



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων

*Τομέας Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών*

---

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*Τεχνο-οικονομική αξιολόγηση συστημάτων  
ηλιακής ψύξης με φωτοβολταϊκά στην  
Ελλάδα*

### **Του Φοιτητή**

Μπελεσιώτη Γεώργιου

### **Επιβλέπων**

Καρέλλας Σωτήριος, Αναπληρωτής Καθηγητής,

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ

---

Αθήνα, Ιούλιος 2019

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή Καθηγητή κ. Σωτήριο Καρέλλα που μου εμπιστεύθηκε την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής μελέτης. Ωστόσο, η εκπόνηση της παρούσας εργασίας ήταν ιδιαίτερα επίπονη και θα ήταν αδύνατη χωρίς τη συμβολή ορισμένων ανθρώπων.

Στο πλαίσιο αυτό, θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον κ. Τρύφωνα Ρουμπεδάκη για τη συνεχή καθοδήγησή του και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε παρά το βεβαρυμένο πρόγραμμά του. Ειδική μνεία, οφείλω να κάνω και στον κ. Αντώνη Χαραλαμπίδη που με την καθοδήγησή του κατέστη εφικτή η εκπόνηση της εν λόγω εργασίας χωρίς καθυστερήσεις. Ακόμη, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου που με βοήθησαν όλο αυτό το διάστημα. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου που με στήριξε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η σύζευξη μιας αντλίας θερμότητας με ένα πεδίο φωτοβολταϊκών συλλεκτών, η διαστασιολόγηση των επιμέρους συνιστωσών του συζευγμένου συστήματος και η πλήρης μοντελοποίηση των βασικών διατάξεων. Σκοπός της διατάξεως είναι η παραγωγή θερμότητας, ψύξης αλλά και η χρήση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας. Ο σχεδιασμός κατευθύνεται από τεchnοοικονομικά κριτήρια, περιβαλλοντικά αλλά και χωροταξικά. Ειδικότερα, μοντελοποιείται η αντλία θερμότητας διαστασιολογώντας κατάλληλα τον ατμοποιητή και τον συμπυκνωτή αυτής καθώς επίσης μελετάται τεchnοοικονομικά η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων παρουσιάζοντας παράλληλα ανάλυση οικονομικής ευαισθησίας.

Ο σχεδιασμός γίνεται για κατοικία επιφάνειας  $100 \text{ m}^2$  που είναι στην Αθήνα. Από την ανάλυση προκύπτει ότι σχετικά με το κόστος της εγκατάστασης σημαντική συνεισφορά έχουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ και ο συμπιεστής της εγκατάστασης. Ιδίως για την περίπτωση των φωτοβολταϊκών, το κόστος αυτών οδηγεί στο τεchnο-οικονομικό βέλτιστο για όλους τους τύπους κτηρίων που μελετήθηκαν να βρίσκεται σε μικρές επιφάνειες ηλιακού πεδίου, μεταξύ  $4.86$  και  $9.72 \text{ m}^2$ . Το βέλτιστο πλήθος Φ/Β πάνελ αντιστοιχεί στη λειτουργία όπου το σύνολο σχεδόν της κατανάλωσης της αντλίας θερμότητας καλύπτεται από τα πάνελ. Αύξηση του πλήθους πέρα από αυτήν την τιμή δεν ωφελεί τεchnο-οικονομικά. Αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης λόγω π.χ. παλαιότητας του κτηρίου οδηγεί σε αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Το όφελος, ως παρούσα αξία, κινείται στο εύρος  $3199-11250 \text{ €}$  για τα σενάρια ελάχιστης και μέγιστης κατανάλωσης, ενώ η περίοδος αποπληρωμής μεταξύ  $2.92$  και  $4.94$  έτη. Τέλος, η ανάλυση ευαισθησίας ανέδειξε τη σημαντική επίδραση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας στην εν γένει ανταγωνιστικότητα του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, μείωση  $10\%$  του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας, υπολογίστηκε ότι επιφέρει μείωση της καθαρής παρούσας αξίας της τάξης του  $10-15\%$ .

## Abstract

The topic of this study consists of the coupling of a conventional heat pump with a solar PV panels field, the sizing of the related subcomponents and the precise modelling of the key processes. The system is designed to cover the cooling and heating loads of a building, while the excess of electrical power is used to substitute parts of the building's electrical loads. The design is based on techno-economic, environmental and spacing criteria. More specifically, the heat pump is modelled sizing its evaporator and condenser in a way such to ensure optimal performance, while a sensitivity analysis is conducted with respect to the optimal PV field area. The reference building is considered to have a total surface area of  $100\text{ m}^2$  and is located in Athens, Greece.

The analysis revealed the key contribution of the PV panels' and the compressor's capital costs in the system's total purchase cost. In particular for the case of the PVs, their cost leads to a techno-economic optimum solar PV field area between  $4.86$  and  $9.72\text{ m}^2$ ; this surface is in most evaluated cases corresponding to a close to 100% coverage of the heat pump's power consumption. In general, the competitiveness of the PV driven heat pump system increases with the age of the house -as the thermal resistance is worse and hence higher thermal loads are required to be covered-. In NPV terms, the optimum values range between  $3199$ - $11250\text{ €}$ , while the corresponding payback periods for the investment range between  $2.92$  and  $4.94$  years. Finally, the results of the sensitivity analysis revealed the key influence of the electricity costs; more specifically, a 10% decrease in the electricity costs was found to lead to a decreased NPV of 10-15% for all considered cases.

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1.	Εισαγωγή .....	1
1.1	Γενικά.....	1
1.2	Αντλία θερμότητας.....	1
1.2.1	Γενικά.....	1
1.2.2	Κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμού .....	2
1.2.3	Διάκριση αντλιών θερμότητας.....	3
1.3	Πηγές θερμότητας.....	4
1.3.1	Αέρας περιβάλλοντος.....	4
1.3.2	Γεωθερμία .....	5
1.3.3	Ηλιακή ενέργεια .....	8
1.4	Ηλιακά υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας.....	9
1.5	Φωτοβολταϊκά συστήματα .....	10
1.5.1	Γενικά.....	10
1.5.2	Αρχή λειτουργίας.....	11
1.5.3	Διάκριση φωτοβολταϊκών συστημάτων .....	12
1.5.4	Συγκρότηση φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	15
1.5.5	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	17
1.5.6	Σύζευξη Φ/Β με αντλία θερμότητας .....	18
1.6	Σκοπός της εργασίας .....	19
Κεφάλαιο 2.	Αντλία θερμότητας.....	20
2.1	Περιγραφή συστήματος .....	20
2.1.1	Λειτουργία αντλίας θερμότητας .....	20
2.1.2	Σύνδεση με συνολικό σύστημα.....	21
2.1.3	Εξαρτήματα αντλίας θερμότητας.....	22
2.2	Συνθήκες λειτουργίας και εργαζόμενα μέσα.....	26
2.2.1	Συνθήκες λειτουργίας .....	26
2.2.2	Εργαζόμενα μέσα .....	27
2.3	Θερμοδυναμική μοντελοποίηση.....	27
Κεφάλαιο 3.	Φωτοβολταϊκό σύστημα .....	31
3.1	Περιγραφή συστήματος .....	31
3.2	Μοντελοποίηση.....	32
3.2.1	Ανάλυση Φ/Β φαινομένου .....	32
3.2.2	Επίδραση εξωτερικών παραγόντων.....	34

3.2.3	Μαθηματικό μοντέλο.....	36
3.2.4	Συντελεστές απόδοσης.....	43
Κεφάλαιο 4.	Αποτελέσματα .....	45
4.1	Θερμικά-Ψυκτικά φορτία.....	45
4.2	Διαστασιολόγηση αντλίας θερμότητας .....	46
4.2.1	Εκλογή φορτίου λειτουργίας.....	46
4.2.2	Εκλογή συμπιεστή .....	47
4.2.3	Εκλογή εναλλακτών θερμότητας .....	48
4.2.4	Τελικές διαστασιολογήσεις .....	49
4.3	Σύζευξη υποσυστημάτων .....	49
4.3.1	Φορτίο αντλίας θερμότητας .....	49
4.3.2	Παραγωγή Φ/Β πάνελ .....	50
4.3.3	Εφαρμογή net-metering.....	51
4.4	Τεχνο-οικονομική αξιολόγηση .....	53
4.4.1	Υφιστάμενη κατάσταση.....	53
4.4.2	Τεχνικοί δείκτες .....	54
4.4.3	Οικονομικοί δείκτες .....	55
4.4.4	Κόστος υποσυστημάτων και ενέργειας .....	56
4.4.5	Αποτελέσματα .....	59
4.5	Ανάλυση ευαισθησίας.....	65
4.5.1	Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας.....	65
4.5.2	Κόστος καυσίμου.....	67
4.5.3	Κόστος αντλίας θερμότητας.....	68
4.5.4	Κόστος Φ/Β συστήματος .....	70
Κεφάλαιο 5.	Συμπεράσματα – Μελλοντικές προτάσεις .....	73
Βιβλιογραφία .....		75

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Σχηματική απεικόνιση κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμού.....	3
Σχήμα 1-2: Εναλλαγή λειτουργίας ψύξης-θέρμανσης μέσω τετράοδης βαλβίδας .....	3
Σχήμα 1-3: Λειτουργία αντλίας θερμότητας διαιρετού τύπου για θέρμανση του εσωτερικού χώρου [2].....	5
Σχήμα 1-4: Σχηματική απεικόνιση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας ανοικτού κυκλώματος [3]. .....	6
Σχήμα 1-5: Τύποι γεωθερμικών αντλιών θερμότητας: Κατακόρυφου (αριστερά) και οριζόντιου τύπου (δεξιά) [3]. .....	6
Σχήμα 1-6: Κύριοι τύποι γεωθερμικών αντλιών θερμότητας οριζόντιου τύπου: Εν σειρά (αριστερά) και παράλληλη διαμόρφωση (δεξιά) [3]. .....	7
Σχήμα 1-7: Επιμερισμός εγκατεστημένης ισχύος γεωθερμικών αντλιών θερμότητας στην Ελλάδα [6]. .....	8
Σχήμα 1-8: Ετήσια ανηγμένη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην Ευρώπη [7].....	8
Σχήμα 1-9: Ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας αέρα-νερού [8]. .....	9
Σχήμα 1-10: Ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας νερού-νερού [8].....	10
Σχήμα 1-11: Αντλία θερμότητας διπλής πηγής θερμότητας [8]. .....	10
Σχήμα 1-12: Σχηματική απεικόνιση διόδου [11].....	12
Σχήμα 1-13: Κατανομή Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα βάσει ισχύος [16]. .....	14
Σχήμα 1-14: Σχηματική απεικόνιση τεχνολογιών κατασκευής Φ/Β κελιών: Μονοκρυσταλλικού πυριτίου (αριστερά), πολυκρυσταλλικού πυριτίου (κέντρο), λεπτού υμενίου (δεξιά).....	14
Σχήμα 1-15: Κατανομή Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα βάσει τεχνολογίας κατασκευής [16]. .....	15
Σχήμα 1-16: Κατανομή Φ/Β συστημάτων παγκοσμίως βάσει τεχνολογίας κατασκευής [15].	15
Σχήμα 1-17: Δομικά στοιχεία Φ/Β συστήματος .....	16
Σχήμα 1-18: Εγκατεστημένη Φ/Β ισχύς στην Ε.Ε. [17].....	17
Σχήμα 1-19: Εγκατεστημένη κατά κεφαλήν Φ/Β ισχύς στην Ε.Ε. [18]. .....	18
Σχήμα 1-20: Ηλιακό δυναμικό και ετήσια ανηγμένη Φ/Β παραγωγή ενέργειας στην Ε.Ε. [19]. .....	18
Σχήμα 2-1: Σχηματική απεικόνιση μελετώμενης αντλίας θερμότητας με αρίθμηση θέσεων. .....	20
Σχήμα 2-2: Απεικόνιση κύκλου αντλίας θερμότητας σε διάγραμμα T-s και p-h. ....	21
Σχήμα 2-3: Τρόπος λειτουργίας του συστήματος: χειμερινή λειτουργία (πάνω), θερινή λειτουργία (κάτω). .....	22
Σχήμα 2-4: Σχηματική απεικόνιση παλινδρομικού συμπιεστή μονού εμβόλου [22]. .....	23
Σχήμα 2-5: Σχηματική απεικόνιση ελικοειδούς συμπιεστή [25]. .....	24
Σχήμα 2-6: Σχηματική απεικόνιση κοχλιωτού συμπιεστή [26]. .....	24
Σχήμα 2-7: Σχηματική απεικόνιση πτερυγιοφόρου συμπιεστή [23]. .....	25
Σχήμα 3-1: Συμπεριφορά διόδου χωρίς (σκούρα γραμμή) και με (ανοιχτή γραμμή) παροχή φωτός [35]. .....	33
Σχήμα 3-2: Καμπύλη λειτουργίας I-V Φ/Β στοιχείου.....	33
Σχήμα 3-3: Καμπύλη λειτουργίας εν σειρά συνδεδεμένων Φ/Β στοιχείων. ....	34
Σχήμα 3-4: Καμπύλη λειτουργίας παράλληλα συνδεδεμένων Φ/Β στοιχείων. ....	34
Σχήμα 3-5: Ηλεκτρικά κυκλώματα μοντελοποίησης Φ/Β στοιχείου/πάνελ. ....	38
Σχήμα 3-6: Καμπύλες I-V και P-V Φ/Β πάνελ από κατασκευαστή συναρτήσει ακτινοβολίας. ....	41
Σχήμα 3-7: Καμπύλες I-V Φ/Β πάνελ από κατασκευαστή συναρτήσει θερμοκρασίας κελιών. ....	41
Σχήμα 3-8: Καμπύλες I-V και P-V Φ/Β πάνελ από μοντέλο συναρτήσει ακτινοβολίας. ....	42

Σχήμα 3-9: Καμπύλες I-V Φ/Β πάνελ από μοντέλο συναρτήσει θερμοκρασίας κελιών.....	43
Σχήμα 4-1: Ωριαία θερμικά και ψυκτικά φορτία εξεταζόμενων κτηρίων κατά τη διάρκεια του έτους.....	46
Σχήμα 4-2: Προσέγγιση ισεντροπικού β.α. συμπιεστή (μοντέλο ZR61KCE_TFD – λειτουργία με R134a) από χάρτη λειτουργίας κατασκευαστή.....	47
Σχήμα 4-3: Ωριαία κατανάλωση αντλίας θερμότητας Σεναρίου 1 με εργαζόμενο μέσο R410A. ....	50
Σχήμα 4-4: Ωριαία παραγόμενη ισχύς ενός Φ/Β πάνελ κατά τη διάρκεια του έτους. ....	51
Σχήμα 4-5: Ωριαία ιδιοκατανάλωση, απόδοση ενέργειας στο δίκτυο για αποθήκευση, κατανάλωση αποθηκευμένης ενέργεια και κατανάλωση δικτύου κατά τη διάρκεια του έτους, για λειτουργία με ένα Φ/Β πάνελ, στο Σενάριο 1 και εργαζόμενο μέσο R410A.....	52
Σχήμα 4-6: Αποθηκευμένη στο δίκτυο ενέργεια κατά τη διάρκεια του έτους, για λειτουργία με ένα Φ/Β πάνελ, στο Σενάριο 1 και με εργαζόμενο μέσο R410A.....	53
Σχήμα 4-7: Επιμερισμός κόστους αντλίας θερμότητας στις συνιστώσες της για μέσο Σενάριο με εργαζόμενο μέσο R410A. ....	58
Σχήμα 4-8: Οικονομικοί δείκτες Σεναρίου 1 συναρτήσει εργαζόμενου μέσου (κατά σειρά από πάνω προς τα κάτω: R410A, R134a, R404A, R407C). ....	60
Σχήμα 4-9: Τεχνικοί δείκτες Σεναρίου 1 για εργαζόμενο μέσο R410A. ....	61
Σχήμα 4-10: Οικονομικοί δείκτες Σεναρίου 2 για εργαζόμενο μέσο R410A. ....	62
Σχήμα 4-11: Οικονομικοί δείκτες Σεναρίου 3 για εργαζόμενο μέσο R410A. ....	63
Σχήμα 4-12: Οικονομικοί δείκτες Σεναρίου 4 για εργαζόμενο μέσο R410A. ....	63
Σχήμα 4-13: Επίδραση κόστους ηλεκτρικής ενέργειας στους οικονομικούς δείκτες όλων των Σεναρίων, για εργαζόμενο μέσο R410A (κατά σειρά από πάνω προς τα κάτω: Σενάριο 1-Σενάριο 4). ....	67
Σχήμα 4-14: Επίδραση κόστους θερμικής ενέργειας στους οικονομικούς δείκτες όλων των Σεναρίων, για εργαζόμενο μέσο R410A (κατά σειρά από πάνω προς τα κάτω: Σενάριο 1-Σενάριο 4). ....	68
Σχήμα 4-15: Επίδραση κόστους αντλίας θερμότητας στους οικονομικούς δείκτες όλων των Σεναρίων, για εργαζόμενο μέσο R410A (κατά σειρά από πάνω προς τα κάτω: Σενάριο 1-Σενάριο 4). ....	70
Σχήμα 4-16: Επίδραση κόστους Φ/Β πάνελ στους οικονομικούς δείκτες όλων των Σεναρίων, για εργαζόμενο μέσο R410A (κατά σειρά από πάνω προς τα κάτω: Σενάριο 1-Σενάριο 4)...	72



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1: Στόχοι Ε.Ε. για τα έτη 2020 και 2030 [1].....	1
Πίνακας 1-2: Δεδομένα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας στην Ελληνική αγορά [5]. .....	7
Πίνακας 2-1: Θερμοκρασίες νερού συμπυκνωτή και ατμοποιητή συναρτήσει περιόδου λειτουργίας.....	26
Πίνακας 2-2: Pinch points εναλλακτών και επίπεδο υπερθέρμανσης και υπόψυξης εργαζόμενου μέσου συναρτήσει φορτίου και περιόδου λειτουργίας. ....	26
Πίνακας 2-3: Ιδιότητες εξεταζόμενων ρευστών.....	27
Πίνακας 3-1: Σταθερές για το μοντέλο του Faïman [39].....	37
Πίνακας 3-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά μελετώμενου Φ/Β πάνελ (μοντέλο T660P, ονομαστικής ισχύος 275 W, εταιρίας TALESUN [33]. .....	40
Πίνακας 4-1: Μέγιστα θερμικά και ψυκτικά φορτία εξεταζόμενων κτηρίων. ....	45
Πίνακας 4-2: Φορτία διαστασιολόγησης αντλίας θερμότητας. ....	47
Πίνακας 4-3: Χαρακτηριστικά απόδοσης τεχνικών συστημάτων υφιστάμενης κατάστασης. 54	
Πίνακας 4-4: Συντελεστές μετατροπής πραγματικής κατανάλωσης ενέργειας σε πρωτογενή [47]. .....	55
Πίνακας 4-5: Συντελεστές μετατροπής πραγματικής κατανάλωσης ενέργειας σε εκπομπές CO <sub>2</sub> [47].....	55
Πίνακας 4-6: Κόστη ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. ....	56
Πίνακας 4-7: Ανηγγμένα κόστη προμήθειας εργαζόμενου μέσου.....	57
Πίνακας 4-8: Κόστος αντλίας θερμότητας συναρτήσει Σεναρίου και εργαζόμενου μέσου... 58	
Πίνακας 4-9: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τεχνο-οικονομικής βελτιστοποίησης.....	64

# Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια, η προσπάθεια βελτίωσης της ποιότητας ζωής του ανθρώπου έχει ως αντίκτυπο την αισθητή αύξηση της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Με τις ανησυχίες για το περιβάλλον να αυξάνονται και την εξάντληση των συμβατικών καυσίμων να είναι ορατή, το επιστημονικό ενδιαφέρον έχει στραφεί στην υποκατάσταση της καύσης ορυκτών καυσίμων από εναλλακτικές, ανανεώσιμες και «αποκεντρωμένες» μορφές παραγωγής ενέργειας. Η κάλυψη των αναγκών αυτών, πρωτίστως μέσω της καύσης ορυκτών-μη ανανεώσιμων καυσίμων, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα και συνεπώς, την επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και της ευρύτερης κλιματικής αλλαγής. Στο πλαίσιο αυτό, έχουν τεθεί στόχοι από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε), οι οποίοι αφορούν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και προωθούν την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε). Για την επίτευξη των στόχων αυτών, ιδιαίτερα αποτελεσματική είναι η αξιοποίηση της απορριπτόμενης στο περιβάλλον θερμότητας, καθώς και των Α.Π.Ε. Συγκεκριμένα, οι στόχοι της Ευρωπαϊκής πολιτικής, υπό το νομοθετικό πλαίσιο «20-20-20», για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μετατροφή σε μορφές ενέργειας που δεν εκλύουν CO<sub>2</sub>, είναι δεσμευτικοί για όλες τις χώρες της Ε.Ε και επομένως και για την Ελλάδα. Οι στόχοι αυτοί συνοψίζονται στον Πίνακα 1-1.

Πίνακας 1-1: Στόχοι Ε.Ε. για τα έτη 2020 και 2030 [1].

Στόχος (%)	Έτος	
	2020	2030
Μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου συγκριτικά με 1990	20	40
Παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε.	20	27
Αύξηση απόδοσης παραγωγής ενέργειας	20	27

Η προσπάθεια επίτευξης των στόχων αυτών οδήγησε το επιστημονικό ενδιαφέρον στην ανάπτυξη πολλών τεχνολογιών. Στην παρούσα εργασία, έμφαση δίνεται στην τεχνολογία της Αντλίας Θερμότητας (Heat Pump) και των Φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων. Συγκεκριμένα, μελετάται η αντλία θερμότητας κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμού (Vapor Compression Cycle – VCC).

## 1.2 Αντλία Θερμότητας

### 1.2.1 Γενικά

Η αντλία θερμότητας είναι συσκευή που προσφέρει ενεργειακά αποδοτικό τρόπο παροχής θερμότητας και ψύξης σε αρκετές εφαρμογές. Γι' αυτό το λόγο, αντλίες θερμότητας εγκαθίστανται σε οικιακά κτίρια και γραφεία προκειμένου να μειωθεί η ενεργειακή τους κατανάλωση.

Η κύρια λειτουργία της, όπως δηλώνει και το όνομά της, είναι η άντληση θερμότητας από κάποιο μέσο-χώρο χαμηλής θερμοκρασίας και να την απόδοσή της σε μέσο-χώρο υψηλής θερμοκρασίας. Η λειτουργία των αντλιών θερμότητας ποικίλει, με κυριότερα είδη τις αντλίες θερμότητας κύκλου μηχανικής συμπίεσης (VCC), απορρόφησης και προσρόφησης. Οι τεχνολογίες αυτές διαφέρουν ως προς τις θερμοκρασίες λειτουργίας τους, αλλά και τα βασικά εξαρτήματά τους. Όπως αναφέρθηκε, η παρούσα εργασία πραγματεύεται την τεχνολογία του κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμού. Μία άλλη διάκριση των αντλιών θερμότητας γίνεται με βάση την πηγή πρόσδοσης και απόρριψης θερμότητας, όπως αναλύεται σε επόμενη παράγραφο.

### **1.2.2 Κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμού**

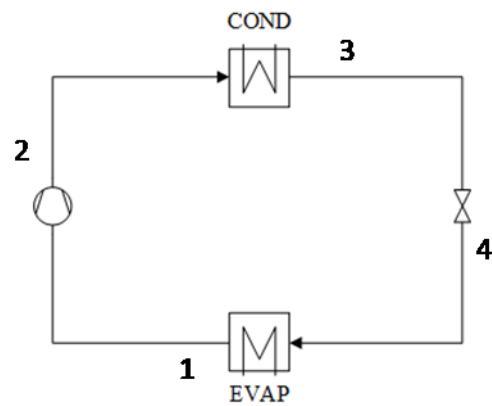
Ο κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμού αποτελεί ψυκτικό κύκλο στον οποίον, η υλοποίηση της παραπάνω διεργασίας απαιτεί τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία έπειτα αποδίδεται στο πολλαπλάσιο σε ωφέλιμη θερμική ισχύ. Με τον όρο ωφέλιμη θερμική ισχύ, εννοείται η θερμότητα που αποδίδεται από την αντλία στην περίπτωση απαιτήσεων θέρμανσης ή αντίστοιχα, η θερμότητα που παραλαμβάνεται από την αντλία όταν υπάρχει φορτίο ψύξης.

Συγκεκριμένα, η παροχή θερμότητας και ψύξης στηρίζεται στη συμπύκνωση και την ατμοποίηση αντίστοιχα, του εργαζόμενου μέσου του κύκλου. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-1, το εργαζόμενο μέσο σε αέρια κατάσταση συμπιέζεται και οδηγείται στον εναλλάκτη θερμότητας του συμπυκνωτή, όπου αποδίδει θερμότητα. Έπειτα, διέρχεται από στραγγαλιστική βαλβίδα όπου ελαττώνεται η πίεσή και η θερμοκρασία του. Από εκεί, κατευθύνεται στον ατμοποιητή προσλαμβάνοντας θερμότητα για την ατμοποίησή του, προτού εισέλθει εκ νέου στο συμπιεστή ώστε να επαναληφθεί ο κύκλος.

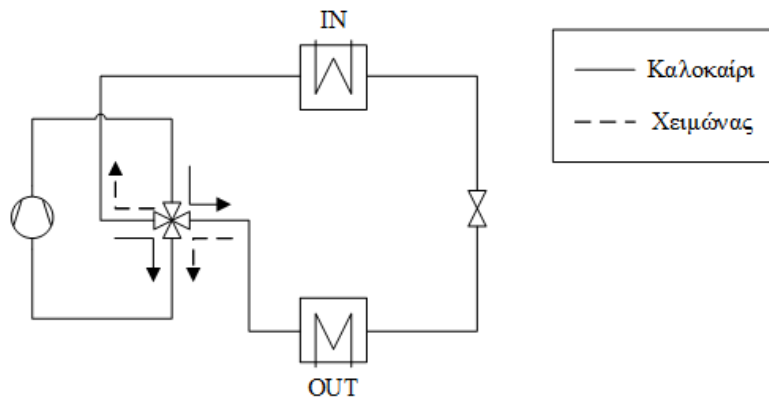
Στο σημείο αυτό, επισημαίνεται ότι η αντλία θερμότητας εκτελεί πάντα ψυκτικό κύκλο, ανεξάρτητα από το αν η απαίτηση λειτουργίας αφορά την παροχή ψύξης η θέρμανσης, και ποτέ θερμικό, γιατί σκοπός της δεν είναι η παραγωγή μηχανικού έργου. Το μόνο που αντιστρέφεται κατά την αλλαγή μεταξύ ψύξης και θέρμανσης είναι ο ρόλος του συμπυκνωτή με τον ρόλο του ατμοποιητή, όπως αναλύεται παρακάτω.

Όσον αφορά την ψύξη και τη θέρμανση ενός χώρου, ισχύουν τα εξής. Την καλοκαιρινή περίοδο, ο ατμοποιητής επικοινωνεί με τον ψυχόμενο χώρο τον οποίο ψύχει, καθώς αντλεί θερμότητα από αυτόν, ενώ το χειμώνα, ο χώρος επικοινωνεί με το συμπυκνωτή, παραλαμβάνοντας θερμότητα από το εργαζόμενο μέσο του κύκλου. Για να είναι δυνατή η λειτουργία της αντλίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ανάλογα με τις απαιτήσεις ψύξης και θέρμανσης χρησιμοποιείται κάποια διάταξη που αντιστρέφει τη ροή του εργαζόμενου μέσου στο κύκλωμα, όπως για παράδειγμα μία τετράοδη βαλβίδα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-2.

Η αποδοτικότητα της αντλίας θερμότητας εκφράζεται μέσω του συντελεστή συμπεριφοράς (coefficient of performance – COP). Συγκεκριμένα, εκφράζει το λόγο της ωφέλιμης θερμικής ισχύος που παρέχεται από την αντλία προς την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει, όπου η ωφέλιμη θερμική ισχύς ορίστηκε παραπάνω.



Σχήμα 1-1: Σχηματική απεικόνιση κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμού.



Σχήμα 1-2: Εναλλαγή λειτουργίας ψύξης-θέρμανσης μέσω τετράοδης βαλβίδας.

### 1.2.3 Διάκριση αντλιών θερμότητας

Όπως σημειώθηκε παραπάνω, η κατηγοριοποίησή τους γίνεται τόσο βάσει της αρχής λειτουργίας τους, όσο και βάσει του μέσου άντλησης και απορρίψης θερμότητας. Αναφορικά με τις αντλίες τύπου VCC, οι βασικές κατηγορίες είναι οι εξής:

- Αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα:

Πρόκειται για την πιο συχνά συναντούμενη τεχνολογία σε οικιακές εφαρμογές μικρής κλίμακας (διαιρούμενου τύπου – split-units), όπου θερμότητα αντλείται και απορρίπτεται από και προς το περιβάλλον και τον αέρα του εσωτερικού χώρου. Ειδικότερα, το καλοκαίρι αντλείται θερμότητα από το περιβάλλον, ενώ το χειμώνα από τον εσωτερικό χώρο, η οποία έπειτα αποβάλλεται ψύχοντας το χώρο. Οι αντλίες αυτές, αν και χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος και απλή λειτουργία, παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή της απόδοσής τους, λόγω της μεγάλης μεταβολής της εξωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του χρόνου, η οποία οδηγεί σε μεγάλους λόγους πίεσης στο συμπιεστή και επομένως αυξημένη κατανάλωση ενέργειας.

– Αντλίες θερμότητας αέρα-νερού:

Αντίστοιχα με την προηγούμενη κατηγορία, με τη διαφορά ότι θερμότητα λαμβάνεται και απορρίπτεται, εκτός από τον αέρα και από ρεύμα νερού. Ενδεικτικές εφαρμογές, οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια, αποτελούν η χρήση της θερμότητας ηλιακών συλλεκτών ή γεωθερμικής ενέργειας για θέρμανση του αέρα του χώρου (ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας), η αξιοποίηση του εξωτερικού αέρα για ψύξη νερού το οποίο προορίζεται για παράδειγμα για ενδοδαπέδιο σύστημα δροσισμού ή μονάδες ανεμιστήρα-στοιχείου (fan-coils) και τέλος η παραγωγή ζεστού νερού αξιοποιώντας τη θερμότητα του αέρα του περιβάλλοντος. Οι αντλίες αυτού του τύπου ενδείκνυνται για χρήση σε υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες αλλά και σε χαμηλές θερμοκρασίες, μέχρι 20 °C. Σε αντίθεση με τις αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα, παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση, ιδιαίτερα στην περίπτωση της ηλιακής υποβοήθησης και της γεωθερμίας.

– Αντλίες θερμότητας νερού-νερού:

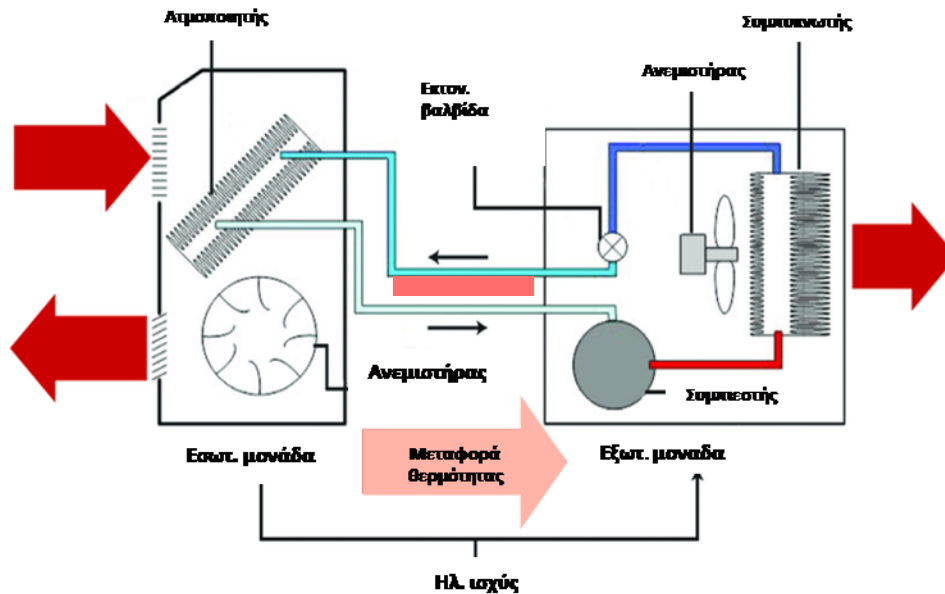
Σε αυτήν την κατηγορία υπάγονται συσκευές που μεταφέρουν θερμότητα από νερό χαμηλής σε νερό υψηλής θερμοκρασίας. Τυπικό παράδειγμα τέτοιων αντλιών αποτελούν μηχανές που αξιοποιούν γεωθερμική ενέργεια, σε συνδυασμό με ηλιακούς συλλέκτες. Λόγω του σχετικά σταθερού θερμοκρασιακού εύρους, η απόδοση των αντλιών αυτών είναι αυξημένη και ιδιαίτερα σταθερή.

### 1.3 Πηγές θερμότητας

Οι κύριες πηγές θερμότητας που αξιοποιούνται από συστήματα αντλιών θερμότητας είναι η θερμότητα του αέρα περιβάλλοντος, η ηλιακή και η γεωθερμική ενέργεια. Ανάλογα με την πηγή θερμότητας, διαφοροποιείται και το σύστημα, όπως αναλύεται στη συνέχεια.

#### 1.3.1 Αέρας περιβάλλοντος

Όπως σημειώθηκε και παραπάνω, η κύρια εφαρμογή στην οποία γίνεται αξιοποίηση της θερμότητας του αέρα περιβάλλοντος αφορά την πρόσδοση θερμότητας σε ρεύμα αέρα. Ειδικότερα, στο Σχήμα 1-3, δίνεται εποπτικά η λειτουργία μίας αντλίας θερμότητας οικιακής χρήσης διαίρετου τύπου, στην οποία ο ατμοποιητής και ο συμπυκνωτής βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία. Συγκεκριμένα, απεικονίζεται η λειτουργία θέρμανσης του εσωτερικού χώρου. Όπως φαίνεται, το εργαζόμενο μέσο αντλεί θερμότητα για την ατμοποίησή του από το εξωτερικό περιβάλλον και έπειτα την αποδίδει, μέσω της συμπύκνωσής του στον αέρα του εσωτερικού χώρου τον οποίο θερμαίνει. Σύμφωνα και με όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, το κύριο μειονέκτημά των εν λόγω αντλιών έγκειται στη μεγάλη εξάρτηση της λειτουργίας τους από τις εξωτερικές συνθήκες, γεγονός που οδηγεί σε μη αποδοτική λειτουργία όσο αυξάνεται το θερμοκρασιακό εύρος του εργαζόμενου μέσου στον κύκλο.

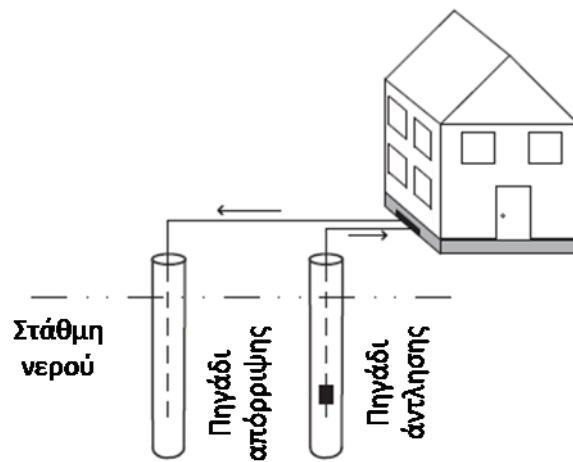


Σχήμα 1-3: Λειτουργία αντλίας θερμότητας διαιρετού τύπου για θέρμανση του εσωτερικού χώρου [2].

### 1.3.2 Γεωθερμία

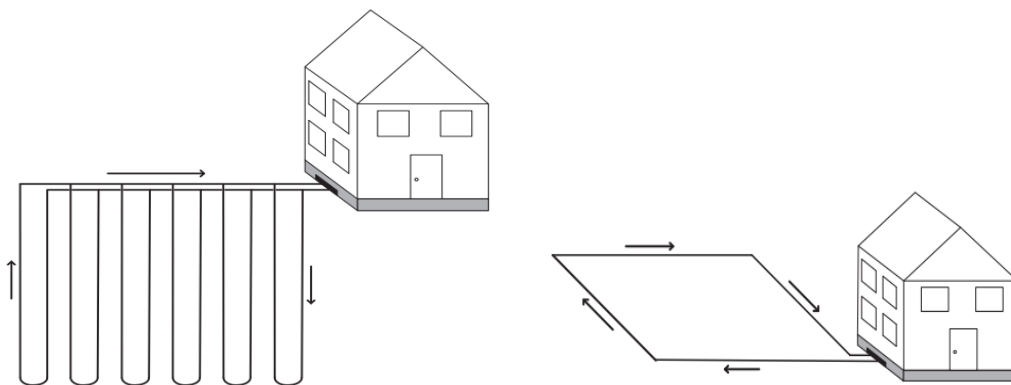
Η αντλία θερμότητας που αξιοποιεί τη θερμότητα του εδάφους καλείται γεωθερμική. Μια γεωθερμική αντλία θερμότητας εκμεταλλεύεται τη σχετικά σταθερή θερμοκρασία του εδάφους ή του νερού του εδάφους, παρέχοντας θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό χρήσης σε κτήρια κατά τη διάρκεια του έτους με ιδιαίτερα σταθερή απόδοση [3]. Όσον αφορά το έτερο μέσο στο οποίο απορρίπτεται ή από το οποίο παραλαμβάνεται θερμότητα, ισχύουν όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, σχετικά με τις αντλίες αέρα-νερού και νερού-νερού. Όπως αναφέρθηκε, το βασικό πλεονέκτημα αυτών των αντλιών έναντι των αντλιών θερμότητας αέρα οφείλεται στη σημαντικά μικρότερη μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους κατά τη διάρκεια του έτους, η οποία είναι θερμότερη από την ατμοσφαιρική το χειμώνα και ψυχρότερη το καλοκαίρι. Ειδικότερα, το βάθος στο οποίο η θερμοκρασία του εδάφους σταθεροποιείται εξαρτάται από παράγοντες όπως η ηλιακή ακτινοβολία, οι θερμικές ιδιότητες του εδάφους και η θερμοκρασία του αέρα [4]. Παρ' όλα αυτά, ως μειονεκτήματα θεωρούνται η μεγάλη απαιτούμενη έκταση γης, το κόστος εγκατάστασής τους και η αντιμετώπιση της διάβρωσης και των διαρροών.

Όσον αφορά την κατηγοριοποίησή τους, αυτή γίνεται με διάφορα κριτήρια. Ο αρχικός διαχωρισμός τους τις κατατάσσει σε αντλίες ανοικτού και κλειστού κυκλώματος. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται οι αντλίες θερμότητας στις οποίες το νερό του εδάφους (δευτερέων ρεύμα) αντλείται από μία γεώτρηση ή πηγάδι, οδηγείται στην αντλία θερμότητας όπου συναλλάσσει θερμότητα με το εργαζόμενο μέσο (πρωτεύων ρεύμα) και έπειτα απορρίπτεται σε άλλη γεώτρηση ή πηγάδι (Σχήμα 1-4). Αντίθετα, στις αντλίες κλειστού κυκλώματος, το εργαζόμενο μέσο οδηγείται στο σημείο όπου βρίσκεται το νερό. Επομένως, η βασική διαφορά τους έγκειται στο εάν υπάρχει κυκλοφορία και του νερού, εκτός από το εργαζόμενο μέσο.

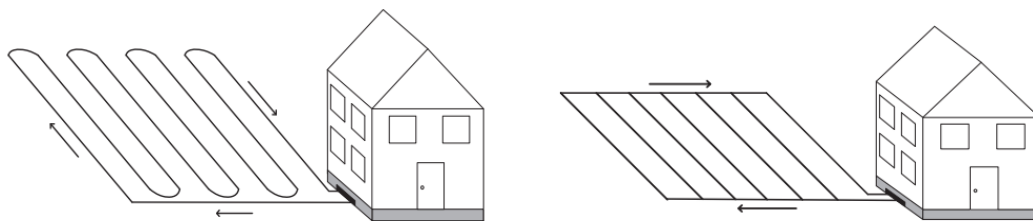


Σχήμα 1-4: Σχηματική απεικόνιση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας ανοικτού κυκλώματος [3].

Όσον αφορά τις αντλίες κλειστού κυκλώματος, γίνεται ειδικότερή διάκρισή τους, ανάλογα με τον προσανατολισμό των σωληνώσεων του εργαζόμενου μέσου στο έδαφος. Συγκεκριμένα, διακρίνονται σε οριζόντιου ή κατακόρυφου τύπου, οι οποίοι δίνονται στο Σχήμα 1-5. Η εκλογή του συστήματος εξαρτάται από κυρίως τη διαθεσιμότητα της επιφάνειας της γης –όσο μικρότερη η διαθεσιμότητα, ενδείκνυται το κατακόρυφο σχήμα, το κόστος εκσκαφής και τα χαρακτηριστικά του εδάφους (μορφολογία, υγρασία, θερμικές ιδιότητες). Τέλος, οι οριζόντιου τύπου παρουσιάζουν ποικίλες διαμορφώσεις, σχετικά με τη διάταξη των σωληνώσεων. Οι κύριες περιπτώσεις περιλαμβάνουν την εν σειρά και παράλληλη διαμόρφωση, οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 1-6 και οι οποίες δύνανται να συνδυαστούν [3].



Σχήμα 1-5: Τύποι γεωθερμικών αντλιών θερμότητας: Κατακόρυφου (αριστερά) και οριζόντιου τύπου (δεξιά) [3].



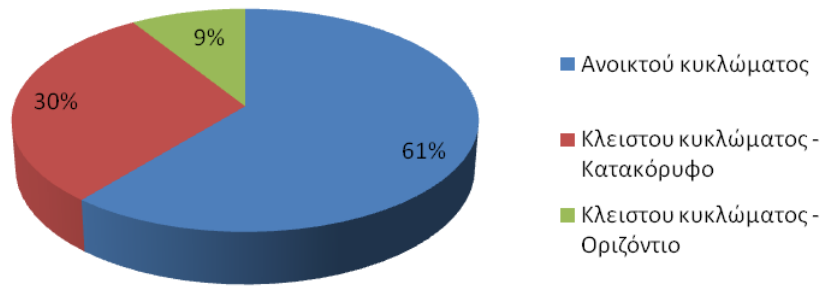
Σχήμα 1-6: Κύριοι τύποι γεωθερμικών αντλιών θερμότητας οριζόντιου τύπου: Εν σειρά (αριστερά) και παράλληλη διαμόρφωση (δεξιά) [3].

Καταλήγοντας, στον Πίνακα και το Σχήμα που ακολουθούν αποτυπώνεται η κατάσταση στην Ελλάδα, αναφορικά με τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα δίνεται η πορεία της εγκατεστημένης ισχύος, της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας και του συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκατεστημένων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Ως συντελεστής χρησιμοποίησης (capacity factor) ορίζεται το πηλίκο της ετήσιας παραγόμενης θερμικής ενέργειας προς τη θερμική ενέργεια που θα παραγόταν αν η αντλία λειτουργούσε καθ' όλη τη διάρκεια του έτους με την ονομαστική της ισχύ. Όπως φαίνεται, η εγκατεστημένη ισχύς αυξάνεται με ελαφρώς μειούμενη τάση, ενώ ο συντελεστής χρησιμοποίησής τους μειώνεται, απόρροια της αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος. Επιπλέον, στο Σχήμα 1-7 παρουσιάζεται ο επιμερισμός της εγκατεστημένης ισχύος στους τύπους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Σύμφωνα με αυτό, η πλειονότητα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας είναι ανοικτού κυκλώματος, σε ποσοστό της τάξης του 60 %, ενώ από τις αντλίες κλειστού κυκλώματος, οι πλέον συναντώμενες είναι οι κατακόρυφου τύπου, σε ποσοστό 30 % της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος.

Πίνακας 1-2: Δεδομένα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας στην Ελληνική αγορά [5].

	1999	2004	2007	2009	2012	2014
Εγκατεστημένη ισχύς (MW)	0.4	4	14	50	100	135
Παραγόμενη ενέργεια (TJ/yr)	3.1	39.1	80	270	486	648
Συντελεστής χρησιμοποίησης	0.25	0.31	0.18	0.17	0.17	0.15

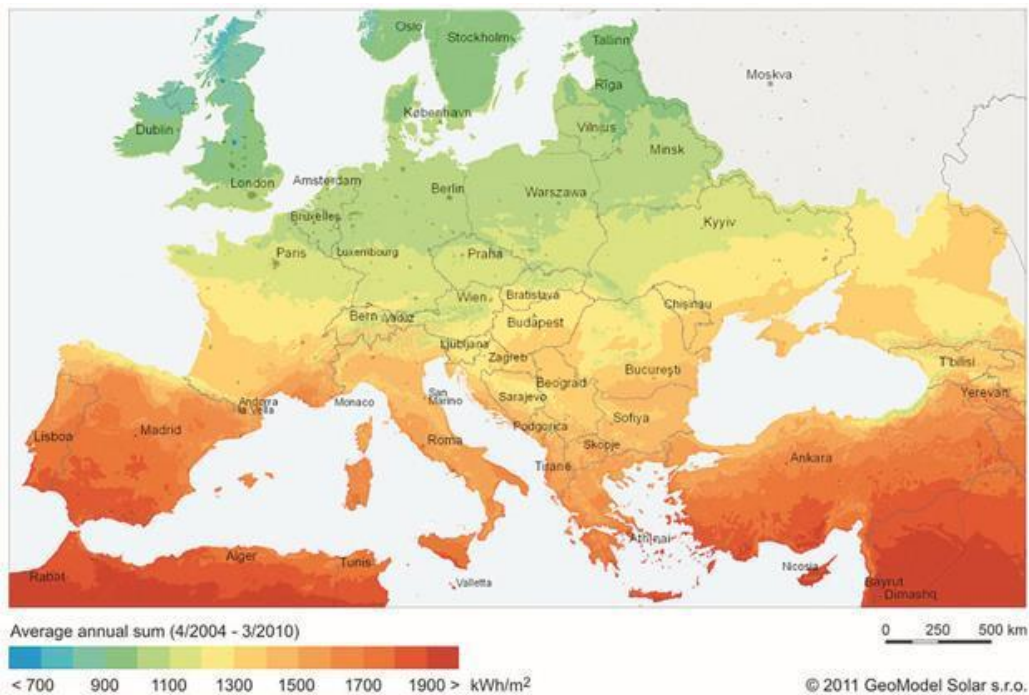




Σχήμα 1-7: Επιμερισμός εγκατεστημένης ισχύος γεωθερμικών αντλιών θερμότητας στην Ελλάδα [6].

### 1.3.3 Ηλιακή ενέργεια

Εκτός της γεωθερμικής ενέργειας, μία από τις σημαντικότερες μορφές Α.Π.Ε. αποτελεί η ηλιακή ενέργεια. Η αξιοποίησή της σε θερμικά συστήματα και συνεπώς σε αντλίες θερμότητας ενδείκνυται σε χώρες με αυξημένο ηλιακό δυναμικό, όπως η Ελλάδα και η ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο Σχήμα.



Σχήμα 1-8: Ετήσια ανηγμένη προσιππουσα ηλιακή ακτινοβολία στην Ευρώπη [7].

Όσον αφορά την αξιοποίησή της σε συστήματα με αντλία θερμότητας, αυτή επιτυγχάνεται με δύο κύριους τρόπους, θερμικά και ηλεκτρικά και αναλύεται σε επόμενες παραγράφους. Ενδεικτικά, η εκμετάλλευσή της γίνεται ως εξής:

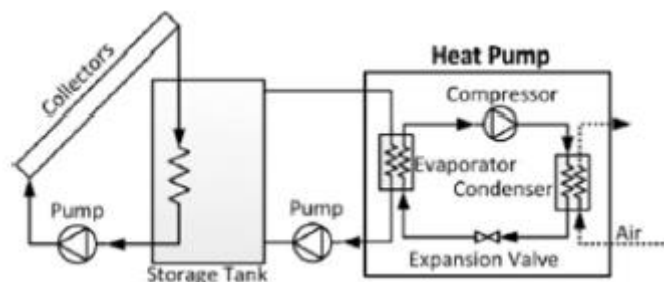
- Με τη χρήση θερμικών ηλιακών συστημάτων που συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπουν σε θερμότητα η οποία αποθηκεύεται. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται ενεργητικά ηλιακά συστήματα ή ηλιοθερμικά συστήματα.
- Με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική.

#### 1.4 Ηλιακά υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας

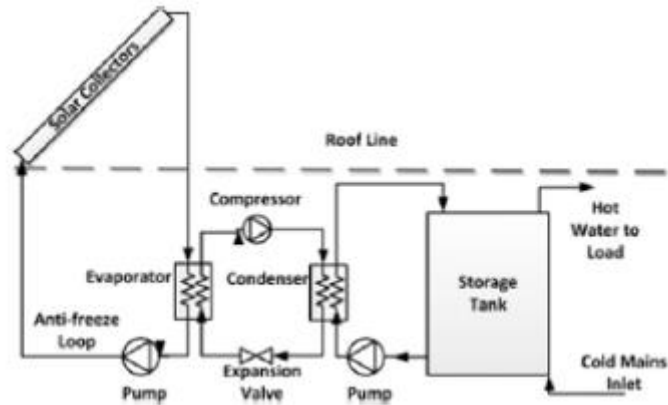
Όσον αφορά τη σύζευξη των αντλιών θερμότητας με ηλιοθερμικά συστήματα, η λειτουργία τους βασίζεται, όπως αναφέρθηκε, στη συλλογή ηλιακής ενέργειας σε μορφή θερμότητας. Οι αντλίες θερμότητας που συνεργάζονται με τέτοια συστήματα καλούνται συνήθως ηλιακά υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας. Προκειμένου να μετατραπεί η ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα, απαραίτητη είναι η ύπαρξη ηλιακών συλλεκτών, ενώ στην πλειονότητα των περιπτώσεων υφίσταται και δοχείο αποθήκευσης για την αντιμετώπιση της μεταβλητότητας της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στα Σχήματα 1-9–1-11 παρατίθενται ορισμένες συνδέσεις αντλιών θερμότητας με ηλιοθερμικά συστήματα [8, 9]. Η λογική των συστημάτων αυτών και γενικότερα της σύνδεσης αντλιών θερμότητας με ηλιοθερμικά συστήματα στηρίζεται στην αύξηση της θερμοκρασίας του ατμοποιητή και επομένως στη μείωση του λόγου πίεσης του κύκλου, γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση του COP της αντλίας.

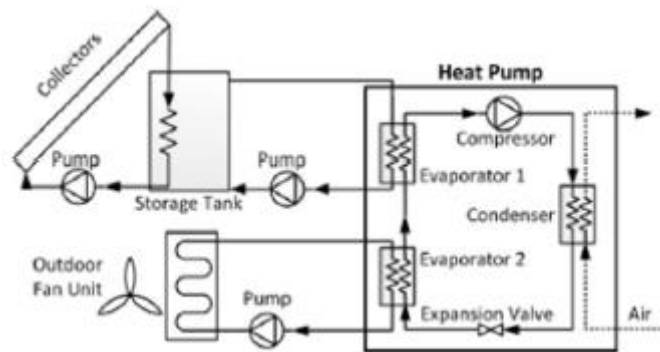
Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 1-9 φαίνεται μία αντλία θερμότητας αέρα-νερού, η οποία λαμβάνει θερμότητα για την ατμοποίηση του εργαζόμενου από δοχείο αποθήκευσης, στο οποίο συλλέγεται η θερμότητα των ηλιακών συλλεκτών. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το δοχείο ψύχεται από την αντλία θερμότητας. Αντίθετα, στο Σχήμα 1-10, η αντλία θερμότητας λαμβάνει θερμότητα απευθείας από τους ηλιακούς συλλέκτες και επομένως, η θερμότητα του ατμοποιητή μπορεί να αυξηθεί ακόμη περισσότερο. Επιπλέον, στο σύστημα αυτό, το δοχείο λαμβάνει θερμότητα έμμεσα από τους ηλιακούς συλλέκτες, μέσω της αντλίας. Τέλος, στο Σχήμα 1-11 δίνεται μία παραλλαγή του Σχήματος 1-9, όπου η αντλία θερμότητας λαμβάνει θερμότητα και από τον αέρα του περιβάλλοντος, στην περίπτωση ανεπάρκειας της ηλιακής ακτινοβολίας, οπότε η θερμοκρασία του δοχείου είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.



Σχήμα 1-9. Ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας αέρα-νερού [8].



Σχήμα 1-10: Ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας νερού-νερού [8].



Σχήμα 1-11: Αντλία θερμότητας διπλής πηγής θερμότητας [8].

## 1.5 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτρικού ρεύματος. Περισσότερα στοιχεία αναφορικά με την αρχή λειτουργίας τους παρουσιάζονται στη συνέχεια.

### 1.5.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση Φ/Β συστημάτων έχει καθιερωθεί ως μία από τις πλέον εφαρμοσμένες τεχνολογίες, με εύρος εφαρμογών που κυμαίνεται από την ηλεκτροδότηση υπολογιστικών μηχανών τσέπης μέχρι κεντρικές μονάδες παραγωγής ενέργειας. Βασικό ρόλο σε αυτό διαδραματίζουν τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα οποία, εντοπίζονται στα εξής:

- Αξιόπιστη και αθόρυβη λειτουργία, με ελάχιστες απαιτήσεις επίβλεψης και συντήρησης και απουσία κινούμενων μερών.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής, που προσεγγίζει τα 25 χρόνια.
- Άμεση σύνδεση σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις, με ελάχιστο παρελκόμενο εξοπλισμό.
- Τεχνολογικά ώριμη και άρα χαμηλού κόστους τεχνολογία.

- Εύκολη επέκταση υπάρχουσας Φ/Β εγκατάστασης.
- Δυνατότητα αποκεντρωμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μεγάλο εύρος ισχύος, από μερικά  $W_p$  έως μεγάλους σταθμούς, της τάξης των  $MW_p$ .

Παρ' όλα αυτά, παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία αφορούν τα εξής:

- Σχετικά χαμηλή απόδοση, της τάξης του 15-23 % [10].
- Εξάρτηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τις καιρικές συνθήκες, όπως την ηλιακή ακτινοβολία, την ηλιοφάνεια, τη θερμοκρασία και τον άνεμο.
- Μείωση της απόδοσής τους με την πάροδο του χρόνου, λόγω γήρανσης του υλικού τους.
- Μείωση της απόδοσής τους λόγω επικαθήσεων, όπως σκόνη και αιθάλη.

### 1.5.2 Αρχή λειτουργίας

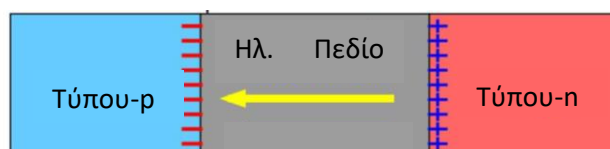
Όπως αναφέρεται σε επόμενη παράγραφο, τα Φ/Β συστήματα αποτελούνται στην πλειοψηφία τους από ημιαγωγούς. Συνεπώς, η φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ενέργειας στηρίζεται αφενός μεν στην ηλιακή ακτινοβολία, αφετέρου στις ιδιότητες των υλικών αυτών σε ατομικό επίπεδο. Ειδικότερα, η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια γίνεται μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου, το οποίο περιγράφεται παρακάτω.

Τα άτομα των ημιαγωγικών υλικών, όπως το πυρίτιο, συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς, οι οποίοι είναι δυνατόν να σπάσουν υπό την επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας ή θερμότητας. Στην περίπτωση αυτή απελευθερώνονται ηλεκτρόνια (αρνητικοί φορείς – n), τα οποία αφήνουν κενές θέσεις, τις οπές (θετικοί φορείς – p). Οι σημαντικότερες ιδιότητες των διατάξεων ημιαγωγών, προέρχονται από τη διάχυση των φορέων τους. Βασική διάταξη για την εκδήλωση των ιδιοτήτων αυτών είναι η ένωση p-n, η οποία σχηματίζεται με την επαφή ενός τμήματος ημιαγωγού τύπου-p και ενός τμήματος τύπου-n. Τότε, ένα μέρος από τις οπές του τμήματος τύπου-p διαχέεται προς το τμήμα τύπου-n, όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως, ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τμήματος τύπου-n διαχέεται προς το τμήμα τύπου-p, όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι επίσης λιγότερα.

Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται μία περιοχή στην οποία υπάρχουν λίγοι φορείς αγωγιμότητας, η οποία ονομάζεται ζώνη εξάντλησης φορέων ή περιοχή αραίωσης. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα παραμένουν στη περιοχή τύπου-n και τα αρνητικά στην περιοχή τύπου-p. Έτσι, δημιουργείται στο εσωτερικό των ημιαγωγών ηλεκτροστατικό πεδίο, το οποίο αντιστέκεται στην κίνηση των φορέων αγωγιμότητας, με συνέπεια την παύση της παραπάνω διάχυσης. Η αποκατάσταση της ισορροπίας γίνεται με επανασυνδέσεις φορέων, μέχρις ότου οι συγκεντρώσεις τους να λάβουν τιμές που ικανοποιούν το νόμο δράσης των μαζών.

Καταλήγοντας, η διάταξη ημιαγωγών που αποτελείται από μία ένωση p-n και από μία ηλεκτρική σύνδεση στο κάθε τμήμα της ονομάζεται δίοδος (Σχήμα 1-12). Μία δίοδος μπορεί

να είναι είτε ορθά είτε ανάστροφα πολωμένη. Στην πρώτη περίπτωση ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται με το τμήμα τύπου-n της διόδου και ο θετικός πόλος με το τμήμα τύπου-p, ενώ στη δεύτερη, ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται με το τμήμα τύπου-p και ο θετικός πόλος με το τμήμα τύπου-n. Το στοιχειώδες τμήμα ενός Φ/Β συστήματος είναι το Φ/Β στοιχείο, το οποίο αποτελείται από πολυάριθμες διόδους.



Σχήμα 1-12: Σχηματική απεικόνιση διόδου [11].

### 1.5.3 Διάκριση φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα Φ/Β συστήματα κατηγοριοποιούνται βάσει διάφορων κριτηρίων. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι βάσει της ισχύος, της σύνδεσής τους στο ηλεκτρικό δίκτυο και του υλικού και του τρόπου κατασκευής τους. Αναλυτικότερα, γίνεται η ακόλουθη διάκριση:

- **Ισχύς:** Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο, τα Φ/Β συστήματα αφορούν μεγάλο εύρος ισχύων και συνεπώς, μπορούν να διαχωριστούν βάσει αυτής. Συγκεκριμένα, τα πλαίσια ταξινομούνται ανάλογα με την ισχύ (η οποία μετράται σε Watt peak,  $W_p$ ), που αποδίδουν στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (Standard Test Conditions – STC). Η ισχύς αυτή αντιστοιχεί σε αυτήν που αποδίδει μια επιφάνεια ενός τετραγωνικού μέτρου, για προσπίπτουσα σε αυτήν ακτινοβολία έντασης  $1000 \text{ W/m}^2$ , σε θερμοκρασία  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  και με αέρια μάζας ίση με 1.5. Στο Σχήμα 1-13 δίνεται η ισχύς των εγκατεστημένων Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα, απ' όπου προκύπτει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό (32 %) αφορά το εύρος ισχύος 10-100  $\text{kW}_p$ , δηλ. πρόκειται για μικρά συστήματα.
- **Ηλεκτρικό δίκτυο:** Αναφορικά με τη σύνδεσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο, οι κύριοι τύποι είναι οι ακόλουθοι [12]:
  - Μη συνδεδεμένα στο δίκτυο: Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας. Συγκεκριμένα, η παραγόμενη ενέργεια χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κάλυψη των ιδιοκαταναλώσεων της εγκατάστασης και του χώρου στον οποίον είναι εγκατεστημένο το σύστημα. Δεδομένου ότι υπάρχει περίπτωση η παραγόμενη ενέργεια να ξεπερνά τη ζητούμενη και λόγω της απουσίας του δικτύου, τα συστήματα αυτά συνδέονται συχνά με μπαταρίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.
  - Συνδεδεμένα στο δίκτυο: Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει η δυνατότητα μέρος ή το σύνολο της παραγόμενης ισχύος να διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στην περίπτωση που μέρος της παραγόμενης ενέργειας

διοχετεύεται στο δίκτυο και η υπόλοιπη προορίζεται για κάλυψη των ιδιοκαταναλώσεων, η εγχεόμενη στο δίκτυο ενέργεια συμψηφίζεται με την απορροφούμενη από το δίκτυο ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενεργειακού συμψηφισμού. Στην περίπτωση της αποκλειστικής τροφοδότησης του δικτύου, γίνεται εικονικός ενεργειακός συμψηφισμός της με την απορροφούμενη ενέργεια [13].

- Υβριδικά συστήματα: Πρόκειται για συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο, με τη διαφορά ότι γίνεται χρήση μπαταριών, οπότε η έγχυση και η απορρόφηση ενέργειας από και προς το δίκτυο ελαχιστοποιείται.

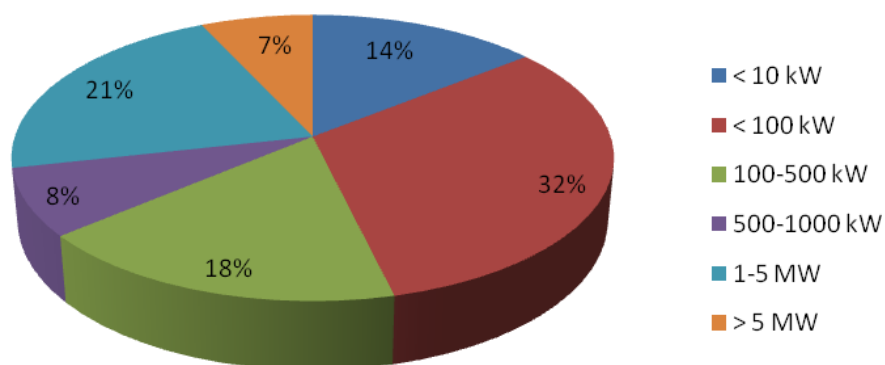
– **Υλικό- Τεχνολογία κατασκευής:** Τα κυριότερα υλικά που χρησιμοποιούνται σε Φ/Β στοιχεία, καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι τα παρακάτω [14, 15]:

- Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο: Τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από καθαρό πυρίτιο σε συνεχές πλέγμα. Λόγω αυτού του γεγονότος εξασφαλίζουν απόδοση της τάξης του 15-19 %, που φτάνει το 22 % σε προηγμένες κατασκευές, ωστόσο εμφανίζουν υψηλό κόστος κατασκευής. Επιπλέον μειονέκτημά τους είναι η μηχανική τους αντοχή, λόγω ψαθυρότητας.
- Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο: Στην περίπτωση αυτή, γίνεται συναρμολόγηση κόκκων κρυστάλλων πυριτίου. Το κόστος τους είναι χαμηλότερο, ενώ παρουσιάζουν διάρκεια ζωής μεγαλύτερη των 25 ετών. Παρ' όλα αυτά, έχουν χαμηλή απόδοση (13-15 %), ενώ έχουν αντίστοιχα προβλήματα ψαθυρότητας.
- Άμορφο πυρίτιο: Εντάσσεται στην ευρύτερη κατηγορία των στοιχείων λεπτού υμενίου (thin-film). Η κατασκευή του γίνεται με την εναπόθεση στρώματος (film) άμορφου πυριτίου σε υπόστρωμα γυαλιού. Λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που απαιτείται για την κατασκευή, μειώνεται το κόστος τους, αλλά αντίστοιχα μειώνεται η απόδοσή τους (5-8 %). Παρ' όλα αυτά, υπερθερμαίνεται λιγότερο και συνεπώς η απόδοσή του δε μειώνεται σημαντικά.
- Τελλουριούχο κάδμιο (CdTe): Ομοίως, ανήκει στην κατηγορία λεπτού υμενίου. Λόγω της αξιοποίησης ακτινοβολίας μικρότερου μήκους κύματος από τα στοιχεία άμορφου πυριτίου, έχουν καλύτερη απόδοση (8-11 %). Ωστόσο, η χρήση τους δυσχεραίνεται από την περιορισμένη διαθεσιμότητα τελλουρίου και την τοξικότητα του καδμίου.
- Σεληνοϊνδιογαλλιούχος χαλκός (CIGS): Και τα συγκεκριμένα στοιχεία αποτελούν στοιχεία λεπτού υμενίου. Ωστόσο, παρουσιάζουν ελαφρώς καλύτερη απόδοση από τα προηγούμενα (11 %), η οποία προσεγγίζει το 20 % σε προηγμένες κατασκευές. Επιπλέον, δεν περιέχουν το τοξικό κάδμιο,

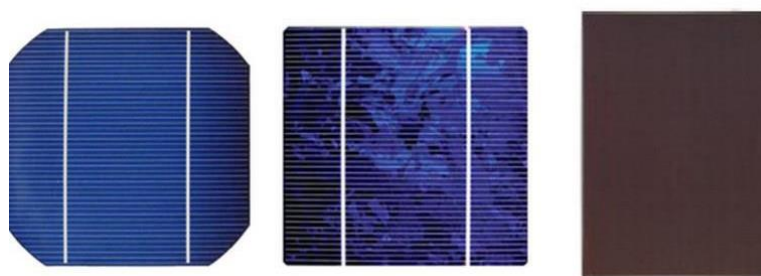
ενώ είναι εξίσου ανθεκτικά σε υπερθέρμανση με τα στοιχεία άμορφου πυριτίου.

- Πολυμερή και οργανικά υλικά: Τα στοιχεία αυτά βρίσκονται ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, έχουν χαμηλό κόστος και χαμηλό βάρος. Εντούτοις, έχουν χαμηλή απόδοση (3-4 %) και είναι επιρρεπή σε μείωση της απόδοσής τους λόγω γήρανσης.

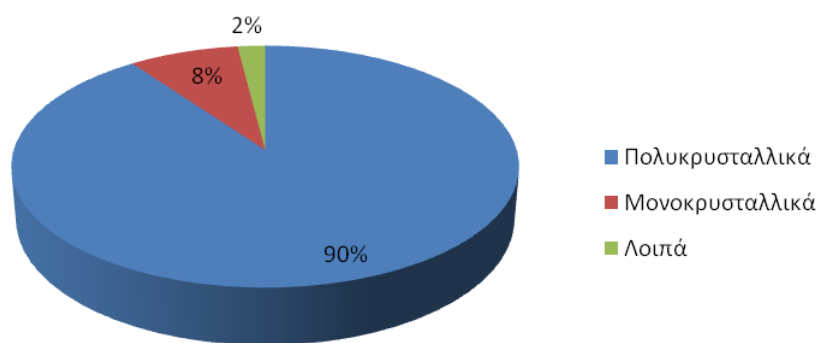
Σύμφωνα με το Σχήμα 1-15, η συντριπτική πλειοψηφία των εγκατεστημένων Φ/Β συστημάτων είναι συστήματα πολυκρυσταλλικού πυριτίου, σε ποσοστό 90 %, ενώ η τεχνολογία του μονοκρυσταλλικού προσεγγίζει το 8 %. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1-16, σε παγκόσμιο επίπεδο, η κατάσταση είναι αντίστοιχη, με τη διαφορά ότι το ποσοστό των πολυκρυσταλλικών Φ/Β συστημάτων είναι σημαντικά μικρότερο, καθώς προσεγγίζει το 65 % της συνολικά εγκατεστημένης ισχύος.



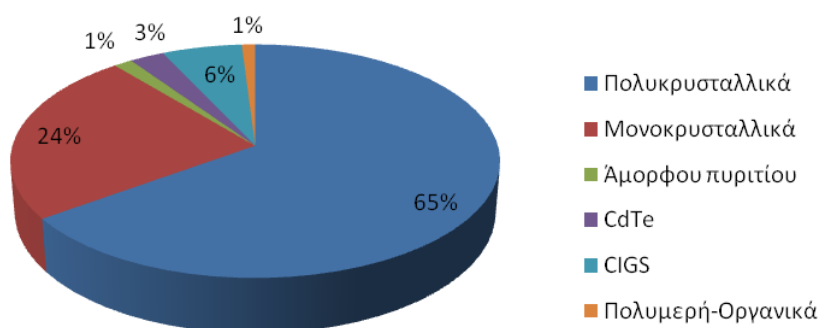
Σχήμα 1-13: Κατανομή Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα βάσει ισχύος [16].



Σχήμα 1-14: Σχηματική απεικόνιση τεχνολογιών κατασκευής Φ/Β κελιών: Μονοκρυσταλλικού πυριτίου (αριστερά), πολυκρυσταλλικού πυριτίου (κέντρο), λεπτού υμενίου (δεξιά).



Σχήμα 1-15: Κατανομή Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα βάσει τεχνολογίας κατασκευής [16].



Σχήμα 1-16: Κατανομή Φ/Β συστημάτων παγκοσμίως βάσει τεχνολογίας κατασκευής [15].

#### 1.5.4 Συγκρότηση φωτοβολταϊκών συστημάτων

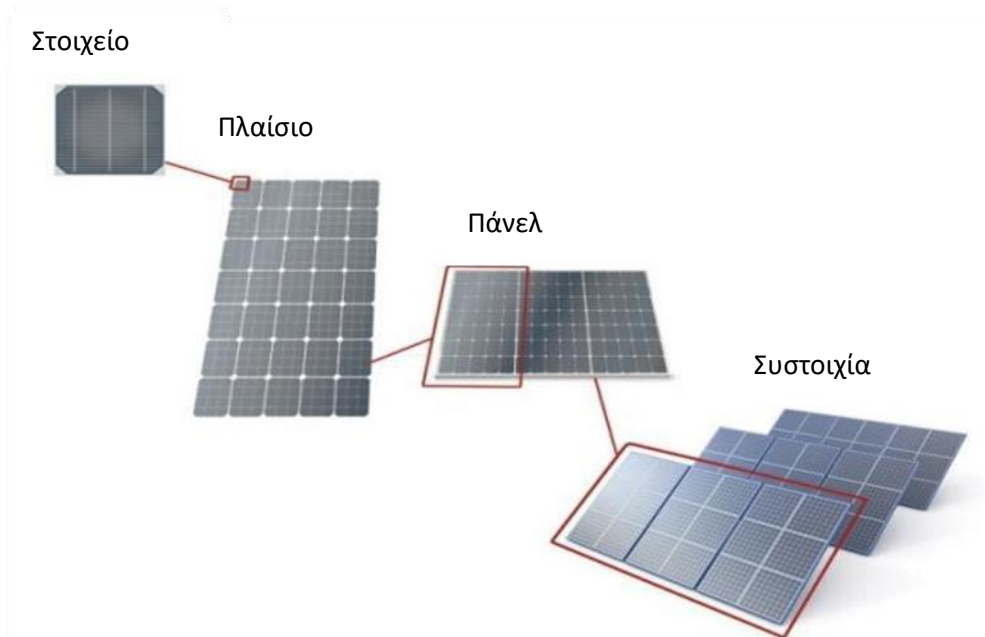
Σύμφωνα με τα παραπάνω, το θεμελιώδες τμήμα ενός Φ/Β συστήματος είναι το Φ/Β στοιχείο, το οποίο κατά σειρά σχηματίζει τις ηλιακές κυψέλες, τα Φ/Β πλαίσια, πάνελ και τις Φ/Β συστοιχίες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-7.

- **Φ/Β στοιχείο-Ηλιακή κυψέλη:** Αποτελεί τον πυρήνα ενός Φ/Β συστήματος. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, πρόκειται ουσιαστικά για διόδους ημιαγωγών σε μορφή δίσκου που, καθώς προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια τους, δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και την πίσω όψη τους.
- **Φ/Β πλαίσιο (module):** Λόγω της μικρής ποσότητας ρεύματος που παράγεται από ένα Φ/Β στοιχείο, γίνεται ο συνδυασμός τους, οπότε συντίθεται ένα Φ/Β πλαίσιο. Τα στοιχεία τοποθετούνται σε ενιαίο πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο και συνδέονται κατάλληλα σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την επίτευξη επιθυμητής τάσης και ισχύος. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια περιβάλλονται από σκελετό και καλύπτονται από γυάλινη επιφάνεια για προστασία έναντι του εξωτερικού περιβάλλοντος.



Συγκεκριμένα, τα ηλιακά στοιχεία στερεώνονται με κολλητική ουσία σε ένα ανθεκτικό φύλλο από μέταλλο (συνήθως αλουμίνιο ή από ενισχυμένο πλαστικό), το οποίο αποτελεί την πλάτη του πλαισίου, ενώ η εμπρός όψη τους καλύπτεται από ένα προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού. Το εμπρός και πίσω φύλλο συγκρατούνται μεταξύ τους, στεγανά και μόνιμα, με τη βοήθεια μιας ταινίας από φυσικό ή συνθετικό ελαστικό και συσφίγγονται με ένα περιμετρικό μεταλλικό περίβλημα. Διαμορφώνεται έτσι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (module), που είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και κυκλοφορεί στο εμπόριο για να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης στη συγκρότηση φωτοβολταϊκών γεννητριών. Δύο ή περισσότερα πλαίσια συνδεδεμένα μαζί αποτελούν ένα πάνελ.

- **Φ/Β συστοιχία (string):** Μία συστοιχία αποτελείται από πλήθος επιμέρους πλαισίων-πάνελ. Λόγω του μεγάλου πλήθους των επιμέρους πλαισίων, πρέπει να ομαδοποιηθούν και να συνδεθούν κατάλληλα. Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, οι συνδέσεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων εντός των πλαισίων γίνονται τόσο εν σειρά όσο και παράλληλα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται η ισχύς εξόδου παρά την ενδεχόμενη βλάβη ενός ή περισσότερων στοιχείων. Ειδικότερα, τα Φ/Β πλαίσια ομαδοποιούνται σε συστοιχίες και τοποθετούνται σε κοινή βάση στήριξης, συνήθως μεταλλική. Οι κυρίως συναντώμενες συστοιχίες είναι οι εξής:
  - Σταθερές συστοιχίες.
  - Στρεφόμενες συστοιχίες, με έναν ή δύο άξονες περιστροφής.
  - Συστοιχίες με ανακλαστήρες / κάτοπτρα.
  - Στρεφόμενες συστοιχίες με κάτοπτρα.

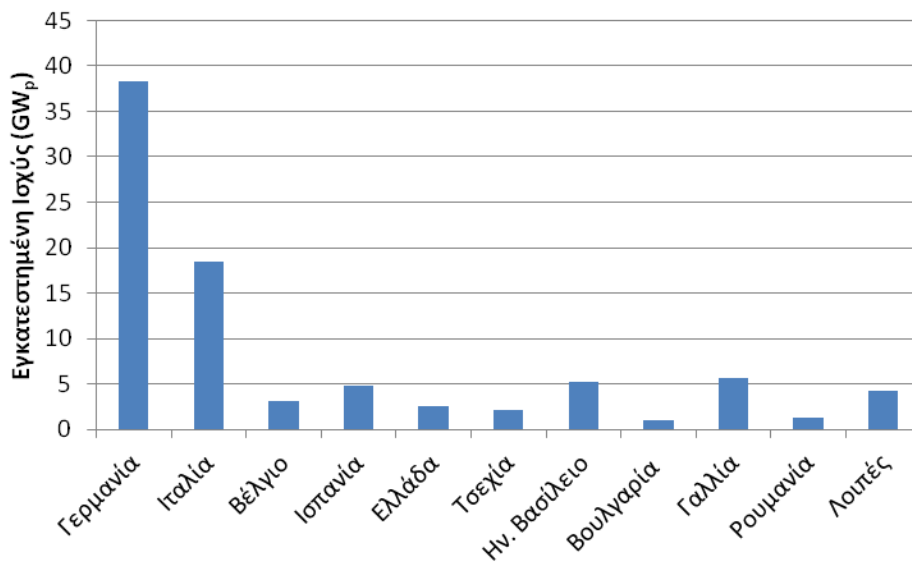


Σχήμα 1-17: Δομικά στοιχεία Φ/Β συστήματος.

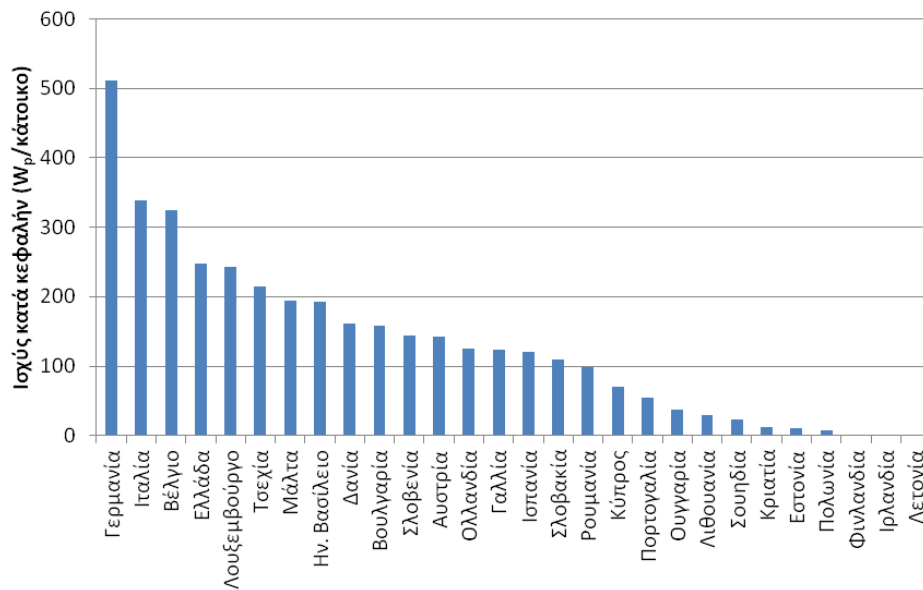
### 1.5.5 Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων

Στα Σχήματα 19,20 παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ισχύς, τόσο συνολικά όσο και κατά κεφαλήν για τις χώρες της Ε.Ε.. Σύμφωνα με αυτό, το μεγαλύτερο ποσοστό Φ/Β συστημάτων βρίσκεται στη Γερμανία. Όσον αφορά την Ελλάδα, η εγκατεστημένη Φ/Β ισχύς της ανέρχεται 2.6 GW<sub>p</sub> [17], ενώ βρίσκεται στην τέταρτη θέση εντός της Ε.Ε., αναφορικά με την κατά κεφαλήν ισχύ. Επισημαίνεται, ότι το μεγαλύτερο ποσοστό εγκαταστάθηκε την περίοδο 2008-2013, ως αποτέλεσμα των ευνοϊκών νομοθετικών διατάξεων σχετικά με την εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων [16]. Όσον αφορά τον επιμερισμό της ανά επίπεδο ισχύος, ισχύουν όσα αναφέρθηκαν παραπάνω (Σχήμα 1-13).

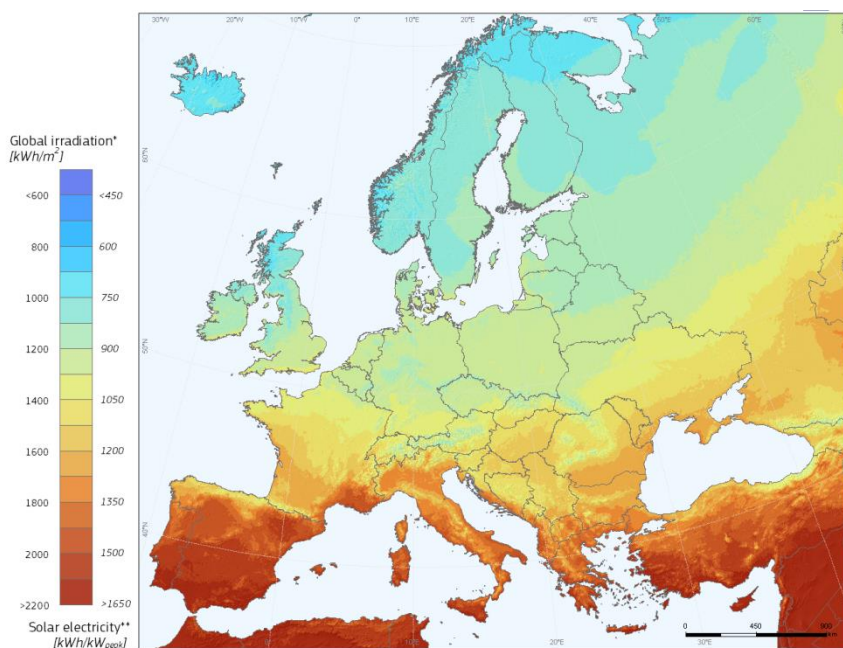
Επιπλέον, στο Σχήμα 1-20 παρατίθεται η ετήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία (kWh/m<sup>2</sup>) σε επίπεδο με νότιο προσανατολισμό και βέλτιστη κλίση, καθώς επίσης και το ετήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από Φ/Β συστήματα, ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος (kWh/kW<sub>p</sub>) στην Ε.Ε.. Σύμφωνα με αυτό και όπως αναμενόταν, το μεγαλύτερο δυναμικό εντοπίζεται στην περιοχή της Μεσογείου και συνεπώς και στην Ελλάδα.



Σχήμα 1-18: Εγκατεστημένη Φ/Β ισχύς στην Ε.Ε. [17].



Σχήμα 1-19: Εγκατεστημένη κατά κεφαλήν Φ/Β ισχύς στην Ε.Ε. [18].



Σχήμα 1-20: Ηλιακό δυναμικό και ετήσια ανηγμένη Φ/Β παραγωγή ενέργειας στην Ε.Ε. [19].

### 1.5.6 Σύζευξη Φ/Β με αντλία θερμότητας

Όσον αφορά τη σύζευξη του Φ/Β συστήματος με την αντλία θερμότητας, οι κύριες μέθοδοι που προτείνονται είναι οι εξής:

- Ηλεκτρικά: Το Φ/Β σύστημα καλύπτει αποκλειστικά τις ηλεκτρικές ανάγκες του συμπιεστή της αντλίας θερμότητας.

- Θερμικά: Όπως αναφέρθηκε, η απόδοση ενός Φ/Β στοιχείου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του. Στο πλαίσιο αυτό, κρίνεται ωφέλιμη η ψύξη του. Έτσι, η απαγόμενη θερμότητα από το Φ/Β μπορεί να προσδοθεί στην αντλία θερμότητας.
- Υβριδικά: Πρόκειται για το συνδυασμό των δύο παραπάνω μεθόδων.

Στην παρούσα εργασία μελετάται αποκλειστικά η ηλεκτρική σύνδεση, λόγω της απλότητάς της και της εύκολης προσάρτησης του Φ/Β συστήματος στην αντλία θερμότητας.

## 1.6 Σκοπός της εργασίας

Σύμφωνα με τα παραπάνω, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Οι αντλίες θερμότητας αποτελούν αποδοτική επιλογή για παραγωγή θέρμανσης και ψύξης, με εύρος πηγών θερμότητας και πλήθος εφαρμογών.
- Τα Φ/Β συστήματα, ιδιαίτερα στην περιοχή της Ελλάδας, αποτελούν άμεση πηγή ηλεκτρικής ενέργειας και η αξιοποίησή τους σε συστήματα με αντλία θερμότητας είναι ενδεδειγμένη.

Συνεπώς, αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διεξοδική μελέτη της σύζευξης των συστημάτων αυτών και ειδικότερα, της ηλεκτρικής σύζευξής τους για οικιακή εφαρμογή. Πιο αναλυτικά, τα ερωτήματα στα οποία καλείται η παρούσα διπλωματική να δώσει απαντήσεις είναι τα ακόλουθα:

- Πώς βελτιστοποιείται η διαστασιολόγηση ενός συστήματος αντλίας θερμότητας με τεχνο-οικονομικά κριτήρια
- Ποια είναι η βέλτιστη επιφάνεια φ/β για σύζευξη με μία αντλία θερμότητας
- Πώς επηρεάζουν τα δομικά στοιχεία του υπό μελέτη κτηρίου την ανταγωνιστικότητα του μελετούμενου συστήματος
- Πώς επηρεάζουν την οικονομική απόδοση του συστήματος οι παράμετροι κόστους
- Πόση εξοικονόμηση επιτυγχάνεται σε ετήσια βάση στις εκπομπές διοξειδίου από το προτεινόμενο σύστημα

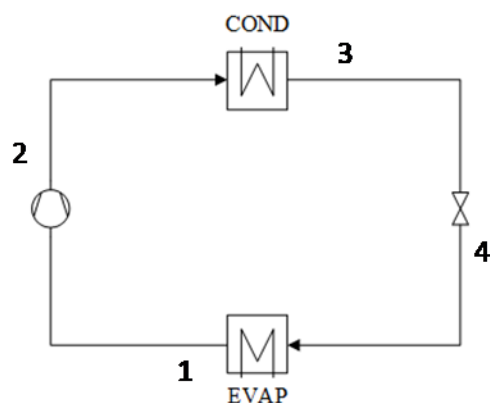
## Κεφάλαιο 2. Αντλία θερμότητας

Αντικείμενο του παρόντος Κεφαλαίου αποτελεί η μελέτη της αντλίας θερμότητας και συγκεκριμένα τα υποσυστήματα που περιλαμβάνει, τις συνθήκες λειτουργίας και τη μοντελοποίησή της.

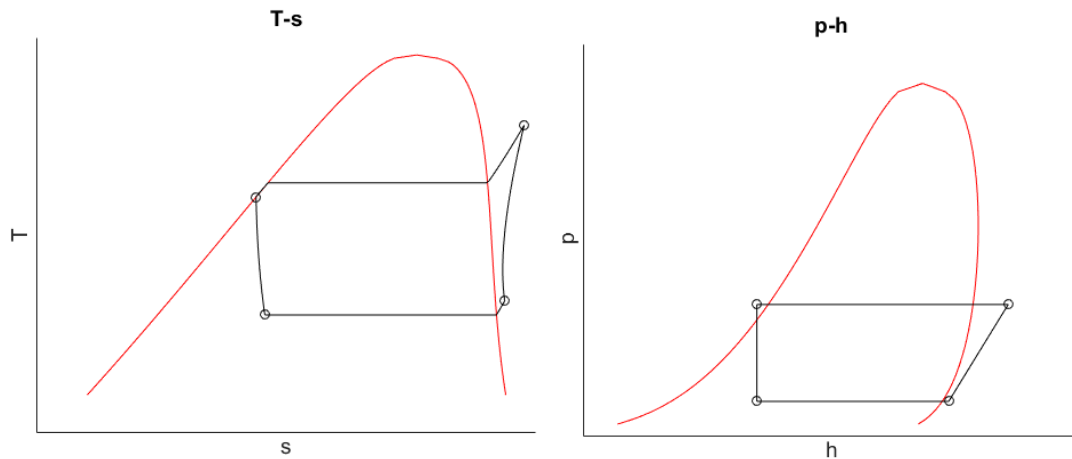
### 2.1 Περιγραφή συστήματος

#### 2.1.1 Λειτουργία αντλίας θερμότητας

Στην παρούσα εργασία, αναφορικά με την αντλία θερμότητας, θα μελετηθεί η συμβατική διάταξη η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 2-1, όπου έχουν αριθμηθεί και οι σχετικές θέσεις. Συγκεκριμένα, το ρευστό από το σημείο 4 εισέρχεται στον ατμοποιητή όπου παραλαμβάνει θερμότητα με αποτέλεσμα να εξέρχεται από αυτόν σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού. Ο λόγος πρόσδοσης υπερθέρμανσης στο ρευστό έγκειται στην προστασία του συμπιεστή έναντι παρουσίας υγρού [20]. Στην συνέχεια, ο ατμός διέρχεται από το συμπιεστή, όπου συντελείται η αύξηση της πίεσής του, με αποτέλεσμα τον υπέρθερμο ατμό υψηλής πίεσης του σημείου 2. Στη συνέχεια, οδηγείται στο συμπυκνωτή όπου συμπυκνώνεται αποβάλλοντας θερμότητα. Το σημείο 3, στην έξοδο του εναλλάκτη θερμότητας αντιστοιχεί σε υπόψυκτο υγρό. Αντίστοιχα με την υπερθέρμανση, η υπόψυξη του ρευστού γίνεται προκειμένου στην είσοδο της εκτονωτικής βαλβίδας να μην υπάρχουν ατμοί του εργαζόμενου μέσου [20]. Το υπόψυκτο υγρό επομένως εισέρχεται στην εκτονωτική βαλβίδα όπου στραγγαλίζεται στην πίεση του ατμοποιητή, με αποτέλεσμα να προκύπτει διφασικό μίγμα. Το μίγμα αυτό έπειτα κατευθύνεται στον ατμοποιητή ώστε να επαναληφθεί ο κύκλος. Η απεικόνιση του κύκλου σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας ( $T-s$ ) και πίεσης-ειδικής ενθαλπίας ( $p-h$ ) φαίνεται στο Σχήμα 2-2.



Σχήμα 2-1: Σχηματική απεικόνιση μελετώμενης αντλίας θερμότητας με αρίθμηση θέσεων.



Σχήμα 2-2: Απεικόνιση κύκλου αντλίας θερμότητας σε διάγραμμα  $T-s$  και  $p-h$ .

Τα παραπάνω αποτελούν τη βασική περιγραφή μίας αντλίας θερμότητας. Στη συνέχεια, αναλύεται το σύστημα που μελετάται στην προκειμένη περίπτωση και συγκεκριμένα, τα μέσα πρόσδοσης και απόρριψης θερμότητας, τη σύνδεσή τους με υφιστάμενα συστήματα ψύξης-θέρμανσης και τα κύρια εξαρτήματά τους.

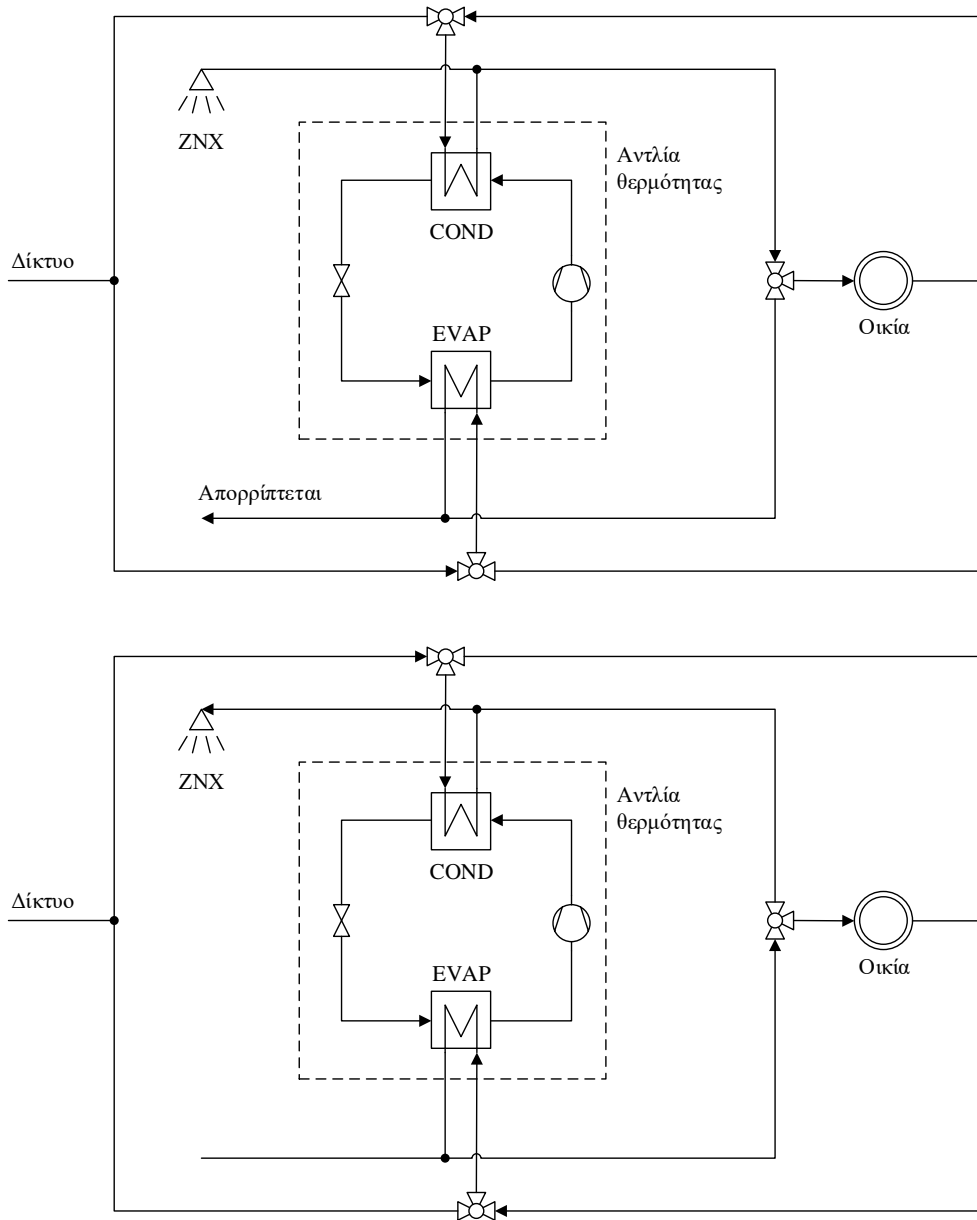
### 2.1.2 Σύνδεση με συνολικό σύστημα

Σχετικά με τα μέσα άντλησης και απόρριψης θερμότητας και όσα αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 1.2.3, οι αντλίες θερμότητας διακρίνονται σε αέρα-αέρα, αέρα-νερού και νερού-νερού, εκ των οποίων η τελευταία παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόδοση λόγω της μικρότερης εξάρτησής της θερμοκρασιακής της ανύψωσης (και άρα της διαφοράς υψηλής και χαμηλής πίεσης) από την εξωτερική θερμοκρασία. Ο συγκεκριμένος τύπος είναι αυτός που μελετάται στα πλαίσια της εργασίας.

Επομένως, το εργαζόμενο μέσο τόσο παραλαμβάνει, όσο και αποδίδει θερμότητα σε αντίστοιχα, ξεχωριστά κυκλώματα νερού. Αναφορικά με αυτό, γίνεται περιγραφή της σύζευξής της με το σύστημα ψύξης-θέρμανσης μίας κατοικίας.

Η ψύξη-θέρμανση γίνεται μέσω ενδοδαπέδιου συστήματος (ή μέσω τερματικών μονάδων ανεμιστήρα-στοιχείου, fan-coils), το οποίο κάνει θέρμανση το χειμώνα και δροσισμό του δαπέδου το καλοκαίρι και τροφοδοτείται με νερό αντίστοιχης θερμοκρασίας από την αντλία θερμότητας. Άρα, συνδέεται τόσο με το συμπυκνωτή, όσο και με τον ατμοποιητή της αντλίας θερμότητας, για την παροχή θέρμανσης και ψύξης, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι το νερό που θερμαίνεται από την αντλία κατά τη θερινή λειτουργία, όπως και το νερό που ψύχεται κατά τη χειμερινή περίοδο, προέρχεται από το δίκτυο και δε μελετάται η χρήση του στο κτήριο. Ωστόσο, σημειώνεται ότι το ζεστό νερό που προκύπτει το καλοκαίρι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παροχή ζεστού νερού χρήσης (ZNX). Ενδεικτική απεικόνιση της λειτουργίας του συστήματος στις δύο αυτές περιπτώσεις λειτουργίας φαίνεται στο επόμενο Σχήμα. Όπως φαίνεται, ανάλογα με την περίοδο, το σύστημα ψύξης

θέρμανσης συνδέεται είτε με το συμπυκνωτή είτε με τον ατμοποιητή της αντλίας θερμότητας, μέσω τρίοδης βαλβίδας.



Σχήμα 2-3: Τρόπος λειτουργίας του συστήματος: χειμερινή λειτουργία (πάνω), θερινή λειτουργία (κάτω).

### 2.1.3 Εξαρτήματα αντλίας θερμότητας

Πέρα από τη σύζευξη τα γενικότερα στοιχεία που παρουσιάστηκαν παραπάνω, στο σημείο αυτό αναλύονται τα κύρια εξαρτήματα που αποτελούν της αντλίας θερμότητας. Σχετικά με αυτό, η αντλία θερμότητας αποτελείται στη βάση της από το συμπιεστή, τους δύο

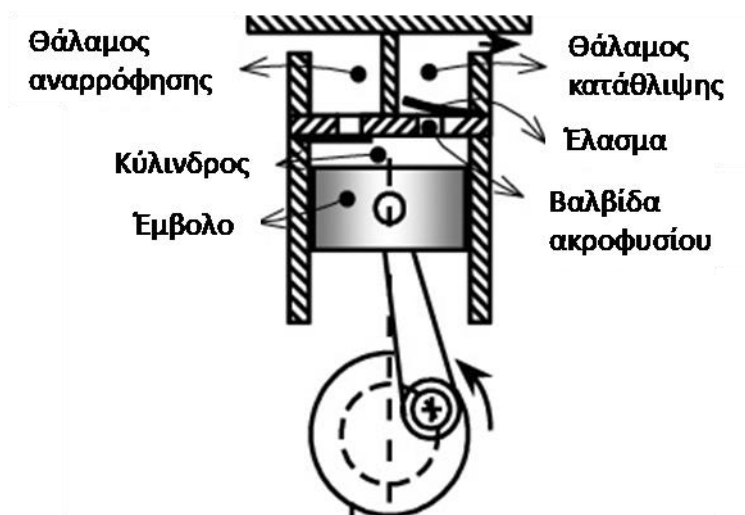
εναλλάκτες θερμότητας (ατμοποιητής και συμπυκνωτής) και την εκτονωτική βαλβίδα, για τα οποία περισσότερα στοιχεία δίνονται παρακάτω.

– Συμπιεστής:

Οι συμπιεστές χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τους ογκομετρικούς (θετικής μετατόπισης) και τους δυναμικούς, που διαφέρουν ως προς την αρχή λειτουργίας τους. Οι πρώτοι λειτουργούν εγκλωβίζοντας το ρευστό (αέριο), το οποίο συμπιέζουν μειώνοντας τον διαθέσιμο όγκο. Αντίθετα, οι δυναμικοί στηρίζονται στην αύξηση της ταχύτητας του ρευστού και τη μετέπειτα μείωσή της για την αύξηση της πίεσης.

Εξαιτίας του τρόπου λειτουργίας τους, διαφέρουν ως προς την παροχή που διακινούν και την αύξηση της πίεσης που επιτυγχάνουν. Συγκεκριμένα, οι ογκομετρικοί χαρακτηρίζονται από αυξημένη συμπίεση αλλά χαμηλή παροχή, ενώ για τους δυναμικούς ισχύει το αντίστροφο [21]. Με βάση αυτό, στις εφαρμογές αντλιών θερμότητας χρησιμοποιούνται κυρίως οι ογκομετρικοί. Παρ' όλα αυτά, οι ογκομετρικοί διακρίνονται σε επιμέρους κατηγορίες, οι κυριότερες των οποίων δίνονται παρακάτω:

- Παλινδρομικοί (reciprocating) συμπιεστές: Όπως δηλώνει και το όνομά τους, η συμπίεση γίνεται μέσω της παλινδρομικής κίνησης ενός εμβόλου (Σχήμα 2-4). Ο ατμός εισέρχεται από το θάλαμο αναρρόφησης στον κύλινδρο όπου συμπιέζεται και μετά, εξέρχεται από το θάλαμο κατάθλιψης σε υψηλή πίεση.

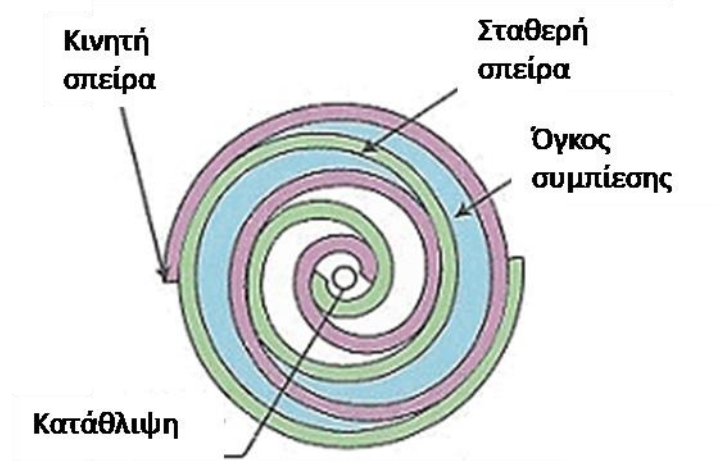


Σχήμα 2-4: Σχηματική απεικόνιση παλινδρομικού συμπιεστή μονού εμβόλου [22].

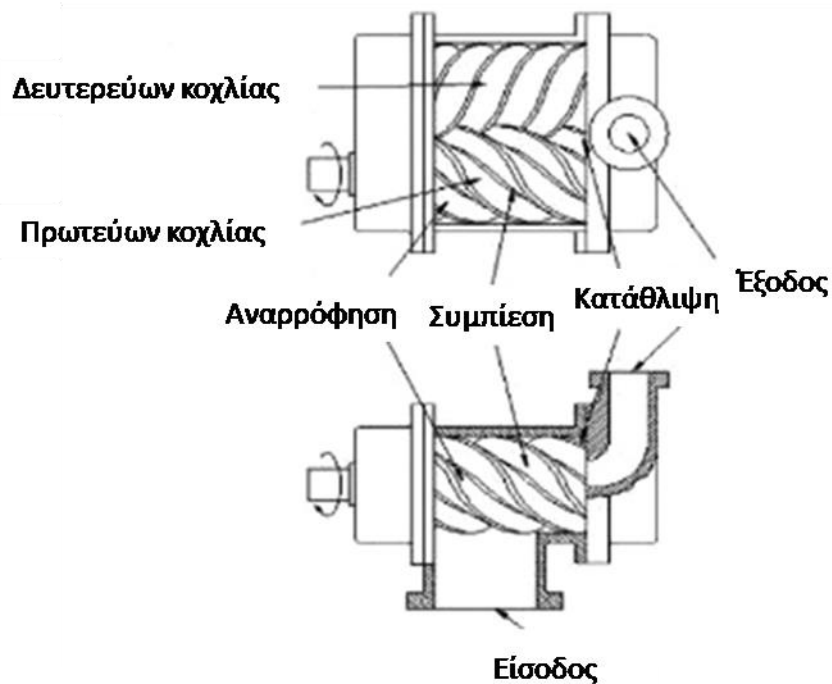
- Περιστροφικοί (rotary) συμπιεστές: Σε αυτήν την κατηγορία συμπιεστών, η συμπίεση γίνεται μέσω της περιστροφής κάποιου εξαρτήματος και όχι μέσω εμβόλων. Οι κυριότεροι τύποι είναι ο ελικοειδής (scroll), ο κοχλιωτός (screw) και οι πτερυγιοφόροι (vane) και φαίνονται στα Σχήματα 2-4-2-7. Στους πρώτους, η συμπίεση γίνεται στους όγκους ρευστού που σχηματίζονται κατά την περιστροφή της μίας σπείρας (κινητή σπείρα) μέσα



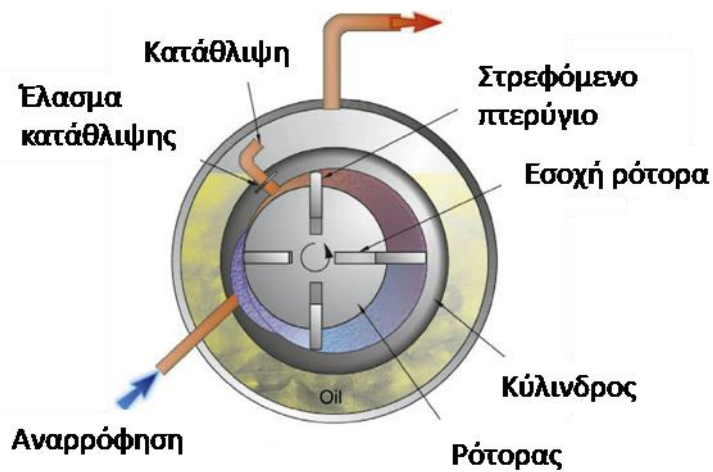
στην άλλη (σταθερή σπείρα), ενώ στους δεύτερους, στους όγκους που σχηματίζονται μεταξύ των δύο κοχλιών. Τέλος, στους πτερυγιοφόρους, σχηματίζονται όγκοι οι οποίοι μειώνονται κατά την περιστροφή λόγω της εκκεντρότητας του άξονα. Από τους συμπιεστές αυτούς, ο πτερυγιοφόρος δε βρίσκει πλέον ευρεία εφαρμογή [23], ενώ οι κοχλιωτοί χρησιμοποιούνται σε αντλίες θερμότητας μεγάλης ισχύος [21]. Έτσι, στην προκειμένη περίπτωση επιλέγεται ελικοειδής συμπιεστής. Συγκεκριμένα, επιλέγονται ερμητικοί ελικοειδείς συμπιεστές (για χαμηλό κόστος) της εταιρίας Copeland [24] (σειρές ZB, ZF, ZP, ZR).



Σχήμα 2-5: Σχηματική απεικόνιση ελικοειδούς συμπιεστή [25].



Σχήμα 2-6: Σχηματική απεικόνιση κοχλιωτού συμπιεστή [26].



Σχήμα 2-7: Σχηματική απεικόνιση πτερυγιοφόρου συμπιεστή [23].

- Εναλλάκτες θερμότητας:  
Οι πιο διαδεδομένες κατηγορίες εναλλακτών θερμότητας είναι οι εναλλάκτες κελύφους-σωλήνων και οι πλακοειδείς. Σχετικά με τους πλακοειδείς (plate heat exchangers), αυτοί χωρίζονται επιπλέον σε εναλλάκτες με φλάντζα (gasketed) και εναλλάκτες με συγκόλληση (brazed), ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των πλακών. Στα πλεονεκτήματα των κελύφους-σωλήνων ανήκει η δυνατότητα λειτουργίας ακόμη και με εξολοκλήρου αέρια ρεύματα, ενώ οι πλακοειδείς χαρακτηρίζονται από μικρότερες απαιτήσεις χώρου [27]. Επειδή όμως στην εργασία αυτή, οι εναλλάκτες δε λειτουργούν με αέρια ρεύματα και επειδή πρόκειται για οικιακή εφαρμογή, οπότε προτιμάται λύση μικρότερου όγκου, επιλέγονται πλακοειδείς εναλλάκτες. Γι' αυτόν το λόγο, επιλέγονται επίσης συγκολλητοί εναλλάκτες και ειδικότερα, της εταιρίας Alfa Laval [28].
- Εκτονωτική βαλβίδα: Οι εκτονωτικές βαλβίδες πραγματοποιούν τη μείωση της πίεσης, από την υψηλή (συμπύκνωσης) στη χαμηλή (ατμοποίησης). Υπάρχουν αρκετοί τύποι, οι οποίοι διαφέρουν ως προς τον τρόπο ρύθμισής τους και τον τρόπο λειτουργίας τους. Οι κυριότεροι περιλαμβάνουν τις θερμοστατικές, τις αυτόματες, τις ηλεκτρονικές και τους τριχοειδείς σωλήνες [29]. Όσον αφορά τους πρώτους, η λειτουργία τους έγκειται στη διατήρηση της υπερθέρμανσης στην έξοδο του ατμοποιητή σε συγκεκριμένο επίπεδο, για την αποφυγή συμπυκνωμάτων στο συμπιεστή. Αντίστοιχα, οι αυτόματες διατηρούν σταθερή την πίεση στην έξοδό τους, ενώ οι ηλεκτρονικές ρυθμίζονται μέσω κάποιου συστήματος ελέγχου. Ωστόσο, τα παραπάνω δεν αφορούν τη συγκεκριμένη εργασία και δε γίνεται περαιτέρω ανάλυσή τους.

## 2.2 Συνθήκες λειτουργίας και εργαζόμενα μέσα

### 2.2.1 Συνθήκες λειτουργίας

Παραπάνω δόθηκε η περιγραφή της σύζευξης της αντλίας θερμότητας με ένα οικιακό σύστημα θέρμανσης-ψύξης. Δεδομένου ότι η αντλία θερμότητας τροφοδοτεί ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης-δροσισμού, οι θερμοκρασίες προσαγωγής θερμού και ψυχρού νερού ορίζονται ίσες με 35 και 12.5 °C, αντίστοιχα. Οι θερμοκρασίες επιστροφής τους δίνονται στον επόμενο Πίνακα.

Ωστόσο, εκτός από το ενδοδαπέδιο σύστημα, η αντλία θερμότητας λαμβάνει η απορρίπτει θερμότητα από το δίκτυο (καλοκαίρι και χειμώνας, αντίστοιχα). Η θερμοκρασία του νερού εισόδου του δικτύου ορίζεται κάθε φορά ως η θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_{amb}$ ), προσαυξημένη κατά 7.5 °C, ενώ η αύξηση/μείωση της θερμοκρασίας του στο συμπυκνωτή/ατμοποιητή, ορίζεται ίση με 5 °C. Οι θερμοκρασίες του νερού φαίνονται στον Πίνακα 2-1.

Πίνακας 2-1: Θερμοκρασίες νερού συμπυκνωτή και ατμοποιητή συναρτήσει περιόδου λειτουργίας.

Εποχή	Χειμώνας		Καλοκαίρι	
	Εισόδου (°C)	Εξόδου (°C)	Εισόδου (°C)	Εξόδου (°C)
Θερμοκρασία				
Συμπυκνωτής	25.0	35.0	$T_{amb} + 7.5$	$T_{amb} + 12.5$
Ατμοποιητής	$T_{amb} + 7.5$	$T_{amb} + 2.5$	20.0	12.5

Όσον αφορά το εργαζόμενο μέσο, οι συνθήκες λειτουργίας του ορίζονται μέσω των εναλλακτών θερμότητας και των βαθμών υπερθέρμανσης και υπόψυξης στον ατμοποιητή και το συμπυκνωτή αντίστοιχα. Ειδικότερα, ως συνθήκη τίθεται η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά των ρευμάτων σε κάθε εναλλάκτη (pinch point). Οι τιμές αυτού του μεγέθους σε κάθε εναλλάκτη, καθορίζεται από το εάν η αντλία θερμότητας λειτουργεί στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας της (προσεγγίζει το μέγιστο φορτίο λειτουργίας για κάθε περίοδο) ή εκτός αυτού. Στην περίπτωση του ονομαστικού σημείου, ορίζεται συγκεκριμένη τιμή, ενώ εκτός του σημείου λειτουργίας ορίζεται εύρος τιμών. Οι τιμές αυτές, όπως και η επιθυμητή υπερθέρμανση και υπόψυξη, για κάθε εναλλάκτη και σε συνάρτηση με το φορτίο λειτουργίας, φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 2-2: Pinch points εναλλακτών και επίπεδο υπερθέρμανσης και υπόψυξης εργαζόμενου μέσου συναρτήσει φορτίου και περιόδου λειτουργίας.

Φορτίο λειτουργίας	Ονομαστικό	Μερικό
Pinch point συμπυκνωτή (°C)	7	5-6
Pinch point ατμοποιητή (°C)	4	4-5
Υπερθέρμανση (°C)	5	5
Υπόψυξη(°C)	5	5

## 2.2.2 Εργαζόμενα μέσα

Όσον αφορά το εργαζόμενο μέσο της αντλίας θερμότητας, υπάρχει πληθώρα ρευστών που χρησιμοποιούνται, γεγονός που επιτρέπει την επιλογή του βέλτιστου, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας. Ενδεικτικά, από τους διάφορους τύπους ρευστών που υπάρχουν, χρησιμοποιούνται, λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών [30], οι υδροφθοράνθρακες, οι υδροφθορολεφίνες και οι φυσικοί υδρογονάνθρακες.

Στην παρούσα εργασία, τα ρευστά που εξετάζονται ανήκουν στην κατηγορία των υδροφθορανθράκων και επιλέχθηκαν έτσι, ώστε να είναι συμβατοί με τους συμπιεστές που εκλέχθηκαν παραπάνω. Συγκεκριμένα, τα μελετώμενα ρευστά είναι τα R134a, R404A, R410A και R407C. Τα ρευστά αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως σε αντλίες θερμότητας. Στον επόμενο Πίνακα καταγράφονται οι βασικές του ιδιότητες, η κρίσιμη πίεση και θερμοκρασία και οι δύο βασικότεροι περιβαλλοντικοί δείκτες, το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential – GWP) και το δυναμικό εξασθένησης της στιβάδας του όζοντος (Ozone Depletion Potential – ODP).

Πίνακας 2-3: Ιδιότητες εξεταζόμενων ρευστών.

Εργαζόμενο μέσο	Κρίσιμη πίεση (bar)	Κρίσιμη θερμοκρασία (°C)	GWP	ODP
R134a	40.59	101.06	1430	0
R404A	37.35	72.14	3922	0
R410A	47.70	70.17	2088	0
R407C	46.34	86.05	1774	0

Όπως φαίνεται, τα ρευστά καλύπτουν σημαντικό εύρος κρίσιμης πίεσης και θερμοκρασίας, ενώ έχουν όλα μηδενικό ODP. Ωστόσο, όλα τα ρευστά έχουν υψηλή τιμή GWP. Όμως, στόχος της παρούσας μελέτης δεν είναι ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της εγκατάστασης και γι' αυτό δεν εξετάστηκαν πιο «φιλικά προς το περιβάλλον» ρευστά. Σημειώνεται ότι όλα τα παραπάνω ρευστά συμπεριφέρονται ως καθαρές ουσίες, εκτός από το R407C, το οποίο έχει ζεοτροπική συμπεριφορά [23]. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μεταβλητή θερμοκρασία κορεσμού υπό σταθερή πίεση, λόγω του οποίου, η τιμή της υπερθέρμανσης του Πίνακα 2-2 ορίζεται για το ρευστό αυτό στους 7 °C.

## 2.3 Θερμοδυναμική μοντελοποίηση

Με βάση όσα αναφέρθηκαν στην αρχή του Κεφαλαίου, παρακάτω παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του κύκλου, εστιάζοντας στα επιμέρους εξαρτήματά του. Σημειώνεται ότι ακολουθείται η αρίθμηση των Σχημάτων 2-1, 2-2. Συνεπώς, για κάθε μεταβολή ισχύουν τα εξής:

- Ατμοποιητής (Μεταβολή 4-1):

Στον ατμοποιητή εισέρχεται διφασικό μίγμα το οποίο, μέσω του νερού ατμοποιείται. Σημειώνεται ότι η ατμοποίηση χωρίζεται σε δύο στάδια, αυτό της ατμοποίησης και αυτό

της υπόψυξης (για την παροχή ξηρού ατμού-υπέρθερμου) στο συμπιεστή. Η μεταβολή θεωρείται ισόθλιπτη, αμελώντας τις πτώσεις πίεσης που λαμβάνουν χώρα. Έτσι, αμελώντας τις απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον, το ισοζύγιο θερμότητας στον εναλλάκτη γίνεται:

$$\dot{m}(h_1 - h_4) = \dot{m}_{evap}\Delta h_{evap} \quad (1)$$

όπου  $\dot{m}$ ,  $\dot{m}_{evap}$  οι παροχές μάζας του εργαζόμενου μέσου της αντλίας θερμότητας και του νερού πρόσδοσης θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο,  $h_i$  οι ειδικές ενθαλπίες του εργαζόμενου μέσου εκατέρωθεν του εναλλάκτη και  $\Delta h_{evap}$  η μεταβολή της ειδικής ενθαλπίας του νερού λόγω πρόσδοσης θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο.

– Συμπιεστής (Μεταβολή 1-2)

Στο συμπιεστή πραγματοποιείται αύξηση της πίεσης του ρευστού. Η μεταβολή που συντελείται δεν είναι ιδανική και συνεπώς χαρακτηρίζεται από έναν ισεντροπικό βαθμό απόδοσης  $\eta_{is,c}$ , ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$\eta_{is,c} = \frac{h_{2is} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (2)$$

όπου  $h_{2is}$  το σημείο στην έξοδο του συμπιεστή, αν η συμπίεση πραγματοποιούταν ισεντροπικά.

Η τιμή του ισεντροπικού β.α., ο οποίος καθορίζει και τη συνολική μεταβολή προκύπτει από τα δεδομένα που παρέχει ο κατασκευαστής, σύμφωνα με αυτά που αναφέρονται σε επόμενο Κεφάλαιο.

– Συμπυκνωτής (Μεταβολή 2-3):

Αντίστοιχα με τον ατμοποιητή, γίνεται η παραδοχή ότι η μεταβολή πραγματοποιείται υπό σταθερή πίεση και δίχως απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον, ενώ η συνολική μεταβολή αποτελείται από την αφαίρεση της υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου, τη συμπύκνωσή του και τέλος την υπόψυξή του. Ομοίως, η βασική σχέση που διέπει τη μεταβολή αφορά το ισοζύγιο ισχύος και είναι η εξής:

$$\dot{m}(h_2 - h_3) = \dot{m}_{cond}\Delta h_{cond} \quad (3)$$

όπου  $\dot{m}_{cond}$  η παροχή μάζας του εργαζόμενου του νερού απόρριψης θερμότητας στο και  $\Delta h_{cond}$  η αύξηση της ειδικής ενθαλπίας του νερού λόγω της θέρμανσής του.

– Εκτονωτική βαλβίδα (Μεταβολή 2-3):

Στην εκτονωτική βαλβίδα συντελείται η μείωση της πίεσης του εργαζόμενου μέσου από την υψηλή πίεση (πίεση συμπύκνωσης) στη χαμηλή (πίεση ατμοποίησης), προτού εισέλθει στον

ατμοποιητή. Κατά τη μεταβολή αυτή δεν παράγεται έργο, ενώ η συναλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον είναι αμελητέα. Συνεπώς, από τον 1<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό νόμο, προκύπτει ότι η διεργασία πραγματοποιείται ισενθαλπικά, δηλαδή:

$$h_3 = h_2 \quad (4)$$

– Λοιπές μεταβολές:

Ως λοιπές μεταβολές λογίζονται οι μεταβολές που οφείλονται στο υπόλοιπο κύκλωμα, δηλ. τις σωληνώσεις, τις βαλβίδες και λοιπά στοιχεία όπως αισθητήρες. Οι μεταβολές αυτές θεωρούνται αμελητέες, δίχως πτώσεις πίεσης και απώλειες θερμότητας. Συνεπώς, όλες οι μεταβολές αφορούν αποκλειστικά τα κύρια εξαρτήματα της αντλίας θερμότητας (εναλλάκτες θερμότητας, συμπιεστής, εκτονωτική βαλβίδα).

– Συντελεστές απόδοσης:

Στόχος της μοντελοποίησης της αντλίας θερμότητας είναι ο υπολογισμός των ιδιοτήτων του εργαζόμενου μέσου και των ρευμάτων νερού προς το συμπυκνωτή και τον ατμοποιητή αντίστοιχα, με απώτερο σκοπό τον υπολογισμό της κατανάλωσής της ώστε, σε επόμενο στάδιο, να εκτιμηθεί το ενεργειακό –και οικονομικό– όφελος από την εφαρμογή της. Αναφορικά με αυτό, ορίζονται μεγέθη που χαρακτηρίζουν την απόδοση του κύκλου.

Ωστόσο, για τον υπολογισμό τους, βασικό μέγεθος αποτελεί το φορτίο λειτουργίας (ωφέλιμο φορτίο), το οποίο αντιστοιχεί στον ατμοποιητή για τη θερινή περίοδο και στο συμπυκνωτή τη χειμερινή. Συνεπώς, το φορτίο αυτό υπολογίζεται ως εξής:

• Χειμώνας:

$$Q_u = Q_{cond} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (5)$$

• Καλοκαίρι:

$$Q_u = Q_{evap} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (6)$$

Επιπλέον, ορίζεται η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς που πρέπει να προσδοθεί στο συμπιεστή, ως:

$$W_t = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (7)$$

Βάσει αυτών, ορίζεται ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP) του κύκλου, ως το πηλίκο των παραπάνω μεγεθών:

$$COP = \frac{Q_u}{W_t} \quad (8)$$

Αντίστοιχα, ορίζεται και ο COP του αντίστοιχου κύκλου Carnot:

$$COP_C = \frac{T_h}{T_h - T_c} \quad (9)$$

όπου  $T_h, T_c$  η υψηλή και χαμηλή θερμοκρασία του κύκλου, αντίστοιχα (σημεία 2, 4).

Η διαδικασία υπολογισμού είναι η εξής: Δεδομένων των φορτίων λειτουργίας για τις δύο περιόδους, και με δεδομένες τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του νερού από τους εναλλάκτες θερμότητας (Πίνακας 2-1), γίνεται επίλυση του κύκλου για διάφορα ζεύγη θερμοκρασιών ατμοποίησης-συμπύκνωσης έτσι ώστε, με βάση την παροχή μάζας που προκύπτει από την επίλυση του κύκλου, να ικανοποιούνται τα pinch points στους εναλλάκτες (Πίνακας 2-2).

Για το σκοπό αυτό έχει αναπτυχθεί κώδικας υπολογισμού στο περιβάλλον Matlab [31]. Στους κώδικες αυτούς, τα θερμοδυναμικά μεγέθη ελήφθησαν με χρήση του λογισμικού CoolProp [32].

## Κεφάλαιο 3. Φωτοβολταϊκό σύστημα

Στόχος του παρόντος Κεφαλαίου είναι η ανάλυση του Φ/Β συστήματος ώστε στη συνέχεια της εργασίας να καταστεί δυνατή η σύζευξή τους με το υποσύστημα της αντλίας θερμότητας που εξετάστηκε προηγουμένως. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη περιλαμβάνει αφενός την περιγραφή του συστήματος των φωτοβολταϊκών στοιχείων και από τί αποτελείται και αφετέρου τη μοντελοποίηση του.

### 3.1 Περιγραφή συστήματος

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 1, ένα Φ/Β σύστημα έχει ως δομικό του στοιχείο το Φ/Β στοιχείο/κυψέλη, τα οποία κατά σειρά σχηματίζουν το πάνελ, τη συστοιχία και τέλος το συνολικό Φ/Β σύστημα. Δεδομένου ωστόσο ότι στο εμπόριο υφίστανται μεμονωμένα πάνελ και όχι Φ/Ω στοιχεία, η περιγραφή του συστήματος θα γίνει με βάση τα πάνελ. Συγκεκριμένα, πρέπει να καθορισθεί ο τύπος τους, το πλήθος και η διάταξή τους. Σημειώνεται ότι στη μελετώμενη διάταξη δε συμπεριλαμβάνονται συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως μπαταρίες, δεδομένου ότι πρόκειται για εφαρμογή σε περιοχή διασυνδεδεμένη στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Όσον αφορά τον τύπο τους, οι κυριότεροι, σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο, περιλαμβάνουν τα πάνελ μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν πολυκρυσταλλικά πάνελ, λόγω της σχετικά ικανοποιητικής απόδοσής και του χαμηλότερου κόστους τους. Ειδικότερα, επιλέχθηκε το μοντέλο T660P ονομαστικής ισχύος 275 W, της εταιρίας TALESUN [33], τα βασικά χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Αναφορικά με το πλήθος των πάνελ που απαρτίζουν το ολοκληρωμένο σύστημα και τον τρόπο σύνδεσής τους, αυτά καθορίζονται από τρεις κύριους παράγοντες, την παραγόμενη ισχύ, την αναπτυσσόμενη τάση στα άκρα του συστήματος και το συνολικά παραγόμενο ρεύμα. Όσον αφορά την ισχύ του συστήματος, αυτή προκύπτει από την παραγόμενη ισχύ ενός πάνελ πολλαπλασιασμένης επί το συνολικό πλήθος των πάνελ. Για την παραγόμενη τάση, αυτή προκύπτει από την αναπτυσσόμενη τάση του ενός πάνελ επί το πλήθος των παράλληλα συνδεδεμένων πάνελ, ενώ το παραγόμενο ρεύμα, ισούται με το παραγόμενο ρεύμα επί το πλήθος των εν σειρά συνδεδεμένων πάνελ.

Συνεπώς, πρέπει να τεθούν στόχοι και περιορισμοί για τα παραπάνω μεγέθη. Σχετικά με την ισχύ, δεν τίθεται κάποιος περιορισμός καθώς, η τελική τιμή θα προκύψει από τεchnοοικονομική ανάλυση στη συνέχεια. Για την τάση και το ρεύμα ωστόσο, το όριο σχετίζεται με το inverter του συστήματος, τη διάταξη δηλαδή που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα του Φ/Β συστήματος σε εναλλασσόμενο και το διοχετεύει είτε στα φορτία της κατοικίας είτε στο δίκτυο. Κατόπιν επεξεργασίας εμπορικών μοντέλων inverter, τα ανώτερα όρια τάσης και ρεύματος τίθενται ίσα με 530 V και 10 A, αντίστοιχα. Για λόγους απλότητας, το μέγιστο πλήθος παράλληλα ( $N_{p,max}$ ) και εν σειρά ( $N_{s,max}$ ) συνδεδεμένων πάνελ υπολογίζεται σύμφωνα με την τάση και το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος (31.7 V και 8.69 A, αντίστοιχα). Επομένως, προκύπτουν:



$$N_{p,max} = 1 \quad (10)$$

$$N_{s,max} = 16 \quad (11)$$

## 3.2 Μοντελοποίηση

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται η μοντελοποίηση ενός Φ/Β πάνελ. Προτού αναλυθεί η ακριβής μεθοδολογία, δίνονται κάποια ποιοτικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς του.

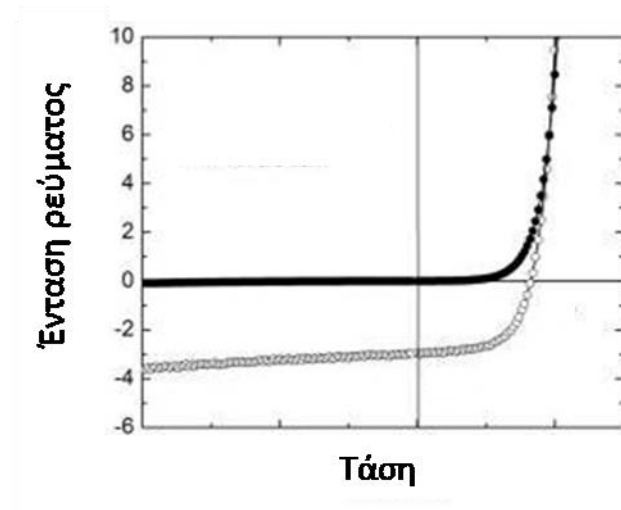
### 3.2.1 Ανάλυση Φ/Β φαινομένου

Στο πρώτο κεφάλαιο έγινε αναφορά στο δομικό στοιχείο ενός Φ/Β πάνελ, το Φ/Β στοιχείο, το οποίο αποτελείται από διόδους τύπου p-n. Οι περισσότερες διόδοι επιτρέπουν τη διέλευση ρεύματος διαμέσου τους, μόνο στην περίπτωση εφαρμογής ορισμένης θετικής τάσης στα άκρα τους, δηλαδή ο θετικός πόλος να βρίσκεται στην άνοδο της διόδου (τμήμα τύπου-p). Η τιμή της τάσης πάνω από την οποία άγεται ρεύμα, ονομάζεται δυναμικό παρεμπόδισης και εξαρτάται από το υλικό της διόδου (π.χ. πυρίτιο) [34]. Για τάση μικρότερη αυτής της τιμής, η διόδος συμπεριφέρεται ως ανοιχτό κύκλωμα, όπως φαίνεται από τη σκούρα γραμμή του Σχήματος 3-1.

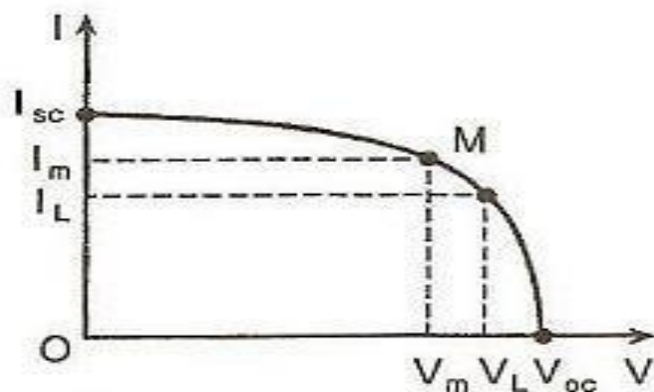
Τα παραπάνω συμβαίνουν χωρίς την παροχή φωτός στη διόδο. Φωτίζοντας τη διόδο, αυτή πολώνεται αντίστροφα (αρνητική τάση στα άκρα της, σύμφωνα με τον προηγούμενο ορισμό) επιτρέποντας ωστόσο το διέλευση ρεύματος, αντίθετης όμως φοράς (ανοιχτόχρωμη γραμμή Σχήματος 3-1). Το ρεύμα αυτό ονομάζεται φωτόρρευμα. Συνεπώς, το ρεύμα που παράγεται από το Φ/Β στοιχείο ισούται με τη διαφορά των δύο. Η λειτουργία ενός Φ/Β στοιχείου δίνεται μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης ρεύματος-τάσης ( $I-V$ ) η οποία συντίθεται από τις παρακάτω. Για λόγους ευκρίνειας, ως θετικές ορίζονται οι τιμές ρεύματος που οφείλονται στο φωτόρρευμα και η καμπύλη δίνεται μόνο για θετικές τιμές της τάσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-2. Στο διάγραμμα αυτό, ορίζονται τα εξής μεγέθη:

- Τάση ανοιχτοκυκλώματος ( $V_{oc}$ )
- Ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ )
- Σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point – MPP)
- Τάση ( $V_m$ ) και ρεύμα ( $I_m$ ) στο σημείο της μέγιστης ισχύος

Όσον αφορά τα  $V_L$ ,  $I_L$  είναι η τάση και το ρεύμα αντίστοιχα της κυψέλης σε κάποιο σημείο λειτουργίας, το γινόμενο των οποίων δίνει την ισχύ του ( $P_L$ ).



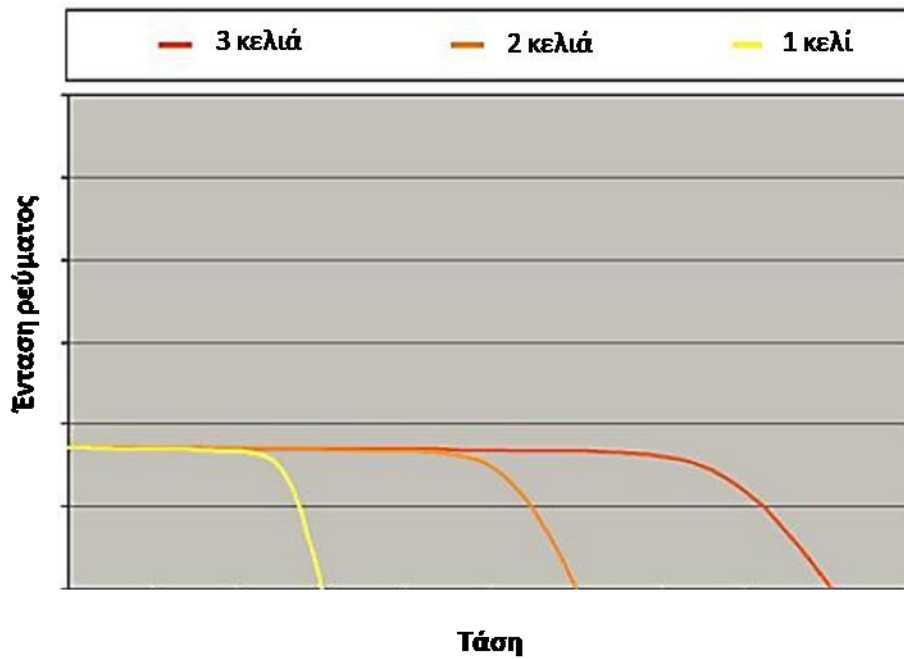
Σχήμα 3-1: Συμπεριφορά διόδου χωρίς (σκούρα γραμμή) και με (ανοιχτή γραμμή) παροχή φωτός [35].



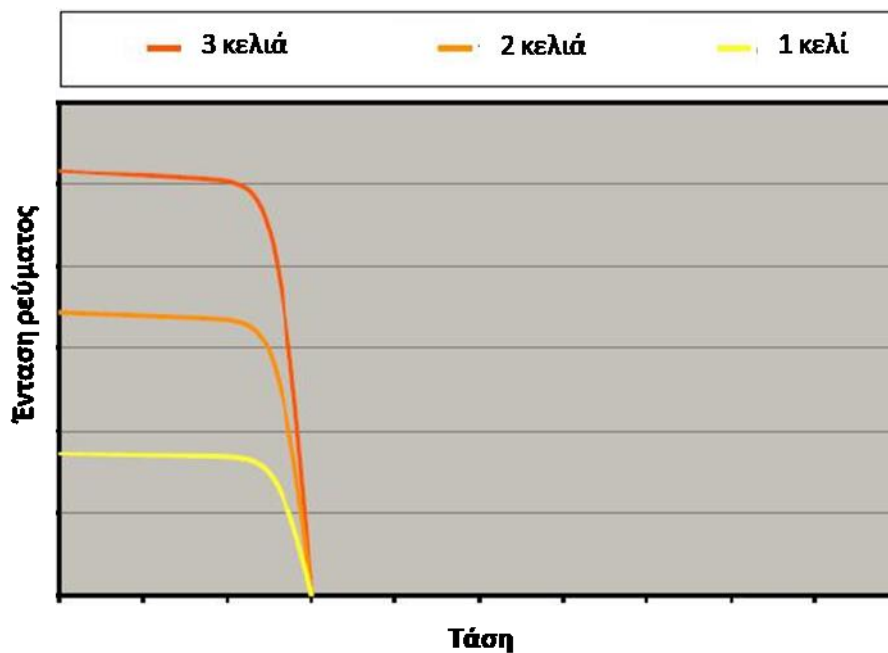
Σχήμα 3-2: Καμπύλη λειτουργίας I-V  $\Phi/B$  στοιχείου.

Ωστόσο, ένα  $\Phi/B$  πάνελ αποτελείται από πολλά στοιχεία, τα οποία συνδέονται τόσο εν σειρά όσο και παράλληλα. Προφανώς, η εν σειρά σύνδεσή τους οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης τάσης για την ίδια τιμή ρεύματος ενώ η παράλληλη, σε αύξηση του ρεύματος για την ίδια τάση, όπως ενδεικτικά φαίνεται στα επόμενα Σχήματα για πολλά συνδεδεμένα στοιχεία. Συνδυάζοντας τους δύο τύπους συνδέσεων των στοιχείων, προκύπτει η καμπύλη λειτουργίας του  $\Phi/B$  πάνελ για το οποίο ορίζονται τα αντίστοιχα μεγέθη με το  $\Phi/B$  στοιχείο (τάση ανοιχτοκυκλώματος, ρεύμα βραχυκύκλωσης κ.τ.λ.)

Σημειώνεται ότι το μοντέλο του  $\Phi/B$  που εξετάζεται στη συγκεκριμένη εργασία αποτελείται από 60 κελιά (στοιχεία), συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους.



Σχήμα 3-3: Καμπύλη λειτουργίας εν σειρά συνδεδεμένων Φ/Β στοιχείων.



Σχήμα 3-4: Καμπύλη λειτουργίας παράλληλα συνδεδεμένων Φ/Β στοιχείων.

### 3.2.2 Επίδραση εξωτερικών παραγόντων

Ωστόσο, οι καμπύλες λειτουργίας ενός Φ/Β πάνελ δίνονται σε ορισμένες συνθήκες λειτουργίας, καθώς μεταβολή αυτών οδηγεί σε αλλαγή της συμπεριφοράς τους και συνεπώς, της απόδοσής τους. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία του

αφορούν το ίδιο το πάνελ, αλλά και τις συνθήκες του περιβάλλοντος και περιγράφονται παρακάτω [36].

- **Προσανατολισμός:** Ο προσανατολισμός του πάνελ περιγράφεται από δύο γωνίες, την κλίση του ( $\beta$ ) και το αζιμούθιο του ( $\gamma$ ). Οι τιμές τους ορίζουν τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτό. Δεδομένου όμως ότι ο Ήλιος κινείται και ότι τα πάνελ είναι τοποθετημένα σε σταθερή βάση, η γωνία πρόσπτωσης μεταβάλλεται και δεν είναι συνεχώς μηδέν (μέγιστη δέσμευση ακτινοβολίας), δηλαδή τα πάνελ δεν ακολουθούν τον Ήλιο. Συνεπώς, η κλίση και το αζιμούθιο πρέπει να επιλεγούν κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μεγιστοποιείται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το επιθυμητό διάστημα. Γι' αυτόν το σκοπό, πρέπει το αζιμούθιο της επιφάνειας να είναι μηδενικό, δηλ. τα πάνελ να είναι στραμμένα προς τον Ισημερινό (δηλαδή προς το Νότο για το βόρειο ημισφαίριο), ενώ η κλίση σχετίζεται άμεσα με το γεωγραφικό πλάτος ( $\varphi$ ) της τοποθεσίας εγκατάστασής τους [37]. Ειδικότερα, για μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, θα πρέπει η κλίση των συλλεκτών προσεγγίζει το γεωγραφικό πλάτος, δηλαδή  $\varphi = \beta \pm 5^\circ$ .
- **Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας:** Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας επιδρά (σχεδόν ανάλογα) στο ρεύμα βραχυκύκλωσης του στοιχείου, ενώ η τάση ανοικτού κυκλώματος αυξάνεται ελαφρά με την αύξηση της έντασης. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η σχεδόν αναλογική σχέση ανάμεσα στην ισχύ του στοιχείου και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, για σταθερές θερμοκρασίες στοιχείου.
- **Θερμοκρασία:** Με την αύξηση της θερμοκρασίας, προκαλείται αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι, εκδηλώνεται ισχυρό ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της  $V_{oc}$ . Παράλληλα, μειώνεται και η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Πιο συγκεκριμένα, αν ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου σε μια δεδομένη θερμοκρασία (π.χ.  $25^\circ\text{C}$ ) είναι  $\eta$ , η τιμή του σε μια διαφορετική θερμοκρασία ( $\theta$ ) θα είναι:

$$\eta(\theta) = \eta(25^\circ\text{C}) * \sigma_\theta \quad (12)$$

Όπου  $\sigma_\theta$  ορίζεται ως ο συντελεστής θερμοκρασίας για διόρθωση της απόδοσης. Για κάθε βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας ο συντελεστής  $\sigma_\theta$  μειώνεται περίπου 0.005. Η τιμή του στην θερμοκρασία αναφοράς είναι 1 [36].

- **Σκίαση:** Προέρχεται από φυσικά εμπόδια όπως δέντρα και στύλοι ή από παροδικά φαινόμενα όπως σύννεφα. Η σκίαση δημιουργεί την μερική ή και ολική απώλεια του φωτορρέυματος καθώς, όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, αυτό δημιουργείται παρουσία φωτός στα στοιχεία του πάνελ.
- **Άνεμος:** Η ταχύτητα του ανέμου και ο προσανατολισμός του μπορούν να επηρεάσουν την απόδοσή του. Μεγάλες ταχύτητες αέρα έχουν σαν αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας.
- **Οπτικές απώλειες:** Με τον όρο οπτικές απώλειες περιγράφεται η μεταβολή της ανακλαστικότητας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (υαλοπίνακας, αντανακλαστικό επίστρωμα, υλικό φωτοβολταϊκών στοιχείων) σε σχέση με την αντίστοιχη σε

Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς(STC -Standard Testing Conditions). Η ανακλαστικότητα του οπτικού συστήματος όψεως του φωτοβολταϊκού πλαισίου, σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή σε Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς, αυξάνει καθώς αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στην επιφάνειά του, ιδιαίτερα σε γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60°.Επίσης, οπτικές απώλειες οφείλονται και στις μεταβολές του φάσματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

- **Γήρανση:** Αφορά στη μείωση της απόδοσης των Φ/Β πλαισίων στο χρόνο της ζωής τους και εκφράζεται, συνήθως, με το ποσοστό γήρανσης ανά έτος χρήσης. Προσδιορίζει την ελάττωση της απόδοσης του Φ/Β, άρα και μέγιστης ισχύος του. Στο κρυσταλλικό πυρίτιο εμφανίζονται αλλοιώσεις στη δομή του υλικού των κρυσταλλικών Φ/Β στοιχείων του πλαισίου, που οφείλονται κυρίως σε υπερθέρμανση. Σύμφωνα με τους κατασκευαστές, η απόδοσή τους μειώνεται στο 80% της ονομαστικής τους, μετά την πάροδο 25 χρόνων.
- **Ρύπανση:** Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ιδιαίτερα όταν αυτά έχουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειας τους από την επικάθιση σκόνης, φύλλων αλατιού από την θάλασσα, εντόμων κ.α. Η μείωση είναι εντονότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές, λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στις γυάλινες ή πλαστικές επιφάνειες των Φ/Β πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει επαρκώς.

Ορισμένοι από τους παραπάνω παράγοντες ενσωματώνονται στο μαθηματικό μοντέλο που περιγράφεται στη συνέχεια.

### 3.2.3 Μαθηματικό μοντέλο

Παραπάνω αναφέρθηκαν τα ποιοτικά στοιχεία που καθορίζουν τη λειτουργία και την απόδοση των Φ/Β στοιχείων και κατ' επέκταση, του Φ/Β συστήματος. Τα στοιχεία αυτά ποσοτικοποιούνται μέσω του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφεται παρακάτω.

Ειδικότερα, η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τους Bellia, Youcef [38] με το οποίο, εφαρμόζοντας διαφορετικές τιμές τάσης από 0 μέχρι την ανοιχτοκυκλώματος, υπολογίζεται το αντίστοιχο ρεύμα εξόδου για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ηλιακής ακτινοβολίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η λειτουργία του Φ/Β συστήματος θεωρείται τέτοια, έτσι ώστε η τάση κάθε πάνελ να ρυθμίζεται με τέτοιον τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται η παραγόμενη ισχύς εξόδου (Maximum Power Point Tracking – MPPT).

Σύμφωνα με όσα προηγήθηκαν, η θερμοκρασία των Φ/Β στοιχείων έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση του Φ/Β συστήματος και συνεπώς, πρέπει να γίνεται εκτίμησή της συναρτήσει των περιβαλλοντικών συνθηκών. Για το σκοπό αυτό, γίνεται χρήση του μοντέλου του Faïman [39], σύμφωνα με το οποίο η θερμοκρασία κυψέλης  $T_{cell}$  υπολογίζεται ως:

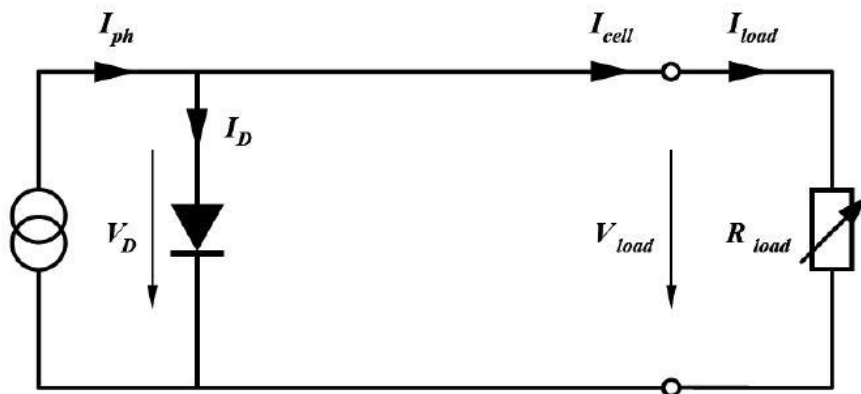
$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{I_{sol}}{c_o + c_1 u_w} \quad (13)$$

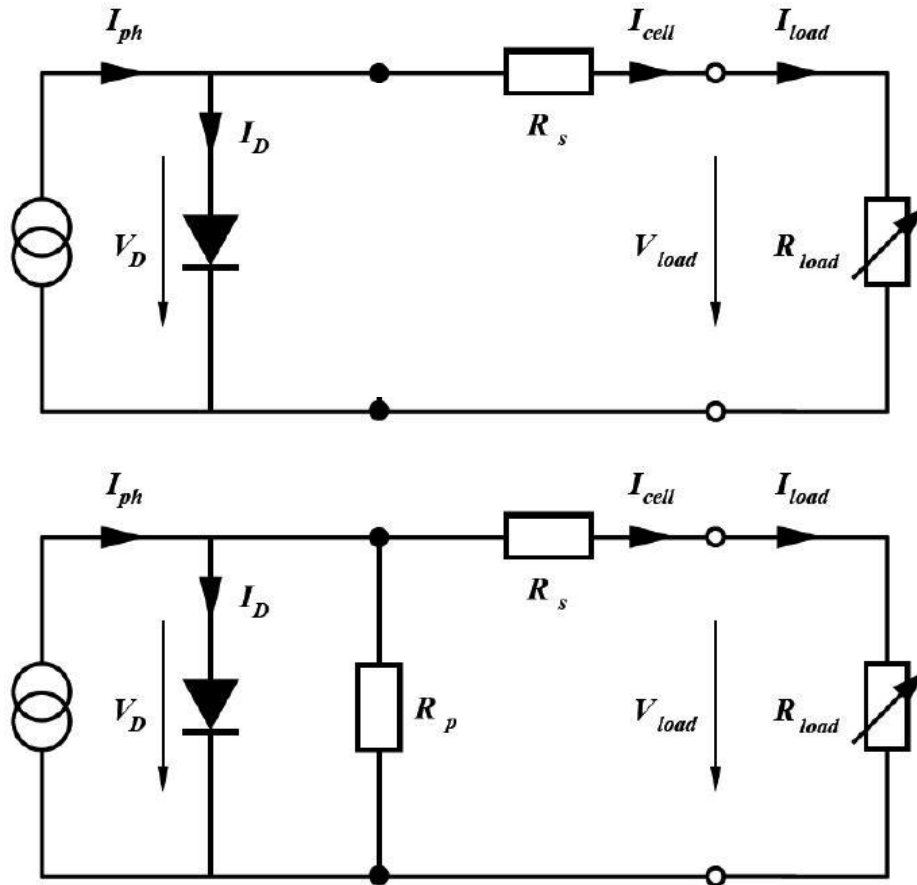
όπου  $u_w$  η ταχύτητα του ανέμου και  $c_o, c_1$  σταθερές οι οποίες εξαρτώνται από την τοποθεσία εγκατάστασης των πάνελ. Οι τιμές των παραπάνω σταθερών για την Αθήνα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 3-1: Σταθερές για το μοντέλο του Faiman [39].

Σταθερά	Τιμή
$c_o$ ( $W K^{-1} m^{-2}$ )	41.86
$c_1$ ( $W s K^{-1} m^{-3}$ )	3.95

Η λογική του μοντέλου βασίζεται σε όσα αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 3.2.1, όπου η λειτουργία των Φ/Β στοιχείων και συνεπώς των πάνελ, μοντελοποιείται κάνοντας χρήση ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Συγκεκριμένα, στη βιβλιογραφία συναντώνται τρία ηλεκτρικά κυκλώματα μοντελοποίησης της λειτουργίας τους, τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 3-5. Κοινό χαρακτηριστικό όλων είναι η ύπαρξη μίας πηγής ρεύματος που μοντελοποιεί το φωτόρρευμα ( $I_{ph}$ ) και μίας διόδου για τη μοντελοποίηση του ημιαγωγού (πυριτίου στην προκειμένη περίπτωση), βάσει του οποίου τα μοντέλα αυτά αποκαλούνται μοντέλα «απλής διόδου» (single diode models). Ειδικότερα, στο πρώτο κύκλωμα, το οποίο αντιστοιχεί στην ιδανική λειτουργία, το ρεύμα και η τάση στο φορτίο (στοιχείο) καθορίζεται αποκλειστικά από το παραγόμενο φωτόρρευμα και τη δίοδο. Αντίθετα, στο μεσαίο σχήμα συμπεριλαμβάνεται και μία αντίσταση σε σειρά με το φορτίο ( $R_s$ ) που αντιστοιχεί στις απώλειες κατά τη διέλευση του ρεύματος στο στοιχείο. Τέλος, στο τελευταίο κύκλωμα, εκτός από την εν σειρά αντίσταση, προστίθεται και μία παράλληλα ( $R_p$ ) που μοντελοποιεί τις απωλειών λόγω διαρροής του ρεύματος μεταξύ των άκρων του Φ/Β στοιχείου.





Σχήμα 3-5: Ηλεκτρικά κυκλώματα μοντελοποίησης Φ/Β στοιχείου/πάνελ.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η γενικότερη –και περισσότερο ακριβής– περίπτωση, με τις δύο αντιστάσεις. Βάσει του μοντέλου, το ρεύμα εξόδου  $I_{PV,mod}$  του πάνελ υπολογίζεται συναρτήσει του  $I_{ph}$ , του αντιστροφου ρεύματος κορεσμού ( $I_o$ ), της τάσης του πάνελ ( $V_{PV,mod}$ ) και των αντιστάσεων  $R_s$ ,  $R_p$  ως ακολούθως [40]:

$$I_{PV,mod} = I_{ph} - I_o \left[ \exp \left( \frac{V_{PV,mod} + I_{PV,mod} \cdot R_s}{a_v} \right) - 1 \right] - \frac{V_{PV,mod} + I_{PV,mod} \cdot R_s}{R_p} \quad (14)$$

όπου  $a_v$  ο διορθωτικός συντελεστής θερμικής τάσης που υπολογίζεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$a_v = N_s \cdot c_{ideal} \cdot k \frac{T_{cell}}{q} \quad (15)$$

όπου  $N_s$  ο αριθμός των εν σειρά συνδεδεμένων στοιχείων στο φωτοβολταϊκό πάνελ,  $c_{ideal}$  ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου (1.3 για πολυκρυσταλλικό πυρίτιο [41],  $k$  η σταθερά

του Boltzmann ( $k = 1.3806 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ ) και  $q$  το φορτίο του ηλεκτρονίου ( $q = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ).

Όσον αφορά το φωτόρρευμα ενός απλού πάνελ, αυτό υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$I_{ph} = \frac{I_{sol}}{I_{sol,STC}} \cdot [I_{sc,STC} + \mu_{sc} \cdot (T_{cell} - T_{cell,STC})] \quad (16)$$

όπου  $I_{sol}$  η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του πάνελ,  $I_{sol,STC}$  η ηλιακή ακτινοβολία σε πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας (Standard Test Conditions – STC) που ισούται με  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $I_{sc,STC}$  είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε STC,  $T_{cell,STC}$  η θερμοκρασία κελιού σε STC ( $T_{cell,STC} = 298 \text{ K}$ ) και  $\mu_{sc}$  ο συντελεστής θερμοκρασίας του ρεύματος βραχυκύκλωσης, ο οποίος εκφράζει τη μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης συναρτήσει της μεταβολής της θερμοκρασίας κελιού..

Το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού απλού πάνελ υπολογίζεται από την επόμενη σχέση:

$$I_o = I_{sc,STC} \cdot \exp\left(\frac{-V_{oc,STC}}{a_v}\right) \cdot \left(\frac{T_{cell}}{T_{cell,STC}}\right)^3 \cdot \exp\left[\left(\frac{q \cdot \varepsilon_g}{C_{ideal} \cdot k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{cell}} - \frac{1}{T_{cell,STC}}\right)\right] \quad (17)$$

όπου το  $V_{oc,STC}$  αναφέρεται στην τάση ανοιχτοκυκλώματος σε STC και  $\varepsilon_g$  η ενέργεια ενεργοποίησης του υλικού (1.12 eV για πυρίτιο).

Αναφορικά με την αντίσταση  $R_p$ , αυτή υπολογίζεται βάσει του σημείου μέγιστης ισχύος (τάση, ρεύμα και ισχύς) του πάνελ (δείκτης mp) σε STC, ως ακολούθως:

$$R_p = \frac{V_{mp,STC} + I_{mp,STC} \cdot R_S}{I_{sc,STC} \left[1 - \exp\left(\frac{V_{mp,STC} + I_{mp,STC} \cdot R_S - V_{oc,STC}}{a_v}\right) + \exp\left(\frac{-V_{oc,STC}}{a_v}\right)\right] - \frac{P_{mp,STC}}{V_{mp,STC}}} \quad (18)$$

Έτσι, γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά του πάνελ στο σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point – MPP) μπορεί να υπολογιστεί η αντίσταση  $R_p$ . Στη συνέχεια, για τη θερμοκρασία λειτουργίας των κελιών και την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, δύναται να υπολογιστούν τα ρεύματα  $I_{ph}$ ,  $I_o$ . Συνεπώς, για δεδομένη τιμή της τάσης  $V_{PV,mod}$  ενός πάνελ μπορεί να υπολογιστεί το ρεύμα του  $I_{PV,mod}$  μέσω της εξίσωσης (14) και συνεπώς, η ισχύς του πάνελ  $P_{PV,mod}$ , ως το γινόμενο τους.

Ωστόσο, το Φ/Β σύστημα θα αποτελείται από  $N_p$  παράλληλες συστοιχίες αποτελούμενες από  $N_s$  εν σειρά συνδεδεμένα πάνελ. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν, η τάση και το ρεύμα του συστήματος υπολογίζεται ως εξής:



$$I_{PV,arr} = I_{PV,mod} \cdot N_p \quad (19)$$

$$V_{PV,arr} = V_{PV,mod} \cdot N_s \quad (20)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για κάθε τιμή τάσης ενός πάνελ μπορεί να υπολογιστεί το ρεύμα και η ισχύς του. Συνεπώς, θέτοντας τις τιμές τάσης που παρέχει ο κατασκευαστής του πάνελ, είναι δυνατή η κατασκευή των χαρακτηριστικών καμπυλών  $I-V$  και  $P-V$  του πάνελ. Η μεθοδολογία χρήσης του παραπάνω μοντέλου συνίσταται στη σύγκριση των αποτελεσμάτων του με τα παρεχόμενα από τον κατασκευαστή δεδομένα και είναι η εξής:

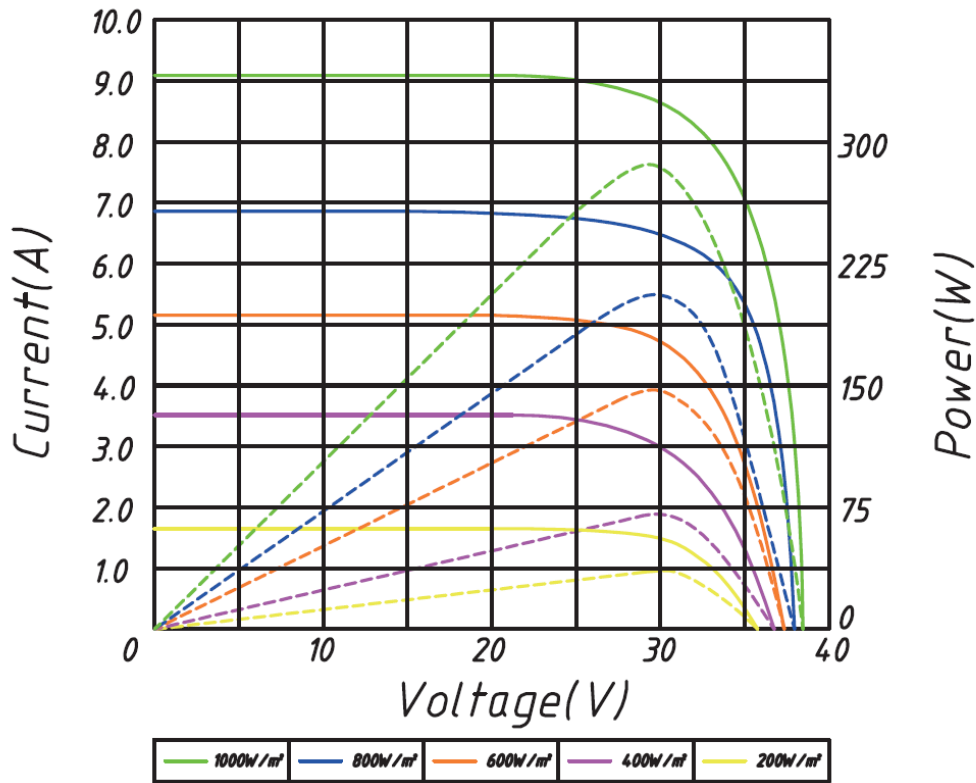
Θεωρώντας συνθήκες STC και υποθέτοντας μία τιμή για την αντίσταση  $R_p$ , υπολογίζονται οι καμπύλες  $I-V$  και  $P-V$  του πάνελ μέσω του μοντέλου. Η μέγιστη ισχύς που προκύπτει συγκρίνεται με την ονομαστική του κατασκευαστή. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου οι δύο αυτές τιμές να ταυτιστούν, σε αντίστοιχη τιμή τάσης, για λειτουργία σε STC.

Για το σκοπό αυτό, στον επόμενο Πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου τύπου Φ/Β πάνελ, ενώ στα Σχήματα 3-6, 3-7 φαίνονται οι καμπύλες  $I-V$  και  $P-V$  που παρέχει ο κατασκευαστής. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα από το μοντέλο φαίνονται στα Σχήματα 3-8, 3-9. Συγκεκριμένα, οι καμπύλες δίνονται για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας των στοιχείων (25, 50 και 75 °C) και ακτινοβολίας στο πάνελ (200, 400, 600, 800 και 1000 W/m<sup>2</sup>), όπου φαίνεται η επίδρασή τους. Ειδικότερα, αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας οδηγεί σε αύξηση του παραγόμενου ρεύματος και της ισχύος εξόδου, ενώ αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει αύξηση του διερχόμενου ρεύματος και μείωση της τάσης ανοιχτοκυκλώματος. Σημειώνεται ότι τα διαγράμματα του μοντέλου κατασκευάστηκαν για:

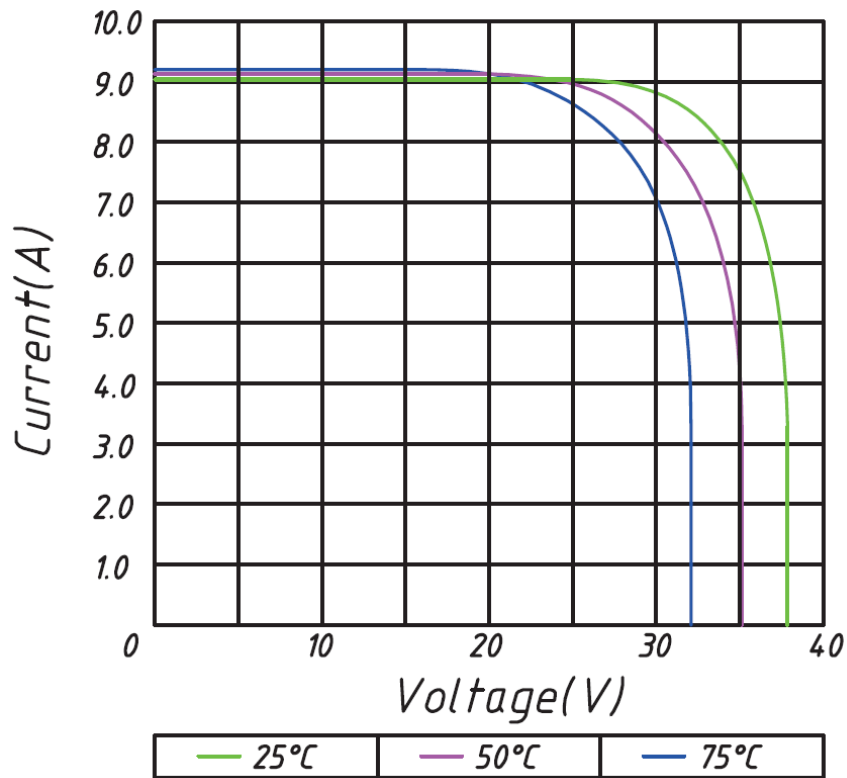
$$R_s = 0.45 \quad (21)$$

Πίνακας 3-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά μελετώμενου Φ/Β πάνελ (μοντέλο T660P, ονομαστικής ισχύος 275 W, εταιρίας TALESUN [33]).

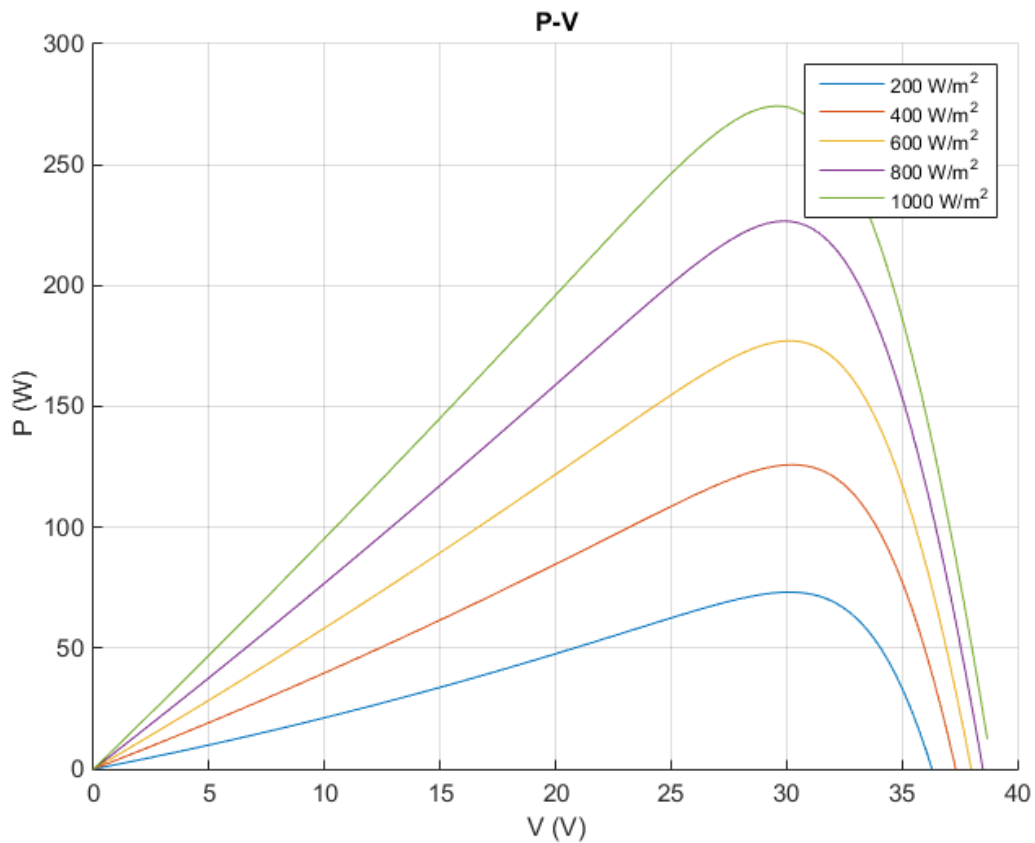
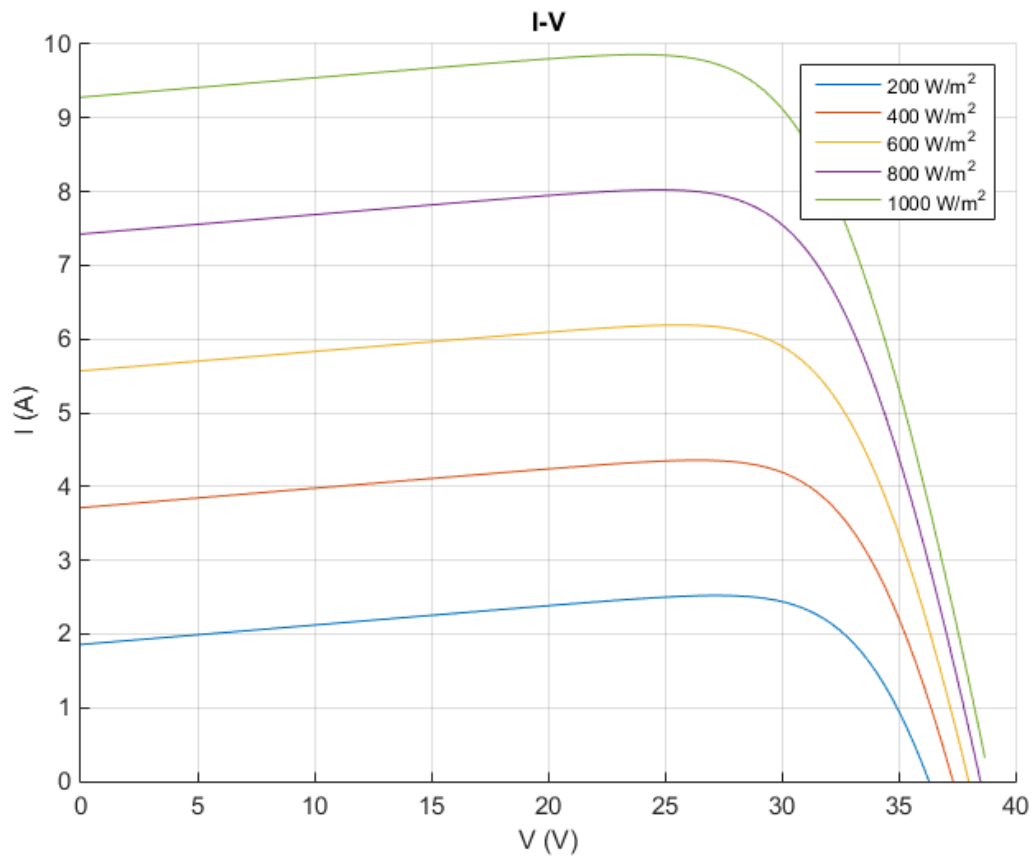
Μέγεθος	Τιμή
$N_s$ (-)	60
$I_{sc,STC}$ (A)	9.17
$\mu_{sc}$ (A/K)	$5.5 \cdot 10^{-3}$
$V_{oc,STC}$ (V)	38.7
$V_{mp,STC}$ (V)	31.7
$I_{mp,STC}$ (A)	8.69
$P_{mp,STC}$ (W <sub>p</sub> )	275
Συνολική επιφάνεια (m <sup>2</sup> )	1.62



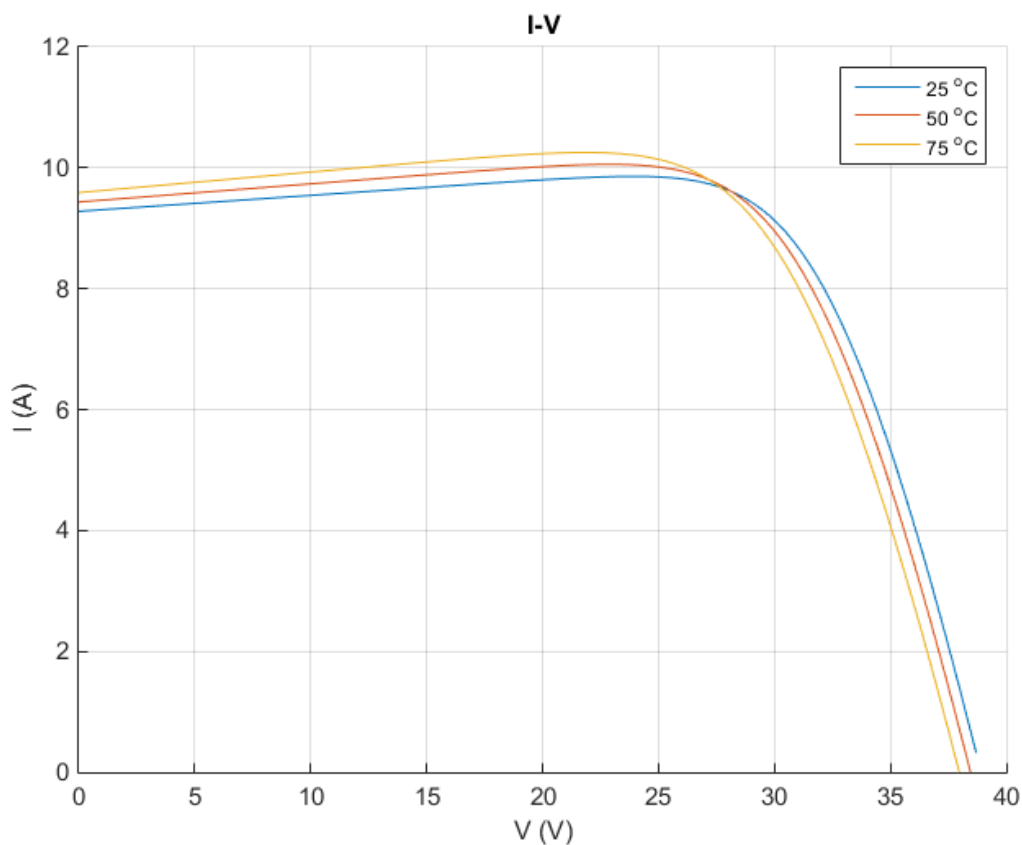
Σχήμα 3-6: Καμπύλες I-V και P-V Φ/Β πάνελ από κατασκευαστή συναρτήσει ακτινοβολίας.



Σχήμα 3-7: Καμπύλες I-V Φ/Β πάνελ από κατασκευαστή συναρτήσει θερμοκρασίας κελιών.



Σχήμα 3-8: Καμπύλες I-V και P-V Φ/Β πάνελ από μοντέλο συναρτήσεως ακτινοβολίας.



Σχήμα 3-9: Καμπύλες I-V Φ/B πάνελ από μοντέλο συναρτήσει θερμοκρασίας κελιών.

Όπως φαίνεται, οι καμπύλες που προκύπτουν από το μοντέλο διαφέρουν ελαφρώς, ως προς τη μορφή τους, σε σχέση με αυτές του κατασκευαστή, καθώς αφενός παρατηρείται αύξηση του ρεύματος μέχρι μία ορισμένη τιμή της τάσης και αφετέρου, για μεγάλες τιμές της τάσης, οι καμπύλες δεν προσεγγίζουν την κατακόρυφο. Παρ' όλα αυτά, το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει την ανάλυση του συνολικού συστήματος που παρατίθεται στο επόμενο Κεφάλαιο, διότι σε αυτά τα τμήματα των καμπυλών, δε μεγιστοποιείται η παραγόμενη ισχύς. Έτσι, εφόσον ακολουθείται λειτουργία MPPT, δε γίνεται χρήση αυτών των περιοχών λειτουργίας.

### 3.2.4 Συντελεστές απόδοσης

Τέλος, έχοντας αναλύσει τη συμπεριφορά και τη μοντελοποίηση των πάνελ, ορίζονται δύο κύριοι συντελεστές απόδοσης. Από τη μία πλευρά, ορίζεται ο βαθμός απόδοσης, ως ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος  $P_{mp}$  προς το γινόμενο της επιφάνειας  $A$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου επί την ένταση της ακτινοβολίας  $I_{sol}$ . Επομένως:

$$\eta = \frac{P_{mp}}{A \cdot I_{sol}} \quad (22)$$

Επιπρόσθετα, ορίζεται ο συντελεστής πλήρωσης (Filling Factor – FF), ως ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος  $P_{mp}$  προς το γινόμενο του ρεύματος βραχυκύκλωσης επί την τάση ανοιχτοκυκλώματος του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Δηλαδή:

$$FF = \frac{P_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (23)$$

Τυπικές τιμές του  $FF$  βρίσκονται μεταξύ 0.6 και 0.85 και προφανώς, είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας καθώς, τόσο η τάση ανοιχτοκυκλώματος και το ρεύμα βραχυκύκλωσης εξαρτώνται από τη θερμοκρασία των κελιών και επίσης, το ρεύμα βραχυκύκλωσης μεταβάλλεται γραμμικά με την ηλιακή ακτινοβολία.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτει συσχέτισή τους:

$$\eta = FF \frac{I_{sc} \cdot V_{oc}}{A \cdot I_{sol}} \quad (24)$$

Σημειώνεται ότι οι υπολογισμοί για τα φωτοβολταϊκά πραγματοποιήθηκαν με την υπόθεση ότι η γωνία κλίσης των πάνελ είναι αυτή για την οποία μεγιστοποιείται η ετήσια άμεση ακτινοβολία, η οποία προκύπτει για την Αθήνα ίση με  $34,92^\circ$ . Με βάση, τις σταθερές που όρισαν οι Foster, Ghassemi [42] για τον καθορισμό της ηλιακής άμεσης ακτινοβολίας σε επιφάνεια με κλίση σε κύρια τοποθεσία.

## Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης, σύμφωνα με όσα προηγήθηκαν. Αρχικά, γίνεται παράθεση των φορτίων λειτουργίας, ακολουθεί η διαστασιολόγηση της αντλίας θερμότητας, έπειτα η σύζευξή της με τα Φ/Β πάνελ και καταλήγοντας, η τεχνο-οικονομική αξιολόγηση του συνολικού συστήματος.

### 4.1 Θερμικά-Ψυκτικά φορτία

Για τη διαστασιολόγηση της αντλίας θερμότητας, πρέπει, όπως σημειώθηκε και κατά την παρουσίαση του μοντέλου της, να είναι γνωστό το φορτίο λειτουργίας της. Στην προκειμένη μελέτη, εξετάστηκε η εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος σε τέσσερις διαφορετικές τυπολογίες κτηρίων. Τα εξεταζόμενα κτήρια αφορούν την περιοχή της Αθήνας, έχουν επιφάνεια δαπέδου 100 m<sup>2</sup>, είναι νότιου προσανατολισμού και διαφέρουν ως προς την περίοδο κατασκευής και συνεπώς, ως προς την κατασκευή του κελύφους τους και της ενεργειακής τους απόδοσης. Πιο συγκεκριμένα, μελετώνται οι εξής χρονικές περιόδους κατασκευής (Σενάρια):

- 2001-2010 (Σενάριο 1)
- 1955-1980 (Σενάριο 2)
- 1981-2000 (Σενάριο 3)
- 2011-Σήμερα (Σενάριο 4)

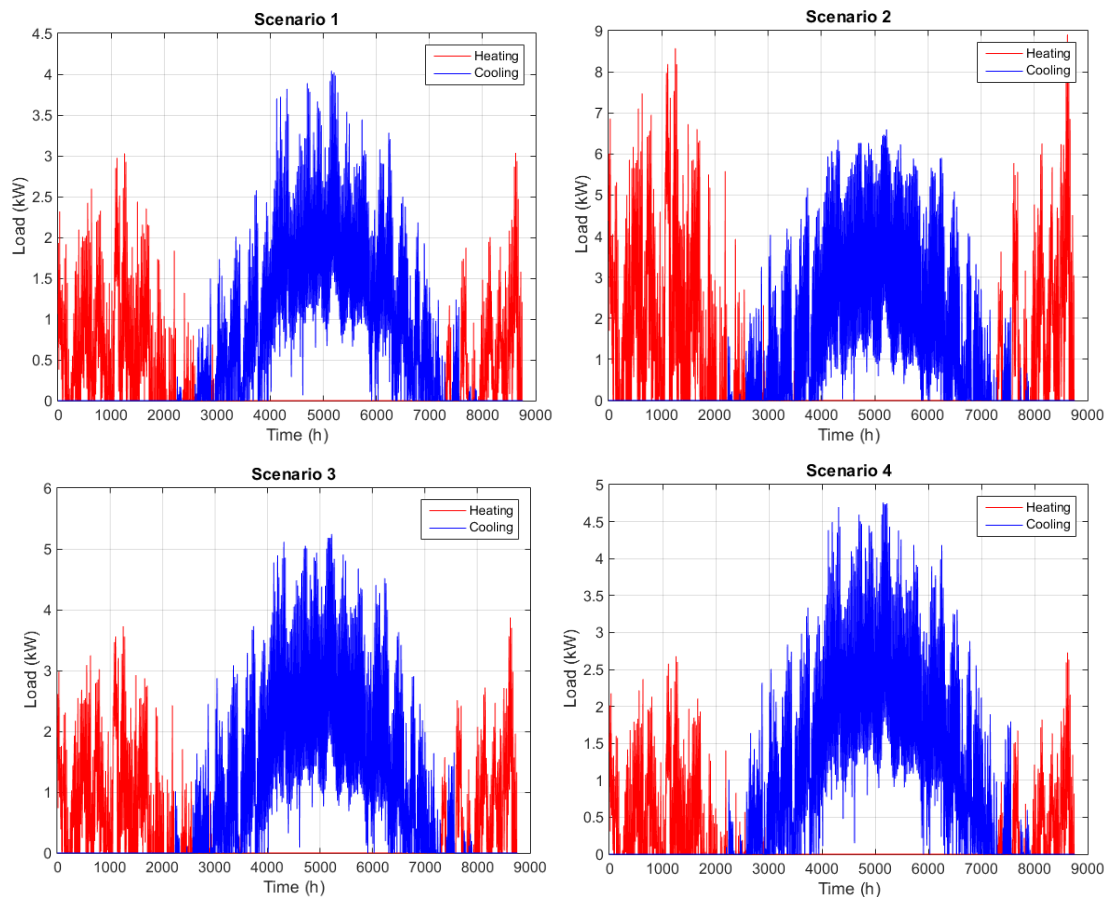
Παρακάτω φαίνονται τα ωριαία θερμικά και ψυκτικά φορτία για τα σενάρια αυτά κατά τη διάρκεια ενός έτους. Τα αποτελέσματα αυτά ελήφθησαν από την εργασία των Kallis et al. [43], στην οποία έγινε ετήσια προσομοίωση με χρήση του λογισμικού Energy Plus [44].

Όπως προκύπτει, σε όλα τα σενάρια, με εξαίρεση το Σενάριο 2, τα ψυκτικά φορτία είναι μεγαλύτερα από τα θερμικά. Αυτό οφείλεται στην πολύ περιορισμένη χρήση θερμομόνωσης στα παλαιότερα κτήρια, στα οποία ανήκει και αυτό του Σεναρίου 2. Στο γεγονός αυτό οφείλεται και τα χαμηλότερα φορτία για τα νεότερα κτήρια. Ωστόσο, φαίνεται ότι το Σενάριο 4, παρότι αντιστοιχεί σε νεότερο κτήριο, έχει μεγαλύτερη απαίτηση σε ψύξη από το Σενάριο 1. Πιθανή αιτία είναι η σημαντικά αυξημένη μόνωση που δεν επιτρέπει την αποφόρτιση του κελύφους.

Συνοψίζοντας, στον επόμενο Πίνακα φαίνονται τα μέγιστα θερμικά και ψυκτικά φορτία κάθε σεναρίου, απ' όπου επιβεβαιώνονται οι παραπάνω παρατηρήσεις.

Πίνακας 4-1: Μέγιστα θερμικά και ψυκτικά φορτία εξεταζόμενων κτηρίων.

A/A Σεναρίου	Θερμικό φορτίο (kW)	Ψυκτικό φορτίο (kW)
1	3.03	4.04
2	8.91	6.60
3	3.87	5.24
4	2.73	4.76



Σχήμα 4-1: Ωριαία θερμικά και ψυκτικά φορτία εξεταζόμενων κτηρίων κατά τη διάρκεια του έτους.

## 4.2 Διαστασιολόγηση αντλίας θερμότητας

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα έγινε η διαστασιολόγηση της αντλίας θερμότητας, η οποία συνίσταται στον καθορισμό του ονομαστικού της φορτίου, την εκλογή του κατάλληλου συμπιεστή και των εναλλακτών θερμότητας.

### 4.2.1 Εκλογή φορτίου λειτουργίας

Όσον αφορά το φορτίο λειτουργίας, αυτό ορίστηκε σύμφωνα με τον Πίνακα 4-1, προσαυξημένο κατά 20 % ώστε να γίνει πρόβλεψη πιθανής υποεκτίμησης η οποία μπορεί να οφείλεται σε παραδοχές κατά τη μοντελοποίηση των κτηρίων ή σε μελλοντικές ακραίες καιρικές συνθήκες. Ωστόσο, με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν δύο διαφορετικές διαστασιολογήσεις, μία για χειμώνα και μία για καλοκαίρι. Από αυτές, επιλέγεται αυτή που οδηγεί σε μεγαλύτερες επιφάνειες εναλλακτών θερμότητας, σύμφωνα με αυτά που ακολουθούν.

Πίνακας 4-2: Φορτία διαστασιολόγησης αντλίας θερμότητας.

A/A Σεναρίου	Θερμικό φορτίο (kW)	Ψυκτικό φορτίο (kW)
1	3.64	4.85
2	10.69	7.92
3	4.64	6.29
4	3.28	5.71

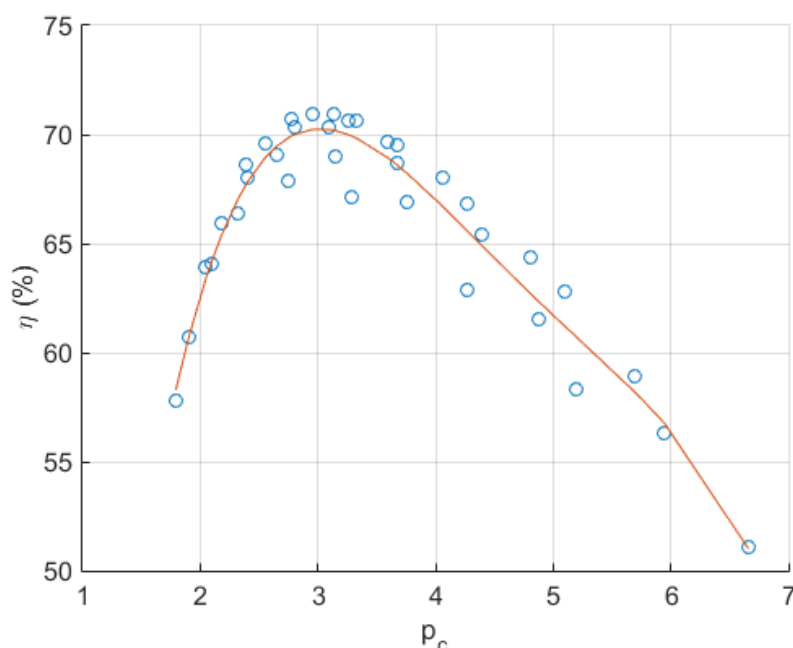
#### 4.2.2 Εκλογή συμπιεστή

Αναφορικά με το συμπιεστή, κριτήριο αποτελεί ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης. Ειδικότερα, μεταξύ των συμπιεστών που προορίζονται για κάθε εργαζόμενο μέσο, επιλέγεται ο συμπιεστής που έχει τη μεγαλύτερη απόδοση για τις συνθήκες λειτουργίας της δυσμενέστερης χειμερινής και θερινής λειτουργίας, αντίστοιχα.

Ως παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση του συμπιεστή λήφθηκε ο λόγος πίεσης του ( $p_c$ ), δεδομένου ότι, ως ελικοειδής, είναι ογκομετρικός και άρα υπάρχει περίπτωση υπερ-συμπίεσης ή υπό-συμπίεσης, λόγω του δεδομένου λόγου όγκων του [45].

Έτσι, για τα σημεία λειτουργίας που παρέχονται από τον κατασκευαστή, εξήχθη ο λόγος πίεσης για κάθε σημείο και λήφθηκε η αντίστοιχη απόδοσή του. Το σύνολο των ζευγών τιμών β.α.-λόγου πίεσης που προέκυψε προσεγγίστηκε από πολυώνυμο 4<sup>ου</sup> βαθμού. Γραφική απεικόνιση της παραπάνω μεθοδολογίας εκτίμησης του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή φαίνεται στο επόμενο σχήμα.

Συνοψίζοντας, για το λόγο πίεσης που προκύπτει για κάθε περίπτωση λειτουργίας, εκτιμάται ο β.α. των συμπιεστών που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο εργαζόμενο μέσο, και επιλέγεται ο πλέον αποδοτικός.



Σχήμα 4-2: Προσέγγιση ισεντροπικού β.α. συμπιεστή (μοντέλο ZR61KCE\_TFD – λειτουργία με R134a) από χάρτη λειτουργίας κατασκευαστή.



### 4.2.3 Εκλογή εναλλακτών θερμότητας

Οι εναλλάκτες θερμότητας που επιλέγονται είναι συγκολλητοί πλακοειδείς, όπως επισημάνθηκε στην Παράγραφο 2.1.3. Οι βασικές παράμετροι για την εκλογή του ακριβούς μοντέλου είναι οι εξής:

- Εργαζόμενα μέσα ρευμάτων
- Φάση ρευμάτων και εφαρμογή εναλλάκτη, π.χ. ατμοποιητής ή συμπυκνωτής
- Παροχές μάζας ρευμάτων
- Θερμοκρασίες εισόδου/εξόδου ρευμάτων
- Μέγιστη πτώση πίεσης σε κάθε ρεύμα εντός του εναλλάκτη.

Τα παραπάνω αποτελούν τα βασικά μεγέθη για την εκλογή των εναλλακτών. Ωστόσο, για την ορθή διαστασιολόγησή τους, απαιτείται αναλυτικότερη μελέτη. Στο πλαίσιο αυτό, έγινε χρήση κώδικα υπολογισμού που μοντελοποιεί τον εναλλάκτη θερμότητας [46]. Ο κώδικας αυτός, εκτός από τα παραπάνω δεδομένα, απαιτεί επιπλέον στοιχεία που αφορούν τα δύο ρεύματα, γεωμετρικά στοιχεία και προδιαγραφές των εναλλακτών. Τα αυτά είναι τα εξής:

- Πιέσεις εισόδου ρευμάτων στον εναλλάκτη
- Διάμετρος συνδέσεων κάθε ρεύματος
- Κατακόρυφη απόσταση συνδέσεων εισόδου/εξόδου
- Πλάτος εναλλάκτη
- Ελάχιστο και μέγιστο πλήθος πλακών εναλλάκτη(ορίζεται από τον κατασκευαστή)
- Μέγιστη παροχή όγκου εναλλάκτη
- Γεωμετρικά μεγέθη των πλακών, τα οποία ορίζονται προσεγγιστικά ως εξής:
  - Πάχος πλάκας: 0.7 mm
  - Γωνία αυλακώσεων πλάκας: 60°
  - Μήκος πλάκας και διακένου μεταξύ διαδοχικών πλακών: 2.5 mm
  - Συντελεστής μεγέθυνσης πλάκας: 1
  - Βήμα αυλάκωσης: 7 mm

Τα μοντέλα που εξετάζονται είναι τα AC30EQ, AC70X, AC112 και CB200 της εταιρίας Alfa Laval. Οι ιδιότητες (πίεση, θερμοκρασία, παροχή μάζας) των ρευμάτων του εργαζόμενου μέσου στους δύο εναλλάκτες προκύπτουν κατόπιν υπολογισμών και δεν είναι καθορισμένες. Αντίθετα, για τα ρεύματα νερού, τα μεγέθη είναι καθορισμένα και είναι τα εξής:

- Πίεση: Ορίζεται σε 1.5 bar σχετικής πίεσης.
- Θερμοκρασία: Σύμφωνα με τον Πίνακα 2-1.
- Παροχή μάζας: Υπολογίζονται ώστε, βάσει των θερμοκρασιών εισόδου/εξόδου, να προκύπτουν τα θερμικά-ψυκτικά φορτία του Πίνακα 4-1.

Τέλος, η μέγιστη πτώση πίεσης ορίζεται στα 120 mbar για τα δύο ρεύματα στο συμπυκνωτή και σε 400 και 300 mbar για το εργαζόμενο μέσο και το νερό στο συμπυκνωτή, αντίστοιχα.

#### **4.2.4 Τελικές διαστασιολογήσεις**

Όπως ειπώθηκε, για κάθε αντλία θερμότητας, προκύπτουν δύο διαστασιολογήσεις, που αντιστοιχούν σε χειμερινή και θερινή λειτουργία. Από αυτές, επιλέγεται αυτή που οδηγεί σε μεγαλύτερες επιφάνειες εναλλακτών, δηλαδή στη δυσμενέστερη περίπτωση λειτουργίας. Λόγω του μεγάλου πλήθους αποτελεσμάτων (4 σενάρια, με 4 εργαζόμενα μέσα και 2 διαστασιολογήσεις ανά περίπτωση), οι τελικές διαστασιολογήσεις δίνονται στη συνέχεια του Κεφαλαίου, για τις τελικά προκρινόμενες περιπτώσεις. Ωστόσο, προκύπτει ότι μεγιστοποίηση των επιφανειών των εναλλακτών (και άρα η περίοδος διαστασιολόγησης) συμβαίνει κατά τη θερινή λειτουργία για όλα τα σενάρια, με εξαίρεση το Σενάριο 2, λόγω των σημαντικά μεγαλύτερων θερμικών φορτίων.

### **4.3 Σύζευξη υποσυστημάτων**

Εκτός από την αντλία θερμότητας, το σύστημα περιλαμβάνει και τα Φ/Β πάνελ, τα οποία την τροφοδοτούν. Η λειτουργία των πάνελ γίνεται βάσει του σχήματος ενεργειακού συμψηφισμού (net-metering), το οποίο περιγράφεται ακολούθως. Γενικότερα, στόχος του συγκεκριμένου σχήματος είναι η ταυτόχρονη κάλυψη μεγάλου μέρους της ηλεκτρικής κατανάλωσης και η «αποθήκευση» στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, όταν υπάρχει πλεόνασμα ηλιακής παραγωγής, η οποία αργότερα τροφοδοτεί το φορτίο σε διαστήματα που η ηλιακή παραγωγή δεν επαρκεί για την κάλυψή του.

Συνεπώς, είναι απαραίτητη η γνώση της κατανάλωσης της αντλίας θερμότητας και της ηλιακής παραγωγής κατά τη διάρκεια του έτους. Στο πλαίσιο αυτό, γίνεται προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας τους, σε χρονικά βήματα διάρκειας μίας ώρας.

#### **4.3.1 Φορτίο αντλίας θερμότητας**

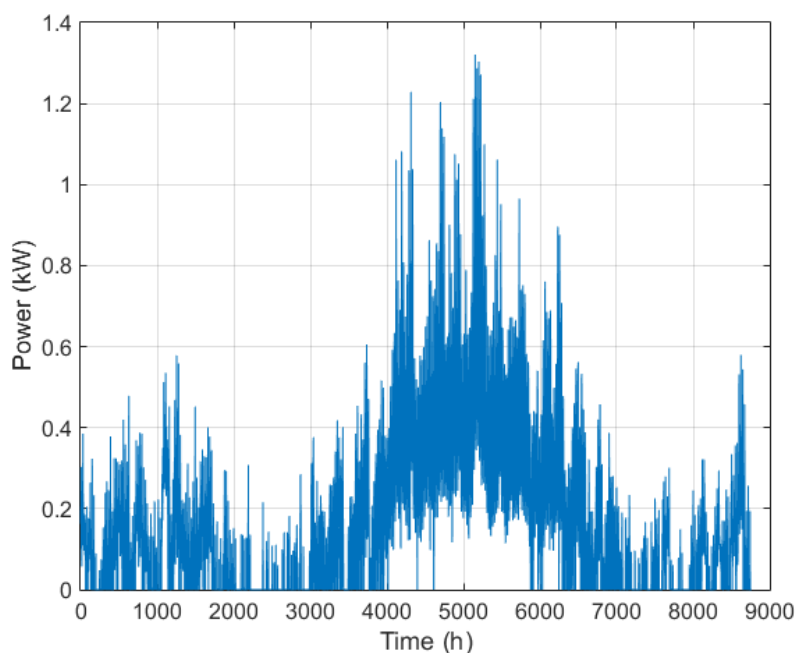
Το φορτίο της αντλίας θερμότητας αντιστοιχεί στην κατανάλωση του συμπιεστή της. Συνεπώς, απαιτείται υπολογισμός του κύκλου κατά τη διάρκεια του έτους. Αυτό γίνεται σύμφωνα με το Κεφάλαιο 2 ενώ, όσον αφορά το συμπιεστή, η εκτίμηση της απόδοσής του γίνεται με βάση τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην Παράγραφο 4.2.2.

Τα εκάστοτε φορτία (θερμικά ή ψυκτικά) λαμβάνονται από τα διαγράμματα του Σχήματος 4-1. Για την ορθότερη προσομοίωση, πολύ χαμηλά φορτία δε λαμβάνονται υπόψη, κάνοντας την υπόθεση ότι σε αυτές τις περιπτώσεις ο χρήστης δεν θέτει σε λειτουργία την αντλία θερμότητας. Το όριο των φορτίων ορίζεται στο 10% του αντίστοιχου μέγιστου θερμικού ή ψυκτικού φορτίου.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 2 έγινε διαχωρισμός της λειτουργίας της αντλίας θερμότητας σε ονομαστικό και μερικό φορτίο και αντίστοιχα ορίστηκαν τα pinch points στους εναλλάκτες. Στα πλαίσια της προσομοίωσης, ως λειτουργία στο ονομαστικό φορτίο θεωρήθηκε η λειτουργία τις ώρες που το φορτίο υπερβαίνει το 80% του αντίστοιχου μέγιστου θερμικού ή ψυκτικού.

Λόγω της πληθώρας αποτελεσμάτων, παρακάτω παρουσιάζεται η κατανάλωση της αντλίας θερμότητας ενδεικτικά, μόνο για μία περίπτωση, για το Σενάριο 1 και για λειτουργία με το R410A. Όπως αναμενόταν, ακολουθεί τη μορφή του αντίστοιχου διαγράμματος του

Σχήματος 4-1. Ωστόσο, δεν είναι πανομοιότυπο, δηλαδή το Σχήμα 4-1 πολλαπλασιασμένο με ένα σταθερό συντελεστή, διότι ο COP, ο οποίος καθορίζει το φορτίο του συμπιεστή συναρτήσει του φορτίου λειτουργίας, μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους.



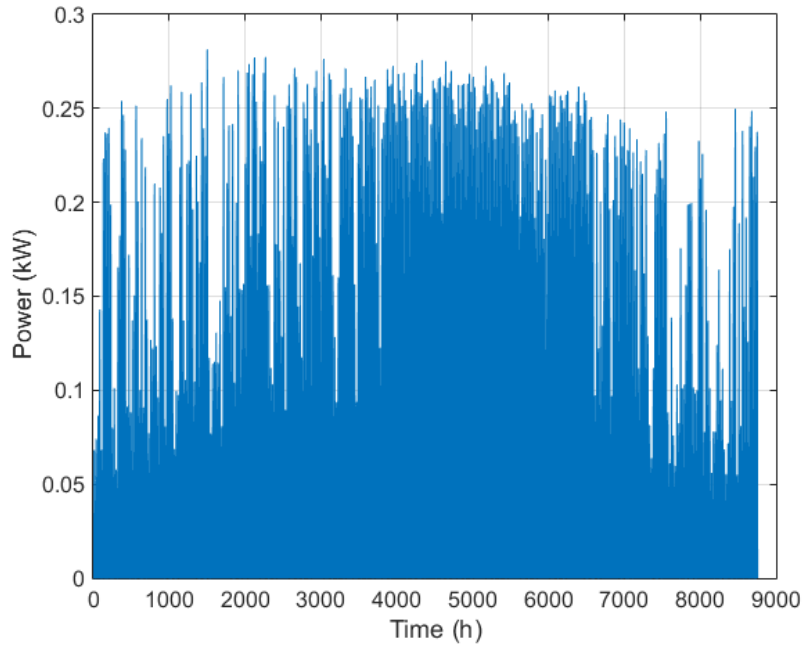
Σχήμα 4-3: Ωριαία κατανάλωση αντλίας θερμότητας Σεναρίου 1 με εργαζόμενο μέσο R410A.

#### 4.3.2 Παραγωγή Φ/Β πάνελ

Σημειώνεται ότι οι υπολογισμοί για τα φωτοβολταϊκά πραγματοποιήθηκαν με την υπόθεση νότιου προσανατολισμού και γωνία κλίσης των πάνελ αυτή για την οποία μεγιστοποιείται η ετήσια άμεση ακτινοβολία. Με βάση, τις σταθερές που όρισαν οι Foster, Ghassemi [42] για τον καθορισμό της ηλιακής άμεσης ακτινοβολίας σε επιφάνεια με κλίση σε κύρια τοποθεσία, η βέλτιστη κλίση για τα πάνελ είναι  $34.92^\circ$ .

Στο επόμενο Σχήμα φαίνεται η ετήσια παραγωγή ενός Φ/Β πάνελ κατά τη διάρκεια του έτους, σε χρονικά βήματα διάρκειας μίας ώρας. Όσον αφορά την ισχύ για περισσότερα του ενός πάνελ, αυτή προκύπτει από το παρακάτω διάγραμμα πολλαπλασιασμένη επί το συνολικό πλήθος των πάνελ.

Επισημαίνεται ότι για κάθε ώρα στην οποία έγινε προσομοίωση, εξήχθησαν οι καμπύλες λειτουργίας  $I-V$  και  $P-V$  για τις δεδομένες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας και ο υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος έγινε για την τάση (και συνεπώς το ρεύμα) στο οποίο μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου. Ομοίως, δηλαδή, υποτέθηκε λειτουργία MPPT, σύμφωνα με όσα σημειώθηκαν στο Κεφάλαιο 3.



Σχήμα 4-4: Ωριαία παραγόμενη ισχύς ενός Φ/Β πάνελ κατά τη διάρκεια του έτους.

#### 4.3.3 Εφαρμογή net-metering

Η λειτουργία του net-metering χρησιμοποιεί, εν γένει, το δίκτυο για «αποθήκευση» της πλεονάζουσας παραγόμενης ενέργειας, ώστε αυτή να αποδοθεί στο μέλλον, σε περίπτωση αδυναμίας κάλυψης του φορτίου από την παραγόμενη ισχύ.

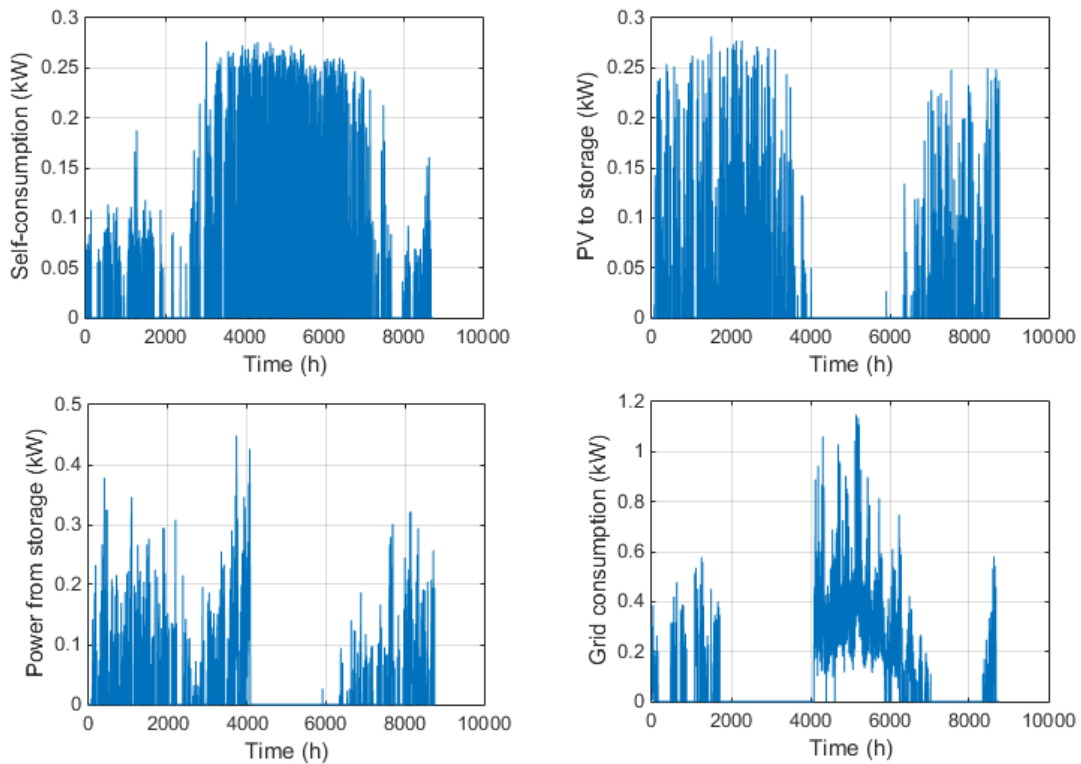
Αναλυτικότερα, η λειτουργία του στην προκειμένη περίπτωση περιγράφεται ως εξής:

Για κάθε ώρα του έτους, λαμβάνεται η κατανάλωση της αντλία θερμότητας και η παραγόμενη ισχύς των Φ/Β πάνελ. Αν η ισχύς αυτή επαρκεί για την κάλυψη του φορτίου, τότε το τμήμα που αντιστοιχεί στο φορτίο αποδίδεται σε αυτό (ιδιοκατανάλωση), ενώ το υπόλοιπο «αποθηκεύεται» στο δίκτυο. Αντίθετα, αν η ηλιακή παραγωγή δεν επαρκεί για το φορτίο, τότε όλη η ισχύς αποδίδεται στο φορτίο, δίχως αποθήκευση. Αν η «αποθηκευμένη» ισχύς μπορεί να καλύψει το έλλειμμα μεταξύ φορτίου και παραγόμενης ισχύος, τότε το μέρος αυτό της αποθηκευμένης ενέργειας αποδίδεται στο φορτίο με αποτέλεσμα την «εκφόρτιση» του δικτύου. Σε αντίθετη περίπτωση, η υπολειπόμενη ισχύς που απαιτείται για το φορτίο, λαμβάνεται από το δίκτυο.

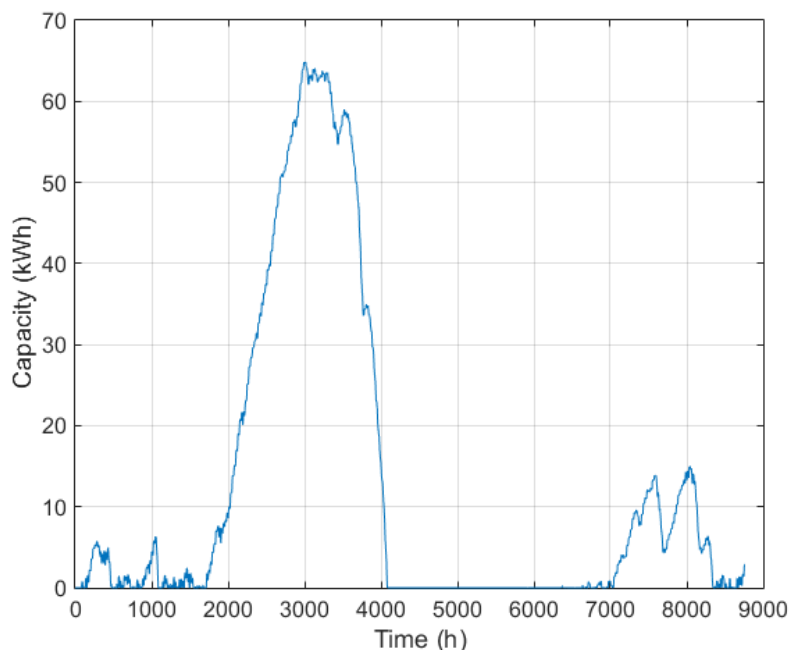
Βάσει αυτών, στο επόμενο Σχήμα φαίνονται τα προφίλ της ωριαίας ιδιοκατανάλωσης, της απόδοσης ενέργειας στο δίκτυο για αποθήκευση, της κατανάλωσης αποθηκευμένης ενέργειας και της κατανάλωσης του δικτύου κατά τη διάρκεια ενός έτους, για λειτουργία με ένα Φ/Β πάνελ, στο Σενάριο 1 και εργαζόμενο μέσω το R410A.

Σύμφωνα με αυτό και σε συνδυασμό με τα προηγούμενα, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα. Στο διάστημα μεταξύ 2000-3000 h υπάρχει αύξηση της αποθήκευσης, γιατί τα φορτία της αντλίας θερμότητας είναι μειωμένα, ενώ υπάρχει ηλιακή παραγωγή. Αντίθετα, μετά τις 3000 h υπάρχει μεγάλη αύξηση στην κατανάλωση της αντλίας, η οποία

δεν μπορεί να καλυφθεί από το πάνελ, με αποτέλεσμα την «εκφόρτιση» του δικτύου μέχρι τις 4000 h και τη μηδενική αποθήκευση στο διάστημα 4000-7000 h. Όσον αφορά τις υπόλοιπες περιόδους, υπάρχει διαδοχική αποθήκευση και απόδοσης της παραγόμενης ενέργειας χωρίς μεγάλα διαστήματα συνεχούς αποθήκευσης ή εκφόρτισης. Αυτό συμβαίνει διότι, αφενός η κατανάλωση της αντλίας είναι χαμηλότερη και αφετέρου, η ηλιακή παραγωγή είναι μειωμένη.



Σχήμα 4-5: Ωριαία ιδιοκατανάλωση, απόδοση ενέργειας στο δίκτυο για αποθήκευση, κατανάλωση αποθηκευμένης ενέργειας και κατανάλωση δικτύου κατά τη διάρκεια του έτους, για λειτουργία με ένα Φ/Β πάνελ, στο Σενάριο 1 και εργαζόμενο μέσω R410A.



Σχήμα 4-6: Αποθηκευμένη στο δίκτυο ενέργεια κατά τη διάρκεια του έτους, για λειτουργία με ένα Φ/Β πάνελ, στο Σενάριο 1 και με εργαζόμενο μέσω R410A.

#### 4.4 Τεχνο-οικονομική αξιολόγηση

Για την πλήρη αξιολόγηση των δύο συστημάτων (αντλία θερμότητας χωρίς ή σε συνδυασμό με τα Φ/Β πάνελ) απαιτείται η διερεύνηση τόσο τεχνικών όσο και οικονομικών δεικτών. Στην παρούσα μελέτη, εξετάζονται, όσον αφορά την τεχνική αξιολόγηση, η εξοικονόμηση καταναλισκόμενης πρωτογενούς ενέργειας και η αντίστοιχη μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub>. Αναφορικά με την οικονομική αξιολόγηση, εξετάζονται η περίοδος αποπληρωμής, η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης (εγκατάσταση του συγκεκριμένου συστήματος) και η εσωτερικός βαθμός απόδοσής της. Συγκεκριμένα, θα διερευνηθούν οι παραπάνω δείκτες τόσο για τη μεμονωμένη χρήση αντλίας θερμότητας, όσο και για τη συνδυασμένη χρήση αντλίας θερμότητας και πάνελ, συναρτήσει του πλήθους των εγκατεστημένων πάνελ.

##### 4.4.1 Υφιστάμενη κατάσταση

Προκειμένου να γίνει σύγκριση ωστόσο, απαιτείται ένα σύστημα αναφοράς (υφιστάμενη κατάσταση). Εδώ, λαμβάνεται ως σύστημα αναφοράς σύστημα θέρμανσης-ψύξης που αποτελείται από λέβητα για την κάλυψη θερμικών φορτίων και αντλία θερμότητας αέρα-αέρα (κλιματιστικό) για τα ψυκτικά φορτία. Όσον αφορά το λέβητα, γίνεται η παραδοχή της λειτουργίας του με Φ.Α., με εξαίρεση το σενάριο 2 για το οποίο, λόγω της παλαιότητας του κτηρίου, γίνεται η υπόθεση καύσης πετρελαίου. Τα χαρακτηριστικά απόδοσης των συστημάτων αυτών (μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης και COP) φαίνονται στον Πίνακα 4-3.

Μέσω των χαρακτηριστικών αυτών, προκύπτει η ετήσια κατανάλωση ενέργειας του υφιστάμενου συστήματος, από τα ετήσια θερμικά και ψυκτικά φορτία του Σχήματος 4-1, ως το άθροισμα της κατανάλωσης του λέβητα ( $Q_{b,total}$ ) και του κλιματιστικού ( $W_{AC,total}$ ).

$$Q_{b,total} = \frac{Q_{h,total}}{\bar{\eta}_b} \quad (25)$$

$$W_{AC,total} = \frac{Q_{c,total}}{COP} \quad (26)$$

Πίνακας 4-3: Χαρακτηριστικά απόδοσης τεχνικών συστημάτων υφιστάμενης κατάστασης.

Σύστημα	Βαθμός απόδοσης (-)	COP (-)
Λέβητας Φ.Α.	0.90	-
Λέβητας πετρελαίου	0.85	-
Κλιματιστικό	-	2.0

#### 4.4.2 Τεχνικοί δείκτες

Οι τεχνικοί δείκτες που εξετάζονται αφορούν την εξοικονόμηση ενεργειακής κατανάλωσης (ως κόστος), τη μείωση της κατανάλωσης ισοδύναμης πρωτογενούς ενέργειας, καθώς και των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Ο λόγος για τον οποίο δεν εξετάζεται η εξοικονόμηση ενέργειας ως ενέργεια αλλά ως κόστος, είναι ότι δεν καταναλώνεται η ίδια μορφή ενέργειας στην υφιστάμενη (καύσιμο και ηλεκτρική ενέργεια) και τη μελετώμενη κατάσταση (ηλεκτρική ενέργεια). Για το σκοπό αυτό, διερευνάται η εξοικονόμηση ενέργειας, όσον αφορά το κόστος της. Το μέγεθος αυτό, παρότι έχει οικονομικά στοιχεία, αντικατοπτρίζει τη μείωση κατανάλωσης που επιτυγχάνεται.

- Εξοικονόμηση κόστους ενέργειας:

Προφανώς, η εξοικονόμηση κόστους ενέργειας ( $E_{sav}$ ) προκύπτει από το κόστος κατανάλωσης της νέας και της υφιστάμενης κατάστασης, δηλαδή:

$$E_{sav}(\text{€}) = (Q_{b,total}C_f + W_{AC,total}C_{el}) - W_{t,total}C_{el} \quad (27)$$

όπου  $C_f$ ,  $C_{el}$  το κόστος καυσίμου και ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh) και  $W_{t,total}$  η συνολική κατανάλωση δικτύου στη νέα κατάσταση.

- Μείωση κατανάλωσης ισοδύναμης πρωτογενούς ενέργειας ( $\Delta E_p$ ):

Προκειμένου η εξοικονόμηση να αξιολογηθεί σε όρους ενέργειας, εκτιμάται η μείωση στην ισοδύναμη πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας. Για την αναγωγή της πραγματικής κατανάλωσης σε πρωτογενή γίνεται χρήση συντελεστών [47], οι οποίοι φαίνονται στον επόμενο Πίνακα. Συνεπώς, γίνεται χρήση εξίσωσης αντίστοιχης με την παραπάνω, με τη διαφορά ότι αντί για κόστη ενέργειας, οι καταναλώσεις πολλαπλασιάζονται επί αυτών των συντελεστών.

Πίνακας 4-4: Συντελεστές μετατροπής πραγματικής κατανάλωσης ενέργειας σε πρωτογενή [47].

Πηγή ενέργειας	Συντελεστής μετατροπής (kWh/kWh)
Φ.Α.	1.05
Πετρέλαιο	1.10
Ηλεκτρική ενέργεια	2.90

- Μείωση ισοδύναμων εκπομπών CO<sub>2</sub> ( $\Delta E_{CO_2}$ ):

Αντίστοιχα με την πρωτογενή ενέργεια, ορίζονται συντελεστές μετατροπής της πραγματικής κατανάλωσης ενέργειας (kWh) σε εκπομπές CO<sub>2</sub> (kg).

Πίνακας 4-5: Συντελεστές μετατροπής πραγματικής κατανάλωσης ενέργειας σε εκπομπές CO<sub>2</sub> [47].

Πηγή ενέργειας	Συντελεστής μετατροπής (kg CO <sub>2</sub> /kWh)
Φ.Α.	0.196
Πετρέλαιο	0.264
Ηλεκτρική ενέργεια	0.989

#### 4.4.3 Οικονομικοί δείκτες

Οι εξεταζόμενοι οικονομικοί δείκτες είναι η απλή περίοδος αποπληρωμής (Pay-back Period – Pbp), η καθαρή παρούσα αξία (Net Present Value – NPV) της «επένδυσης» και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσής της (Internal Rate of Return – IRR).

- Περίοδος αποπληρωμής:

Προφανώς, η απλή περίοδος αποπληρωμής εκφράζει τα έτη στα οποία το κόστος εφαρμογής ( $C_{CAPEX}$ ) του νέου συστήματος έχει καλυφθεί από τις ετήσιες εξοικονομήσεις κόστους, δηλαδή:

$$PbP = \frac{E_{sav}(\text{€})}{C_{CAPEX}} \quad (28)$$

- Καθαρή παρούσα αξία:

Το μέγεθος αυτό λαμβάνει υπόψη τη χρονική αξία του χρήματος και υπολογίζεται ανάγοντας την καθαρή χρηματοροπή κάθε έτους ( $R_i$ ) στο παρόν βάσει ενός επιτοκίου προεξόφλησης  $i$ , το οποίο στην προκειμένη περίπτωση ορίζεται ίσο με 7%. Για τον υπολογισμό της, απαιτείται επιπλέον ο ορισμός συγκεκριμένου χρονικού ορίζοντα αξιολόγησης, ο οποίο εδώ τίθεται ίσος με είκοσι (20) έτη. Ο υπολογισμός γίνεται σύμφωνα



με τον επόμενο τύπο, όπου το  $R_t$  για τον πρώτο χρόνο εκφράζει το  $C_{CAPEX}$ , ενώ για τους υπόλοιπους το  $E_{sav}$ .

$$NPV = \sum_{j=0}^{20} \frac{R_t}{(1+i)^j} \quad (29)$$

- Εσωτερικός βαθμός απόδοσης:

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης εκφράζει το επιτόκιο προεξόφλησης ( $i$ ) πάνω από το οποίο η καθαρή παρούσα αξία αποκτά αρνητικές τιμές. Συνεπώς, αύξηση του IRR συνεπάγεται καλύτερη οικονομική απόδοση της επένδυσης. Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται διότι σταθμίζει τους δύο προηγούμενους δείκτες, την περίοδο αποπληρωμής και την καθαρή παρούσα αξία διότι, αύξηση του χρόνου αποπληρωμής δε σημαίνει απαραίτητα μείωση του NPV.

#### 4.4.4 Κόστος υποσυστημάτων και ενέργειας

Για τον υπολογισμό των παραπάνω δεικτών, απαιτούνται υπολογισμοί κόστους και συνεπώς, τα αντίστοιχα δεδομένα. Στην προκειμένη περίπτωση, τα κόστη που λαμβάνονται υπόψη αφορούν τα κόστη εξοπλισμού (για την αντλία θερμότητας και τα Φ/Β πάνελ) και τα κόστη ενέργειας (ηλεκτρικής και καυσίμου).

- Κόστη ενέργειας:

Το κόστος της ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (ως πετρέλαιο και Φ.Α.), λαμβάνονται από στατιστικές έρευνες και δεδομένα αρμόδιων αρχών και φαίνονται στον επόμενο Πίνακα. Στις τιμές αυτές συμπεριλαμβάνεται και Φόρος Προστιθέμενης Αξίας (Φ.Π.Α.)

Πίνακας 4-6: Κόστη ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.

Μέγεθος	Τιμή (€/kWh)
Ηλεκτρική ενέργεια	0.1646 [48]
Πετρέλαιο	0.1060 [49]
Φυσικό αέριο	0.0654 [50]

- Κόστος αντλίας θερμότητας:

Στο κόστος της αντλίας θερμότητας λήφθηκε υπόψη το κόστος των βασικών εξαρτημάτων της, το κόστος των σωληνώσεων, το κόστος για την πλήρωση του κυκλώματος με το εργαζόμενο μέσο και το κόστος κατασκευής της. Ειδικότερα, ελήφθησαν τα εξής κόστη:

- Εναλλάκτες θερμότητας: Για πλακοειδείς εναλλάκτες, χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη σχέση συσχέτισης του κόστους με την επιφάνεια  $A$  των εναλλακτών [51]:

$$C_{hex} = 190 + 310 \cdot A(m^2) \quad (30)$$

- Συμπιεστής: Προκειμένου να αποφευχθεί ενδεχόμενη υποεκτίμηση του κόστους του, αυτό υπολογίστηκε ως το άθροισμα δύο συνιστωσών κόστους που προκύπτουν από τη βιβλιογραφία και αφορούν ελικοειδείς συμπιεστές [51] και κινητήρες [52], αντίστοιχα:

$$C_{comp} = 1.5 \cdot [225 + 170 \cdot V_s(l/rev)] + 71.7 \cdot P^{0.95} \quad (31)$$

όπου  $V_s$  ο όγκος «εμβολισμού» του συμπιεστή ο οποίος δίνεται από τον κατασκευαστή και  $P$  η κατανάλωση του συμπιεστή η οποία, υπολογίζεται για τη δυσμενέστερη περίπτωση λειτουργίας και προσαυξάνεται κατά 30%, για συντηρητική εκτίμηση.

- Εκτονωτική βαλβίδα: Το κόστος της θεωρείται σταθερό και ίσο με 150 €.
- Σωληνώσεις: Θεωρείται ίσο με το 15% του συνολικού κόστους του βασικού εξοπλισμού που περιγράφηκε παραπάνω.
- Εργαζόμενο μέσο: Τα κόστη των εργαζόμενων μέσων που εξετάζονται προκύπτουν από τον όγκο τους στο κύκλωμα, ο οποίος υποτίθεται ίσος με 3 l. Το μέγεθος αυτό πολλαπλασιάζεται με το μοναδιαίο ογκομετρικό κόστος των εξεταζόμενων ρευστών που φαίνεται στον επόμενο Πίνακα.

Πίνακας 4-7: Μοναδιαία κόστη προμήθειας εργαζόμενου μέσου.

Εργαζόμενο μέσο	Ανηγμένο κόστος (€/l)
R134a	11.6
R404A	29.9
R410A	14.1
R407C	23.6

- Κατασκευή: Το κόστος κατασκευής (εργατικά κόστη) θεωρείται ίσο με το 20% του συνολικού κόστους που προκύπτει από τα παραπάνω.

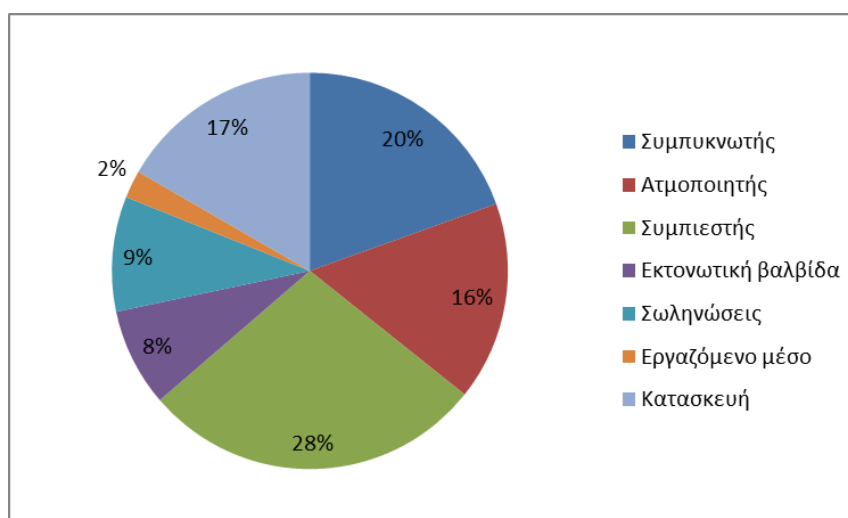
Συγκεντρωτικά, παρουσιάζεται στον επόμενο Πίνακα το κόστος των αντλιών που προκύπτουν για όλα τα εργαζόμενα μέσα κάθε Σεναρίου. Επίσης, παρατίθεται το ανηγμένο κόστος, ως προς την ονομαστική ψυκτική ισχύ της αντλίας.

Πίνακας 4-8: Κόστος αντλίας θερμότητας συναρτήσει Σεναρίου και εργαζόμενου μέσου.

Αριθμός σεναρίου	Εργαζόμενο μέσο	Κόστος (€)	Ειδικό κόστος (€/kW)
1	R410A	1719.8	354.6
	R134a	1868.4	385.3
	R404A	1868.5	385.3
	R407C	1835.4	378.5
2	R410A	2121.7	268.0
	R134a	2217.2	280.1
	R404A	2256.2	285.0
	R407C	2526.9	319.2
3	R410A	1849.6	294.0
	R134a	2029.0	322.5
	R404A	2016.7	320.5
	R407C	1970.1	313.1
4	R410A	1807.8	316.6
	R134a	1971.6	345.3
	R404A	1996.6	349.6
	R407C	1919.3	336.1

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το R410A παρουσιάζει το χαμηλότερο κόστος αντλίας θερμότητας. Όπως αποδεικνύεται και στη συνέχεια του Κεφαλαίου, το ρευστό αυτό εξασφαλίζει τη μεγαλύτερη οικονομική απόδοση. Για τις προκρινόμενες αυτές λύσεις, απεικονίζεται στο Σχήμα 4-7 ο επιμερισμός του κόστους στις συνιστώσες της αντλίας. Οι τιμές έχουν προκύψει μέσω των σταθμισμένων μεγεθών των τεσσάρων Σεναρίων.

Όπως προκύπτει, το μεγαλύτερο κόστος οφείλεται στο συμπιεστή (28%) και στη συνέχεια στους εναλλάκτες και την κατασκευή. Αντίθετα, το εργαζόμενο μέσο επιδρά ελάχιστα στο συνολικό κόστος, σε ποσοστό που προσεγγίζει το 2%.



Σχήμα 4-7: Επιμερισμός κόστους αντλίας θερμότητας στις συνιστώσες της για μέσο Σενάριο με εργαζόμενο μέσο R410A.

- Κόστος Φ/Β συστήματος:

Το ειδικό κόστος του Φ/Β συστήματος λαμβάνεται ίσο με 1400 €/kW<sub>p</sub> [53]. Στην τιμή αυτή συμπεριλαμβάνεται το κόστος των πάνελ, του inverter και παρελκόμενων στοιχείων, όπως ο ρυθμιστής του συστήματος.

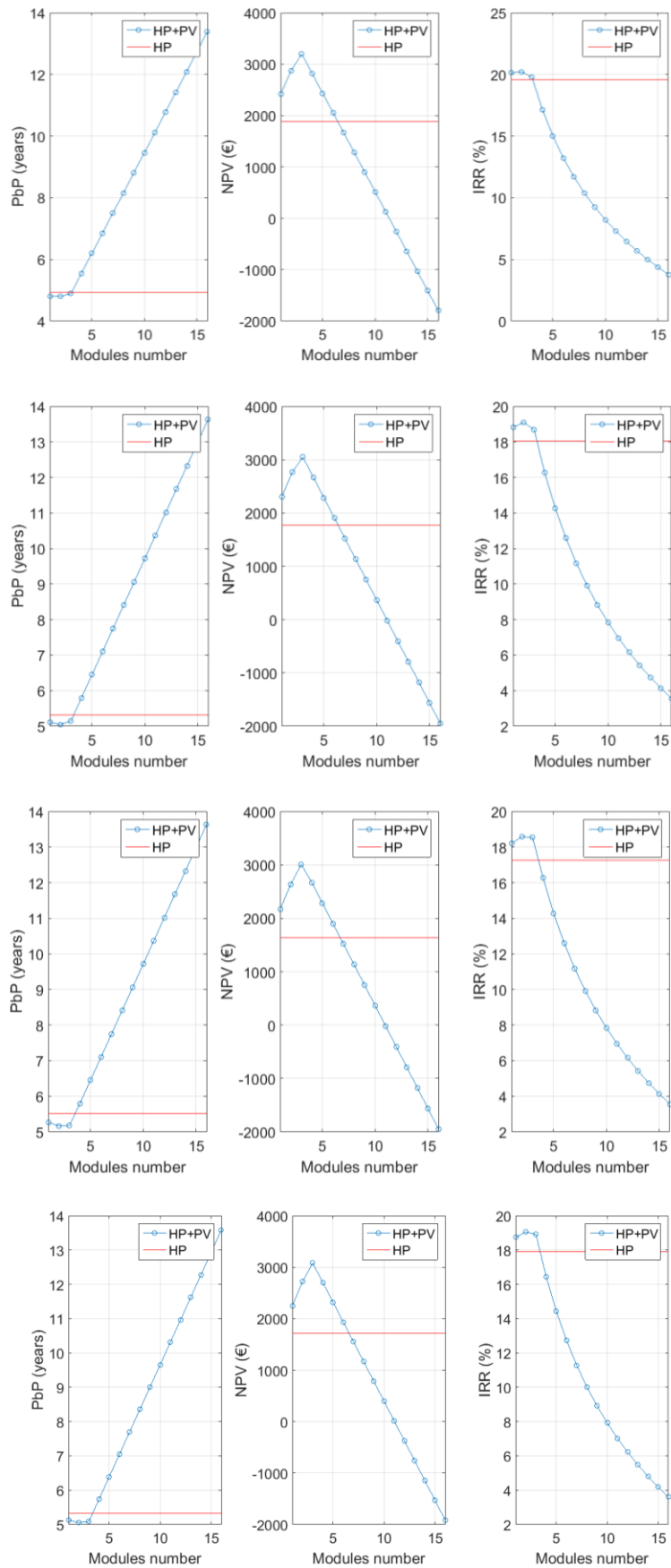
#### 4.4.5 Αποτελέσματα

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για κάθε Σενάριο και εργαζόμενο μέσο. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι οικονομικοί δείκτες για την αντλία θερμότητας χωρίς, και σε συνδυασμό με το Φ/Β σύστημα, συναρτήσει των Φ/Β πάνελ.

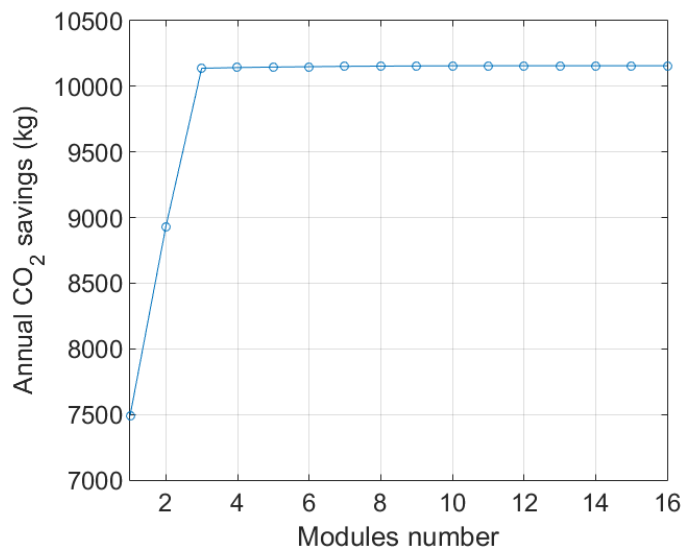
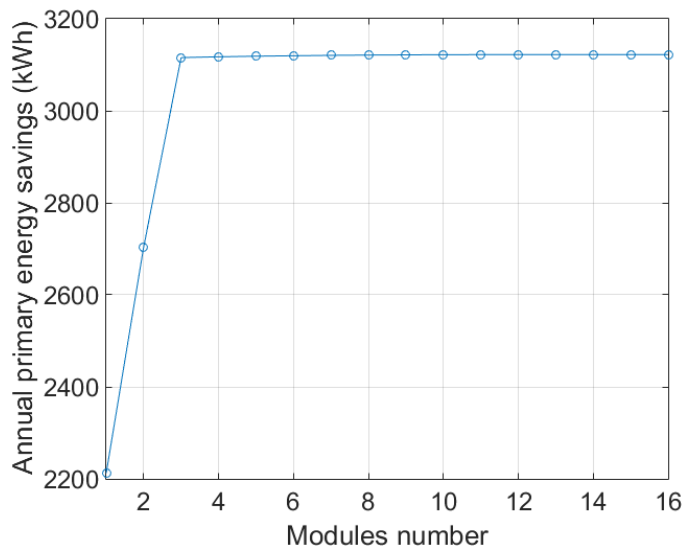
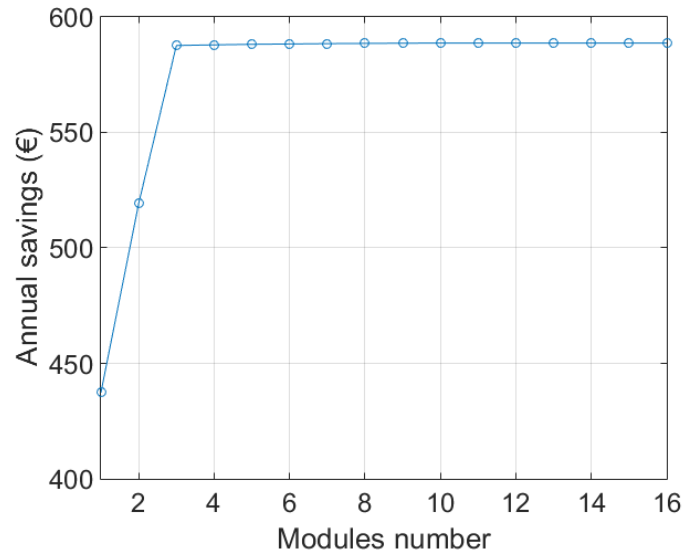
Η αξιολόγηση θα γίνει δίνοντας έμφαση στην περίοδο αποπληρωμής και την παρούσα αξία. Ως κριτήριο, τίθεται η μεγιστοποίηση της παρούσας αξίας, δίχως σημαντική αύξηση της περιόδου αποπληρωμής. Κατ' αυτόν τον τρόπο, εκτιμάται αφενός, αν η βέλτιστη λύση αντιστοιχεί στη μεμονωμένη χρήση της αντλίας θερμότητας (HP) ή στη σύζευξη της με Φ/Β σύστημα (HP+PV) και αφετέρου, το εργαζόμενο μέσο της αντλίας και το πλήθος (επιφάνεια) των Φ/Β πάνελ, στην περίπτωση που η σύνδεση αντλίας-Φ/Β συστήματος κρίνεται αποδοτικότερη.

Ειδικότερα, στο Σχήμα 4-8 φαίνονται οι οικονομικοί δείκτες για το Σενάριο 1 και όλα τα εργαζόμενα μέσα. Κατά σειρά, από πάνω προς τα κάτω τα διαγράμματα αντιστοιχούν στα R410A, R134a, R404A και R407C. Ακολουθώντας το κριτήριο μεγιστοποίησης της παρούσας αξίας δίχως μεγάλη αύξηση της περιόδου αποπληρωμής, φαίνεται πως προκρίνεται η σύζευξη της αντλίας θερμότητας με το Φ/Β σύστημα, για ορισμένο, ωστόσο, πλήθος πάνελ. Επιπλέον, το ρευστό R410A παρουσιάζει τους βέλτιστους οικονομικούς δείκτες, καθώς εξασφαλίζει μικρότερη περίοδο αποπληρωμής, μεγαλύτερη καθαρή παρούσα αξία και μεγαλύτερο συντελεστή εσωτερικής απόδοσης. Τέλος, όσον αφορά το βέλτιστο πλήθος Φ/Β πάνελ, αυτό αντιστοιχεί σε 3 πάνελ, καθώς εκεί μεγιστοποιείται η NPV ενώ η περίοδος αποπληρωμής παραμένει προσεγγιστικά ίδια με την ελάχιστη, με αμελητέα αύξηση.

Όσον αφορά τη μορφή των καμπυλών, και ιδιαίτερα της περιόδου αποπληρωμής και της παρούσας αξίας, παρατηρείται ότι, μετά το σημείο μεγιστοποίησης της NPV, ακολουθεί γραμμική μεταβολή τους, αύξηση για την αποπληρωμή και μείωση για την παρούσα αξία. Η ερμηνεία των καμπυλών αυτών γίνεται μέσω των διαγραμμάτων των τεχνικών δεικτών, οι οποίοι παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-9. Σύμφωνα με αυτά, για πλήθος πάνελ μεγαλύτερα από τρία, το επιπλέον κέρδος είναι αμελητέο, διότι τα πάνελ έχουν καλύψει σχεδόν το σύνολο της κατανάλωσης της αντλίας. Αντίθετα, αυξάνοντας το πλήθος τους, αυξάνεται το κόστος επένδυσης και προφανώς γραμμικά, οδηγώντας συνεπώς και στη γραμμική μεταβολή των οικονομικών αυτών δεικτών.



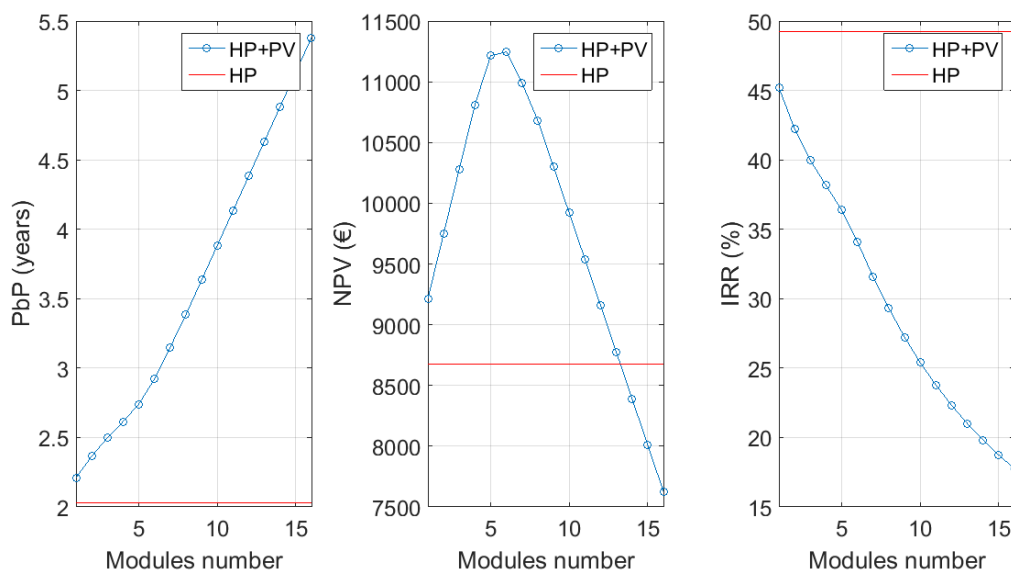
Σχήμα 4-8: Οικονομικοί δείκτες Σεναρίου 1 συναρτήσεσι εργαζόμενου μέσου (κατά σειρά από πάνω προς τα κάτω: R410A, R134a, R404A, R407C).



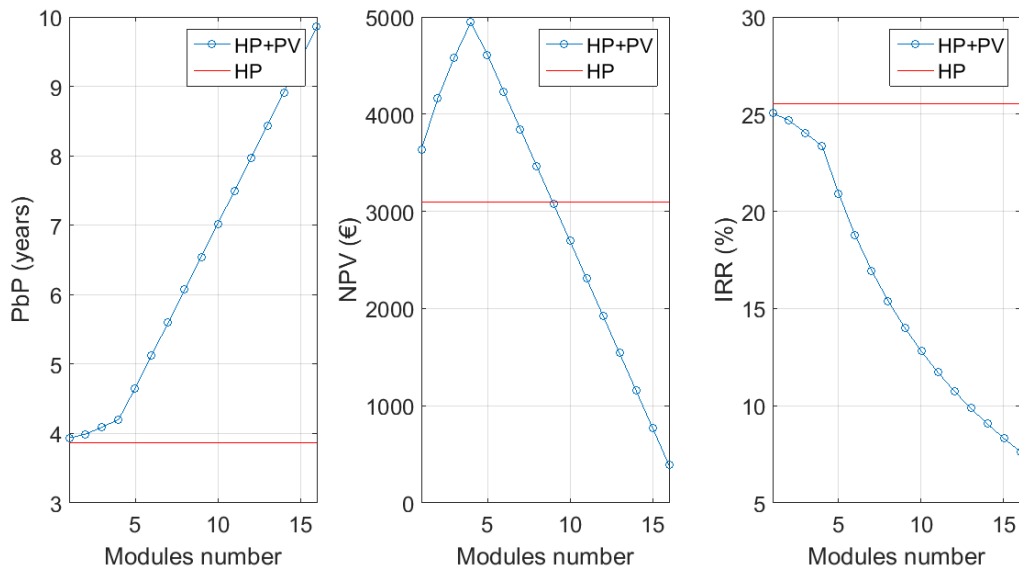
Σχήμα 4-9: Τεχνικοί δείκτες Σεναρίου 1 για εργαζόμενο μέσο R410A.

Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και για τα υπόλοιπα σενάρια, με βέλτιστη λύση τη σύζευξη αντλίας θερμότητας και πάνελ και εργαζόμενο μέσο το R410A. Τα αντίστοιχα διαγράμματα μεταβολής των οικονομικών δεικτών συναρτήσει του πλήθους των πάνελ δίνονται στα επόμενα Σχήματα. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται έγκειται στις διαφορετικές τιμές καθώς, όσο μεγαλύτερα τα θερμικά-ψυκτικά φορτία (Σενάρια 2, 3), τόσο μεγαλύτερα τα οφέλη από την εφαρμογή του μελετούμενου συστήματος. Τέλος, μεταξύ των Σεναρίων ποικίλει και το βέλτιστο πλήθος Φ/Β πάνελ.

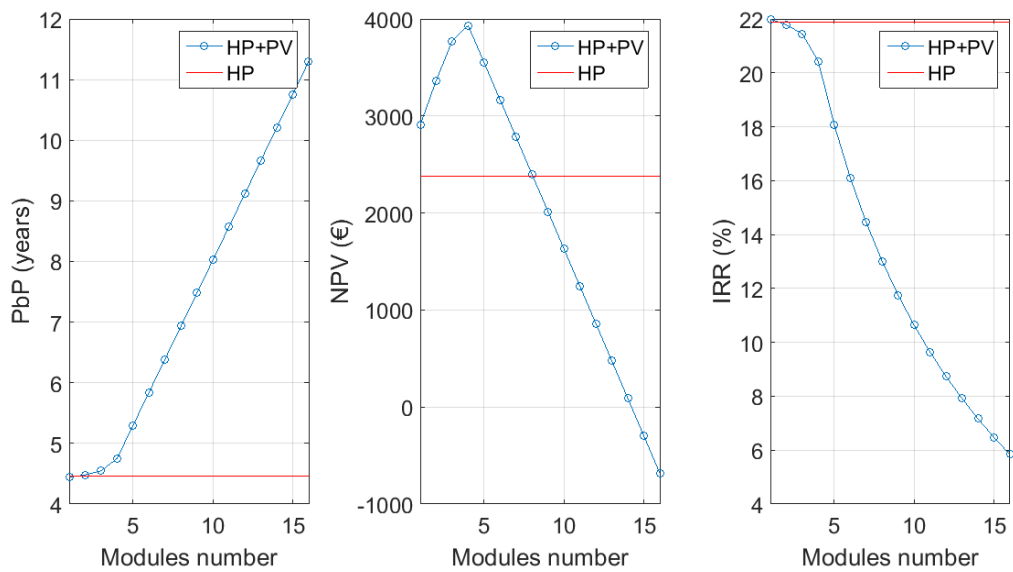
Στον Πίνακα 4-9 δίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ανάλυσης για κάθε σενάριο, όπου καταγράφεται το βέλτιστο εργαζόμενο μέσο, το βέλτιστο πλήθος-επιφάνεια των Φ/Β πάνελ, οι επιφάνειες των εναλλακτών και οι τεχνικοί και οικονομικοί δείκτες και βάσει των οποίων, επιβεβαιώνεται το άνωθεν συμπέρασμα.



Σχήμα 4-10: Οικονομικοί δείκτες Σεναρίου 2 για εργαζόμενο μέσο R410A.



Σχήμα 4-11: Οικονομικοί δείκτες Σεναρίου 3 για εργαζόμενο μέσο R410A.



Σχήμα 4-12: Οικονομικοί δείκτες Σεναρίου 4 για εργαζόμενο μέσο R410A.



Πίνακας 4-9: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τεχνο-οικονομικής βελτιστοποίησης.

A/A Σεναρίου	Εργαζόμενο μέσο	Πλήθος πάνελ	Επιφάνεια πάνελ (m <sup>2</sup> )	A <sub>cond</sub> (m <sup>2</sup> )	A <sub>evap</sub> (m <sup>2</sup> )	E <sub>sav</sub> (€)	ΔE <sub>p</sub> (kWh)	ΔE <sub>CO2</sub> (kg)	PbP (έτη)	NPV (€)	IRR (%)
1	R410A	3	4.86	0.400	0.251	587.7	3116	10140	4.89	3199	19.78
	R134a	3	4.86	0.500	0.503	587.6	3116	10140	5.15	3050	18.69
	R404A	3	4.86	0.469	0.329	583.6	3091	10070	5.18	3008	18.54
	R407C	3	4.86	0.367	0.445	587.6	3115	10140	5.09	3083	18.92
2	R410A	6	9.72	0.834	0.619	1517.0	6378	21090	2.92	11250	34.10
	R134a	5	8.10	0.834	0.909	1484.0	6180	20510	2.79	11190	35.71
	R404A	6	9.72	0.834	0.619	1514.0	6361	21040	3.02	11080	33.01
	R407C	6	9.72	0.867	1.336	1514.0	6360	21040	3.20	10810	31.11
3	R410A	4	6.48	0.534	0.309	806.4	4252	13900	4.20	4945	23.35
	R134a	4	6.48	0.634	0.638	810.9	4279	13980	4.40	4812	22.22
	R404A	4	6.48	0.600	0.425	794.9	4183	13700	4.47	4659	21.82
	R407C	4	6.48	0.467	0.541	800.2	4215	13790	4.39	4761	22.30
4	R410A	4	6.48	0.500	0.290	704.4	3935	12260	4.75	3932	20.42
	R134a	4	6.48	0.600	0.580	704.4	3935	12260	4.99	3769	19.36
	R404A	4	6.48	0.567	0.389	704.4	3935	12260	5.02	3743	19.21
	R407C	4	6.48	0.433	0.503	704.3	3935	12250	4.91	3820	19.69

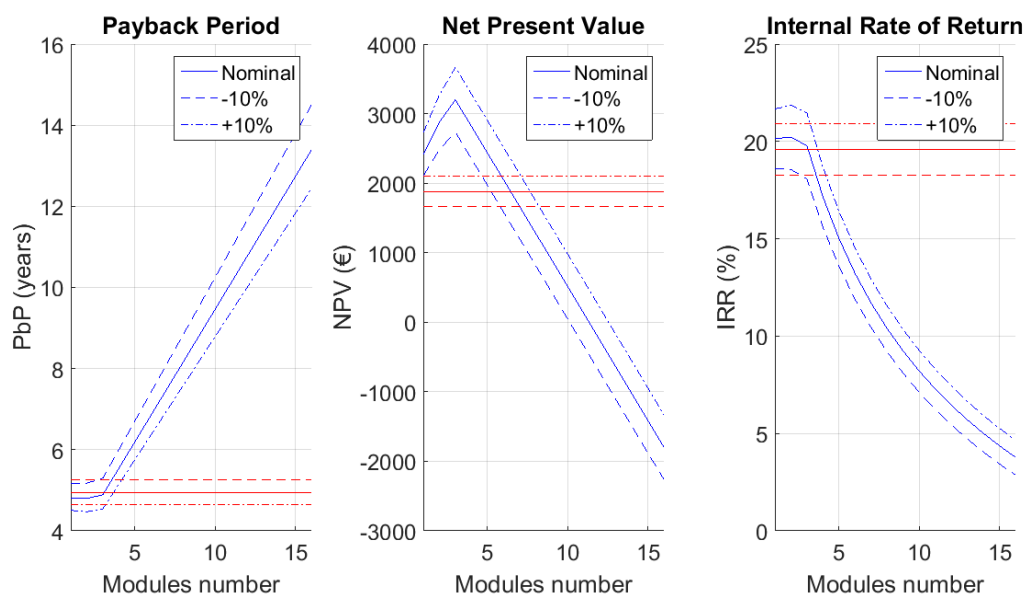
## 4.5 Ανάλυση ευαισθησίας

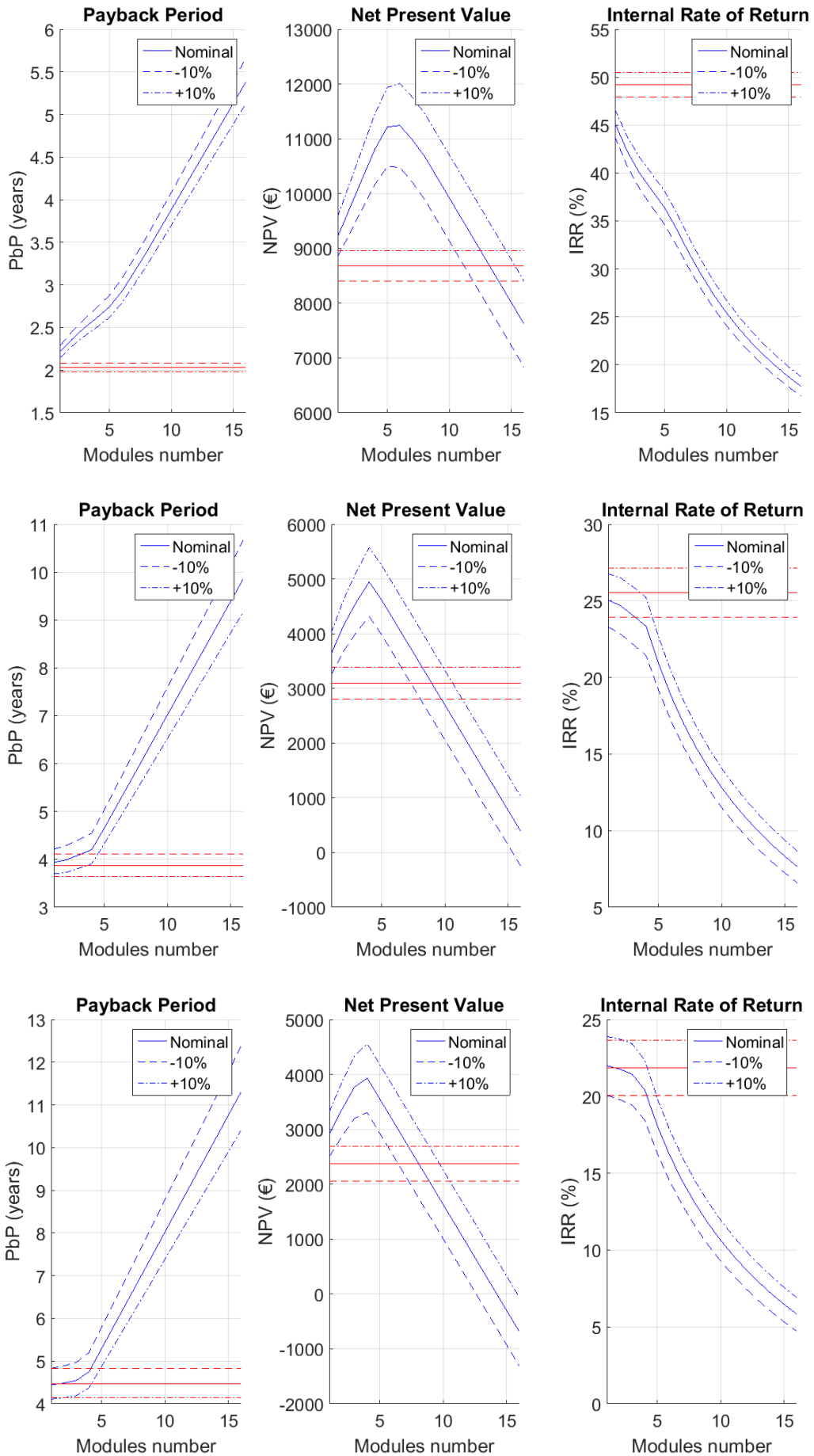
Δεδομένων των μεταβολών που ενδέχεται να συμβούν σε βασικά μεγέθη που επηρεάζουν την παραπάνω αξιολόγηση, διενεργείται ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων αυτών ώστε να διερευνηθεί η τεχνο-οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος σε ενδεχόμενη μεταβολή τους. Συγκεκριμένα, τα μεγέθη, των οποίων οι μεταβολές εξετάζονται, είναι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, το κόστος των καυσίμων (Φ.Α. και πετρέλαιο), το κόστος της αντλίας θερμότητας και το κόστος των Φ/Β πάνελ. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω για κάθε περίπτωση και συγκεκριμένα, για το προκρινόμενο εργαζόμενο μέσο, R410A. Στα Σχήματα που ακολουθούν, τα διαγράμματα παρουσιάζονται από πάνω προς τα κάτω, από το Σενάριο 1 έως το Σενάριο 4 και όσον αφορά το χρωματισμό, οι μπλε γραμμές αντιστοιχούν σε (HP+PV) ενώ οι κόκκινες σε (HP), σύμφωνα με τα προηγούμενα.

### 4.5.1 Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας

Σύμφωνα με δεδομένα της Eurostat του 2018 [48], η μεταβολή της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος σε ορισμένες χώρες ξεπερνά το 10 % κατά την διάρκεια ενός έτους, αναδεικνύοντας την ανάγκη απόκτησης εποπτείας της συμπεριφοράς του συστήματος. Συνεπώς, εξετάζονται δύο περιπτώσεις εκατέρωθεν της ονομαστικής, αύξηση και μείωση κατά 10% γύρω από την ονομαστική τιμή των 0.1646 €/kWh.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4-13, μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας μειώνει την οικονομική απόδοση του συστήματος, δίχως ωστόσο να αλλάζει το γεγονός ότι η βέλτιστη λύση αντιστοιχεί σε (HP+PV) και στο ίδιο πλήθος πάνελ. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μειωμένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του νέου συστήματος συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση. Ειδικότερα, μείωση του κόστους κατά 10% οδηγεί σε μείωση της καθαρής παρούσας αξίας σε ποσοστό που κυμαίνεται μεταξύ 6.84 και 15.92% για τα Σενάρια 2 και 4, αντίστοιχα.



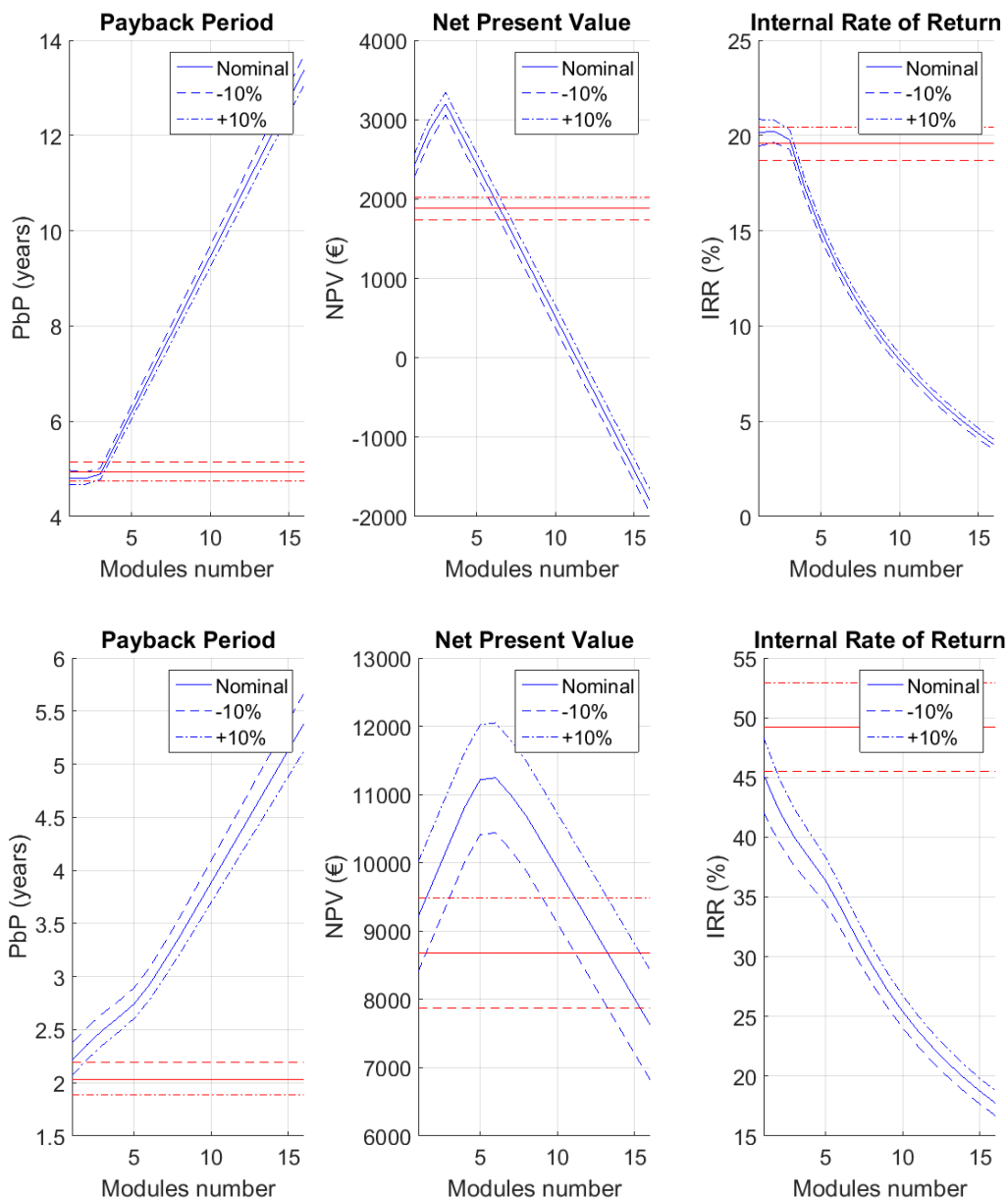


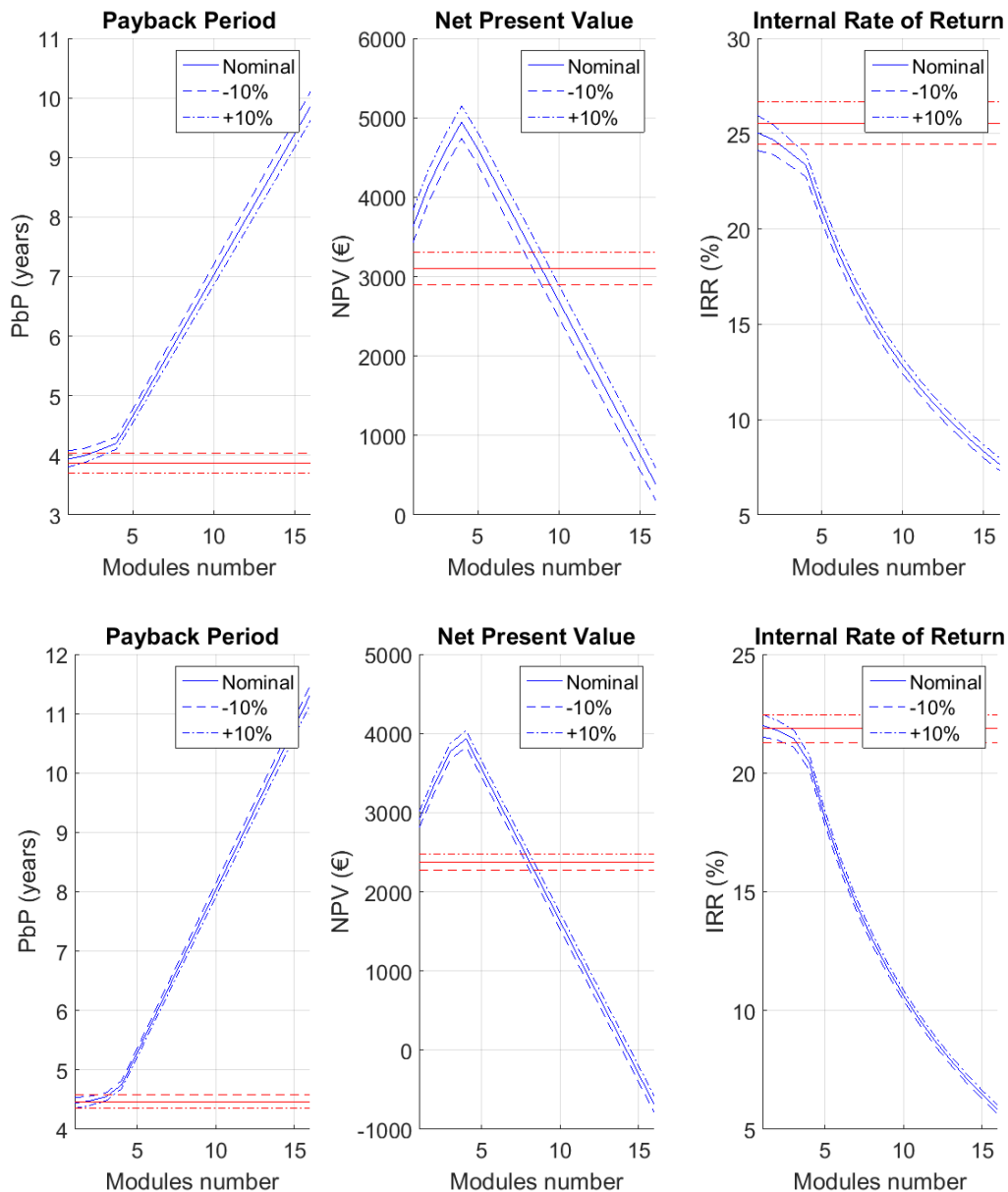
Σχήμα 4-13: Επίδραση κόστους ηλεκτρικής ενέργειας στους οικονομικούς δείκτες όλων των Σεναρίων, για εργαζόμενο μέσο R410A (κατά σειρά από πάνω προς τα κάτω: Σενάριο 1-Σενάριο 4).

#### 4.5.2 Κόστος καυσίμου

Αναφορικά με το κόστος του καυσίμου (πετρέλαιο για το Σενάριο 2 και Φ.Α. για τα υπόλοιπα), εφαρμόζεται το ίδιο ποσοστό μεταβολής  $\pm 10\%$  από το αντίστοιχο ονομαστικό.

Αντίστοιχα με πριν, μείωση του κόστους καυσίμου μειώνει την αποδοτικότητα της επένδυσης, αλλά σε μικρότερο βαθμό, λόγω της σημαντικά χαμηλότερης τιμής της θερμικής έναντι της ηλεκτρικής ενέργειας. Ομοίως, μείωση του κόστους κατά 10% επιφέρει μείωση του NPV κατά 2.59-7.20% για τα Σενάρια 4 και 2, αντίστοιχα. Η μεγαλύτερη μεταβολή συμβαίνει για το Σενάριο 2, λόγω των πολύ υψηλών φορτίων θέρμανσης και συνεπώς, της μεγαλύτερης κατανάλωσης θερμικής ενέργειας.



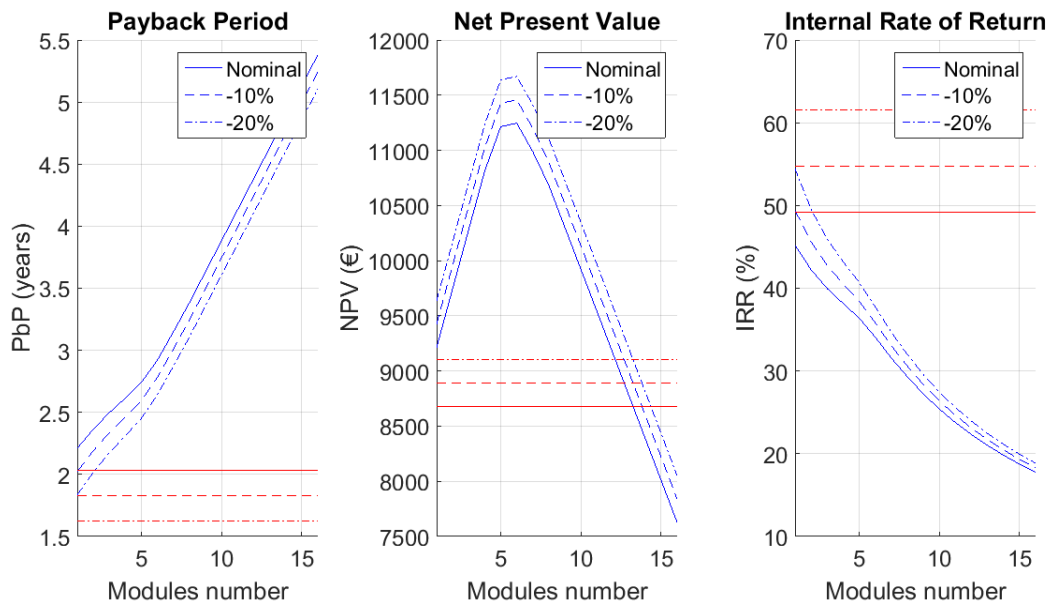
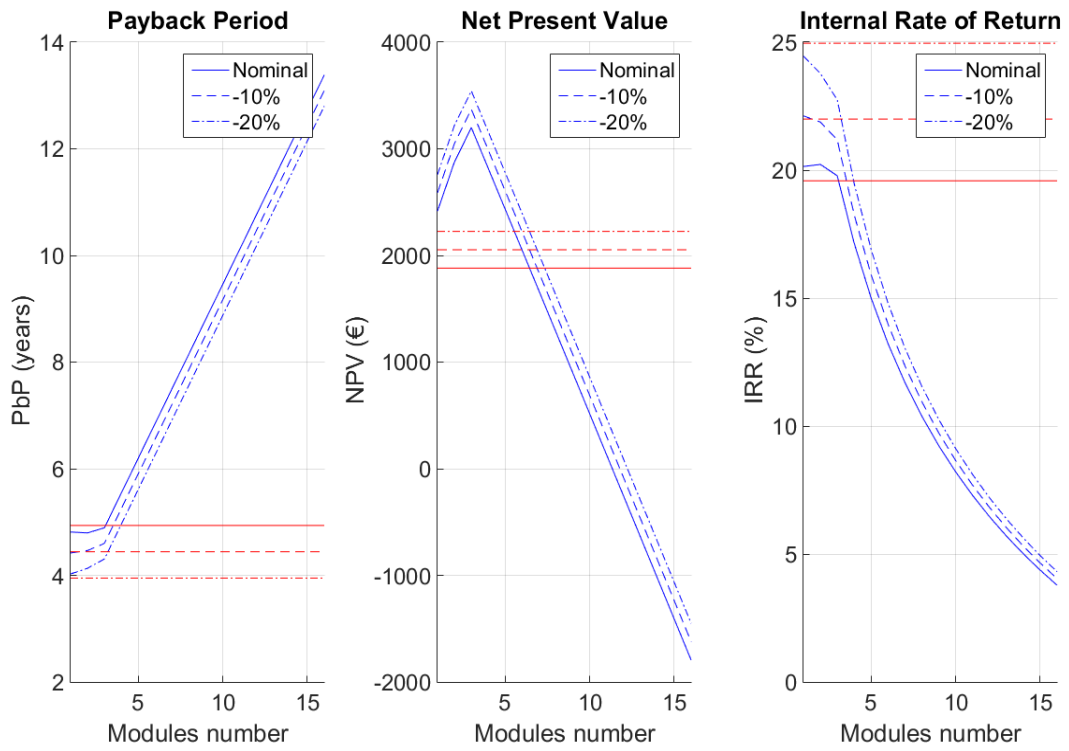


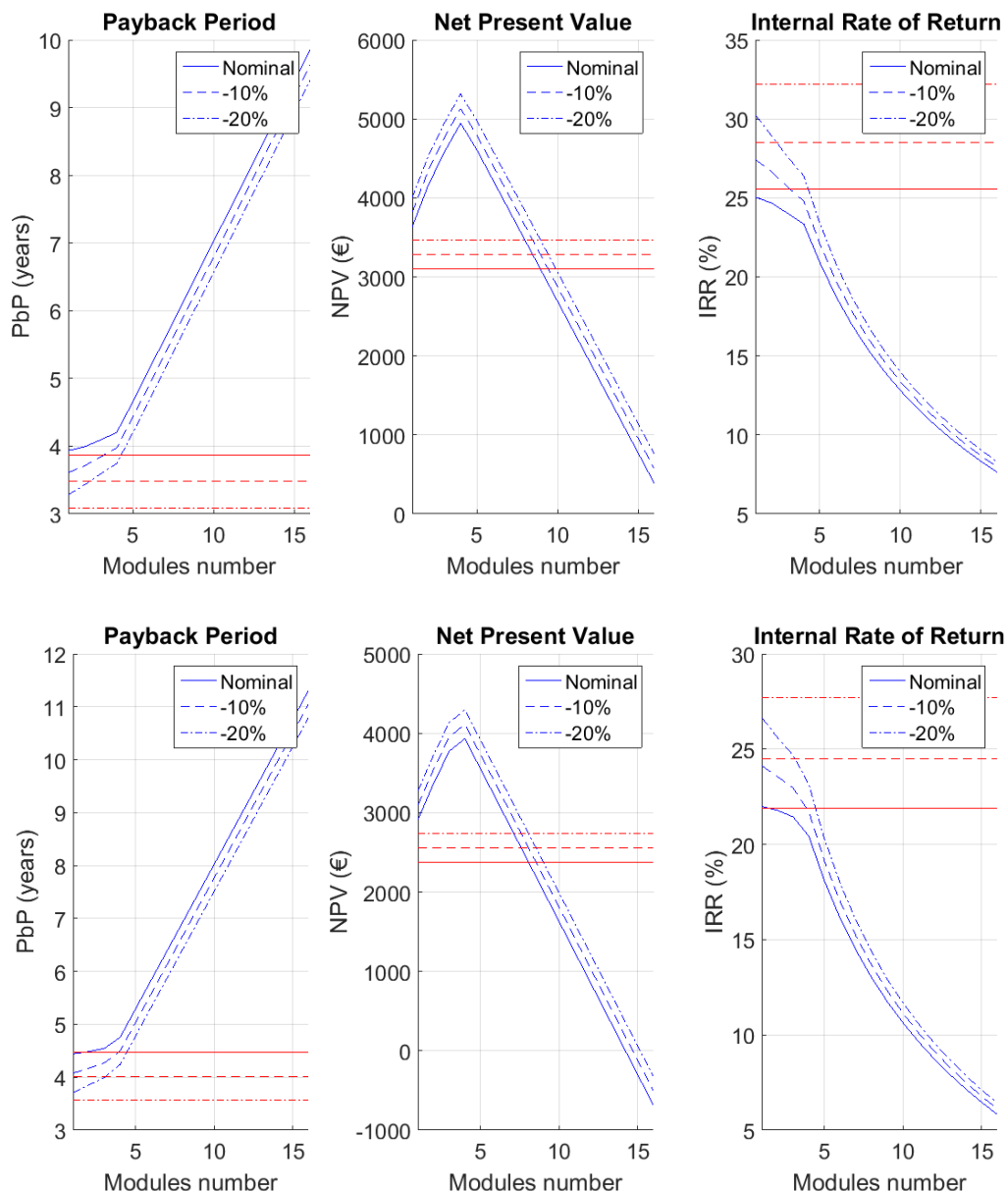
Σχήμα 4-14: Επίδραση κόστους θερμικής ενέργειας στους οικονομικούς δείκτες όλων των Σεναρίων, για εργαζόμενο μέσο R410A (κατά σειρά από πάνω προς τα κάτω: Σενάριο 1-Σενάριο 4).

#### 4.5.3 Κόστος αντλίας θερμότητας

Λόγω της ευρείας εφαρμογής αντλιών θερμότητας σε οικιακά συστήματα, η ανάλυση ευαισθησίας ως προς αυτό το μέγεθος εξετάζει τη μείωση του κόστους της κατά 10 και 20%.

Προφανώς, μείωση του κόστους της αυξάνει την αποδοτικότητα του συστήματος. Ενδεικτικά, μείωση του κόστους κατά 10% προκαλεί αύξηση του NPV κατά 1.83-5.37% για τα Σενάρια 1 και 4, αντίστοιχα. Η μικρή μεταβολή για το Σενάριο 2 οφείλεται εκ νέου, στην αυξημένη κατανάλωση.



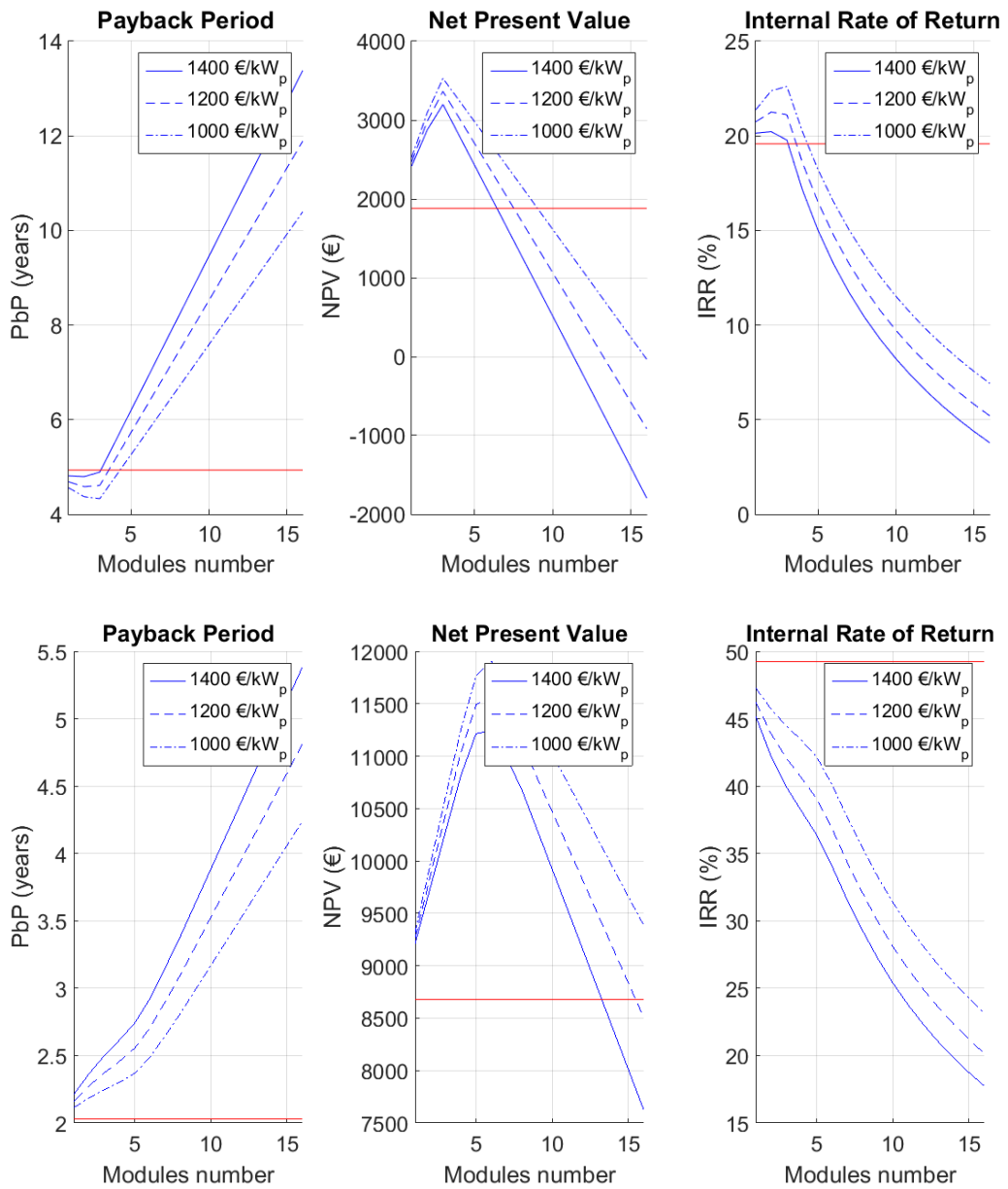


Σχήμα 4-15: Επίδραση κόστους αντλίας θερμότητας στους οικονομικούς δείκτες όλων των Σεναρίων, για εργαζόμενο μέσο R410A (κατά σειρά από πάνω προς τα κάτω: Σενάριο 1-Σενάριο 4).

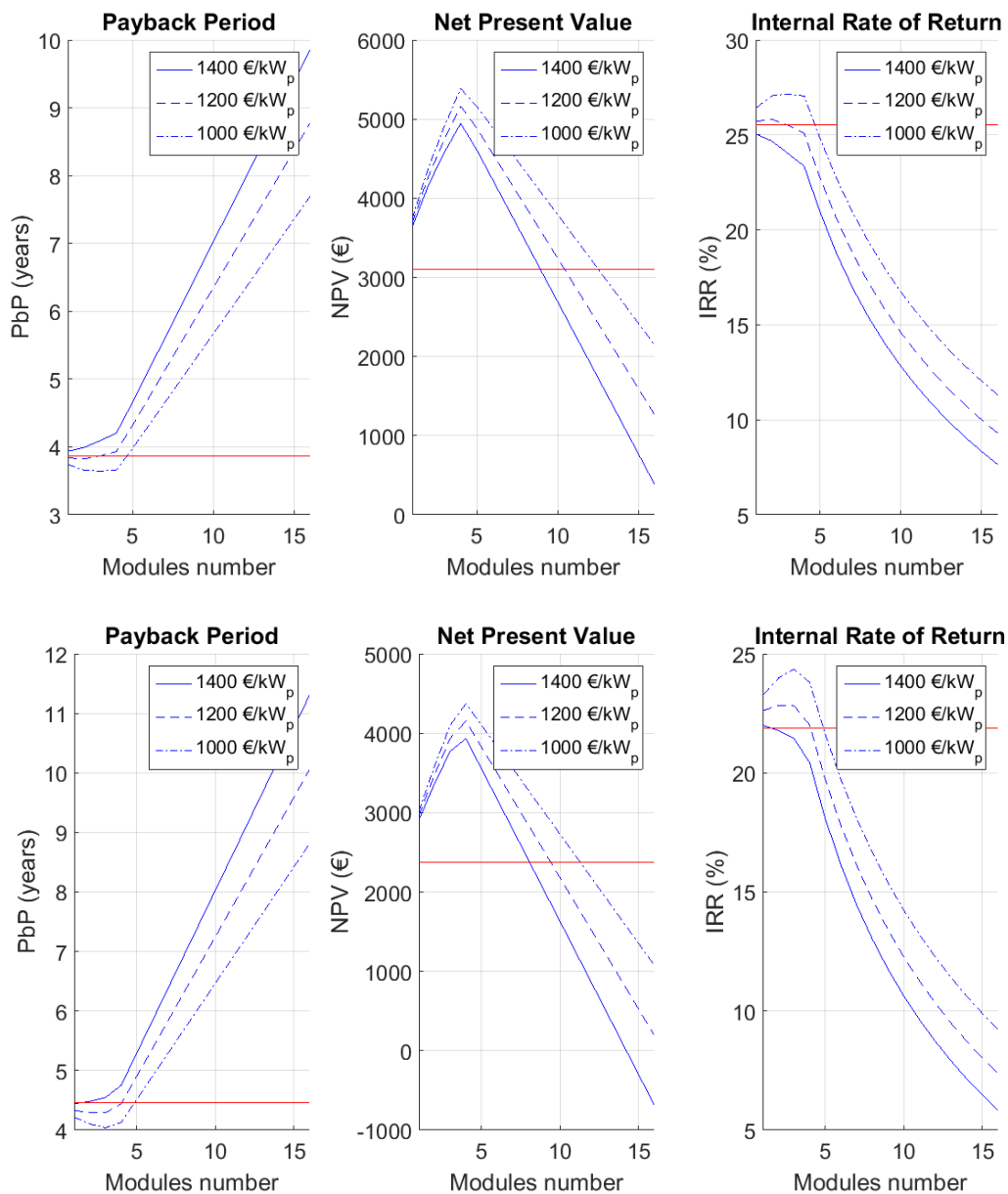
#### 4.5.4 Κόστος Φ/Β συστήματος

Λόγω της συνεχώς αυξανόμενης εφαρμογής Φ/Β συστημάτων για οικιακές εφαρμογές, αναμένεται μείωση του ειδικού κόστους τους με τη πάροδο των χρόνων. Πιο συγκεκριμένα έχει καταγραφεί αύξηση στην εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων της τάξης του 24% κατά την διάρκεια των ετών 2010 έως 2017 [53]. Γι' αυτόν το λόγο, εξετάζεται η μείωση του ειδικού κόστους του από τα 1400 €/kW<sub>p</sub>, στα 1200 και 1000 €/kW<sub>p</sub>, αντίστοιχα.

Όπως αναμενόταν, μείωση του κόστους του Φ/Β συστήματος οδηγεί σε αύξηση της καθαρής παρούσας αξίας η οποία, για ειδικό κόστος 1000 €/kW<sub>p</sub>, ανέρχεται σε ποσοστό 5.87-11.19% για τα Σενάρια 2 και 4, αντίστοιχα.







Σχήμα 4-16: Επίδραση κόστους Φ/Β πάνελ στους οικονομικούς δείκτες όλων των Σεναρίων, για εργαζόμενο μέσο R410A (κατά σειρά από πάνω προς τα κάτω: Σενάριο 1-Σενάριο 4).

## Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα – Μελλοντικές προτάσεις

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η χρήση συστήματος ηλιακής ψύξης-θέρμανσης, αποτελούμενου από μία αντλία θερμότητας μηχανικής συμπίεσης ατμού σε σύζευξη με Φ/Β σύστημα, για οικιακή εφαρμογή στην περιοχή της Αθήνας, για τέσσερις διαφορετικές τυπολογίες κτηρίων, συναρτήσει της περιόδου κατασκευής τους. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν κλιματικά δεδομένα και στοιχεία κελύφους των αντίστοιχων κτηρίων. Για το προτεινόμενο σύστημα εξετάστηκαν τέσσερα διαφορετικά εργαζόμενα μέσα, με μεταβαλλόμενο πλήθος Φ/Β πάνελ.

Η τεχνο-οικονομική βελτιστοποίηση διενεργήθηκε έτσι, ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη οικονομική απόδοση του νέου συστήματος, σε όρους καθαρής παρούσας αξίας και να εξασφαλίζεται ικανοποιητική περίοδος αποπληρωμής, συγκριτικά με τη μεμονωμένη εφαρμογή αντλίας θερμότητας. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάστηκαν επιπλέον, οι δείκτες εξοικονόμησης κόστους ενέργειας, η μείωση πρωτογενούς ενέργειας και η μείωση ισοδύναμων εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις παραμέτρους κόστους (ενέργειας και εξοπλισμού) ώστε να εξεταστεί η επίδρασή τους στην απόδοσή του. Τα κύρια ευρήματα της εργασίας συνοψίζονται παρακάτω:

- Για όλες τις υπό εξέταση τυπολογίες κτηρίων (Σενάρια) προκρίνεται η εφαρμογή του συστήματος ηλιακής ψύξης έναντι της αποκλειστικής χρήσης αντλίας θερμότητας, καθώς εξασφαλίζει μεγαλύτερο οικονομικό όφελος, σε όρους παρούσας αξίας.
- Όσον αφορά το εργαζόμενο μέσο της αντλίας θερμότητας, σε όλα τα Σενάρια το βέλτιστο αντιστοιχεί στο R410A.
- Το πλήθος των Φ/Β πάνελ που οδηγεί στην υψηλότερη οικονομική απόδοση ποικίλει ανάλογα με το Σενάριο εφαρμογής και κυμαίνεται μεταξύ 3 και 6. Ισοδύναμα, η βέλτιστη επιφάνειά τους κυμαίνεται μεταξύ 4.86 και 9.72 m<sup>2</sup>.
- Το βέλτιστο πλήθος Φ/Β πάνελ αντιστοιχεί στη λειτουργία όπου το σύνολο σχεδόν της κατανάλωσης της αντλίας θερμότητας καλύπτεται από τα πάνελ. Αύξηση του πλήθους πέρα από αυτήν την τιμή δεν ωφελεί τεχνο-οικονομικά.
- Αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης λόγω π.χ. παλαιότητας του κτηρίου οδηγεί σε αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Το όφελος, ως παρούσα αξία, κινείται στο εύρος 3199-11250 € για τα σενάρια ελάχιστης (Σενάριο 1) και μέγιστης κατανάλωσης (Σενάριο 2), ενώ η περίοδος αποπληρωμής μεταξύ 2.92 και 4.94 έτη.
- Από τις παραμέτρους κόστους, για την πλειονότητα των Σεναρίων, μεγαλύτερη επίδραση στην απόδοση του συστήματος έχει το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας και δευτερευόντως, το κόστος του Φ/Β συστήματος. Ενδεικτικά, μείωση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας κατά 10% επιφέρει μείωση της παρούσας αξίας της τάξης του 10-15% για τα Σενάρια 1, 3 και 4.
- Για το Σενάριο μέγιστης κατανάλωσης (Σενάριο 2), αξιοσημείωτη επίδραση έχει το κόστος του καυσίμου (πετρελαίου) έναντι των άλλων παραμέτρων, καθώς μείωση του κατά 10% οδηγεί σε αύξηση της περιόδου αποπληρωμής και μείωση της παρούσας αξίας κατά 7.2%

Αναφορικά με μελλοντική εργασία επί της παρούσας μελέτης, γίνονται οι εξής προτάσεις:

- Επέκταση της μελέτης και στις υπόλοιπες κλιματικές ζώνες της Ελλάδας εκτός από την Αθήνα (κλιματική ζώνη Β), καθώς και σε διάφορες πόλεις της Ευρώπης για τις οποίες υπάρχουν κλιματικά δεδομένα και στοιχεία κτηριακού αποθέματος.
- Εφαρμογή του συστήματος σε άλλους τύπους κτηρίων, όπως κτήρια γραφείων.
- Σύγκριση με άλλες τεχνολογίες ηλιακής ψύξης, όπως απορρόφηση και προσρόφηση.
- Ανάλυση ευαισθησίας ταυτόχρονα για περισσότερες από μία παραμέτρους κόστους, η οποία θα αντιστοιχεί σε μία πιθανή μελλοντική κατάσταση.
- Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις παραμέτρους λειτουργίας της αντλίας θερμότητας (θερμοκρασίες προσαγωγής θέρμανσης και ψύξης, pinch points εναλλακτών κ.τ.λ.).

## Βιβλιογραφία

1. *Climate strategies & targets*. 2016 [Accessed: 01-2019]; Available from: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_en).
2. Nogueira, L., *WEC ADEME project on energy efficiency policies Package of measures to promote efficient air conditioning*. 2013.
3. Self, S.J., B.V. Reddy, and M.A. Rosen, *Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options*. *Applied energy*, 2013. **101**: p. 341-348.
4. Omer, A.M., *Ground-source heat pumps systems and applications*. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2008. **12**(2): p. 344-371.
5. Karytsas, S. and I. Chaldezos, *Review of the Greek Legislative Framework for Ground Source Heat Pumps (GSHPs) and Suggestions for its Improvement*. *Procedia environmental sciences*, 2017. **38**: p. 704-712.
6. Andritsos, N., et al. *Geothermal developments in Greece—Country update 2010-2014*. in *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. 2015.
7. BP, *BP Statistical Review of World Energy*. 2019.
8. Buker, M.S. and S.B. Riffat, *Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: A systematic review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. **55**: p. 399-413.
9. Κουτσοστάθης, Δ., *Συνεργασία ηλιακών συλλεκτών με θερμικές μηχανές για θέρμανση και ψύξη*. 2018, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο: Αθήνα.
10. *What are the most efficient solar panels on the market? Solar panel efficiency explained*. 2019 [Accessed: 03-2019]; Available from: <https://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/>.
11. *Operational functions of a junction diode*. 2019 [Accessed: 03-2019]; Available from: <https://sailseanchai.com/>.
12. *Solar Types*. [Accessed: 03-2019]; Available from: <http://www.milestonesolar.in/types>.
13. *Νόμος 3468/2016 (ΦΕΚ 129/Α/27-06-2006): Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης και λοιπές διατάξεις*.
14. *4.5. Types of PV technology and recent innovations*. [Accessed: 03-2019]; Available from: <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/608>.
15. Settino, J., et al., *Overview of solar technologies for electricity, heating and cooling production*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. **90**: p. 892-909.
16. Kyritsis, A., et al., *Evolution of PV systems in Greece and review of applicable solutions for higher penetration levels*. *Renewable Energy*, 2017. **109**: p. 487-499.
17. Martins, F., *PV sector in the European Union countries—Clusters and efficiency*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. **74**: p. 173-177.
18. *Installed solar photovoltaics capacity per inhabitant in the European Union (EU-28) in 2018, by country (in watts per inhabitant)*. 2019 [Accessed: 02-2019]; Available from: <https://www.statista.com/statistics/612412/installed-solar-photovoltaics-capacity-eu/>.
19. *Photovoltaic Geographical Information System*. 2017 [Accessed: 02-2019]; Available from: [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_download/map\\_index\\_c.html](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index_c.html).
20. Dincer, I. and M. Kanoglu, *Refrigeration systems and applications*. Vol. 2. 2010: Wiley Online Library.
21. Guźda, A. and N. Szmolke, *Compressors in Heat Pumps*. Vol. 39. 2016. 71-83.
22. *Reciprocating compressors and Types*. 2015 [Accessed: 03-2019]; Available from: <https://aermech.com/reciprocating-compressors-and-typesworking-principleengineering-explained/>.
23. Hundy, G.F., *Refrigeration, air conditioning and heat pumps*. 2016: Butterworth-Heinemann.

24. Copeland™ Compressors. [Accessed: 03-2019]; Available from: <https://climate.emerson.com/en-us/brands/copeland>.
25. Scroll compressors. 2012 [Accessed: 03-2019]; Available from: <https://www.enggyclopedia.com/2012/03/scroll-compressors/>.
26. Imran, M., et al., *Volumetric expanders for low grade heat and waste heat recovery applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **57**: p. 1090-1109.
27. Χαραλαμπίδης, Α., *Σύζευξη συστήματος ORC μικρής ισχύος με οικιακό ηλιακό σύστημα και σχεδιασμός κατάλληλης διάταξης*. 2018, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
28. Alfa Laval. [Accessed: 04-2019]; Available from: <https://www.alfalaval.com/>.
29. SWEP. 4.2 Thermal expansion valves (TEVs). [Accessed: 04-2019]; Available from: <https://www.swep.net/refrigerant-handbook/4.-expansion-valves/adf6/>.
30. European Parliament, *Regulation (EU) No 517/2017 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006*. 2014, Council of the European Union.
31. MathWorks. MATLAB. [Accessed: 11-2018]; Available from: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
32. Coolprop. *Welcome to CoolProp*. [Accessed: 02-2019]; Available from: <http://www.coolprop.org/>.
33. TALE SUN. [Accessed: 03-2019]; Available from: <https://www.talesun-eu.com/home/>.
34. Κυριακόπουλος, Κ., *Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά*. 2015, Αθήνα: Ε.Μ.Π.
35. *Physics of Solar Cells*. [Accessed: 02-2019]; Available from: [http://depts.washington.edu/cmditr/modules/opv/physics\\_of\\_solar\\_cells.html](http://depts.washington.edu/cmditr/modules/opv/physics_of_solar_cells.html).
36. Σπυρίδων Κοσμάς, Ν.Κ., *Η επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων*. 2011, Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά: Αθήνα.
37. Αντωνόπουλος, Κ., *Θερμικά - Ηλιακά Συστήματα*. 2015, Αθήνα: Ε.Μ.Π.
38. Bellia, H., R. Youcef, and M. Fatima, *A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB*. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 2014. **3**(1): p. 53-61.
39. Faiman, D., *Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2008. **16**(4): p. 307-315.
40. Bouraiou, A., et al., *Modeling and simulation of photovoltaic module and array based on one and two diode model using Matlab/Simulink*. Energy Procedia, 2015. **74**: p. 864-877.
41. Tsai, H.-L., C.-S. Tu, and Y.-J. Su. *Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK*. in *Proceedings of the world congress on Engineering and computer science*. 2008. San Francisco, USA.
42. Foster, R., M. Ghassemi, and A. Cota, *Solar energy: renewable energy and the environment*. 2009: CRC Press.
43. G. Kallis, T.R., D. Magiri-Skouloudi, S. Karellas, *Environmental performance of ZEOSOL solar cooling setup*, in *32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2019)*. Wroclaw, Poland.
44. EnergyPlus™. Available from: <https://energyplus.net/>.
45. Quoilin, S., et al., *Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **22**: p. 168-186.
46. Ρουμπεδάκης, Τ., *Μελέτη της λειτουργίας και σχεδιασμός συστήματος τριπαραγωγής μικρής κλίμακας με χρήση υπερκρίσιμου κύκλου ORC*. 2014, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο: Αθήνα.
47. *Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017. Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης*. Αθήνα. 2017.

48. Eurostat. *Electricity price statistics*. 2019 [Accessed: 05-2019]; Available from: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity\\_price\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics).
49. Γενική Γραμματεία Εμπορίου & Προστασίας Καταναλωτή, *Εβδομαδιαίο δελτίο επισκόπησης τιμών καυσίμων*. Αθήνα, Απρίλιος 2019.
50. Eurostat. *Natural gas price statistics*. 2019 [Accessed: 05-2019]; Available from: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Natural\\_gas\\_price\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Natural_gas_price_statistics).
51. Quoilin, S., et al., *Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles*. Applied thermal engineering, 2011. **31**(14-15): p. 2885-2893.
52. Boyaghchi, F.A. and P. Heidarnejad, *Thermoeconomic assessment and multi objective optimization of a solar micro CCHP based on Organic Rankine Cycle for domestic application*. Energy conversion and Management, 2015. **97**: p. 224-234.
53. *Photovoltaics Report*, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, 2014.