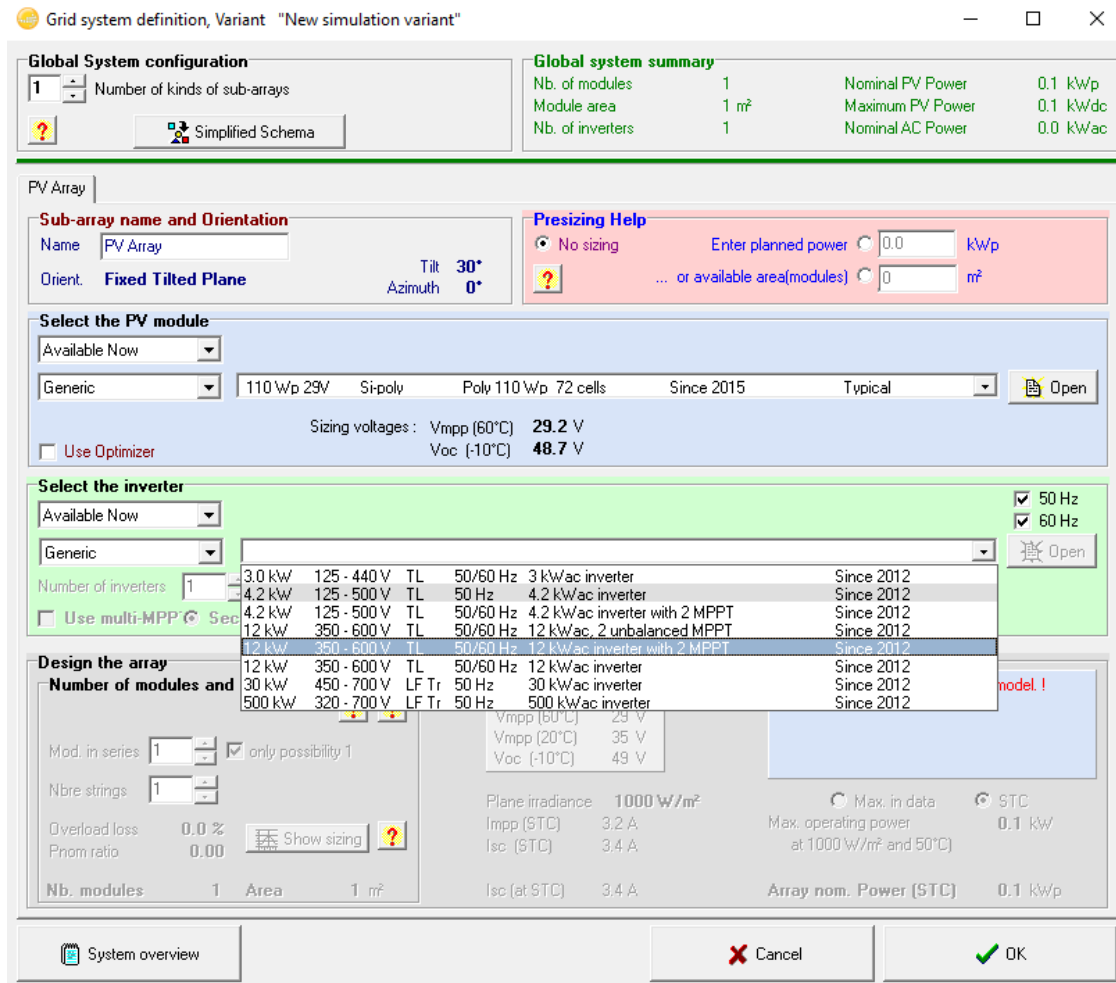
ανάλογα με την κλίση του συλλέκτη ενώ η δεύτερη αναπαριστά την παραγωγή λαμβάνοντας υπόψιν τον προσανατολισμό του. Διαπιστώνεται επομένως ότι οι τιμές που καθορίστηκαν από τον χρήστη δεν είναι βέλτιστες και το λογισμικό προτείνει για μέγιστη παραγωγή 30° για την κλίση και 0° για το αζιμούθιο.



Εικόνα 5.5: Καθορισμός κλίσης και προσανατολισμού των πάνελ

Μετά την επιλογή της γεωγραφικής περιοχής και της κλίσης των πάνελ ο χρήστης καλείται να δημιουργήσει το σύστημά του. Το πρόγραμμα διαθέτει βιβλιοθήκες για την επιλογή των φωτοβολταϊκών μοντέλων και των αντιστροφών. Στην Εικόνα 5.6 παρατίθεται το παράθυρο του λογισμικού στο οποίο ο χρήστης ορίζει το σύστημα. Αν η μελέτη πραγματοποιηθεί με έναν συγκεκριμένο τύπο πάνελ, τότε υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής του στην βιβλιοθήκη, στην περίπτωση που δεν περιλαμβάνεται. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο χρήστης να γνωρίζει τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του καθώς και λεπτομέρειες που αφορούν το πλήθος και την διάταξη των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Ανάλογη διαδικασία ακολουθείται και στους αντιστροφείς.





Εικόνα 5.6: Επιλογή φωτοβολταϊκών πλαισίων και αντιστροφών

Οι απώλειες του συστήματος αποτελούν ένα ξεχωριστό τμήμα στο λογισμικό. Στο PnSyst, οι παράμετροι απωλειών των πλαισίων είναι αρχικοποιημένες με βάση τις προκαθορισμένες τιμές του λογισμικού. Αφού δημιουργηθεί το σύστημα και γίνει προσομοίωσή του, ο μελετητής αποφασίζει αν τα αποτελέσματα είναι ρεαλιστικά με τις αρχικοποιημένες τιμές απωλειών. Τυχόν αλλαγές σε κάποιες από τις παραμέτρους πραγματοποιούνται σε επόμενο στάδιο της μελέτης, όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμού και πάντα με μεγάλη προσοχή.

Σε κάθε αλλαγή που πραγματοποιείται στο σύστημα (πλήθος, τύπος και συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών και αντιστροφών) ο χρήστης έχει την δυνατότητα να πραγματοποιεί την προσομοίωση του συστήματος δημιουργώντας αυτόματα μία έκθεση αποτελεσμάτων. Εκεί αναφέρονται το είδος, τα τεμάχια και η συνδεσμολογία των πάνελ και των αντιστροφών, η παραγόμενη ενέργεια, το κόστος εγκατάστασης κ.α. Η έκθεση

των αποτελεσμάτων που θα προκύψει από την παρούσα μελέτη θα παραταθεί στο τέλος του κεφαλαίου αφού πρωτίστως αναλυθούν όλα τα αποτελέσματα.

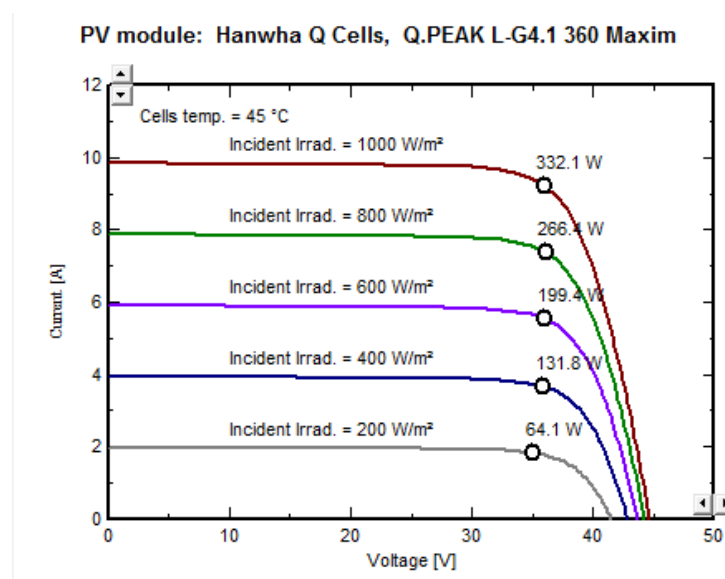
### 5.3.1 Σχεδιασμός του συστήματος

Η επιλογή φωτοβολταϊκού μοντέλου, για το πρώτο σύστημά, έγινε με βάση την απόδοση του πάνελ. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψιν τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, χρησιμοποιήθηκαν μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά της εταιρίας Hanwha Q Cells και κωδικό μοντέλου Q.PEAK L-G4.1 360 Maxim. Η απόδοση των πλαισίων σε συνθήκες εργαστηρίου (ηλιακή ακτινοβολία  $1000 \text{ W/m}^2$  και θερμοκρασία  $25^\circ\text{C}$ ) είναι  $18.07\%$  και τα χαρακτηριστικά των μονάδων με βάση αυτές είναι:

$$P_{\text{nom}} = 360\text{Wp} \text{ και } V_{\text{mpp}} = 38.9\text{V},$$

όπου  $P_{\text{nom}}$  η ονομαστική ισχύς και  $V_{\text{mpp}}$  η μέγιστη τάση του πάνελ.

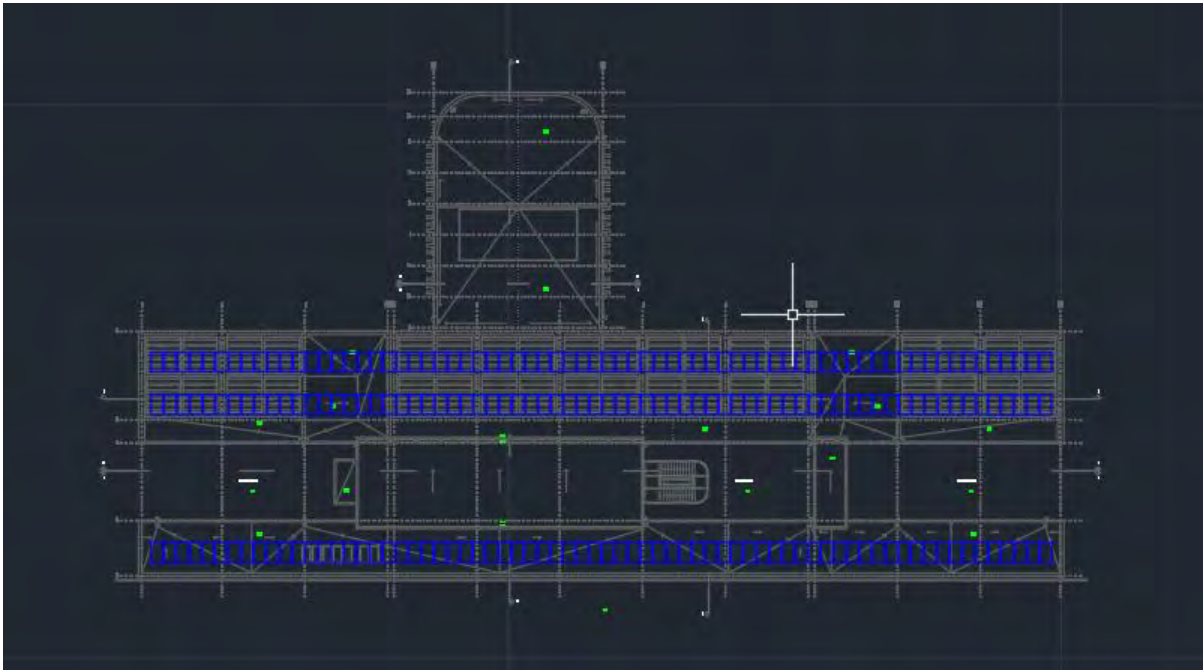
Ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και την θερμοκρασία που αναπτύσσεται στα κελιά υπάρχει διακύμανση στην απόδοση του πλαισίου. Στο Σχήμα 5.1, παρατηρούνται οι γραφικές παραστάσεις του ρεύματος συναρτήσει της τάσης για πέντε διαφορετικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας (Incident Irradiance) υπό σταθερή θερμοκρασία. Από το σχήμα συμπεραίνεται ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας επιδρά (σχεδόν ανάλογα) στο ρεύμα βραχυκύκλωσης του κελιού, ενώ η τάση του ανοιχτού κυκλώματος αυξάνεται ελάχιστα με την αύξηση της έντασης.



Σχήμα 5.1: Επίδραση της έντασης ακτινοβολίας στην έξοδο του πλαισίου

Η διαστασιολόγηση του συστήματος έγινε λαμβάνοντας υπόψη την ελεύθερη επιφάνεια του δώματος και τα τετραγωνικά που απαιτεί κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε μονάδας είναι  $1.994 \times 1.000 \text{m}$ , ενώ το βάρος της είναι  $24 \text{kg}$ . Η τοποθέτηση έγινε, με την πλευρά μήκους  $1.000 \text{m}$  να αποτελεί την βάση του πάνελ, με νότιο προσανατολισμό και κλίση  $31^\circ$ . Συνολικά τοποθετήθηκαν 210 μονάδες με συνολική ονομαστική ισχύ εξόδου  $75.6 \text{kWp}$ .

Η εγκατάσταση των μονάδων πραγματοποιήθηκε υπολογίζοντας, το εμβαδόν της ελεύθερης επιφάνειας που είναι διαθέσιμη στην βόρεια και νότια πλευρά του δώματος. Έτσι στο νότιο τμήμα, με διαστάσεις  $84 \times 5 \text{m}$ , τοποθετήθηκαν εβδομήντα πάνελ, ενώ στην βόρεια πλευρά του δώματος τοποθετήθηκαν 140 επιπλέον μονάδες. Στην Εικόνα 5.7 παρατηρείται η διάταξη των πλαισίων.



**Εικόνα 5.7:** Κάτοψη δώματος κτηρίου αναφοράς

Στην βόρεια πλευρά του κτηρίου τα πάνελ τοποθετήθηκαν πάνω σε μεταλλική πέργκολα και το συνολικό βάρος των μονάδων είναι  $3.360$  τόνοι, ενώ τα κιλά ανά τετραγωνικό μέτρο είναι περίπου  $5,46 \text{kg/m}^2$ . Απαραίτητες επομένως θεωρούνται οι επεμβάσεις για την ενίσχυση του στεγάστρου με σκοπό την αποφυγή κατάρρευσης.

Για την δημιουργία του συστήματος ελήφθη υπόψιν η χρήση βελτιστοποιητή (optimizer). Πρόκειται για DC-DC αντιστροφείς οι οποίοι συνδέονται σε κάθε υπομονάδα (φωτοβολταϊκό πάνελ). Υπάρχουν ωστόσο μοντέλα, όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη, τα οποία διαθέτουν ενσωματωμένο βελτιστοποιητή, ο οποίος τοποθετείται στη θέση της διόδου παράκαμψης (by-pass diode) ανά 20-24 φωτοβολταϊκά κελιά.

Όπως αναφέρθηκε τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούνται από την εν σειρά σύνδεση των φωτοβολταϊκών κελιών. Αν κάποια από τα κελιά του πάνελ υποστούν μερική σκίαση τότε η τάση στα άκρα τους μειώνεται. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μειωμένη παραγωγή ισχύος από την μονάδα.

Μία λύση στην αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος αποτελεί ο βελτιστοποιητής. Σκοπός του είναι η παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος για κάθε πάνελ και έχει συγκεκριμένη λειτουργία. Όταν η τάση εξόδου του πλαισίου πάρει τιμή μικρότερη της μέγιστης τάσης του ( $V < V_{mp}$ ) τότε το ρεύμα ενισχύεται κατά μήκος της καμπύλης ισχύος ( $P_{mp} = I_{mp} * V_{mp}$ ), με αποτέλεσμα το πάνελ να παράγει την μέγιστη δυνατή ισχύ δεδομένων των συνθηκών. Η τιμή που μπορεί να πάρει το ρεύμα δεν μπορεί να ξεπεράσει την τιμή του μέγιστου ρεύματος που δίνει ο κατασκευαστής ( $I_{mp}$ ). Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η άντληση της μέγιστης ισχύος από κάθε υπομονάδα.

Για την κάλυψη των αναγκών του συστήματος έγινε χρήση αντιστροφών διπλού κλάδου, με δυνατότητα παρακολούθησης του σημείου βέλτιστης λειτουργίας γνωστή και ως MPPT (Maximum Power Point Tracker). Πρόκειται για ένα κύκλωμα (τυπικά μετατροπέα από DC σε DC) που χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των σύγχρονων φωτοβολταϊκών αντιστροφών. Το MPPT κύκλωμα ελέγχει την τάση εξόδου της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών μονάδων, την συγκρίνει με την τάση του μετατροπέα, καθορίζει ποια είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παραχθεί και στην συνέχεια την μετατρέπει στο επιθυμητό επίπεδο.

Οι αντιστροφείς με διπλή λειτουργία MPPT επιτρέπουν πολύ μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό του συστήματος, εξοικονόμηση κόστους καθώς και παραγωγή μεγαλύτερου ποσού ενέργειας. Η σύνδεση δύο συστοιχιών με διαφορετικά ηλιακά αζιμούθια ή κλίσεις και διαφορετικό αριθμό πάνελ σε έναν αντιστροφέα μονού MPPT θα είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός συστήματος με ιδιαίτερα μικρό βαθμό απόδοσης και

σε ορισμένες περιπτώσεις θα δημιουργούσε ένα μη ασφαλές σύστημα. Η κατασκευή συστοιχιών με διαφορετική κλίση, αζιμούθιο, ακόμα και διαφορετικό τύπο πάνελ, επιτρέπει περισσότερες επιλογές για την κάλυψη των αναγκών της εγκατάστασης εξαλείφοντας την ανάγκη χρήσης δεύτερου μετατροπέα.

Ακόμη και για ομοιογενείς συστοιχίες φωτοβολταϊκών (ίδιο τύπο πάνελ, κλίση και αζιμούθιο), η διπλή λειτουργία MPPT εξακολουθεί να αποτελεί την καλύτερη επιλογή. Στην περίπτωση που μία σειρά υποστεί βλάβη ή έχει μεγαλύτερο ποσοστό ρύπανσης ή ζητήματα με την σκίαση, θα επηρεαστεί ολόκληρη η έξοδος του συστήματος και θα υπάρξει μείωση της συνολικής παραγόμενης ενέργειας. Η διάσπαση των σειρών όμως σε δύο τμήματα, με χρήση διπλού MPPT, θα σημειώσει μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας, καθώς η συστοιχία που δεν εμφανίζει κάποιο από τα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα συνεχίζει να παρέχει την μέγιστη ενέργεια.

Έτσι λοιπόν για ολόκληρη την μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δεκαπέντε τριφασικοί αντιστροφείς με ονομαστική ισχύ 5 kW, τάση λειτουργίας 200 – 800V και μέγιστη τάση εισόδου 900V. Στους αντιστροφείς έγινε σύνδεση όμοιων συστοιχιών (δέκα συστοιχίες η καθεμιά συνδεδεμένη σε ένα MPPT), με την κάθε μία να αποτελείται από επτά φωτοβολταϊκά πάνελ. Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται το μονογραμμικό διάγραμμα της συνδεσμολογίας του ενός αντιστροφέα και των δύο συστοιχιών.



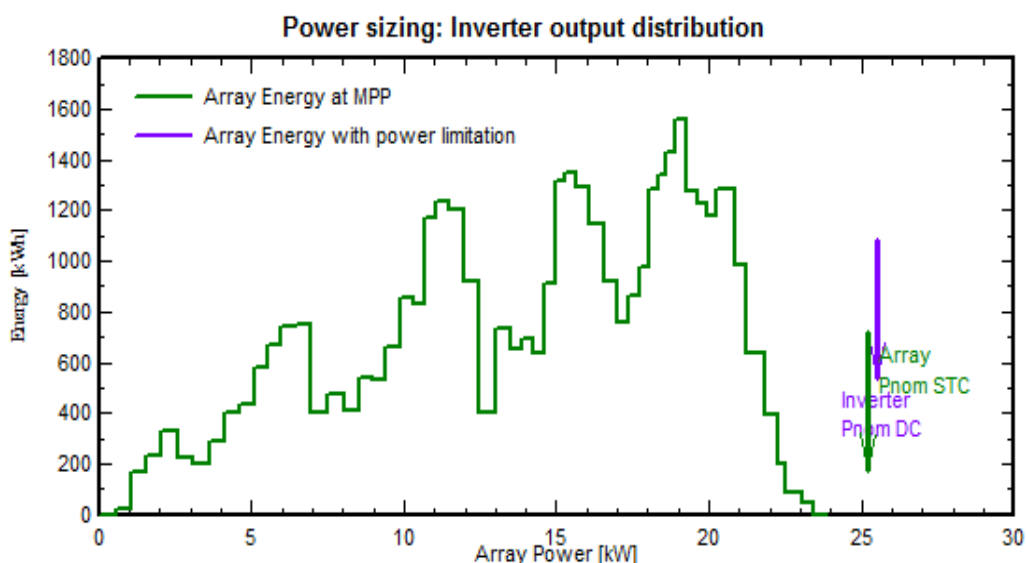
Σχήμα 5.2: Μονογραμμικό διάγραμμα συνδεσμολογίας φωτοβολταϊκών με τον αντιστροφέα

Κάθε συστοιχία δίνει τάση εξόδου και συνολική ισχύ ίση με:

- Τάση εξόδου συστοιχίας = Αριθμό φωτοβολταϊκών x Ονομαστική τάση πάνελ (1)
- Συνολική ισχύ συστοιχίας = Αριθμό φωτοβολταϊκών x Ονομαστική ισχύ πάνελ (2)

Επομένως η τάση και η ισχύς εξόδου κάθε συστοιχίας σύμφωνα με τους τύπους (1) και (2) είναι  $7 \times 38.9 = 272,3V$  και  $7 \times 360 = 2,520kW$  αντίστοιχα. Όπως αναφέραμε όμως σε κάθε μετατροπέα συνδέονται δύο συστοιχίες. Η τάση στους ακροδέκτες του μετατροπέα παραμένει ίση με  $272,3V$ , καθώς έχουμε παράλληλη σύνδεση συστοιχιών. Η συνολική ισχύς όμως που δέχεται ο αντιστροφέας ισούται με το άθροισμα των ισχύων των επιμέρους συστοιχιών, δηλ.  $5,04kW$ .

Σε αυτό το σημείο παρατηρείτε μία αναντιστοιχία όσο αναφορά την συνολική ισχύ των παράλληλων συστοιχιών και την συνολική ισχύ που μπορεί να διαχειριστεί ο αντιστροφέας, παρατηρώντας ένα μικρό ποσοστό απωλειών της τάξης του  $0,8\%$  ανά αντιστροφέα. Η απώλεια αυτή είναι θεωρητική, καθώς όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω τα ονομαστικά χαρακτηριστικά των πάνελ είναι σε συνθήκες εργαστηρίου. Επομένως, σε πραγματικές συνθήκες μία συστοιχία δεν θα καταφέρει να παράξει  $3,045kW$ . Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται η διαστασιολόγηση του αντιστροφέα. Η παραγόμενη ισχύς του αντιστροφέα αναπαρίσται με το μωβ βέλος ενώ αυτή των φωτοβολταϊκών με πράσινο. Όπως είναι εμφανές η αναντιστοιχία που προαναφέρθηκε είναι τόσο μικρή που τα δύο βέλη σχεδόν ταυτίζονται.



Σχήμα 5.3: Καμπύλη παραγωγής ενέργειας

### 5.3.2 Υπολογισμός απωλειών και συνολική παραγωγή του συστήματος

Η άδεια χρήσης του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε, επιτρέπει την μελέτη συστημάτων με συνολική ονομαστική ισχύ 30kW. Έτσι το σύστημα θα πρέπει να διασπαστεί σε τρία όμοια υποσυστήματα των εβδομήντα πάνελ (συνδεδεμένα σε δέκα συστοιχίες των επτά) και των πέντε αντιστροφών (σε κάθε αντιστροφή μπορούν να συνδεθούν δύο συστοιχίες). Επομένως, η διαστασιολόγηση πραγματοποιήθηκε στο 1/3 του συστήματος με αποτέλεσμα να μπορεί να επεκταθεί και στα άλλα δύο υποσυστήματα.

Οι απώλειες του εξεταζόμενου συστήματος μπορούν να οριστούν λαμβάνοντας υπόψιν τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία), οι οποίες εν τέλει καθορίζουν την ισχύ εξόδου του συστήματος, σε σχέση με την ονομαστική ισχύ που αναφέρεται από τον κατασκευαστή για την λειτουργία του υπό εργαστηριακές συνθήκες. Ξεκινώντας από την προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια του συλλέκτη, αφού ληφθούν υπόψιν τυχόν σκιάσεις του, ένα ιδανικό πάνελ πρέπει να αποδώσει ένα kW ανά ένα kWh εγκατεστημένης ισχύος, υπό ακτινοβολία 1kW.

Παρόλα αυτά, υπάρχουν κάποιοι παράγοντες που επηρεάζουν και μειώνουν αυτή την ιδανική απόδοση. Στην ιδανική περίπτωση, η παραγόμενη ενέργεια του συστήματος ανά τετραγωνικό μέτρο είναι 1.646kWh/m<sup>2</sup>. Η οριζόντια ακτινοβολία (Horizontal Global Irradiation) και η προσπίπτουσα ακτινοβολία (Incident Global Irradiation) προσδίδουν στο σύστημα ένα ποσοστό 12,4% αύξησης. Αντίθετα, η επίπτωση που έχει ο συντελεστής ανάκλασης (IAM – Incident Angle Modifier), αντιστοιχεί στην μείωση της ακτινοβολίας που πραγματικά φτάνει στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Η μείωση αυτή οφείλεται κυρίως σε ανακλάσεις στο γυάλινο κάλυμμα, οι οποίες αυξάνονται με την γωνία πρόσπτωσης και είναι της τάξης του 2,1% (IAM factor on global).

Επομένως η παραγόμενη ενέργεια του υποσυστήματος, λαμβάνοντας υπόψιν μόνο την ηλιακή ακτινοβολία και τον συντελεστή απόδοσης των πάνελ σε εργαστηριακές συνθήκες είναι 45,615MWh. Παρόλα αυτά, αν αφαιρεθούν οι απώλειες που οφείλονται στην ηλιακή ακτινοβολία (PV loss due to irradiance level = 0,6%), στην θερμοκρασία (PV loss due to temperature = 5,8%) και στις ωμικές απώλειες των καλωδίων (Ohmic wiring loss = 1,4%) τότε η συνολική παραγωγή των πάνελ υπολογίζεται σε 42,131MWh.

Οι απώλειες του συστήματος λόγω της θερμοκρασίας, υπολογίζονται σε κάθε στάδιο της προσομοίωσης με ένα θερμικό ισοζύγιο. Με αυτό τον τρόπο καθορίζεται η στιγμιαία θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία χρησιμοποιείται κατά την μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Το θερμικό ισοζύγιο περιλαμβάνει τον συντελεστή απώλειας θερμότητας (U), ένα σταθερό συντελεστή απωλειών (Uc) και ένα συντελεστή απωλειών (Un) που έχει πλήρη εξάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου της περιοχής (Wind vel). Οι παραπάνω συντελεστές συνδέονται με την σχέση:

$$U = U_c + U_n \cdot \text{WindSpeed} \text{ [W/m}^2\cdot\text{K]}$$

Για τον υπολογισμό των θερμικών απωλειών του συστήματος ορίστηκε μόνο ο σταθερός συντελεστής απωλειών, με βάση την εγκατάσταση του συστήματος. Το λογισμικό, μετά από μετρήσεις σε πραγματικά συστήματα, παρέχει τρεις προτεινόμενες τιμές για τον συντελεστή (Uc):

- $U_c = 29 \text{ W / m}^2\text{K}$  για πλήρη ελεύθερη κυκλοφορία αέρα γύρω από τους συλλέκτες
- $U_c = 20 \text{ W / m}^2\text{K}$  για ημιαυτόματα πλαίσια με αεραγωγό στο πίσω μέρος
- $U_c = 15 \text{ W / m}^2\text{K}$  για μονάδες με πλήρη μόνωση στο πίσω μέρος

Στο παρόν σύστημα η τιμή του συντελεστή ορίστηκε στα  $29 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Τέλος, ο συντελεστής Un τέθηκε με μηδενική τιμή, καθώς η ταχύτητα του ανέμου είναι ποσότητα με πολλές παραμέτρους, η οποία δεν σε πολλές περιπτώσεις δεν συνάδει με τις χρονοσειρές ανέμου των μετεωρολογικών δεδομένων.

Η ωμική αντίσταση καλωδίωσης προκαλεί απώλειες μεταξύ της ισχύος που παράγεται από τις μονάδες και της ισχύος στα τερματικά της συστοιχίας. Οι απώλειες αυτές οφείλονται στην θερμότητα που αναπτύσσεται στις καλωδιώσεις του συστήματος και μπορούν να χαρακτηριστούν από μία μόνο παράμετρο, την αντίσταση (R). Η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη ορίζεται ως εξής:

$$Q = R \cdot I^2 \text{ [W]},$$

όπου I, το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό.

Το πρόγραμμα προτείνει ένα προκαθορισμένο ποσοστό απώλειας καλωδίωσης 1,5%, σε σχέση με τις εργαστηριακές συνθήκες λειτουργίας. Παρόλα αυτά παρέχεται η



δυνατότητα, για τον καθορισμό και τη βελτιστοποίηση των ωμικών ζημιών, της εισαγωγής του μήκους καλωδίωσης που απαιτείται για την εγκατάσταση, καθώς και η διατομή τους. Έτσι για την εν σειρά σύνδεση των πάνελ χρησιμοποιήθηκε DC καλώδιο διατομής 1,5mm καθώς το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να παράξει η συστοιχία είναι 9,7 A. Από την άλλη για την σύνδεση των συστοιχιών με τον αντιστροφέα χρησιμοποιήθηκε DC καλώδιο διατομής 2mm.

Οι απώλειες που οφείλονται σε "αναντιστοιχία" (Module array mismatch loss) σχετίζονται με το γεγονός ότι πλαίσια μιας συστοιχίας δεν έχουν ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος ( $I / V$ ). Σε μια συστοιχία φωτοβολταϊκών μονάδων, το ρεύμα της συμβολοσειράς καθορίζεται από το πλαίσιο που παράγει το μικρότερο ποσό ενέργειας. Στην περίπτωση που εξετάζεται, τα πάνελ που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τα ίδια ονομαστικά χαρακτηριστικά, και ως εκ τούτου το ποσοστό απωλειών λόγω αναντιστοιχίας είναι μηδενικό.

Μία επιπλέον επιλογή που παρέχει το λογισμικό είναι ο καθορισμός των απωλειών που σχετίζονται με την ποιότητα του πάνελ που επιλέχθηκε. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης, δίνοντας μία τιμή (αρνητική) δηλώνει την αξιοπιστία των πάνελ, και κατά συνέπεια το ποσοστό προσμετράτε θετικά στις απώλειες. Στην παρούσα μελέτη το ποσοστό αυτό έχει οριστεί ως μηδέν.

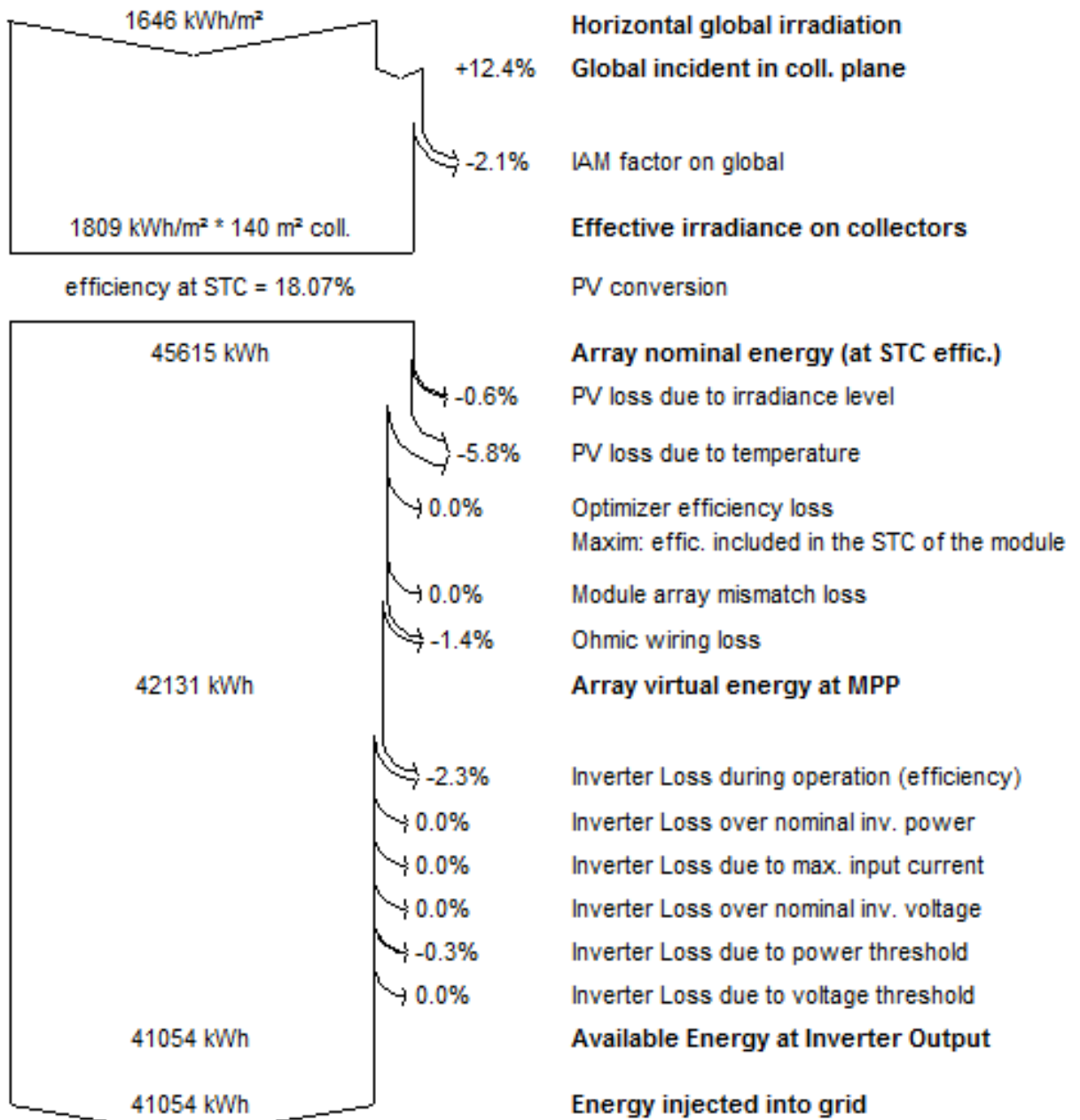
Πέρα από τις απώλειες των φωτοβολταϊκών, απώλειες εμφανίζει και ο αντιστροφέας. Οι απώλειες παρατηρούνται κυρίως στην λειτουργία του (Inverter loss during operation = 2,3%). Παρόλα αυτά ένα μικρό ποσοστό της τάξης του 0,3% οφείλεται στην ονομαστική ισχύ του (Inverter Loss due to power threshold = 0,3%), καθώς η συνολική ονομαστική ισχύς του συστήματος είναι 25,2 kWp ενώ η αντίστοιχη των αντιστροφέων είναι 25kW.

Αν λοιπόν από την αρχική ονομαστική ισχύ του υποσυστήματος αφαιρεθούν οι απώλειες που προαναφέρθηκαν η συνολική παραγωγή υπολογίζεται σε 41,054MWh τον χρόνο.

Το λογισμικό συμπεριλαμβάνει σχηματικά όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω μέσω ενός διαγράμματος. Το διάγραμμα απωλειών παρέχει την δυνατότητα στον μελετητή να αποκτήσει μία εμπεριστατωμένη άποψη για την ποιότητα του συστήματος, προσδιορίζοντας τις κύριες πηγές απωλειών. Με αυτό τον τρόπο, όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω συνοψίζονται στο Σχήμα 5.4. Παρατηρώντας το, προκύπτει το συμπέρασμα

ότι το μεγαλύτερο ποσοστό απωλειών οφείλεται στην θερμοκρασία λειτουργίας των πάνελ.

### Loss diagram for "optimizer" - year



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα απωλειών κατά την διάρκεια ενός έτους

Στο Σχήμα 5.5 συνοψίζονται η ημερήσια παραγωγή ενέργειας του συστήματος ανά kW εγκατεστημένης ισχύος και εστιάζει σε τρεις κύριες ποσότητες:

- Στις απώλειες των πάνελ (Lc)

- Στις απώλειες του συστήματος (Ls)
- Στην τελική παραγόμενη ενέργεια (Yf)

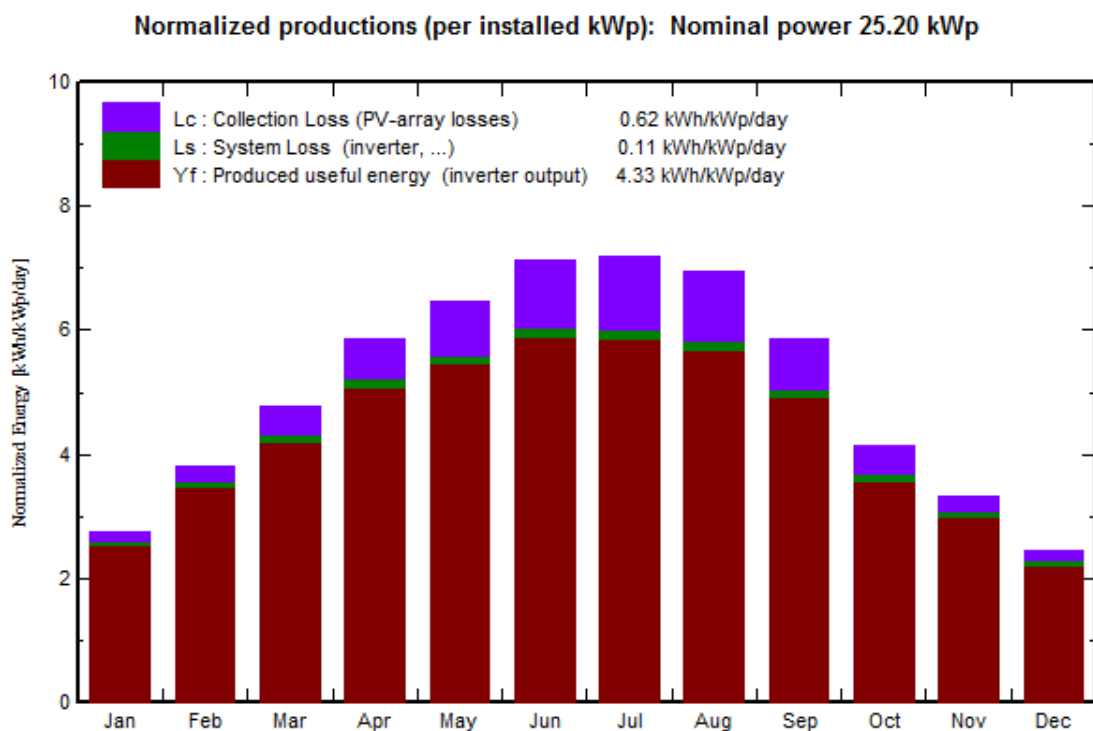
Προκειμένου να υπολογιστούν οι παραπάνω ποσότητες το λογισμικό κάνει χρήση δύο ακόμη μεταβλητών:

- Την παραγόμενη ενέργεια του συστήματος με την προϋπόθεση ότι το σύστημα λειτουργεί στις ονομαστικές του τιμές, δηλαδή σε εργαστηριακές συνθήκες (Yr)
- Την παραγόμενη ενέργεια των πάνελ σε πραγματικές συνθήκες (Ya)

Από τα παραπάνω έπεται ότι οι ποσότητες που απεικονίζονται προκύπτουν από τις σχέσεις που ακολουθούν:

$$L_c = Y_r - Y_a \text{ [kWh/kWp/day]}$$

$$L_s = Y_a - Y_f \text{ [kWh/kWp/day]}$$



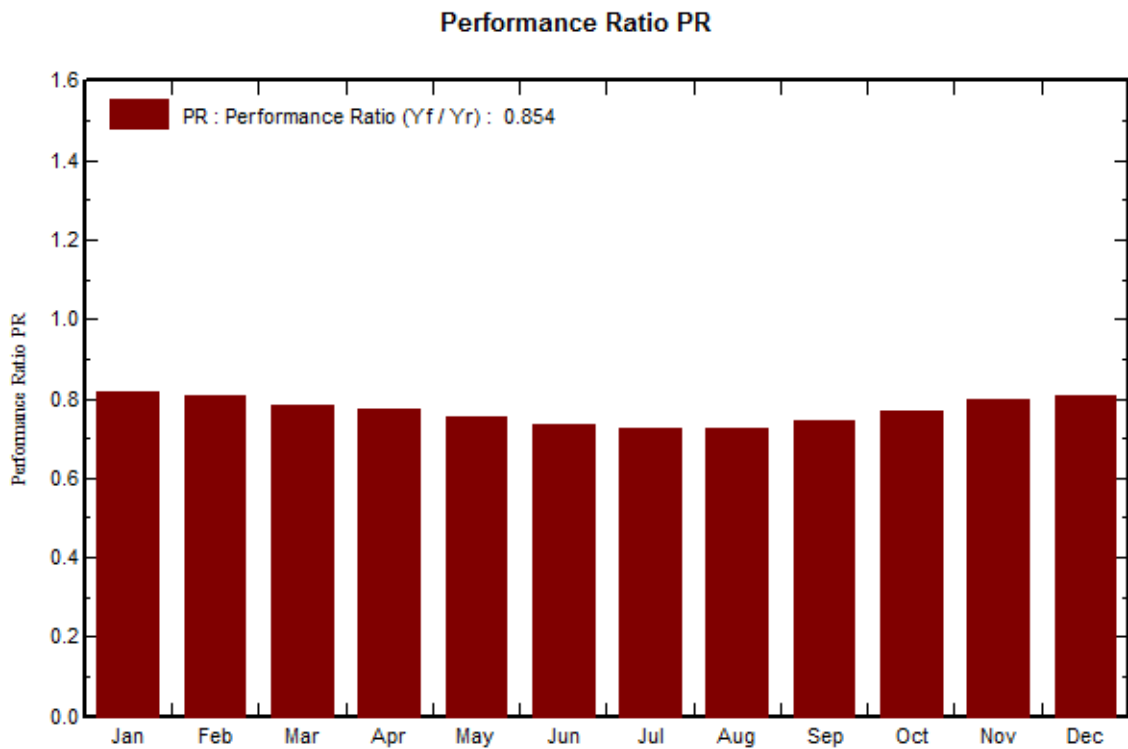
**Σχήμα 5.5:** Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά kW εγκατεστημένης ισχύος

Με βάση τα παραπάνω μεγέθη μπορεί να παρασταθεί και ο δείκτης απόδοσης (Performance Ratio, PR) του συστήματος ανά kW εγκατεστημένης ισχύος, όπως φαίνεται

στο Σχήμα 5.6. Η απόδοση ορίζεται σαν το πηλίκο της ενέργειας που εισάγεται στο δίκτυο προς την ενέργεια που παράγει το σύστημα υπό τις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_a}$$

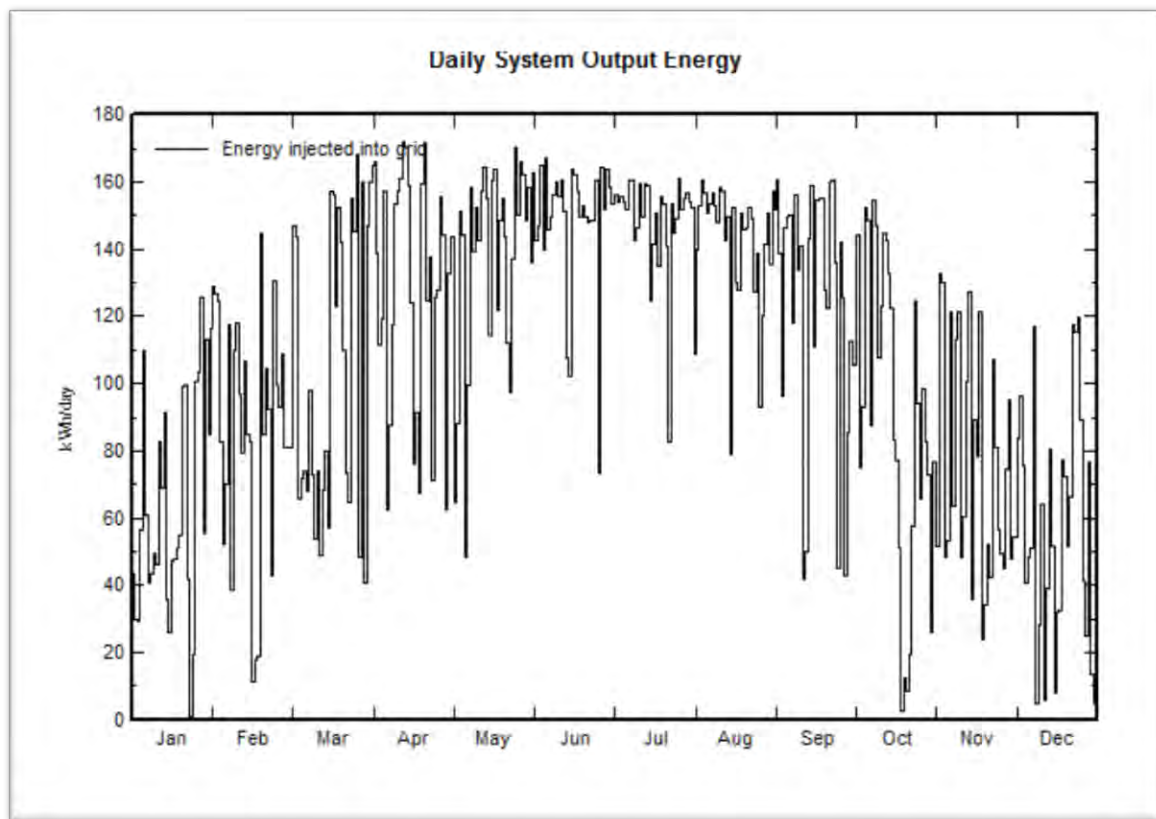
Στο Σχήμα 5.6 επίσης παρατηρείται ότι τους καλοκαιρινούς μήνες, παρά την μεγαλύτερη καμπύλη του ηλίου, η απόδοση του συστήματος είναι χαμηλότερη. Η μείωση αυτή οφείλεται στην αυξημένη τιμή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος καθώς και στην αυξημένη ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία, με τον μικρότερο δείκτη απόδοσης να εμφανίζεται κυρίως τον Ιούλιο και τον Αύγουστο.



**Σχήμα 5.6:** Δείκτης απόδοσης συστήματος ανά kW εγκατεστημένου ισχύος

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του υποσυστήματος, λαμβάνοντας υπόψιν τις απώλειες που αναφέρθηκαν παραπάνω, αναπαρίσταται στο Σχήμα 5.7). Το διάγραμμα αναφέρεται στην ημερήσια παραγωγή ενέργειας κατά την διάρκεια ενός έτους. Σύμφωνα με αυτό προκύπτει ότι η μικρότερη παραγωγή του συστήματος σημειώνεται

κατά τους χειμερινούς μήνες, γεγονός που οφείλεται στην μικρότερη διάρκεια ημέρας και στις καιρικές συνθήκες.



**Σχήμα 5.7:** Ημερήσια παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού συστήματος στην διάρκεια του έτους

Στο Πίνακα 5.2 αναγράφεται η συνολική ωριαία παραγωγή ενέργειας ανά μήνα. Όπως φαίνεται αναφέρονται μόνο οι ώρες κατά τις οποίες το σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία. Η μέγιστη παραγωγή συνεπώς, παρατηρείται κατά τις πρώτες μεσημβρινές ώρες, αποτέλεσμα που ανακύπτει από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του υποσυστήματος.

**Πίνακας 5.2:** Ωριαίο άθροισμα παραγωγής ενέργειας ανά μήνα (kWh)

| Monthly Hourly sums for E_Grid [kWh] |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                      | 6H | 7H  | 8H  | 9H  | 10H | 11H | 12H | 13H | 14H | 15H | 16H | 17H | 18H | 19H |
| January                              | 0  | 0   | 91  | 230 | 327 | 362 | 360 | 340 | 307 | 223 | 108 | 0   | 0   | 0   |
| February                             | 0  | 0   | 118 | 272 | 364 | 402 | 432 | 409 | 388 | 310 | 186 | 30  | 0   | 0   |
| March                                | 0  | 66  | 232 | 396 | 484 | 525 | 536 | 529 | 467 | 364 | 230 | 92  | 0   | 0   |
| April                                | 18 | 158 | 329 | 463 | 578 | 585 | 589 | 570 | 502 | 404 | 272 | 127 | 9   | 0   |
| May                                  | 64 | 203 | 369 | 500 | 585 | 625 | 642 | 615 | 545 | 442 | 319 | 163 | 44  | 0   |
| June                                 | 69 | 201 | 367 | 506 | 602 | 645 | 654 | 626 | 576 | 484 | 355 | 193 | 64  | 1   |

|           |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |   |
|-----------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|---|
| July      | 58  | 192  | 370  | 516  | 618  | 661  | 678  | 658  | 599  | 504  | 368  | 202  | 67  | 0 |
| August    | 27  | 170  | 349  | 490  | 606  | 662  | 685  | 664  | 595  | 497  | 363  | 186  | 38  | 0 |
| September | 0   | 139  | 301  | 435  | 532  | 573  | 592  | 586  | 519  | 407  | 266  | 103  | 0   | 0 |
| October   | 0   | 89   | 239  | 365  | 446  | 474  | 485  | 432  | 373  | 278  | 137  | 12   | 0   | 0 |
| November  | 0   | 3    | 149  | 277  | 353  | 389  | 390  | 414  | 342  | 250  | 119  | 0    | 0   | 0 |
| December  | 0   | 0    | 80   | 165  | 232  | 307  | 325  | 374  | 308  | 193  | 77   | 0    | 0   | 0 |
| Year      | 236 | 1222 | 2994 | 4615 | 5727 | 6210 | 6369 | 6217 | 5523 | 4356 | 2801 | 1108 | 223 | 1 |

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της υποενότητας τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν το 1/3 του συστήματος μας. Αν λοιπόν γίνει αναγωγή των αποτελεσμάτων σε ολόκληρο το σύστημα συμπεραίνουμε ότι η συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια είναι 123.3 MWh. Στο Παράρτημα Δ παρουσιάζεται το τυπολόγιο με βάση το οποίο υπολογίζεται η παραγωγή του συστήματος.

#### **5.4 Διάρκεια ζωής και οικονομική μελέτη του συστήματος**

Τα κύρια στοιχεία του συστήματος είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ και οι αντιστροφείς. Ο κατασκευαστής των φωτοβολταϊκών πλαισίων που επιλέχθηκαν προβλέπει 25 χρόνια λειτουργίας, με δωδεκαετή κατασκευαστική εγγύηση. Όταν ξεπεραστεί το προβλεπόμενο χρονικό περιθώριο τότε παρατηρείται μείωση στην αρχική παραγωγική τους ικανότητας. Το ίδιο χρονικό περιθώριο προβλέπεται και για την λειτουργία των αντιστροφών. Επομένως, με μία επιφύλαξη, μπορεί να θεωρηθεί ότι η διάρκεια ζωής του συστήματός ξεπερνάει τα 20 χρόνια.

Το λογισμικό επιτρέπει τον οικονομικό υπολογισμό του συστήματος. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτούνται πληροφορίες που αφορούν το κόστος επένδυσης, δηλαδή πληροφορίες για την τιμή των φωτοβολταϊκών, των αντιστροφών και των καλωδίων καθώς και για το κόστος εγκατάστασης του συστήματος. Επιπλέον επιτρέπει την δήλωση των εξόδων για την ετήσια συντήρησή του, η οποία ορίστηκε στα 600€. Τέλος, σε περίπτωση δανείου για την εγκατάσταση του συστήματος, επιτρέπει την εισαγωγή πληροφοριών για το επιτόκιο και για την διάρκεια αποπληρωμής του. Επειδή η μελέτη πραγματοποιείται σε δημόσιο κτήριο θεωρήθηκε ότι η επένδυση δεν απαιτεί λήψη δανείου.

Για την υλοποίηση λοιπόν της οικονομικής μελέτης, αρχικά πραγματοποιήθηκε έρευνα για το κόστος αγοράς των πάνελ και των αντιστροφών. Η τιμή ανά πάνελ ορίστηκε στα

350€, ενώ ανά αντιστροφέα στα 380€. Επομένως, το συνολικό κόστος των βασικών στοιχείων ορίζεται περίπου στις 80.000€.

Σε δεύτερο στάδιο έγινε μελέτη για τον υπολογισμό των καλωδίων που απαιτούνται για την σύνδεση των πάνελ και των αντιστροφέων. Κατά μέσο όρο για την σύνδεση των συστοιχιών απαιτείται περίπου καλώδιο 9m (διατομής 1,5mm), ενώ για την σύνδεσή τους στους αντιστροφέις περίπου 60m (διατομής 2,0mm). Το μεγάλο μήκος του δεύτερου καλωδίου οφείλεται στο γεγονός ότι οι αντιστροφέις θα τοποθετηθούν στο μηχανοστάσιο του υπογείου. Επομένως, συνολικά απαιτούνται περίπου 270m καλωδίου για την πρώτη σύνδεση και 900m καλωδίου για την δεύτερη (1,8€ ανά μέτρο). Το συνολικό κόστος των παραπάνω φτάνει περίπου στα 1.600€.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω το συνολικό κόστος του συστήματος ανέρχεται στα 81.600€. Το ποσό αυτό αντιστοιχεί σε 1066€ ανά kW εγκατεστημένης ισχύος. Για την οικονομική ανάλυση έγινε συμπερίληψη των ετησίων εξόδων για την συντήρηση του συστήματος (600€/έτος), καθώς και τυχών εξόδων για την αντικατάσταση ή επισκευή κάποιων στοιχείων του συστήματος (200€/έτος).

Το λογισμικό προσφέρει την ικανότητα οικονομικής μελέτης για την εγκατάσταση. Έτσι, χωρίς να ληφθούν υπόψιν άλλα έξοδα, όπως το κόστος μεταφοράς και εγκατάστασης του εξοπλισμού και το κόστος για την μελέτη, δυνατότητες που παρέχονται από το πρόγραμμα, και αρχικοποιώντας την τιμή της παραγόμενης kWh στα 0,9€, γίνεται μία πρώτη εκτίμηση του χρόνου απόσβεσης του υποσυστήματος.

Στον Πίνακα 5.3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της οικονομικής μελέτης. Στην πρώτη στήλη αναφέρεται η χρονολογία. Η δεύτερη στήλη (Loan), η οποία παρουσιάζεται με μηδενικές τιμές, αναφέρεται στο επιτόκιο από την λήψη δανείου. Προχωρώντας δεξιά αναγράφονται τα ετήσια έξοδα για την συντήρηση και την επισκευή του συστήματος (Running costs), καθώς και η τιμή της συνολικής ενέργειας που πωλείται στο δίκτυο (Sold Energy). Η αμέσως επόμενη στήλη, αφορά τον ετήσιο ισολογισμό (Yearly balance), η τιμή του οποίου ισούται με την τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας αφαιρώντας το σταθερό ετήσιο κόστος συντήρησης (Yearly balance = Sold Energy – Running costs). Τέλος, παρατίθεται η στήλη του σωρευτικού χρηματοοικονομικού ισολογισμού (Cumulated Balance), η τιμή του οποίου προκύπτει σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Cumulated Balance}^{(v)} = \text{Cumulated Balance}^{(v-1)} + \text{Yearly Balance}^{(v)},$$

όπου:

- $\text{Cumulated Balance}^{(v)}$ : η τιμή του σωρευτικού ισολογισμού του τρέχοντος έτους
- $\text{Cumulated Balance}^{(v-1)}$ : η τιμή του σωρευτικού ισολογισμού του προηγούμενου έτους
- $\text{Yearly Balance}^{(v)}$ : η τιμή του ετήσιου ισολογισμού του τρέχοντος έτους

**Πίνακας 5.3:** Μακροπρόθεσμος οικονομικός ισολογισμός φωτοβολταϊκού συστήματος

| Year | Loan<br>0.0 % | Running<br>costs | Sold<br>energy | Yearly<br>Balance | Cumul.<br>Balance |
|------|---------------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|
| 2020 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 2895              |
| 2021 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 5790              |
| 2022 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 8685              |
| 2023 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 11579             |
| 2024 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 14474             |
| 2025 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 17369             |
| 2026 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 20264             |
| 2027 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 23159             |
| 2028 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 26054             |
| 2029 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 28948             |
| 2030 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 31843             |
| 2031 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 34738             |
| 2032 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 37633             |
| 2033 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 40528             |
| 2034 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 43423             |
| 2035 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 46317             |
| 2036 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 49212             |
| 2037 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 52107             |
| 2038 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 55002             |
| 2039 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 57897             |

Το συνολικό κόστος επένδυσης για το υποσύστημα υπολογίστηκε στις περίπου στις 30.000€. Παρατηρώντας την στήλη του σωρευτικού οικονομικού ισολογισμού, το 2030 η τιμή του ξεπερνά το κόστος εγκατάστασης (31.843€) ενώ το 2029 είναι μικρότερη (28.948). Εκτιμάται επομένως ότι η απόσβεση του υποσυστήματος θα πραγματοποιηθεί σε 10 περίπου χρόνια από την εγκατάσταση του.





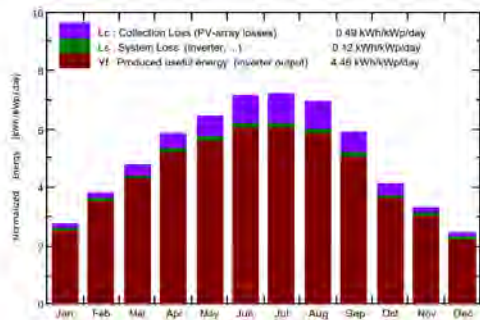
### Grid-Connected System: Main results

**Project :** University of Thessaly  
**Simulation variant :** optimizer

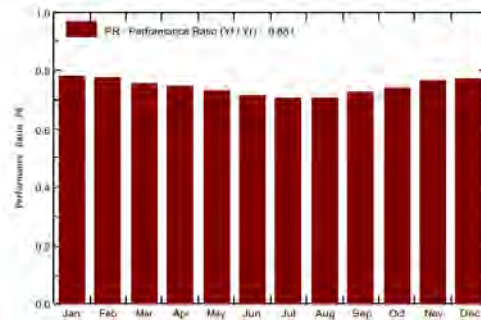
|                               |                                  |                                     |
|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Main system parameters</b> | System type                      | <b>Grid-Connected</b>               |
| PV Field Orientation          | tilt                             | 31° azimuth 0°                      |
| PV modules                    | Model                            | Q.PEAK L-G4.1 360 Maxim Pnom 360 Wp |
| PV Array                      | Nb. of modules                   | 70 Pnom total <b>25.20 kWp</b>      |
| Inverter                      | BG5KTR (5kw,3 phase with 2 MPPT) | Pnom 5.00 kW ac                     |
| Inverter pack                 | Nb. of units                     | 5.0 Pnom total <b>25.00 kW ac</b>   |
| User's needs                  | Unlimited load (grid)            |                                     |

|                                |                                |                       |                                  |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| <b>Main simulation results</b> |                                |                       |                                  |
| System Production              | <b>Produced Energy</b>         | <b>41.05 MWh/year</b> | Specific prod. 1629 kWh/kWp/year |
|                                | Performance Ratio PR           | 88.11 %               |                                  |
| Investment                     | Global incl. taxes             | 28866 €               | Specific 1.15 €/Wp               |
| Yearly cost                    | Annuities (Loan 0.0%, 0 years) | 28866 €/yr            | Running Costs 800 €/yr           |
| Energy cost                    |                                | <b>0.72 €/kWh</b>     |                                  |

**Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 25.20 kWp**



**Performance Ratio PR**



**optimizer**  
Balances and main results

|           | GlobHor<br>kWh/m² | DiffHor<br>kWh/m² | T Amb<br>°C | GlobInc<br>kWh/m² | GlobEff<br>kWh/m² | EArray<br>MWh | E_Grid<br>MWh | PR    |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|-------|
| January   | 57.0              | 32.03             | 7.87        | 85.1              | 83.4              | 2.073         | 2.010         | 0.937 |
| February  | 76.7              | 37.90             | 8.62        | 106.8             | 104.7             | 2.576         | 2.508         | 0.932 |
| March     | 123.0             | 55.39             | 12.13       | 147.9             | 144.9             | 3.469         | 3.386         | 0.909 |
| April     | 161.8             | 68.75             | 14.77       | 175.6             | 171.8             | 4.077         | 3.968         | 0.897 |
| May       | 203.6             | 79.80             | 20.32       | 200.3             | 195.3             | 4.521         | 4.416         | 0.875 |
| June      | 226.9             | 70.73             | 24.76       | 214.5             | 209.3             | 4.734         | 4.619         | 0.855 |
| July      | 230.7             | 71.54             | 27.58       | 223.0             | 217.7             | 4.861         | 4.752         | 0.845 |
| August    | 205.4             | 65.37             | 27.17       | 215.8             | 211.0             | 4.720         | 4.595         | 0.845 |
| September | 148.8             | 53.45             | 22.22       | 176.1             | 172.8             | 3.950         | 3.856         | 0.869 |
| October   | 98.3              | 44.17             | 18.42       | 128.4             | 125.9             | 2.950         | 2.869         | 0.887 |
| November  | 66.6              | 32.92             | 13.17       | 99.9              | 98.0              | 2.373         | 2.311         | 0.918 |
| December  | 46.9              | 24.37             | 9.23        | 75.6              | 74.1              | 1.828         | 1.762         | 0.925 |
| Year      | 1645.6            | 636.42            | 17.24       | 1849.0            | 1808.9            | 42.131        | 41.054        | 0.881 |

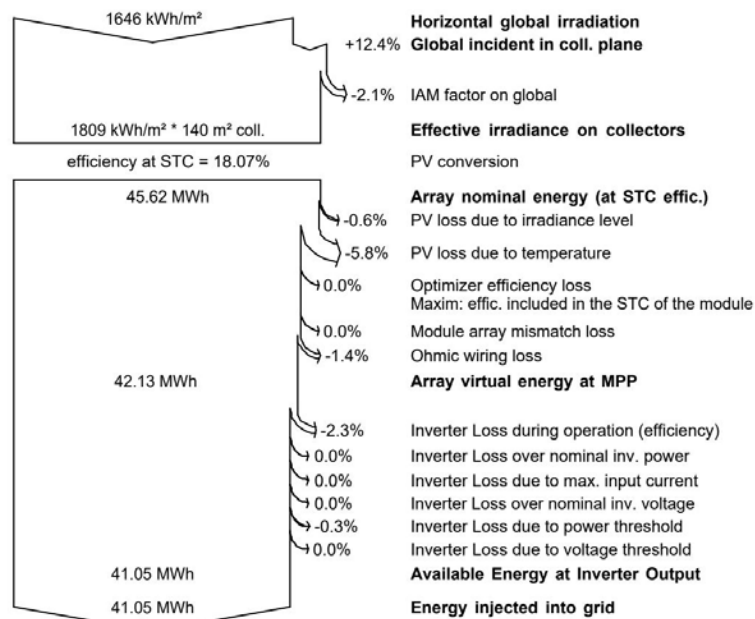
Legends: GlobHor: Horizontal global irradiation      GlobEff: Effective Global, corr. for IAM and shadings  
 DiffHor: Horizontal diffuse irradiation      EArray: Effective energy at the output of the array  
 T Amb: Ambient Temperature      E\_Grid: Energy injected into grid  
 GlobInc: Global incident in coll. plane      PR: Performance Ratio

### Grid-Connected System: Loss diagram

**Project :** University of Thessaly  
**Simulation variant :** optimizer

|                               |                                  |                       |                               |
|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| <b>Main system parameters</b> | System type                      | <b>Grid-Connected</b> |                               |
| PV Field Orientation          | tilt                             | 31°                   | azimuth 0°                    |
| PV modules                    | Model                            | Q.PEAK L-G4.1 360     | Maxim Pnom 360 Wp             |
| PV Array                      | Nb. of modules                   | 70                    | Pnom total <b>25.20 kWp</b>   |
| Inverter                      | BG5KTR (5kw,3 phase with 2 MPPT) | Pnom                  | 5.00 kW ac                    |
| Inverter pack                 | Nb. of units                     | 5.0                   | Pnom total <b>25.00 kW ac</b> |
| User's needs                  | Unlimited load (grid)            |                       |                               |

**Loss diagram over the whole year**



|   |                                  |                         |                               |
|---|----------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| PVSYST V6.70                                      |                                  | 03/11/19                | Page 4/6                      |
| <b>Grid-Connected System: Economic evaluation</b> |                                  |                         |                               |
| <b>Project :</b>                                  | <b>University of Thessaly</b>    |                         |                               |
| <b>Simulation variant :</b>                       | <b>optimizer</b>                 |                         |                               |
| <b>Main system parameters</b>                     | System type                      | <b>Grid-Connected</b>   |                               |
| PV Field Orientation                              | tilt                             | 31°                     | azimuth 0°                    |
| PV modules  | Model                            | Q.PEAK L-G4.1 360 Maxim | Pnom 360 Wp                   |
| PV Array  | Nb. of modules                   | 70                      | Pnom total <b>25.20 kWp</b>   |
| Inverter  | BG5KTR (5kw,3 phase with 2 MPPT) |                         | Pnom 5.00 kW ac               |
| Inverter pack                                     | Nb. of units                     | 5.0                     | Pnom total <b>25.00 kW ac</b> |
| User's needs                                      | Unlimited load (grid)            |                         |                               |
| <b>Investment</b>                                 |                                  |                         |                               |
| PV modules (Pnom = 360 Wp)                        | 70 units                         | 350 € / unit            | 24500 €                       |
| Supports / Integration                            |                                  | 3 € / module            | 200 €                         |
| Inverters (Pnom = 5.0 kW ac)                      | 5 units                          | 380 € / unit            | 1900 €                        |
| Settings, wiring, ...                             |                                  |                         | 1566 €                        |
| Engineering                                       |                                  |                         | 700 €                         |
| Substitution underworth                           |                                  |                         | 0 €                           |
| <b>Gross investment</b> (without taxes)           |                                  |                         | <b>28866 €</b>                |
| <b>Financing</b>                                  |                                  |                         |                               |
| Gross investment (without taxes)                  |                                  |                         | 28866 €                       |
| Taxes on investment (VAT)                         | Rate 0.0 %                       |                         | 0 €                           |
| Gross investment (including VAT)                  |                                  |                         | 28866 €                       |
| Subsidies   |                                  |                         | 0 €                           |
| <b>Net investment (all taxes included)</b>        |                                  |                         | <b>28866 €</b>                |
| Annuities   | ( Loan 0.0 % over 0 years)       |                         | 28866 €/year                  |
| Annual running costs: maintenance, insurances ... |                                  |                         | 800 €/year                    |
| <b>Total yearly cost</b>                          |                                  |                         | <b>29666 €/year</b>           |
| <b>Energy cost</b>                                |                                  |                         |                               |
| Produced Energy                                   |                                  |                         | 41.1 MWh / year               |
| Cost of produced energy                           |                                  |                         | 0.72 € / kWh                  |

### Grid-Connected System: Long Term Financial Balance

**Project :** University of Thessaly  
**Simulation variant :** optimizer

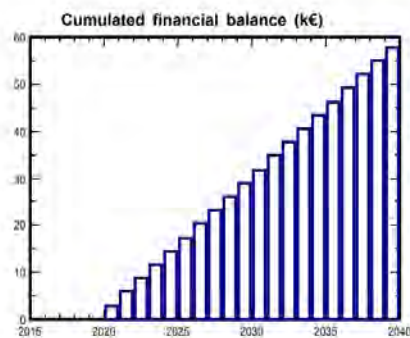
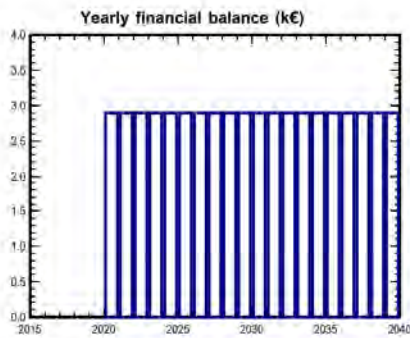
|                               |                                  |                         |            |                    |
|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------|--------------------|
| <b>Main system parameters</b> | System type                      | <b>Grid-Connected</b>   |            |                    |
| PV Field Orientation          | tilt                             | 31°                     | azimuth    | 0°                 |
| PV modules                    | Model                            | Q.PEAK L-G4.1 360 Maxim | Pnom       | 360 Wp             |
| PV Array                      | Nb. of modules                   | 70                      | Pnom total | <b>25.20 kWp</b>   |
| Inverter                      | BG5KTR (5kw,3 phase with 2 MPPT) |                         | Pnom       | 5.00 kW ac         |
| Inverter pack                 | Nb. of units                     | 5.0                     | Pnom total | <b>25.00 kW ac</b> |
| User's needs                  | Unlimited load (grid)            |                         |            |                    |

**Electricity sale**

Feed-in Tariff **0.09 €/kWh**      Warranty over **20 years**  
 Annual connexion tax **0 €**

**Long term balance and Running conditions**

Annual sale tariff depreciation **0.0 % / year**  
 Annual production reduction **0.0 % / year**  
 Feed-in tariff Warranty over **20 years**  
 Tariff reduction after contractual warranty **-50 %**  
 Loan duration (payment of annuities) **0 years**



Long term economic balance

| Year | Loan<br>0.0 % | Running<br>costs | Sold<br>energy | Yearly<br>Balance | Cumul<br>Balance |
|------|---------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|
| 2020 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 2895             |
| 2021 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 5790             |
| 2022 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 8685             |
| 2023 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 11579            |
| 2024 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 14474            |
| 2025 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 17369            |
| 2026 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 20264            |
| 2027 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 23159            |
| 2028 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 26054            |
| 2029 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 28948            |
| 2030 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 31843            |
| 2031 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 34738            |
| 2032 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 37633            |
| 2033 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 40528            |
| 2034 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 43423            |
| 2035 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 46317            |
| 2036 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 49212            |
| 2037 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 52107            |
| 2038 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 55002            |
| 2039 | 0             | 800              | 3695           | 2895              | 57897            |

### Grid-Connected System: CO2 Balance

**Project :** University of Thessaly

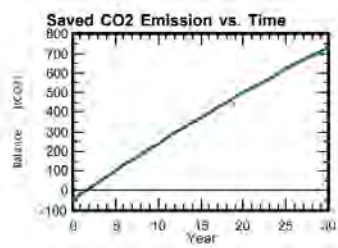
**Simulation variant :** optimizer

|                               |                                  |                         |                               |
|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| <b>Main system parameters</b> | System type                      | <b>Grid-Connected</b>   |                               |
| PV Field Orientation          | tilt                             | 31°                     | azimuth 0°                    |
| PV modules                    | Model                            | Q.PEAK L-G4.1 360 Maxim | Pnom 360 Wp                   |
| PV Array                      | Nb. of modules                   | 70                      | Pnom total <b>25.20 kWp</b>   |
| Inverter                      | BG5KTR (5kw,3 phase with 2 MPPT) |                         | Pnom 5.00 kW ac               |
| Inverter pack                 | Nb. of units                     | 5.0                     | Pnom total <b>25.00 kW ac</b> |
| User's needs                  | Unlimited load (grid)            |                         |                               |

|                             |                           |                                       |                           |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| <b>Produced Emissions</b>   | <b>Total:</b>             | <b>46.57 tCO2</b>                     |                           |
|                             | Source:                   | Detailed calculation from table below |                           |
| <b>Replaced Emissions</b>   | <b>Total:</b>             | <b>899.1 tCO2</b>                     |                           |
|                             | System production:        | 41.05 MWh/yr                          | Lifetime: 30 years        |
|                             |                           |                                       | Annual Degradation: 1.0 % |
|                             | Grid Lifecycle Emissions: | 730 gCO2/kWh                          |                           |
|                             | Source:                   | IEA List                              | Country: Greece           |
| <b>CO2 Emission Balance</b> | <b>Total:</b>             | <b>733.5 tCO2</b>                     |                           |

**System Lifecycle Emissions Details:**

| Item             | Modules        | Supports      |
|------------------|----------------|---------------|
| LCE              | 1713 kgCO2/kWp | 4.87 kgCO2/kg |
| Quantity         | 25.2 kWp       | 700 kg        |
| Subtotal [kgCO2] | 43161          | 3408          |



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

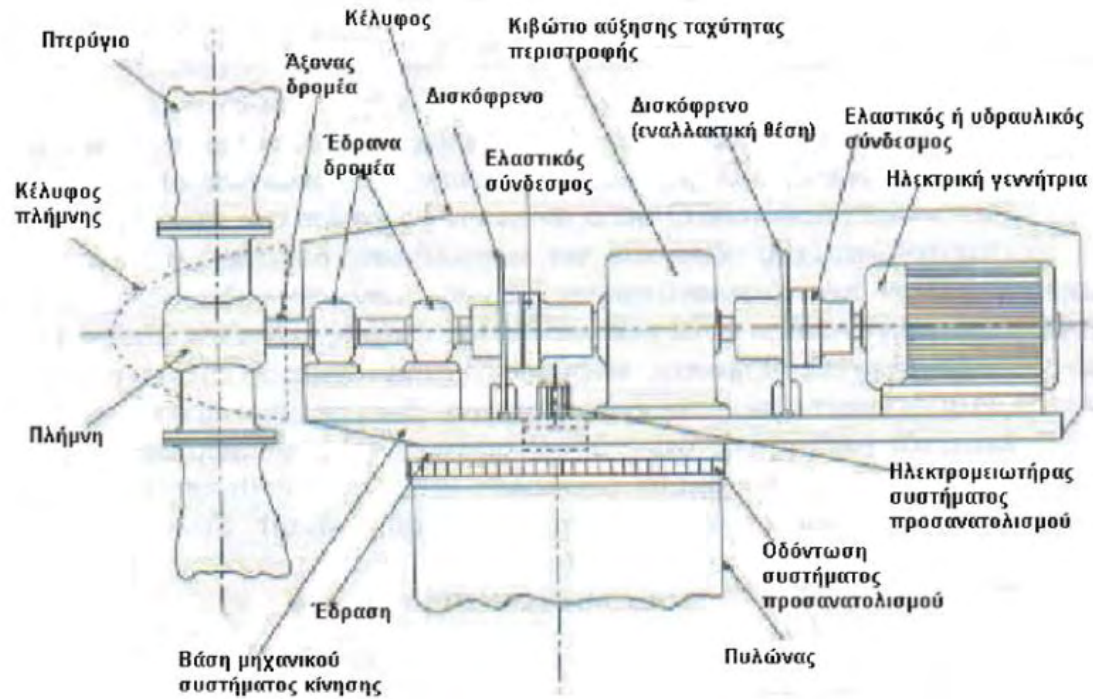
### ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

#### 6.1 Εισαγωγή στην τεχνολογία των ανεμογεννητριών

Εκμεταλλεύσιμη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας αποτελεί και ο άνεμος. Τα συστήματα ανεμογεννητριών έχουν την ικανότητα μετατροπής της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ή μηχανική ενέργεια. Τα βασικά μέρη των ανεμογεννητριών παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1 και είναι τα εξής [13]:

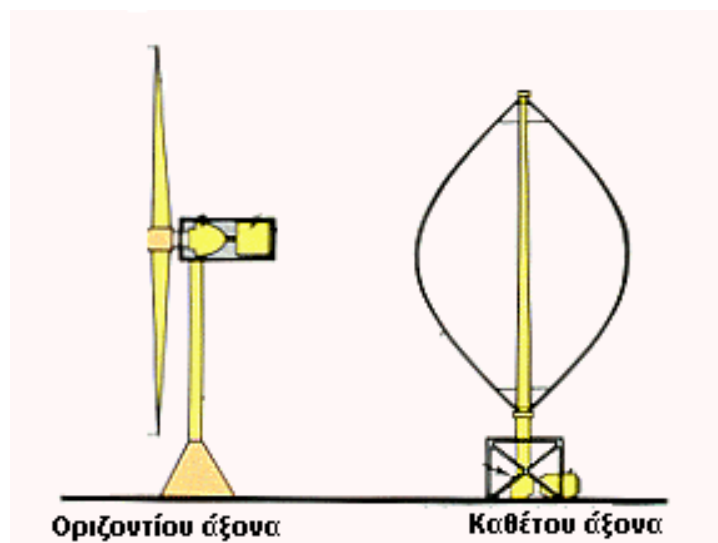
- **Ανεμόμετρο:** καταγράφει την ταχύτητα του ανέμου και μεταφέρει την πληροφορία στον ελεγκτή.
- **Πτερύγια:** ο άνεμος δημιουργεί μία άνωση στα πτερύγια προκαλώντας μία ροπή γύρο από τον άξονα περιστροφής και αναγκάζοντάς τα να περιστρέφονται.
- **Φρένο:** ένα μηχανικό, υδραυλικό ή ηλεκτρικό δισκόφρενο το οποίο διακόπτει την λειτουργία του κινητήρα σε περίπτωση ανάγκης.
- **Ελεγκτής:** είναι υπεύθυνος για την λειτουργία και την παύση του κινητήρα όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπερνά τα επιτρεπόμενα όρια λειτουργίας του.
- **Άξονας χαμηλής ταχύτητας:** ο ρότορας κινεί τον άξονα χαμηλής ταχύτητας περίπου στις 30 με 60 στροφές ανά λεπτό.
- **Άξονας υψηλής ταχύτητας:** οδηγεί τη γεννήτρια.
- **Κιβώτιο ταχυτήτων:** αποτελεί ένα ακριβό τμήμα της ανεμογεννήτριας. Οι ταχύτητες συνδέουν τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής, αυξάνοντας την ταχύτητα περιστροφής, από τις 30 με 60 στροφές ανά λεπτό στις 1200 με 1500 στροφές ανά λεπτό.
- **Γεννήτρια:** συνήθως παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα
- **Κέλυφος:** ο ρότορας συνδέεται με το κέλυφος, το οποίο βρίσκεται πάνω απ' τον πύργο και περιλαμβάνει το κιβώτιο ταχυτήτων, τους άξονες υψηλής και χαμηλής ταχύτητας, τη γεννήτρια, τον ελεγκτή και το φρένο. Ένα κάλυμμα προστατεύει τα μέρη εντός του κελύφους.





Σχήμα 6.1: Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας

Ανάλογα με τον τρόπο περιστροφής των πτερυγίων διακρίνονται δύο τύποι ανεμογεννητριών: οι οριζοντίου και οι κατακόρυφου άξονα. Στις οριζοντίου άξονα ανεμογεννήτριες τα πτερύγια μοιάζουν με τις προπέλες των πλοίων και έχουν τον άξονά τους παράλληλο με την επιφάνεια της γης. Από την άλλη πλευρά, οι κατακόρυφου άξονα ανεμογεννήτριες περιστρέφονται γύρω από έναν κάθετο άξονα προς την κατεύθυνση του ανέμου. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζονται οι δύο τύποι ανεμογεννητριών.



Σχήμα 6.2: Σχηματική απεικόνιση ανεμογεννητριών οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα



Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του οριζοντίου άξονα ανεμογεννητριών είναι τα εξής:

- ✓ Ικανότητα εκμετάλλευσης ανέμου μεγαλύτερης ταχύτητας λόγω του ύψους της.
- ✓ Υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή.
- ✓ Υψηλότερη αποδοτικότητα και καλύτερη απόδοση συγκριτικά με τις κατακόρυφου άξονα.
- ✗ Παραγωγή θορύβου κατά την λειτουργία της
- ✗ Για την συνεχή και καλύτερη εκμετάλλευση του ανέμου απαραίτητος θεωρείται ο μηχανισμός περιστροφής, οποίος ρυθμίζει τον προσανατολισμό των πτερυγίων στην κατεύθυνση του ανέμου.

Αντίστοιχα τα θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι τα εξής:

- ✓ Εκμετάλλευση του ανέμου ανεξάρτητα από την κατεύθυνσή του.
- ✓ Παράγει λιγότερο θόρυβο συγκριτικά με τις οριζόντιου άξονα.
- ✓ Λόγω του μικρού μεγέθους συνίστανται για τοποθέτηση εντός οικιστικών περιοχών, όπως σε δώματα των κτηρίων και σε αυτοκινητόδρομους.
- ✗ Χαμηλός βαθμός απόδοσης.
- ✗ Υψηλή ροπή εκκίνησης με αποτέλεσμα χαμηλή ταχύτητα περιστροφής.
- ✗ Δεν υπάρχει δυνατότητα εκμετάλλευσης υψηλών ανέμων λόγω του μικρού τους μεγέθους.

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στα κεντρικά δίκτυα, όσο και σε απομακρυσμένες περιοχές. Στην δεύτερη περίπτωση έχουν διπλό ρόλο. Ναι μεν βασικός στόχος είναι η παραγωγή ενέργειας αλλά παράλληλα λειτουργούν υποστηρικτικά έχοντας την ικανότητα βελτίωσης του προφίλ τάσης του δικτύου.

Ανάλογα με τον σκοπό που εξυπηρετούν, τα μεγέθη των ανεμογεννητριών ποικίλουν:

- 50W - 10kW: Για την φόρτιση μπαταριών ή την λειτουργία αντλιών νερού μη διασυνδεδεμένων στο δίκτυο
- 10kW – 200kW: Για εφαρμογές στο μη διασυνδεδεμένο δίκτυο

Σημαντικός παράγοντας για μία επιτυχημένη εφαρμογή συστήματος ανεμογεννητριών αποτελεί το αιολικό δυναμικό της περιοχής. Η μέση (διαθέσιμη) ετήσια ισχύς ενός συστήματος, είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου, η οποία συνήθως αυξάνεται όσο αυξάνεται το ύψος από το έδαφος. Ορίζεται λοιπόν ένα κατώτατο όριο για την ετήσια μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου, 4m/s σε ύψος 10m από την επιφάνεια της γης, με σκοπό να αποφανθεί η εγκατάσταση ή όχι του συστήματος στην εξεταζόμενη περιοχή.

Υπάρχουν κάποια τοπογραφικά χαρακτηριστικά που τείνουν να επιταχύνουν τον άνεμο και πολύ συχνά οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε τέτοιες περιοχές. Αυτά περιλαμβάνουν περάσματα ανάμεσα σε βουνά και κοιλάδες που διοχετεύουν τους ανέμους. Επιπλέον, περιοχές οι οποίες παρουσιάζουν λίγα εμπόδια, όπως είναι η επιφάνεια της θάλασσας δίπλα στις παράκτιες περιοχές και οι χορτώδεις πεδιάδες, μπορούν επίσης να αποτελέσουν καλές αιολικές πηγές.

Παρόλο που ο υπολογισμός της ενέργειας που παράγει μία ανεμογεννήτρια βασίζεται σε χάρτες αιολικού δυναμικού και σε χρονοσειρές ανέμου της περιοχής εγκατάστασης δεν είναι πάντα επιτυχημένος. Για την διεξαγωγή ασφαλή αποτελεσμάτων θεωρούνται απαραίτητες μακροχρόνιες και αναλυτικές μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές ωστόσο, είναι πιθανόν να παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις σε κοντινές περιοχές.

Η τεχνικά εκμεταλλεύσιμη ισχύς ενός δεδομένου ρεύματος αέρα είναι μικρότερη από τη διαθέσιμη. Ο λόγος της διαθέσιμης ισχύος προς την τεχνικά εκμεταλλεύσιμη ονομάζεται συντελεστής ισχύος ( $C_p$ ) και αποτελεί χαρακτηριστική μεταβλητή του τεχνικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται (ανεμογεννήτρια). Ακόμα όμως και χωρίς την υπόθεση συγκεκριμένης αιολικής μηχανής, ο συντελεστής ισχύος δεν μπορεί να ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο το οποίο ονομάζεται όριο του Betz (Betz Limit) και έχει τιμή  $C_p = 0.5926$ .

Προκειμένου η ενέργεια που παράγουν οι ανεμογεννήτριες να είναι εκμεταλλεύσιμη απαραίτητος θεωρείται και σε αυτή την περίπτωση ο μετατροπέας. Η τάση που παράγεται στην έξοδο της γεννήτριας είναι συνεχής επομένως θα πρέπει να γίνει μετατροπή της σε εναλλασσόμενη.

## 6.2 Οικιστικές ανεμογεννήτριες

Όσο αναφορά τον κτηριακό τομέα, τα τελευταία χρόνια οι οικιστικές ανεμογεννήτριες αποτελούν ιδανική λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές με διαθέσιμο αιολικό δυναμικό. Προσφέρουν την δυνατότητα υψηλότερης παραγωγής ενέργειας καταλαμβάνοντας μικρότερη έκταση, σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά. Κυρίως εμφανίζονται σε εφαρμογές μη διασυνδεδεμένες με το δίκτυο ακολουθούμενες από ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για την αυτονομία της εγκατάστασης.

### 6.2.1 Νομικό πλαίσιο και ενεργειακός συμψηφισμός – Net Metering

Σύμφωνα με το άρθρο 6 ν. 4203/2006 «Ρυθμίσεις θεμάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και άλλες διατάξεις» και με την αναθεώρηση που πραγματοποιήθηκε στο άρθρο 4 - ΦΕΚ Α' 235/1-11-2013 της εφημερίδας κυβερνήσεως, η εγκατάσταση μικρών ανεμογεννητριών που συνδέονται με το δίκτυο πραγματοποιείται αποκλειστικά υπό το πλαίσιο Ειδικού Προγράμματος Ανάπτυξης μικρών ανεμογεννητριών. Το πρόγραμμα αφορά μόνο την εγκατάσταση συστημάτων συνολικής ονομαστικής ισχύος έως 50kW σε γήπεδα, οικόπεδα και κτηριακές εγκαταστάσεις που παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο διανομής.

Η σύνδεση των ανεμογεννητριών με το δίκτυο πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο που συνδέονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα και βασίζεται στον ενεργειακό συμψηφισμό. Στο Σχήμα 6.3 παρατηρούμε την σύνδεση του αντιστροφέα στον μετρητή που υπολογίζει την παραγόμενη από το σύστημα ενέργεια (Μετρητής 1). Ακολούθως ο πρώτος μετρητής συνδέεται με τον μετρητή του ΔΕΔΔΗΕ (Μετρητής 2), ο οποίος είναι διπλής κατεύθυνσης. Ο δεύτερος μετρητής, και σε αυτή την περίπτωση είναι εκείνος που συμψηφίζει την εισαχθείσα στο δίκτυο ενέργεια με την καταναλισκόμενη από την εγκατάσταση. [11]



Σχήμα 6.3: Σύνδεση συστήματος ανεμογεννήτριας με το δίκτυο

### 6.3 Εισαγωγή στο λογισμικό RetScreen4 και στις δυνατότητές του

Το λογισμικό RetScreen 4, που χρησιμοποιήθηκε και αναλύθηκε στο τρίτο κεφάλαιο για τον υπολογισμό της γεωθερμικής αντλίας, χρησιμοποιήθηκε και σε αυτή την περίπτωση για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας του συστήματος των ανεμογεννητριών.

Η ανάλυση της μελέτης των ανεμογεννητριών πραγματοποιείται σε πέντε στάδια:

- Αρχικοποίηση του ενεργειακού μοντέλου: καθορίζονται οι παράμετροι και η τοποθεσία της μελέτης καθώς και ο τύπος του συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, κα.).
- Ανάλυση κόστους: εισάγεται το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης του συστήματος.
- Ανάλυση εκπομπών: αποτελεί προαιρετικό στάδιο και καθορίζει την ετήσια μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με την χρήση της εξεταζόμενης τεχνολογίας.
- Οικονομική ανάλυση: αναθέτοντας τιμές σε βασικές οικονομικές παραμέτρους, όπως το κόστος πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, τον καθορισμό του επιτοκίου από τυχόν λήψη δανείου κα. υπολογίζεται η βιωσιμότητα του συστήματος.
- Ανάλυση επικινδυνότητας: αποτελεί ένα ακόμη προαιρετικό στάδιο ανάλυσης και βοηθά τον χρήστη να προσδιορίσει πώς η αβεβαιότητα στις εκτιμήσεις διαφόρων

βασικών παραμέτρων μπορεί να επηρεάσει την οικονομική βιωσιμότητα του έργου.

Στην παρούσα μελέτη θα γίνει χρήση μόνο των τριών σταδίων: ενεργειακό μοντέλο, ανάλυση κόστους και οικονομική ανάλυση.

Το λογισμικό κάνει χρήση δύο βάσεων δεδομένων με σκοπό τον υπολογισμό της ενέργειας που παράγεται ή εξοικονομείται. Η πρώτη είναι η κλιματική βάση της Nasa, η οποία περιέχει τα κλιματικά δεδομένα (ηλιακή ακτινοβολία, υγρασία, ταχύτητα ανέμου κα.) της κάθε περιοχής. Η δεύτερη βάση δεδομένων περιέχει μοντέλα ανεμογεννητριών και παρέχει βασικές πληροφορίες για καθένα από αυτά όπως τον βαθμό απόδοσης, την απαιτούμενη έκταση εγκατάστασης κα.. Τέλος παρέχεται η επιλογή εισαγωγής μοντέλου από τον χρήστη, με απαραίτητη προϋπόθεση να είναι γνωστά τα τεχνικά χαρακτηριστικά.

Πριν ο χρήστης ξεκινήσει να σχεδιάζει το σύστημά του θα πρέπει να ορίσει την περιοχή εγκατάστασης. Με αυτό τον τρόπο το λογισμικό εισάγει τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής από την βάση μετεωρολογικών δεδομένων της Nasa (Σχήμα 6.4).

Κράτος - περιφέρεια

Επαρχία / Νομός

Θέση κλιματολογικών δεδομένων

Γεωγραφικό πλάτος °B


Γεωγραφικό μήκος °A

Υψόμετρο   Πηγή

Θερμοκρασία θέρμανσης βάσει σχεδιασμού °C  Πηγή

Θερμοκρασία ψύξης βάσει σχεδιασμού °C  Πηγή

Πλάτος (διακύμανση) θερμοκρασίας εδάφους °C  Πηγή



|        | Θερμοκρασία αέρα | Σχετική υγρασία | Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία - Οριζόντια | Ατμοσφαιρική πίεση | Ταχύτητα ανέμου | Θερμοκρασία εδάφους | Βαθμό-ημέρες θέρμανσης | Βαθμο-ημέρες ψύξης |
|--------|------------------|-----------------|---|--------------------|-----------------|---------------------|------------------------|--------------------|
|        | °C               | %               | kWh/m²/ημ                               | kPa                | m/Δευτερόλεπ    | °C                  | °C-ημ                  | °C-ημ              |
| Ιαν    | 5,8              | 70,7%           | 1,84                                    | 99,6               | 5,1             | 4,9                 | 379                    | 0                  |
| Φεβ    | 6,4              | 65,3%           | 2,61                                    | 99,5               | 5,2             | 6,4                 | 324                    | 0                  |
| Μαρ    | 9,7              | 57,7%           | 3,74                                    | 99,3               | 4,6             | 10,8                | 257                    | 0                  |
| Απρ    | 14,9             | 48,3%           | 5,29                                    | 99,0               | 4,0             | 16,9                | 92                     | 148                |
| Μαι    | 20,7             | 42,0%           | 6,42                                    | 99,1               | 3,7             | 23,4                | 0                      | 331                |
| Ιουν   | 25,6             | 36,7%           | 7,63                                    | 99,0               | 3,5             | 29,1                | 0                      | 468                |
| Ιουλ   | 27,8             | 36,1%           | 7,51                                    | 98,9               | 4,2             | 31,3                | 0                      | 551                |
| Αυγ    | 27,3             | 38,4%           | 6,70                                    | 99,0               | 4,3             | 30,4                | 0                      | 535                |
| Σεπτ   | 23,3             | 42,5%           | 5,14                                    | 99,2               | 3,9             | 25,9                | 0                      | 400                |
| Οκτ    | 17,8             | 52,3%           | 3,17                                    | 99,5               | 4,4             | 18,9                | 5                      | 243                |
| Νοε    | 11,7             | 64,4%           | 1,91                                    | 99,5               | 4,7             | 11,5                | 189                    | 51                 |
| Δεκ    | 7,0              | 72,3%           | 1,46                                    | 99,6               | 5,1             | 6,1                 | 341                    | 0                  |
| Ετήσιο | 16,6             | 52,2%           | 4,46                                    | 99,3               | 4,4             | 18,0                | 1.587                  | 2.727              |
| Πηγή   | NASA             | NASA            | NASA                                    | NASA               | NASA            | NASA                | NASA                   | NASA               |

Μετρημένο σε

Σχήμα 6.4: Κλιματολογικά δεδομένα

### 6.3.1 Σχεδιασμός συστήματος ανεμογεννητριών

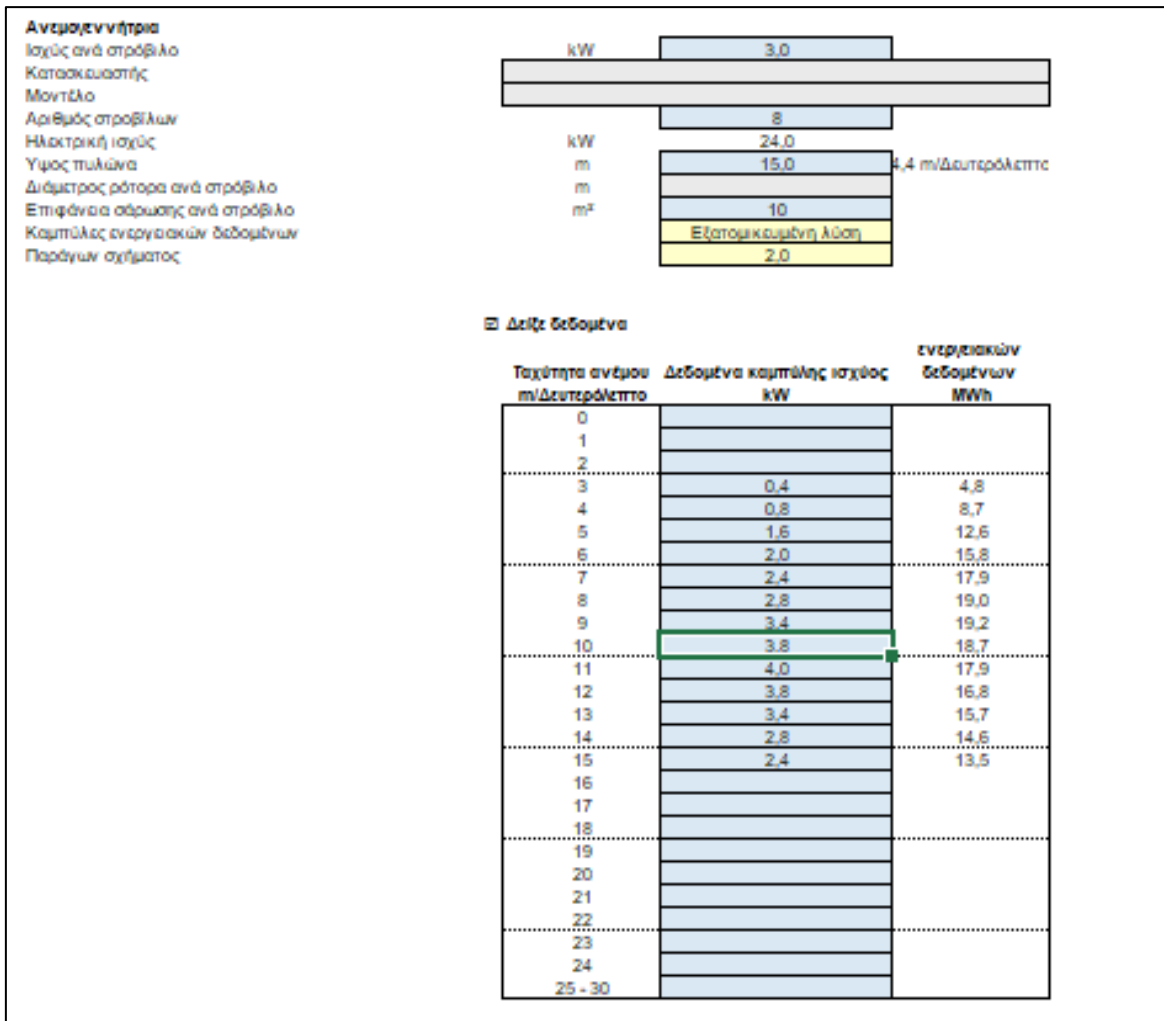
Ο σχεδιασμός του συστήματος πραγματοποιείται στο φύλλο υπολογισμού ενεργειακό μοντέλο. Ωστόσο πριν την αρχικοποίησή του ο χρήστης καλείται να εισάγει την τιμή της MWh στην διάρκεια του έτους (Σχήμα 6.5), δεδομένο που θα αξιοποιηθεί αργότερα στην οικονομική μελέτη της εγκατάστασης. Σύμφωνα με τα νέα τιμολόγια της ΔΕΗ η τιμή της κιλοβατώρας, για κτήρια με κατανάλωση πάνω από 2000 κιλοβατώρες το τετράμηνο, διαμορφώθηκε στα 0,11936€ ανά κιλοβατώρα.

Αξιολόγηση πηγών

| Μέθοδος (εκτίμησης) φυσικών πόρων | Μήνας       | Ταχύτητα ανέμου |                          | Δείξε δεδομένα                             | Ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο<br>MWh |
|-----------------------------------|-------------|-----------------|--------------------------|--|--------------------------------------|
|                                   |             | mi/Δευτερόλεπτο | Αγρία<br>mi/Δευτερόλεπτο | Τιμή<br>πωλούμενου<br>ηλεκτρισμού<br>€/MWh |                                      |
|                                   | Ιανουάριος  | 5,1             | 5,1                      | 119,4                                      | 6                                    |
|                                   | Φεβρουάριος | 5,2             | 5,2                      | 119,4                                      | 6                                    |
|                                   | Μάρτιος     | 4,6             | 4,6                      | 119,4                                      | 5                                    |
|                                   | Απρίλιος    | 4,0             | 4,0                      | 119,4                                      | 3                                    |
|                                   | Μαίος       | 3,7             | 3,7                      | 119,4                                      | 3                                    |
|                                   | Ιούνιος     | 3,5             | 3,5                      | 119,4                                      | 2                                    |
|                                   | Ιούλιος     | 4,2             | 4,2                      | 119,4                                      | 4                                    |
|                                   | Αύγουστος   | 4,3             | 4,3                      | 119,4                                      | 4                                    |
|                                   | Σεπτέμβριος | 3,9             | 3,9                      | 119,4                                      | 3                                    |
|                                   | Οκτώβριος   | 4,4             | 4,4                      | 119,4                                      | 4                                    |
|                                   | Νοέμβριος   | 4,7             | 4,7                      | 119,4                                      | 5                                    |
|                                   | Δεκέμβριος  | 5,1             | 5,1                      | 119,4                                      | 6                                    |
|                                   | Ετήσιο      | 4,4             | 4,4                      | 119,4                                      | 52                                   |

Σχήμα 6.5: Εισαγωγή τιμής πώλησης MWh στην διάρκεια ενός έτους

Στην συνέχεια ο χρήστης καθορίζει το μοντέλο της ανεμογεννήτριας, τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του και το πλήθος των ανεμογεννητριών. Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μοντέλου από την βάση του λογισμικού. Παρόλα αυτά δεν έγινε χρήση της και επιλέχθηκε διαφορετικό μοντέλο. Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζονται τα πεδία τα οποία θα πρέπει να αρχικοποιήσει ο χρήστης, ενώ στην συνέχεια της υποενότητας εξηγούνται οι τιμές που ορίστηκαν σε κάθε πεδίο.



Σχήμα 6.6: Αρχικοποίηση ονομαστικών δεδομένων ανεμογεννητριών

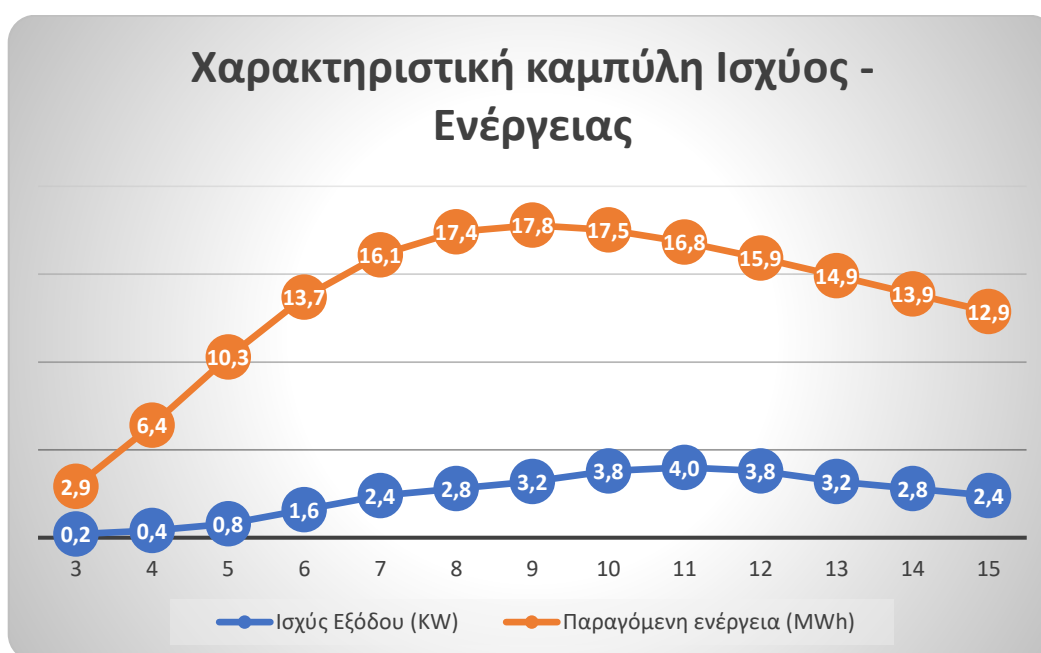
Στην παρούσα εγκατάσταση έγινε μελέτη για τοποθέτηση ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα στην νότια πλευρά του δώματος. Η ονομαστική ισχύς της καθεμιάς είναι 3kW ενώ η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι 4kW. Η διάμετρος και το ύψος των πτερυγίων είναι 2,5m και 3,7m αντίστοιχα (Σχήμα 6.7).



Σχήμα 6.7: Ρότορας ανεμογεννήτριας



Κάθε ανεμογεννήτρια διαθέτει ένα πεδίο ταχύτητας ανέμου στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια. Αυτό το πεδίο, διακρίνεται στην χαρακτηριστική καμπύλη που παραθέτει ο κατασκευαστής. Στην προκειμένη περίπτωση, η ελάχιστη ταχύτητα ανέμου κατά την οποία η ανεμογεννήτρια τίθεται σε λειτουργία (cut-in) είναι 3m/s, ενώ η ταχύτητα του ανέμου (cut-out) στην οποία ξεκινούν να λειτουργούν τα συστήματα πέδησης είναι 11m/s. Στο Σχήμα 6.8 διακρίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη του εξεταζόμενου μοντέλου, σύμφωνα με τα δεδομένα λειτουργίας του κατασκευαστή. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν στο πεδίο «Δεδομένα καμπύλης ισχύος» του λογισμικού.



**Σχήμα 6.8:** Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος – ενέργειας

Το συγκεκριμένο μοντέλο ανεμογεννήτριας είναι για κτηριακή χρήση και εγκατάσταση στην οροφή. Το ύψος του πυλώνα επομένως δεν ξεπερνά τα 6m. Αν ληφθεί υπόψιν η απόσταση του δώματος, του κτηρίου αναφοράς, από την επιφάνεια της γης, η ανεμογεννήτρια είναι σε θέση να αξιοποιεί ταχύτητες ανέμου σε ύψος 21m. Από τα μετεωρολογικά δεδομένα της Nasa, στο Σχήμα 6.9 φαίνεται η αξιοποιήσιμη από το σύστημα ταχύτητα του ανέμου ανά μήνα. Η εξίσωση με την οποία συνδέεται η ετήσια παραγόμενη ενέργεια των ανεμογεννητριών με την ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζεται στο Παράρτημα Ε.



Σχήμα 6.9: Ταχύτητα ανέμου στην διάρκεια του έτους

Από την στιγμή που οι ανεμογεννήτριες είναι κατακόρυφου άξονα, δεν υπάρχει η έννοια του προσανατολισμού. Η χωροθέτηση των ανεμογεννητριών, προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα σκίασης, έγινε σε σειρά, στην ανατολική πλευρά του δώματος και με την μεταξύ τους απόσταση να ισούται με το τριπλάσιο της διαμέτρου του ρότορα, δηλαδή 7,5m. Επομένως λαμβάνοντας υπόψιν ότι το μήκος της νότιας πλευράς είναι 82m, τοποθετήθηκαν συνολικά οκτώ ανεμογεννήτριες.

Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας (ισχύς και τάση) είναι:

$$W_p = 3000\text{kW}$$

$$V_{nom} = 380\text{V} ,$$

επομένως, για κάθε ανεμογεννήτρια προβλέπεται και ο αντίστοιχος αντιστροφέας με ονομαστικής εισόδου  $W_p = 3000\text{kW}$  με μέγιστη τάση εισόδου 400V. Οι ονομαστικές τιμές ισχύος των ανεμογεννητριών και των αντιστροφέων ταυτίζονται, επομένως δεν υπάρχει κίνδυνος απωλειών λόγω αναντιστοιχίας.

Ο επιλεγμένος αντιστροφέας, όπως και οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών συστημάτων, διαθέτουν σύστημα ανίχνευσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας (Maximum Power Point Tracker – MPPT). Όταν η τάση εξόδου της ανεμογεννήτριας είναι μικρότερη

της ονομαστικής, το ρεύμα αυξάνεται, χωρίς να ξεπερνάει το ανώτατο όριο, με αποτέλεσμα να παράγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς.

### 6.3.2 Υπολογισμός απωλειών και συνολική παραγωγή συστήματος

Το λογισμικό παρέχει την δυνατότητα υπολογισμού των απωλειών, οι οποίες αρχικοποιούνται στο φύλλο υπολογισμού του ενεργειακού μοντέλου και διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- Απώλειες διάταξης
- Απώλειες πτερυγίου
- Λοιπές απώλειες
- Απώλειες διαθεσιμότητας

Μεταξύ των ανεμογεννητριών υπάρχει ένα ποσοστό αλληλεπίδρασης το οποίο καθορίζει την παραγόμενη ενέργεια κάθε μιας από αυτές. Οι απώλειες της διάταξης εξαρτώνται από την απόσταση των ανεμογεννητριών, τον προσανατολισμό τους και τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Σε ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα, οι τιμές των απωλειών αυτών κυμαίνονται από 0 έως 20%. Οι απώλειες των συστοιχιών για ένα σύστημα που αποτελείται από έναν μεμονωμένο στρόβιλο είναι 0%, ενώ για συστήματα με οκτώ έως δέκα ανεμογεννήτριες, στα οποία τηρούνται τα όρια των μεταξύ τους αποστάσεων, η τιμή είναι μικρότερη του 5%.

Απώλειες μπορεί να προκύψουν και από τα πτερύγια των ανεμογεννητριών λόγω ρύπανσης ή πάγου. Όταν η μείωση της απόδοσης οφείλεται στην ρύπανσή τους, ο περιοδικός καθαρισμός των πτερυγίων οδηγεί σε βελτίωση του συντελεστή. Από την άλλη πλευρά, όταν παρατηρηθεί πάγος, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών του χειμώνα, η ανεμογεννήτρια αναγκάζεται να σταματήσει, όταν βρίσκεται σε λειτουργία, ή να παραμείνει εκτός λειτουργίας. Και στις δύο περιπτώσεις προκειμένου να γίνει υπολογισμός της τελικής παραγόμενης ενέργειας ο χρήστης οφείλει να καθορίσει ένα συντελεστή επί της εκατό, με την τιμή να κυμαίνεται από 1% έως 10%.

Ένας ακόμη συντελεστής απωλειών που θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι οι λοιπές απώλειες. Περιλαμβάνει τις απώλειες που οφείλονται στην έναρξη και στην παύση των ανεμογεννητριών καθώς και τις απώλειες των καλωδίων που συνδέουν τις

ανεμογεννήτριες με τον πίνακα της εγκατάστασης. Η τιμή της παραμέτρου φτάνει το 6% ενώ η μικρότερη τιμή που συνίσταται να ορίσει ο χρήστης είναι το 2%, για τις μικρού μήκους καλωδιώσεις.

Τέλος, μία ακόμη παράμετρος που χρήζει αρχικοποίησης είναι οι απώλειες λόγω διαθεσιμότητας. Σε αυτές συνυπολογίζονται οι προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας για την συντήρηση των ανεμογεννητριών και τα σφάλματα κατά την λειτουργία τους. Το ποσοστό αυτού του είδους των απωλειών ξεκινάει από 2% και μπορεί να φτάσει στο 7%. Σε κάποιες περιπτώσεις μάλιστα στις οποίες η εγκατάσταση του συστήματος πραγματοποιείται σε περιοχές όπου η συντήρηση και ο καθαρισμός των ανεμογεννητριών γίνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα τότε το ποσοστό μπορεί να ξεπεράσει το 7%.

Στην παρούσα μελέτη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.10, όπου παρουσιάζονται οι παράμετροι απωλειών του λογισμικού, ελήφθησαν υπόψιν και οι τέσσερις παράμετροι απωλειών που αναφέρθηκαν και η ανάθεσή του έγινε ως εξής:

- Απώλειες διάταξης = 2%: τηρούνται οι αποστάσεις των ανεμογεννητριών.
- Απώλειες πτερυγίων = 5%: η εγκατάσταση πραγματοποιείται σε περιοχή με ήπιο κλίμα και προβλέπεται συχνός καθαρισμός του συστήματος.
- Λοιπές απώλειες = 6%: έγινε παραδοχή του χειρότερου σεναρίου καλωδίωσης.
- Απώλειες διαθεσιμότητας = 4%: τακτικός καθαρισμός του συστήματος.

|                               |     |       |
|-------------------------------|-----|-------|
| Απώλειες διάταξης             | %   | 2,0%  |
| Απώλειες πτερυγίου            | %   | 5,0%  |
| Λοιπές απώλειες               | %   | 6,0%  |
| Διαθεσιμότητα                 | %   | 96,0% |
| <b>Περίληψη</b>               |     |       |
| Συντελεστής ισχύος            | %   | 31,9% |
| Ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο | MWh | 67    |

**Σχήμα 6.10:** Αρχικοποίηση συντελεστών απωλειών μέσω του λογισμικού

Λαμβάνοντας επομένως υπόψιν όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, η τελική παραγόμενη ενέργεια του συστήματος μας φτάνει τις 52 MWh ετησίως.

## 6.4 Διάρκεια ζωής και οικονομική μελέτη συστήματος

Απαραίτητο κομμάτι της μελέτης αποτελεί το κόστος του έργου. Το λογισμικό προσφέρει την δυνατότητα οικονομικής ανάλυσης προκειμένου να εκτιμηθεί η απόσβεση και η βιωσιμότητα του συστήματος. Διακρίνονται τρεις βασικές κατηγορίες για την εκτίμηση του οικονομικού μέρους της μελέτης:

- Κόστος αρχικής επένδυσης
- Ετήσιο κόστος
- Περιοδικό κόστος

Το κόστος αρχικής επένδυσης αποτελεί το πιο βασικό τμήμα της οικονομικής μελέτης. Περιλαμβάνει το κόστος που σχετίζεται με την εκπόνηση μελέτης σκοπιμότητας, την ολοκλήρωση της μηχανολογικής μελέτης, την αγορά, την εγκατάσταση και την μεταφορά του εξοπλισμού κα.. Παρόλο που το λογισμικό λαμβάνει υπόψιν όλες αυτές τις παραμέτρους για την πραγματοποίηση της οικονομικής ανάλυσης, στην παρούσα μελέτη θα εκτιμηθεί η απόσβεση του συστήματος όσον αφορά την αρχική επένδυση για την αγορά του εξοπλισμού (ανεμογεννήτριες, αντιστροφείς και καλωδίωση).

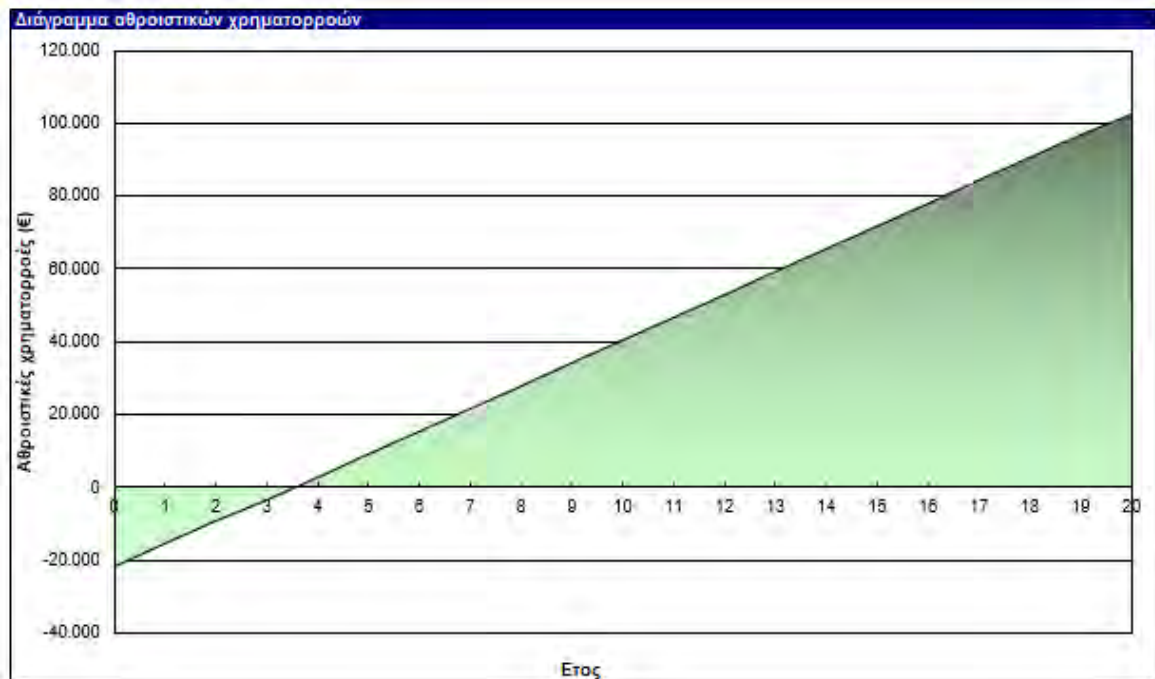
Οι τιμές του εξοπλισμού ορίστηκαν με βάση τα δεδομένα της αγοράς για τα χαρακτηριστικά του συστήματος και το προβλεπόμενο όριο λειτουργίας του συστήματος αρχικοποιήθηκε στα 20 έτη . Έτσι, η τιμή των ανεμογεννητριών ορίστηκε 2000€/ τεμάχιο, ενώ η τιμή των μετατροπέων στα 600€/ τεμάχιο. Επιπλέον, για την σύνδεση των ανεμογεννητριών στους αντιστροφείς, απαιτούνται κατά μέσο όρο 60m καλώδιο διατομής 2mm (1.8€/m), ενώ για την συνολική εγκατάσταση απαιτούνται 400m καλωδίωσης. Επομένως, το συνολικό αρχικό κόστος ανέρχεται στα 21,880€ ή στα 911.7€/kW.

Στις παραπάνω τιμές δεν υπολογίστηκαν το κόστος λειτουργίας και συντήρησης καθώς και το περιοδικό κόστος λειτουργίας καθώς είναι υποκειμενικές τιμές. Στην μελέτη το ζητούμενο ήταν ο υπολογισμός του χρόνου απόσβεσης του αρχικού συστήματος. Στο Σχήμα 6.11 παρουσιάζεται η σύνοψη του κόστους έργου όπως εμφανίζεται από το λογισμικό.

| <b>Σύνοψη κόστους έργου και αποταμιεύσεων/εσόδων</b> |               |          |               |
|--|---------------|----------|---------------|
| <b>Αρχικά κόστη</b>                                  |               |          |               |
| Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας               | 100,0%        | €        | 21.881        |
| Ισοζύγιο συστήματος & διάφορα                        | 0,0%          | €        | 0             |
| <b>Συνολικά αρχικά κόστη</b>                         | <b>100,0%</b> | <b>€</b> | <b>21.881</b> |
| <b>Ετήσια κόστη και πληρωμές χρέους</b>              |               |          |               |
| Λειτουργία & Συντήρηση                               |               | €        | 0             |
| Κόστος καυσίμου - προτεινόμενη περίπτωση             |               | €        | 0             |
| <b>Συνολικά ετήσια κόστη</b>                         |               | <b>€</b> | <b>0</b>      |
| <b>Περιοδικά κόστη (πιστώσεις)</b>                   |               |          |               |
| <hr/>  |               |          |               |
| <b>Ετήσιες αποταμιεύσεις και έσοδα</b>               |               |          |               |
| Κόστος καυσίμου - βασική περίπτωση                   |               | €        | 0             |
| Εσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας                |               | €        | 6.232         |
| <b>Συνολικές ετήσιες αποταμιεύσεις και εισόδημα</b>  |               | <b>€</b> | <b>6.232</b>  |

**Σχήμα 6.11:** Σύνοψη κόστους έργου και αποταμιεύσεων/ εσόδων

Λαμβάνοντας υπόψιν τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω και θεωρώντας ότι η διάρκεια ζωής του έργου είναι 20 έτη τότε η απόσβεση του συστήματος εκτιμάται στα 3.5 έτη, χρονική διάρκεια που θεωρείται ιδιαίτερα ικανοποιητική για δημόσιο κτήριο. Στο Σχήμα 6.12 αναπαρίσταται το διάγραμμα αθροιστικών χρηματοροών του συστήματος.



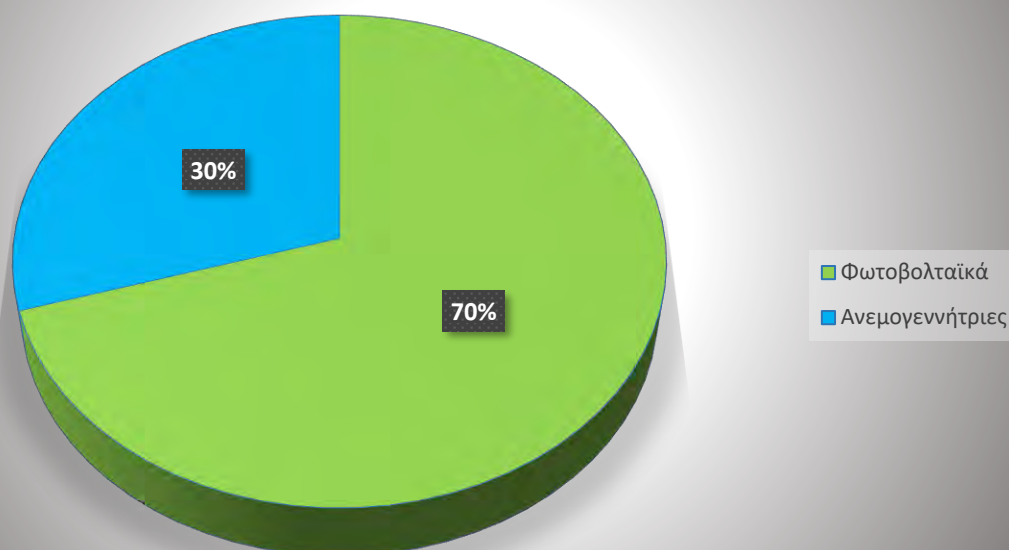
Σχήμα 6.12: Διάγραμμα αθροιστικών χρηματοροών

## 6.5 Υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών – ανεμογεννητριών

Στο προηγούμενο όπως και στο παρόν κεφάλαιο αναλύθηκαν ξεχωριστά τα συστήματα φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών αντίστοιχα. Το πρώτο σύστημα αποτελούνταν από 210 φωτοβολταϊκά πάνελ με συνολική παραγωγή ενέργειας 123,3MWh. Από την άλλη πλευρά το σύστημα των ανεμογεννητριών αποτελούνταν από οκτώ ανεμογεννήτριες με συνολική παραγωγή ενέργειας 52MWh. Όπως παρατηρείται τα δύο συστήματα παρουσιάζουν σημαντική διαφορά στην παραγόμενη ενέργεια σε σχέση με το πλήθος τους.

Παρόλα αυτά υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης και των δύο συστημάτων, δημιουργώντας ένα ενιαίο υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας. Στο νέο αυτό σύστημα η συνολική παραγόμενη ενέργεια ισούται με το άθροισμα των επιμέρους παραγόμενων από τα δύο συστήματα, όπως αυτά αναλύθηκαν, δηλαδή 175,3 MWh. Το ποσοστό συμμετοχής των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών στην συνολική παραγωγή παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.13. Τέλος, ο τρόπος σύνδεσης των δύο επιμέρους υποσυστημάτων δεν διαφέρει από τον τρόπο που μελετήθηκε και αναφέρθηκε στα δύο κεφάλαια.

## Ποσοστό παραγόμενης ενέργειας ανά σύστημα



Σχήμα 6.13: Ποσοστό παραγόμενης ενέργειας ανά σύστημα

### 6.5.1 Οικονομική μελέτη υβριδικού συστήματος

Τα δύο υποσυστήματα του υβριδικού συστήματος έχουν διαφορετική διάρκεια απόσβεσης. Σκοπός είναι η μελέτη του χρόνου απόσβεσης του συνολικού συστήματος. Η εγκατάσταση του υβριδικού συστήματος, χωρίς την εργασία εγκατάστασης και τα ετήσια έξοδα συντήρησης, του συνολικού συστήματος ισούται με το άθροισμα του κόστους επένδυσης καθενός ξεχωριστά. Επομένως το ποσό των αρχικών εξόδων υπολογίζεται στα 93.000,032€. Αν θεωρήσουμε ότι η τιμή της kWh είναι στα 0,11936€ τότε η ετήσια τιμή πώλησης των συνολικών παραγόμενων MWh ανέρχεται στα 20.860,7€. Θεωρώντας και ένα ποσό συντήρησης του συστήματος στα 2000€ ετησίως τότε ο χρόνος απόσβεσης του συστήματος υπολογίζεται στα 5,5 έτη, ιδιαίτερα ικανοποιητικό χρονικό διάστημα απόσβεσης για δημόσιο κτήριο. Στο Σχήμα 6.14 παρουσιάζεται το διάγραμμα αθροιστικών χρηματορροών.





**Σχήμα 6.14:** Διάγραμμα αθροιστικών χρηματοροών

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε η ενεργειακή κατανάλωση του νέου κτηρίου του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, εξετάστηκαν μέθοδοι μείωσης της καταναλισκόμενης ενέργειας και σχεδιάστηκαν συστήματα φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών με σκοπό την αυτοπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Λαμβάνοντας υπόψιν το ωρολόγιο πρόγραμμα του ακαδημαϊκού έτους 2018-2019, κάνοντας αντιστοιχία των αιθουσών διδασκαλίας του νέου κτηρίου με τις αίθουσες που διεξάγονται την τρέχουσα χρονική περίοδο τα μαθήματα, λαμβάνοντας υπόψιν συντελεστές ταυτοχρονισμού για τα επιμέρους φορτία του κτηρίου και συμπεριλαμβάνοντας το εγκατεστημένο σύστημα αυτόματου ελέγχου υπολογίστηκε ότι η ενέργεια που απαιτείται για την λειτουργία του κτηρίου ανέρχεται στις 177,39MWh.

Με σκοπό να μειωθεί η καταναλισκόμενη ενέργεια έγινε μελέτη αντικατάστασης των φωτιστικών φθορίου σε LED. Τα αποτελέσματα της φωτομετρικής μελέτης έδειξαν ότι επιτυγχάνεται μείωση έως και 8,9% της ενέργειας που καταναλώνεται ετησίως στο κτήριο, με το νέο ποσό κατανάλωσης να φτάνει περίπου τις 161MWh.

Προσπαθώντας να μειωθεί ακόμα περισσότερο η ενεργειακή κατανάλωση του κτηρίου μελετήθηκε η αντικατάσταση του ανοιχτού γεωθερμικού συστήματος με κατακόρυφο κλειστό. Καθώς η διαφορά μεταξύ των συντελεστών απόδοσης των δύο συστημάτων ήταν μικρότερη της μονάδας η καταναλισκόμενη ενέργεια μειώθηκε μόνο κατά 2,7MWh. Λαμβάνοντας δε υπόψιν το απαγορευτικά μεγάλο ποσό εγκατάστασης και την αδυναμία απόσβεσης του συστήματος, διαπιστώνεται ότι δεν είναι συμφέρουσα η εγκατάσταση κλειστού γεωθερμικού συστήματος.

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάστηκαν συστήματα φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών. Λαμβάνοντας υπόψιν την διαθέσιμη επιφάνεια του κτηρίου τα δύο συστήματα έχουν την δυνατότητα παραγωγής έως και 175,3MWh ενώ ο χρόνος απόσβεσης του υβριδικού αυτού συστήματος εκτιμάται στα 5,5 έτη.

Κλείνοντας είμαστε σε θέση να καταλήξουμε σε δύο βασικά συμπεράσματα. Αρχικά, με την παρούσα κατάσταση του κτηρίου, δηλαδή χωρίς να γίνει αλλαγή φωτισμού σε LED, και την εγκατάσταση του υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών – ανεμογεννητριών, είναι προφανές ότι μπορούμε να καλύψουμε το 98% των απαιτήσεων του κτηρίου σε ηλεκτρική ενέργεια, ετησίως. Παρόλα αυτά, αν γίνει εγκατάσταση του φωτισμού LED το υβριδικό σύστημα είναι σε θέση να καλύψει το 100% των ενεργειακών απαιτήσεων του κτηρίου εξασφαλίζοντας και ένα πλεόνασμα ενέργειας της τάξης του 8%.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] «Ενεργειακά Στατιστικά Στοιχεία,» Υπουργείο Ενέργειας & Περιβάλλοντος , [Ηλεκτρονικό]. Available:<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=299&language=el-GR>. [Πρόσβαση 19 Αύγουστος 2019].
- [2] «European Commission,» 2019 Αυγούστου 26. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings/overview>. [Πρόσβαση 18 Σεπτέμβριος 2019].
- [3] P. Muthuraju, M. Moghimi, R. Garmabdari, S. Stegen, J. Lu and P. Kararaju, "Conversion of University Commercial Buildings to Net-Zero Energy Buildings Employing Renewable Energy Sources," in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Palermo, Italy, 2018.
- [4] Νόμος 3661 - Μέτρα για την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτηρίων , Σχέδιο Κανονισμού για την Ενεργειακή Αποδοτικότητα των Κτηρίων - KENAK.
- [5] «Έγκριση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων,» *Εφημερίδα της κυβερνήσεως*, αρ. Δεύτερο, ρ. 2367, 12 Ιούλιος 2017.
- [6] Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, «Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης,» *ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ*, αρ. Δεύτερο, 2017.
- [7] F. Xiaoyun, L. Xiaojian και W. Yan, «Research and analysis of the design development and perspective technology for LED lighting products,» σε *2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design*, Wenzhou, China, 2010.
- [8] Μ. Βραχόπουλος, Κανονική γεωθερμία-αρχές σχεδιασμού γεωθερμικών συστημάτων και εφαρμογές, Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών

Βιβλιοθηκών, 215.

- [9] Ι. Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Θεσσαλονίκη: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ, 2019.
- [10] Β. Δ. Μπιτζιώνης, Εναλλακτικές μορφές ενέργειας : φωτοβολταϊκά συστήματα, αιολικά συστήματα, υβριδικά συστήματα, Αθήνα: Τζιόλας, 2011.
- [11] «ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΘΕΜΑΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ,» *ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ*, αρ. Πρώτο, 1 Νοέμβριος 2013.
- [12] «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης και λοιπές διατάξεις,» *Εφημερίδα Ελληνικής Κυβερνήσεως*, αρ. Δεύτερο, ρ. 20, 5 Μαΐος 2017.
- [13] A. Balmaceda και C. Maynez, Wind turbines : types, design, and efficiency, UK: Nova Science Pub Inc, 2013.
- [14] ΔΕΗ, «Λογαριασμός και Χρεώσεις,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.dei.gr/el/oikiakoi-pelates/xrisimes - plirofories - gia - to - logariasmosas /logariasmos-kai-xrewseis/ti-einai-to-migma-kausimou-pou-emfanizetai-sto-log](https://www.dei.gr/el/oikiakoi-pelates/xrisimes-plirofories-gia-to-logariasmosas/logariasmos-kai-xrewseis/ti-einai-to-migma-kausimou-pou-emfanizetai-sto-log). [Πρόσβαση 19 Αύγουστος 2019].
- [15] Υ. Π. & Ενέργειας, «ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ (ΚΕΝΑΚ),» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=525>. [Πρόσβαση 19 Αύγουστος 2019].

## Παράρτημα Α

### Πίνακες Τεχνικών οδηγιών ΚΕΝΑΚ

Πίνακας Α.1: Τυπικό ωράριο λειτουργίας κτηρίων ανά χρήση.

| Βασικές κατηγορίες κτηρίων | Χρήσεις Κτηρίων ή Θερμικών ζωνών   | Ώρες λειτουργίας | Ημέρες λειτουργίας ανά εβδομάδα | Περίοδος λειτουργίας σε μήνες |
|----------------------------|--|------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Κατοικίας                  | Μονοκατοικία, πολυκατοικία (περισσότερα του ενός ανεξάρτητα διαμερίσματα). | 18               | 7                               | 12                            |
| Προσωρινής διαμονής        | Ξενοδοχείο ετήσιας λειτουργίας   | 24               | 7                               | 12                            |
|                            | Θερινής λειτουργίας  | 24               | 7                               | 7 (Απρ. - Οκτ.)               |
|                            | Χειμερινής λειτουργίας   | 24               | 7                               | 8 (Σεπτ. - Απρ.)              |
|                            | Ξενώνας ετήσιας λειτουργίας  | 24               | 7                               | 12                            |
|                            | Θερινής λειτουργίας  | 24               | 7                               | 7 (Απρ. - Οκτ.)               |
|                            | Χειμερινής λειτουργίας   | 24               | 7                               | 8 (Σεπτ. - Απρ.)              |
|                            | Οικοτροφείο και κοιτώνας   | 24               | 7                               | 12                            |
|                            | Υπνοδωμάτιο ξενοδοχείου, οικοτροφείου κ.ά.                                 | 12               | 7                               | ανά χρήση                     |
|                            | Κοινόχρηστος χώρος ξενοδοχείου, οικοτροφείου κ.ά.                          | 24               | 7                               | ανά χρήση                     |
| Συνάθροισης κοινού         | Εστιατόριο   | 12               | 7                               | 12                            |
|                            | Ζαχαροπλαστείο, καφενείο   | 15               | 7                               | 12                            |
|                            | Νυχτερινό κέντρο διασκέδασης, μουσική σκηνή                                | 6                | 4                               | 12                            |
|                            | Θέατρο, κινηματογράφος   | 7                | 7                               | 12                            |
|                            | Χώρος Συναυλιών  | 6                | 7                               | 12                            |
|                            | Χώρος εκθέσεων, μουσείο  | 6                | 7                               | 12                            |

|                                |   |           |           |                    |
|--------------------------------|---|-----------|-----------|--------------------|
|                                | Χώρος συνεδριών, αμφιθέατρο, αίθουσα δικαστηρίων  | 6         | 5         | 12                 |
|                                | Τράπεζα   | 8         | 5         | 12                 |
|                                | Αίθουσα πολλαπλών χρήσεων   | 14        | 3         | 12                 |
|                                | Κλειστό γυμναστήριο, κλειστό κολυμβητήριο   | 14        | 7         | 12                 |
|                                | Διάδρομοι και άλλοι κοινόχρηστοι βοηθητικοί χώροι   | ανά χρήση | ανά χρήση | ανά χρήση          |
|                                | Λουτρό  | ανά χρήση | ανά χρήση | ανά χρήση          |
| Εκπαίδευσης                    | Νηπιαγωγείο   | 8         | 5         | 9 (Σεπτ. - Μαΐ.)   |
|                                | Πρωτοβάθμια εκπαίδευση, δευτεροβάθμια εκπαίδευσης   | 8         | 5         | 9 (Σεπτ. - Μαΐ.)   |
|                                | Τριτοβάθμια εκπαίδευση, αίθουσα διδασκαλίας   | 13        | 5         | 10 (Σεπτ. - Ιουν.) |
|                                | Φροντιστήριο, ωδείο   | 7         | 5         | 9 (Σεπτ. - Μαΐ.)   |
| Υγείας και κοινωνικής πρόνοιας | Νοσοκομείο, κλινική   | 24        | 7         | 12                 |
|                                | Αίθουσα ασθενών (δωμάτιο)   | 24        | 7         | 12                 |
|                                | Χειρουργείο (τακτικό)   | 8         | 5         | 12                 |
|                                | Εξωτερικά ιατρεία   | 8         | 5         | 12                 |
|                                | Αίθουσες αναμονής   | 8         | 5         | 12                 |
|                                | Αγροτικό ιατρείο, υγειονομικός σταθμός, κέντρο υγείας, ιατρείο                                      | 12        | 5         | 12                 |
|                                | Ψυχιατρείο, ίδρυμα ατόμων με ειδικές ανάγκες, ίδρυμα χρονίως πασχόντων, οίκος ευγηρίας, βρεφοκομείο | 24        | 7         | 12                 |
|                                | Βρεφικός σταθμός, παιδικός σταθμός  | 8         | 5         | 11                 |

| Βασικές κατηγορίες κτηρίων | Χρήσεις Κτηρίων ή Θερμικών ζωνών     | Ώρες λειτουργίας | Ημέρες λειτουργίας ανά εβδομάδα | Περίοδος λειτουργίας σε μήνες |
|----------------------------|--------------------------------------|------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Σωφρονισμού                | Κρατητήριο, αναμορφωτήριο, φυλακή    | 24               | 7                               | 12                            |
|                            | Αστυνομική διεύθυνση                 | 24               | 7                               | 12                            |
| Εμπορίου                   | Εμπορικό κέντρο, αγορά και υπεραγορά | 12               | 6                               | 12                            |
|                            | Κατάστημα, φαρμακείο                 | 9                | 6                               | 12                            |
|                            | Ινστιτούτο γυμναστικής               | 12               | 6                               | 12                            |
|                            | Κουρείο, κομμωτήριο                  | 12               | 6                               | 12                            |
| Γραφείων                   | Γραφείο                              | 10               | 5                               | 12                            |
|                            | Βιβλιοθήκη                           | 6                | 5                               | 12                            |



Πίνακας Α.2: Στάθμη γενικού (όχι ειδικού) φωτισμού κτηρίου αναφοράς ανά χρήση κτηρίου σύμφωνα με το EN

12464-1 2011

| Χρήσεις κτηρίων ή θερμικών ζωνών                               | Στάθμη φωτισμού [lx] | Επίπεδο αναφοράς μέτρησης [m] | Δείκτης θάμβωσης UGR | Ομοιομορφία φωτισμού Uo (min/μέση τιμή) |
|--|----------------------|-------------------------------|----------------------|---|
| Μονοκατοικία, πολυκατοικία (περισσότερα του ενός διαμερίσματα) | 200                  | 0,8                           | -                    | -                                       |
| Ξενοδοχείο ετήσιας λειτουργίας                                 | 300                  | 0,8                           | 22                   | 0,6                                     |
| θερινής λειτουργίας  | 300                  | 0,8                           | 22                   | 0,6                                     |
| χειμερινής λειτουργίας   | 300                  | 0,8                           | 22                   | 0,6                                     |
| Ξενώνας ετήσιας λειτουργίας                                    | 300                  | 0,8                           | 22                   | 0,6                                     |
| θερινής λειτουργίας  | 300                  | 0,8                           | 22                   | 0,6                                     |
| χειμερινής λειτουργίας   | 300                  | 0,8                           | 22                   | 0,6                                     |
| Οικοτροφείο και κοιτώνας                                       | 300                  | 0,8                           | 22                   | 0,6                                     |
| Υπνοδωμάτιο ξενοδοχείου, οικοτροφείου κ.ά.                     | 250                  | 0,8                           | -                    | -                                       |
| Κοινόχρηστος χώρος ξενοδοχείου, οικοτροφείου                   | 100                  | 0,5                           | 28                   | 0,4                                     |
| Εστιατόριο   | 200                  | 0,8                           | -                    | -                                       |
| Ζαχαροπλαστέιο, καφενείο                                       | 250                  | 0,8                           | -                    | -                                       |
| Νυχτερινό κέντρο διασκέδασης, μουσική σκηνή                    | 100                  | 0,8                           | -                    | -                                       |
| Θέατρο, κινηματογράφος   | 100                  | 0,8                           | 25                   | 0,4                                     |
| Χώρος συναυλιών  | 100                  | 0,8                           | 25                   | 0,4                                     |
| Χώρος εκθέσεων, μουσείο  | 200                  | 0,8                           | 22                   | 0,4                                     |
| Χώρος συνεδρίων, αμφιθέατρο, αίθουσα δικαστηρίων               | 500                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |
| Τράπεζα  | 500                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |
| Αίθουσα πολλαπλών χρήσεων                                      | 300                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |
| Κλειστό γυμναστήριο, κλειστό κολυμβητήριο                      | 300                  | 0,5                           | 22                   | 0,6                                     |
| Διάδρομοι και άλλοι κοινόχρηστοι βοηθητικοί χώροι              | 100                  | 0                             | 28                   | 0,4                                     |
| Λουτρό (κοινόχρηστο)   | 200                  | 0,8                           | 25                   | 0,4                                     |
| Νηπιαγωγείο  | 300                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |

| Χρήσεις κτηρίων ή θερμικών ζωνών  | Στάθμη φωτισμού [lx] | Επίπεδο αναφοράς μέτρησης [m] | Δείκτης θάμβωσης UGR | Ομοιομορφία φωτισμού Uo (min/μέση τιμή) |
|---|----------------------|-------------------------------|----------------------|---|
| Πρωτοβάθμια εκπαίδευση, δευτεροβάθμια εκπαίδευσης   | 300                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |
| Τριτοβάθμια εκπαίδευση, αίθουσα διδασκαλίας   | 500                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |
| Φροντιστήριο, ωδείο   | 500                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |
| Νοσοκομείο, κλινική   | 300                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |
| Αίθουσα ασθενών (δωμάτιο)   | 100                  | 0,8                           | 19                   | 0,4                                     |
| Χειρουργείο (τακτικό)   | 1000                 | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |
| Εξωτερικών ιατρείων   | 500                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |
| Αίθουσες αναμονής   | 200                  | 0,8                           | 22                   | 0,4                                     |
| Αγροτικό ιατρείο, υγειονομικός σταθμός, κέντρο υγείας, ιατρείο                                      | 500                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |
| Ψυχιατρείο, ίδρυμα ατόμων με ειδικές ανάγκες, ίδρυμα χρονίως πασχόντων, οίκος ευγηρίας, βρεφοκομεία | 300                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |
| Βρεφικός σταθμός, παιδικός σταθμός  | 300                  | 0,8                           | 22                   | 0,4                                     |
| Κρατητήριο, αναμορφωτήριο, φυλακή   | 300                  | 0,8                           | 22                   | 0,4                                     |
| Αστυνομική διεύθυνση  | 500                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |
| Εμπορικό κέντρο, αγορά και υπεραγορά  | 300                  | 0,8                           | 22                   | 0,4                                     |
| Κατάστημα, φαρμακείο  | 500                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |
| Ινστιτούτο γυμναστικής  | 400                  | 0,8                           | 22                   | 0,6                                     |
| Κουρείο, κομμωτήριο   | 400                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |
| Γραφείο   | 500                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |
| Βιβλιοθήκη  | 500                  | 0,8                           | 19                   | 0,6                                     |

**Πίνακας Α.3:** Εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού (W/m<sup>2</sup>) κτηρίου αναφοράς ανάλογα της στάθμης φωτισμού για τον υπολογισμό της ενεργειακής του απόδοσης.

| <b>Ζώνες τεχνητού φωτισμού /<br/>Στάθμη φωτισμού<br/>[lx]</b> | <b>Ισχύς για κτήριο<br/>αναφοράς<br/>[W/m<sup>2</sup>]</b> | <b>Ισχύς για ελάχιστες απαιτήσεις<br/>ενεργειακής απόδοσης κτιρίων<br/>[W/m<sup>2</sup>]</b> |
|---|--|--|
| 1000  | 32,0   | 28,0   |
| 500   | 16,0   | 14,0   |
| 400   | 12,8   | 11,2   |
| 300   | 9,6  | 8,4  |
| 250   | 8,0  | 7,0  |
| 200   | 6,4  | 5,6  |
| 100   | 3,2  | 2,8  |

## Παράρτημα Β

### Βασικοί ορισμοί και τυπολόγιο φωτομετρίας

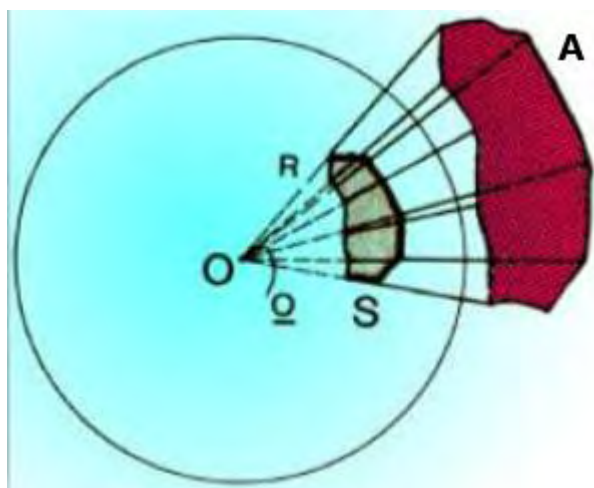
Ο Πίνακας Β.1 δίνει τις σημαντικότερες σχέσεις φωτομετρίας.

Πίνακας Β.1: Σημαντικότερες σχέσεις φωτομετρίας

| Μέγεθος  | Τύπος                          | Μονάδες                    |
|--|--------------------------------|----------------------------|
| Μέτρο στερεάς γωνίας                               | $\Omega = S / R^2$             | Sterad ή sr                |
| Ένταση Φωτεινής σημειακής πηγής                    | $I = \Phi / \omega$            | Candela ή cd               |
| Ολική φωτεινή ροή σημειακής πηγής                  | $\Phi_{ολ} = 4\pi I$           | Lumen ή lm                 |
| Φωτισμός επιφάνειας από παράλληλη δέσμη            | $E = \Phi \text{ συν}\phi / S$ | Lux ή lumen/m <sup>2</sup> |
| Φωτισμός στοιχειώδους επιφάνειας από σημειακή πηγή | $E = I \text{ συν}\phi / R^2$  | Lux ή cd/m <sup>2</sup>    |
| Απόδοση φωτεινής πηγής                             | $\alpha = \Phi / P$            | lumen/watt                 |

#### Μέτρο στερεάς γωνίας

Αν θεωρηθεί Ο, ένα τυχαίο σημείο στον χώρο, και Α, μία επιφάνεια τυχαίου σχήματος, τότε υπάρχει η δυνατότητα ένωσης του σημείου Ο με διάφορα σημεία της περιμέτρου της επιφάνειας. Το μέρος του χώρου που περιορίζεται και περικλείεται από αυτές τις γραμμές ονομάζεται στερεά γωνία. Αν με κέντρο το Ο διαγράψουμε σφαίρα ακτίνας R τότε στην επιφάνεια του διαγράφεται μία επιφάνεια S. Το μέτρο της αντίστοιχης στερεάς επιφάνειας που σχηματίστηκε είναι:  $\Omega = S / R^2$ . Σχήμα Β.1 αναπαρίστανται τα παραπάνω.



Σχήμα Β.1: Σχηματική αναπαράσταση μέτρου στερεάς γωνίας

### Φωτεινή ροή (Φ)

Η φωτεινή ροή (Φ) είναι το πηλίκο της στοιχειώδους ενέργειας (Q) που εκπέμπει μία σημειακή φωτεινή πηγή σε στοιχειώδη χρόνο προς τον χρόνο αυτό και εκφράζεται από τον τύπο:

$$\Phi = dQ/dt$$

Η φωτεινή ροή επομένως αποτελεί τον ρυθμό με τον οποίο η φωτεινή πηγή εκπέμπει φωτεινή ενέργεια και η μονάδα μέτρησής της είναι το lumen (lm).

### Ένταση φωτεινής σημειακής πηγής (I)

Ως ένταση (I) μιας σημειακής φωτεινής ροής ορίζεται το πηλίκο της στοιχειώδους φωτεινής ροής (dΦ) που εκπέμπει το σώμα εντός στοιχειώδους στερεάς γωνίας (dω) προς την γωνία αυτή:

$$I = d\Phi/d\omega$$

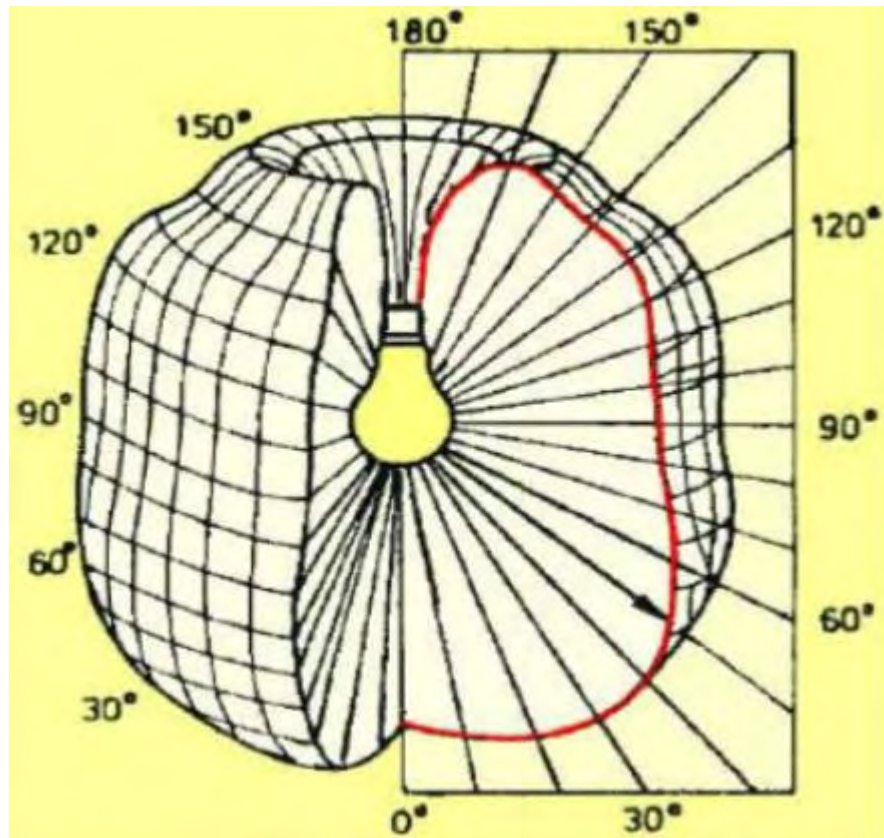
Όταν η ένταση της φωτεινής πηγής είναι ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις τότε έχουμε ομοιόμορφη εκπομπή και ο τύπος γίνεται:

$$I = \Phi/\omega$$

Η μονάδα μέτρησης της έντασης (I) μιας φωτεινής πηγής είναι η candela (cd).

Επειδή η περίπτωση της σταθερής εκπομπής φωτεινής ροής αποτελεί ιδανική περίπτωση, καθώς πρακτικά δεν υφίσταται η ύπαρξη ιδανικών φωτεινών πηγών,

προκειμένου να αναπαρασταθεί η διανομή της φωτεινής έντασης προς όλες τις κατευθύνσεις χρησιμοποιείται ένα διάγραμμα πολικών συντεταγμένων με μορφή καμπύλης, όπως φαίνεται στο Σχήμα Β.2. Αυτό το διάγραμμα ονομάζεται πολικό διάγραμμα ή φωτομετρική καμπύλη ή καμπύλη φωτεινής έντασης.



Σχήμα Β.2: Καμπύλη φωτεινής έντασης

### Φωτισμός επιφάνειας (E)

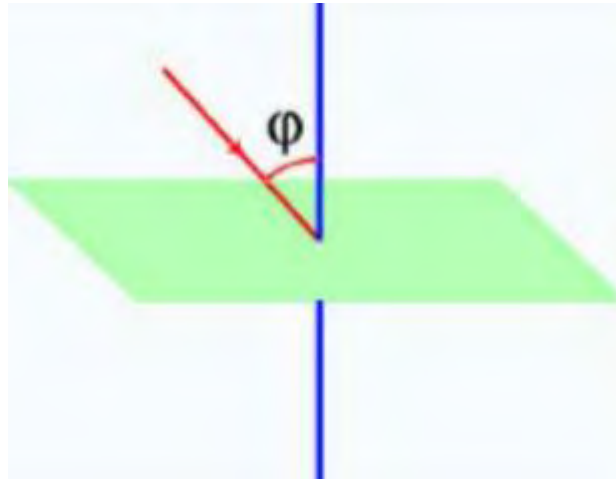
Όταν ένα σώμα δεν είναι αυτόφωτο τότε θεωρείται ότι φωτίζεται όταν πάνω του προσπίπτει μία φωτεινή ροή ( $\Phi$ ). Έτσι στην περίπτωση μίας στοιχειώδους επιφάνειας ( $dS$ ) πάνω στην οποία προσπίπτει κάθετα μία ποσότητα στοιχειώδους φωτεινής ροής ( $d\Phi$ ), το πηλίκο της προαναφερθείσας φωτεινής ροής προς την στοιχειώδη επιφάνεια ορίζει τον φωτισμό της επιφάνειας. Μονάδα μέτρησης αποτελεί το Lux.

Όταν ο φωτισμός της επιφάνειας οφείλεται σε παράλληλη φωτεινή δέσμη προκειμένου να γίνει υπολογισμός του γίνεται χρήση του πρώτου νόμου της φωτομετρίας:

«Ο φωτισμός μίας επιφάνειας από μία παράλληλη φωτεινή δέσμη είναι ανάλογος με το συνημίτονο της γωνίας με την οποία προσπίπτουν στην επιφάνεια οι ακτίνες της δέσμης».

$$E = \Phi \text{ συν}\phi / S$$

Ως γωνία  $\phi$  ορίζεται η γωνία μεταξύ του κάθετου στην επιφάνεια άξονα και της διεύθυνσης της προσπίπτουσας δέσμης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα Β.3.



Σχήμα Β.3: Ορισμός προσπίπτουσας γωνίας φωτεινής δέσμης

Από την άλλη πλευρά όταν ο φωτισμός της επιφάνειας οφείλεται σε σημειακή φωτεινή πηγή τότε για τον υπολογισμό του γίνεται χρήση του δεύτερου νόμου της φωτομετρίας:

«Ο φωτισμός που προκαλεί μία σημειακή φωτεινή πηγή σε ένα σημείο μίας επιφάνειας είναι ανάλογος με την ένταση της φωτεινής πηγής, ανάλογος με το συνημίτονο της γωνίας με την οποία προσπίπτουν οι ακτίνες στην στοιχειώδη επιφάνεια και αντιστρόφως ανάλογος με το τετράγωνο της απόστασης της φωτεινής πηγής από το φωτιζόμενο σημείο.»

$$E = I \text{ συν}\phi / R^2$$

## Παράρτημα Γ

### Τυπολόγιο υπολογισμού γεωθερμικού συστήματος

#### Υπολογισμός μήκους γεωθερμικού γεωεναλλάκτη ( $L_h$ )

Για τον υπολογισμό τού μήκους των σωληνώσεων που απαιτείται για την κάλυψη του θερμικού φορτίου χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$L_h = q_{d,heat} \frac{\frac{(COP_h - 1)}{COP_h} (R_p + R_s F_h)}{T_{g,min} - T_{ewt,min}}$$

Όπου:

$q_{d,heat}$ : το θερμικό φορτίο του κτηρίου

$COP_h$ : ο εποχιακός συντελεστής κατά την περίοδο θέρμανσης του γεωθερμικού συστήματος

$R_p$ : είναι η αντίσταση θερμότητας του σωλήνα

$R_s$ : θερμική αντίσταση του εδάφους

$F_h$ : ο συντελεστής μερικού φορτίου του γεωεναλλάκτη για την περίοδο θέρμανσης

$T_{g,min}$ : η ελάχιστη θερμοκρασία του εδάφους

$T_{ewt,min}$ : η ελάχιστη θερμοκρασία εισόδου του νερού στο σύστημα

Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου μήκους σωληνώσεων κατά την διάρκεια ψύξης χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$L_h = q_{d,cool} \frac{\frac{(COP_c - 1)}{COP_c} (R_p + R_s F_c)}{T_{g,max} - T_{ewt,max}}$$

Όπου:

$q_{d,cool}$ : το ψυκτικό φορτίο του κτηρίου

$COP_c$ : ο εποχιακός συντελεστής κατά την περίοδο ψύξης του γεωθερμικού συστήματος



$F_c$ : ο συντελεστής μερικού φορτίου του γεωεναλλάκτη για την περίοδο ψύξης

$T_{g,max}$ : η μέγιστη θερμοκρασία του εδάφους

$T_{etw,max}$ : η μέγιστη θερμοκρασία εισόδου του νερού στο σύστημα

### **Θερμοκρασία εισόδου του νερού στο σύστημα ( $T_{etw}$ )**

Σύμφωνα με βιβλιογραφική αναφορά της ASHRAE για την θερμοκρασία του εισερχόμενου νερού στο σύστημα χρησιμοποιούνται οι δύο παρακάτω τύποι:

- Ελάχιστη θερμοκρασία εισόδου ( $T_{etw,min}$ ):

$$T_{etw,min} = T_{g,min} - 15^\circ \text{ F}$$

- Μέγιστη θερμοκρασία εισόδου ( $T_{etw,max}$ ):

$$T_{etw,max} = T_{g,max} + 110^\circ \text{ F}$$

### **Συντελεστής μερικού φορτίου γεωεναλλάκτη (F)**

Προκειμένου να προσδιοριστεί το μήκος των σωληνώσεων του εδάφους απαραίτητος είναι ο συντελεστής μερικού φορτίου κατά την περίοδο θέρμανσης και ψύξης αντίστοιχα. Ο συντελεστής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$F = \frac{q_{avg}}{q_{max}}$$

Όπου:

$q_{avg}$ : το μέσο ψυκτικό/θερμικό φορτίο κατά την περίοδο ψύξης/θέρμανσης

$q_{max}$ : το μέγιστο ψυκτικό/θερμικό φορτίο κατά την περίοδο ψύξης/θέρμανσης

### **Θερμική και ψυκτική χωρητικότητα αντλίας θερμότητας**

Το θερμικό/ψυκτικό φορτίο του γεωεναλλάκτη και η θερμική/ψυκτική χωρητικότητα της αντλίας θερμότητας συνδέονται με τους παρακάτω τύπους:

- Για την ψύξη:

$$Q_c = Q_{he,c} \frac{COP_c}{COP_c + 1}$$

- Για την θέρμανση:

$$Q_h = Q_{he,h} \frac{COP_h}{COP_h - 1}$$

Όπου:

$Q_c$ : η ψυκτική χωρητικότητα της αντλίας θερμότητας στον εξατμιστή

$Q_{he,c}$ : η θερμότητα που αποβάλλεται μέσω του συμπυκνωτή σε λειτουργία ψύξης

$Q_h$ : η θερμική χωρητικότητα της αντλίας θερμότητας στον εξατμιστή

$Q_{he,h}$ : η θερμότητα που απορροφάτε από τον γεωεναλλάκτη μέσω του εξατμιστή σε περίοδο θέρμανσης

### **Υπολογισμός της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτεί το γεωθερμικό σύστημα**

Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την γεωθερμική αντλία υπολογίζεται από τους παρακάτω τύπους:

- Για την θέρμανση:

$$HP_{e,demand} = \frac{Q_h}{COP_h}$$

- Για την ψύξη:

$$HP_{e,demand} = \frac{Q_c}{COP_c}$$

## Παράρτημα Δ

### Τυπολόγιο υπολογισμού παραγωγής φωτοβολταϊκών πλαισίων

#### Υπολογισμός Ηλεκτρικής Ενέργειας φωτοβολταϊκού πλαισίου

Για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ενέργειας ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου και λαμβάνοντας υπόψιν τους συντελεστές μείωσης της απόδοσης, η μέγιστη ενέργεια που παράγουν Ν φωτοβολταϊκά πλαίσια δίνεται από την σχέση:

$$E_{m\pi} = E_{HA} \cdot N \cdot S_{\pi} \cdot \eta_{\pi} \cdot \sigma_{\alpha} \cdot \sigma_{\kappa} \cdot \sigma_{\mu}$$

Όπου:

$E_{HA}$ : ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

$S_{\pi}$ : επιφάνεια φωτοβολταϊκού πλαισίου

$\eta_{\pi}$ : βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου  $\eta_{\pi} = \eta_{STC} \cdot \sigma_{\gamma} \cdot \sigma_{\delta} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\rho}$

$\eta_{STC}$ : ο βαθμός απόδοσης του πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου

$\sigma_{\gamma} / \sigma_{\delta} / \sigma_{\theta} / \sigma_{\rho}$ : συντελεστής γήρανσης/ ρύπανσης/ θερμοκρασίας/ δίοδου

$\sigma_{\alpha} / \sigma_{\kappa} / \sigma_{\mu}$ : συντελεστής ανομοιογένειας/ καλωδιώσεων/ απωλειών μεταφοράς ενέργειας

#### Επιδραση της θερμοκρασίας

Ο συντελεστής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων επηρεάζεται σε με μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία. Ο κατασκευαστής αναγράφει την απόδοση του πλαισίου σε συνθήκες εργαστηρίου δηλαδή στους 20°C. Σε ορισμένες περιπτώσεις ωστόσο, σύμφωνα με μετρήσεις, τους καλοκαιρινούς μήνες τα ηλιακά στοιχεία αναπτύσσουν θερμοκρασίες κατά 25 – 30°C μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Για τον υπολογισμό του συντελεστή απόδοσης επομένως γίνεται καθορισμός του συντελεστή θερμοκρασίας σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma_{\theta} = 1 - ((t_{\alpha} + 30) - 25) \cdot 0,004$$

όπου:

$t_{\alpha}$ : η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα

### Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου

Ο βαθμός απόδοσης ( $\eta_{\pi}$ ) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ορίζεται ως τον λόγο της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την προσπίπτουσα ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας:

$$\eta_{\pi} = \frac{P_{mp}}{P_{HA}}$$

όπου:

$P_{mp}$ : η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς του πλαισίου

$P_{HA}$ : η ισχύς της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Ο βαθμός απόδοσης των πλαισίων εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Γήρανση: Η απόδοση μειώνεται λόγω αλλοίωσης των υλικών κατασκευής. Για την διαχρονική μείωση λαμβάνεται ο συντελεστής απόδοσης γήρανσης  $\sigma_{\gamma} = 0,90$ .
- Ρύπανση επιφάνειας: ο συντελεστής ρύπανσης λαμβάνεται με τις ακόλουθες τιμές:
  - $\sigma_{\rho} = 0,95$  για πλαίσια που καθαρίζονται συχνά
  - $\sigma_{\rho} = 0,90$  για πλαίσια ελαφρώς σκονισμένα
  - $\sigma_{\rho} = 0,80$  για πλαίσια οριζόντια και βρώμικα
- Δίοδος αντεπιστροφής: η δίοδος αντεπιστροφής είναι εκείνη που εμποδίζει την εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή διαμέσου του φωτοβολταϊκού πλαισίου όταν αυτό δεν φωτίζεται και προκαλεί απώλειες της τάξης του 1%. Μέσω του συντελεστή απωλειών διόδου γίνεται υπολογισμός των απωλειών αυτών. Η τιμή του λαμβάνεται  $\sigma_{\delta} = 0,99$ .

## Παράρτημα Ε

### Τυπολόγιο υπολογισμού παραγωγής ανεμογεννητριών

#### Μέση ετήσια ισχύς

Η μέση ετήσια ισχύς που παράγει μία ανεμογεννήτρια ορίζεται από τον τύπο:

$$W_{\text{mean}} = \frac{1}{2} \rho A V^3,$$

Όπου:

$\rho$ : η πυκνότητα του ανέμου (σε κανονικές συνθήκες – θερμοκρασία 25°C και πίεση 1 atm)

A: το εμβαδόν την επιφάνειας που σαρώνεται από τα πτερύγια του δρομέα

V: η ταχύτητα του ανέμου στο ύψους εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας.