



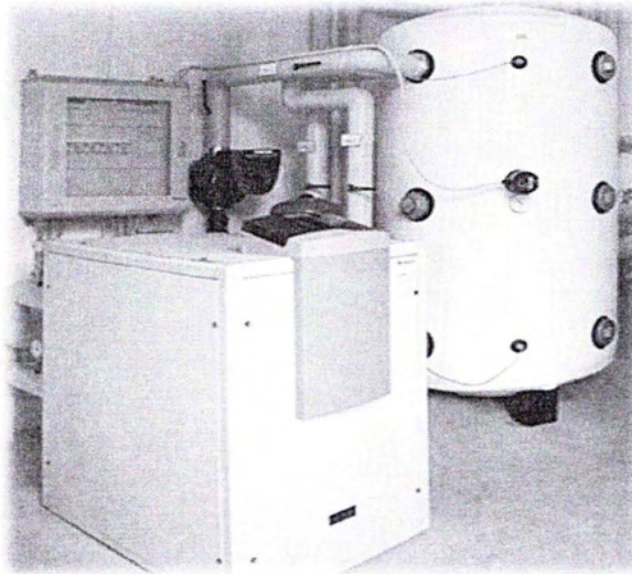
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

## ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

του  
Αστέριου Ι. Κοσμαρά

Τριμελής επιτροπή:  
Ανδρίτσος Νικόλαος (επιβλέπων)  
Μποντόζογλου Βασίλειος  
Παντελής Δημήτριος



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, Οκτώβριος 2014



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 13221/1  
Ημερ. Εισ.: 06-11-2014  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ  
2014  
ΚΟΣ

© 2014 Αστέριος Ι. Κοσμαράς

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος (Επιβλέπων)

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Δημήτριος Παντελής

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας



## Ευχαριστίες

Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Νίκο Ανδρίτσο, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, για την υπομονή και επιμονή του, όπως και για την επιστημονική καθοδήγηση του. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, τον Καθηγητή Βασίλη Μποντόζογλου και τον Επίκουρο Καθηγητή Δημήτρη Παντελή για τη προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδερφή μου για τη κατανόηση, υπομονή, ηθική υποστήριξη και αγάπη τους όλα αυτά τα χρόνια, όπως επίσης και για το δικαίωμα που μου έδωσαν στη μόρφωση. Τους αφιερώνω ως ένδειξη της ευγνωμοσύνης μου αυτή τη διπλωματική μου διατριβή.

Αστέριος Κοσμαράς

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει στόχο την οικονομοτεχνική μελέτη θέρμανσης ενός θερμοκηπίου με Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας. Αρχικά γίνεται αναφορά στη θέρμανση του θερμοκηπίου και τη σημασία της. Αναφέρονται τα ενεργειακά ισοζύγια και ακολουθούν οι τρόποι (συστήματα θέρμανσης) με τους οποίους μπορεί να θερμανθεί ένα θερμοκήπιο. Τα συστήματα θέρμανσης μπορεί να είναι είτε συμβατικά είτε μη συμβατικά. Στα μη συμβατικά ανήκουν τα συστήματα που χρησιμοποιούν Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, οι οποίες είναι πρακτικά ανεξάντλητες. Μια τέτοια μορφή ενέργειας είναι και η λεγόμενη «Αβαθής Γεωθερμία», με την οποία γίνεται αξιοποίηση της αποθηκευμένης στο έδαφος ενέργεια για τη θέρμανση ενός χώρου. Οι Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας (ΓΑΘ) είναι οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση της αβαθούς γεωθερμίας. Στη παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται οικονομοτεχνική σύγκριση ενός συστήματος θέρμανσης ΓΑΘ και ενός συμβατικού συστήματος θέρμανσης Φυσικού Αερίου (ΦΑ). Το σύστημα ΦΑ επιλέχτηκε για τη σύγκριση αφού αποτελεί το πλέον χρησιμοποιούμενο συμβατικό σύστημα κύριας θέρμανσης στα νέα θερμοκήπια. Η οικονομική μελέτη έγινε για διάστημα έξι ετών και δείχνει ότι παρά το αρχικά υψηλό κόστος κατασκευής του, το σύστημα ΓΑΘ αρχίζει να αποδίδει κατακόρυφα αυξανόμενο κέρδος μετά από περίπου τρία έτη λειτουργίας. Αυτό οφείλεται στο πολύ χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησής του. Η συγκριτική μελέτη επομένως αναδεικνύει το σύστημα ΓΑΘ ως τον οικονομικότερο τρόπο θέρμανσης για το θερμοκήπιο. Για αυτό το λόγο γίνεται επιτακτική η ενημέρωση των αρμόδιων φορέων καθώς και την θέσπιση μέτρων από τη μεριά του κράτους για τη διάδοση των συστημάτων ΓΑΘ που αποτελέσουν ακόμα ένα βήμα για την λύση των ενεργειακών και οικονομικών προβλημάτων.

## **Abstract**

This work deals with a feasibility study of heating a greenhouse using a geothermal heat pump system (GHPS). Initially, the heating requirements of a greenhouse are presented followed by a brief introduction of the most common installations (systems) for heating greenhouses. The heating requirements can be covered either by using conventional fuels or by using renewable energy sources (e.g. geothermal energy, solar energy and biomass), which are practically inexhaustible. Although geothermal energy can be found only in some specific regions, the so-called "Shallow Geothermal Energy" can be used everywhere to supply low-temperature heat. This is obtained with a heat pump system (GHPS), which transfers heat to or from the ground.

This thesis attempts to evaluate, from a technical and economic standpoint, a GHPS heating system and a conventional gas heating system (GHS) for heat a typical greenhouse in Northern Greece. The GHS system was chosen for comparison since it is the most commonly used conventional heating system in new greenhouses in Greece. The economic evaluation was carried out for six years and shows that despite the initial high cost of construction, the GHPS system begins to generate increased profits after about a three year period. This is mainly due to the very low cost of operation and maintenance. This comparative study therefore demonstrates that a GHPS is the most economical way of heating a greenhouse. For this reason, it is imperative the adoption of suitable measures on the part of the State for the dissemination of these systems, which constitute a further step for the solution of energy and economic problems in the agricultural sector.

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Στόχος της διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2 Το ενεργειακό πρόβλημα.....	1
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	2
<b>2 . ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....</b>	<b>4</b>
2.1 Εισαγωγή.....	4
2.2 Ενεργειακά ισοζύγια στο θερμοκήπιο.....	5
2.2.1 Εισροή θερμότητας στο θερμοκήπιο.....	6
2.2.2 Απώλειες θερμότητας από το θερμοκήπιο.....	9
2.3 Συστήματα θέρμανσης θερμοκηπίων.....	14
2.3.1 Εισαγωγή.....	14
2.3.2 Συμβατικά συστήματα θέρμανσης.....	16
2.3.2.1 Τοπικά συστήματα θέρμανσης.....	17
2.3.2.2 Κεντρικά συστήματα θέρμανσης.....	19
2.3.3 Συστήματα Θέρμανσης με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	22
2.3.3.1 Θέρμανση θερμοκηπίων με βιομάζα.....	24
2.3.3.2 Θέρμανση θερμοκηπίων με ηλιακή ενέργεια.....	26
2.3.3.3 Θέρμανση με χρήση Γεωθερμίας.....	27

<b>3. ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....</b>	<b>29</b>
3.1 Εισαγωγή.....	29
3.2 Αβαθής γεωθερμία.....	29
3.2.1 Ορισμός.....	29
3.2.2 Συστήματα ανοιχτού – κλειστού βρόχου.....	30
3.2.2.1 Συστήματα ανοιχτού βρόχου.....	30
3.2.2.2 Συστήματα κλειστού βρόχου.....	31
3.3 Εισαγωγή στις αντλίες θερμότητας.....	34
3.4 Αρχές λειτουργίας και κατασκευαστικά μέρη της αντλίας θερμότητας.....	36
3.5 Αποτελεσματικότητα και συντελεστής λειτουργίας.....	40
3.6 Ψυκτικά ρευστά.....	42
3.7 Οι πηγές και οι αποδέκτες θερμότητας.....	46
3.7.1 Αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα.....	47
3.7.2 Αντλίες θερμότητας αέρα-νερού.....	48
3.7.3 Αντλίες θερμότητας νερού-αέρα.....	49
3.7.4 Αντλίες θερμότητας νερού-νερού.....	50
3.7.5 Αντλίες θερμότητας εδάφους-νερού.....	51
3.7.6 Αντλίες θερμότητας εδάφους-αέρα.....	52
3.8 Γιατί γεωθερμική αντλία θερμότητας.....	53
<b>4. ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ.....</b>	<b>54</b>
4.1 Εισαγωγή.....	54
4.2 Περιγραφή του θερμοκηπίου.....	54

4.3	Ενεργειακά ισοζύγια.....	55
4.3.1	Ενεργειακά κέρδη θερμοκηπίου.....	55
4.3.2	Ενεργειακές απώλειες θερμοκηπίου.....	56
4.3.3	Υπολογισμός συνολικού θερμικού φορτίου.....	57
4.4	Υπολογισμός μέγιστου θερμικού φορτίου.....	58
4.5	Υπολογισμός συνολικού θερμικού φορτίου σε ετήσια βάση.....	58
4.6	Παραδοχές μελέτης θέρμανσης.....	59
4.7	Κάλυψη των θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου με ΓΑΘ.....	59
4.8	Κάλυψη των θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου με λέβητα φυσικού αερίου.....	61
4.9	Σύστημα διανομής θερμότητας.....	62
4.10	Οικονομική μελέτη.....	63
4.10.1	Θέρμανση με ΓΑΘ.....	63
4.10.2	Θέρμανση με λέβητα φυσικού αερίου.....	66
4.11	Συγκριτικά οικονομικά στοιχεία.....	68
<b>5.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>72</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>74</b>

# **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

## **1.1 Στόχος της διπλωματικής εργασίας**

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η χρήση της αβαθούς γεωθερμίας για την θέρμανση ενός θερμοκηπίου. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιείται τεχνική και οικονομική μελέτη για την εγκατάσταση συστήματος θέρμανσης με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας σε νέο θερμοκήπιο και γίνεται σύγκριση με το πλέον χρησιμοποιούμενο σε νέα θερμοκήπια συμβατικό σύστημα θέρμανσης, αυτό του φυσικού αερίου. Η επιλογή της χρήσης της αβαθούς γεωθερμίας για τη θέρμανση μίας νέας μονάδας θερμοκηπίου έγινε ως βέλτιστη λύση του παγκόσμιου ενεργειακού προβλήματος το οποίο έχει πλέον τεράστιες οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές διαστάσεις.

## **1.2 Το ενεργειακό πρόβλημα**

Το ενεργειακό πρόβλημα στις μέρες μας εμφανίζεται οξύτερο από ποτέ. Η ουσία του ενεργειακού προβλήματος βρίσκεται στην συσχέτιση των ενεργειακών αποθεμάτων που διαρκώς μειώνονται με τις απαιτήσεις για κατανάλωση ενέργειας που διαρκώς αυξάνονται.

Από τις αρχές της δεκαετίας του '70, μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση οι τιμές των συμβατικών καυσίμων άρχισαν να αυξάνονται με γοργούς ρυθμούς (Ανδρίτσος, 2008). Αποτέλεσμα ήταν το κόστος θέρμανσης των θερμοκηπίων να ξεπερνάει το 30% του συνολικού κόστους παραγωγής. Έγινε επομένως επιτακτική η ανάγκη για έρευνα νέων ενεργειακών πηγών προκειμένου να επιτευχθεί μείωση του ενεργειακού κόστους.

Παράλληλα με την ενεργειακή άρχισε να αναπτύσσεται και η οικολογική κρίση με την δραματική αύξηση των περιβαλλοντικών προβλημάτων λόγω της συνεχώς αυξανόμενης χρήσης ορυκτών καυσίμων αρχής γενομένης από τη βιομηχανική επανάσταση.

Τις τελευταίες δεκαετίες το έντονο ενδιαφέρον για το φαινόμενο του θερμοκηπίου και τις κλιματικές αλλαγές παγκοσμίως, από τη χρήση των συμβατικών καυσίμων, έγινε πάλι επίκεντρο



της πολιτικής ατζέντας στα περιβαλλοντικά ζητήματα. Με τη συνθήκη του Κιότο δημιουργήθηκε ένας νέος διεθνής στόχος και οι κυβερνήσεις όλων των χωρών παγκοσμίως έχουν θέσει μέγιστα επίπεδα εκπομπών CO<sub>2</sub> για διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες.

Γίνεται επομένως αντιληπτό ότι οι επιχειρήσεις του πρωτογενούς και δευτερογενούς τομέα παραγωγής είναι αντιμέτωπη με μία πολιτική, οικονομική και κοινωνική πίεση για μείωση της χρήσης ενέργειας και βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας της μέσω τεχνολογικών καινοτομιών και χρήση άλλων πιο οικονομικών συστημάτων θέρμανσης, που καταργούν τα ορυκτά καύσιμα και αντλούν ενέργεια από άλλες πηγές όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η γεωθερμία, ο άνεμος, η ορμή των ποταμών κ.α. (Bakker et al, 2007).

### **1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας**

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται σύντομη αναφορά στο ενεργειακό και τεχνολογικό πρόβλημα που πραγματεύεται η διατριβή και παρουσιάζεται ο σκοπός και η δομή της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη θέρμανση των θερμοκηπίων. Αρχικά αναφέρονται τα ενεργειακά ισοζύγια που υπάρχουν μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. Ακολουθεί αναδρομή των συμβατικών συστημάτων θέρμανσης και στη συνέχεια των μη συμβατικών με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Το τρίτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην θέρμανση του θερμοκηπίου με Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας. Αρχικά γίνεται αναφορά στην αβαθή γεωθερμία και τα συστήματα εκμετάλλευσής της. Αναλύονται τα συστήματα ανοιχτού – κλειστού βρόχου και γίνεται λόγος για τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Έπειτα γίνεται εισαγωγή στις αντλίες θερμότητας και δίνεται ο ορισμός τους, οι αρχές λειτουργίας, τους και αναλύονται τα κατασκευαστικά μέρη τους και ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσής τους. Στη συνέχεια αναφέρονται τα ψυκτικά ρευστά και τα χαρακτηριστικά τους και γίνεται μια αναδρομή στη χρήση τους με το πέρασμα των χρόνων. Ακολουθούν οι πηγές και οι αποδέκτες θερμικής ενέργειας των αντλιών θερμότητας. Το κεφάλαιο κλείνει με τα πλεονεκτήματα των Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας έναντι των συμβατικών.



Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η οικονομοτεχνική μελέτη της θέρμανσης νέου θερμοκηπίου με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας και η σύγκριση του με ένα συμβατικό σύστημα (φυσικού αερίου). Αρχικά παρουσιάζεται το θερμοκήπιο και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μελέτη της θέρμανσης με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης. Ακολουθεί οικονομοτεχνική ανάλυση για να ελεγχθεί η βιωσιμότητα της επιλογής του συστήματος θέρμανσης με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας σε σύγκριση με σύστημα θέρμανσης φυσικού αερίου που αποτελεί το κατά κόρων χρησιμοποιούμενο συμβατικό σύστημα θέρμανσης σε νέα θερμοκήπια.

Στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα αυτής της διπλωματικής εργασίας με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και το τελικό συμπέρασμα της οικονομοτεχνικής μελέτης για τη θέρμανση του θερμοκηπίου.

## 2. ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

### 2.1 Εισαγωγή

Η θέρμανση των θερμοκηπίων είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις επιχειρήσεις καλλιέργειας φρούτων και λαχανικών, προκειμένου να έχουν όλο το χρόνο όσο το δυνατόν πιο προβλέψιμη και επιθυμητή παραγωγή. Ο προσεκτικά ελεγχόμενη θερμοκρασία μπορεί να αυξήσει το ρυθμό ανάπτυξης των φυτών ενώ παράλληλα επηρεάζει σημαντικά τις διάφορες λειτουργίες τους όπως είναι η αναπνοή, η φωτοσύνθεση, η απορρόφηση θρεπτικών συστατικών περιορίζοντας παράλληλα τις ασθένειες (Van Henten et al, 2006).

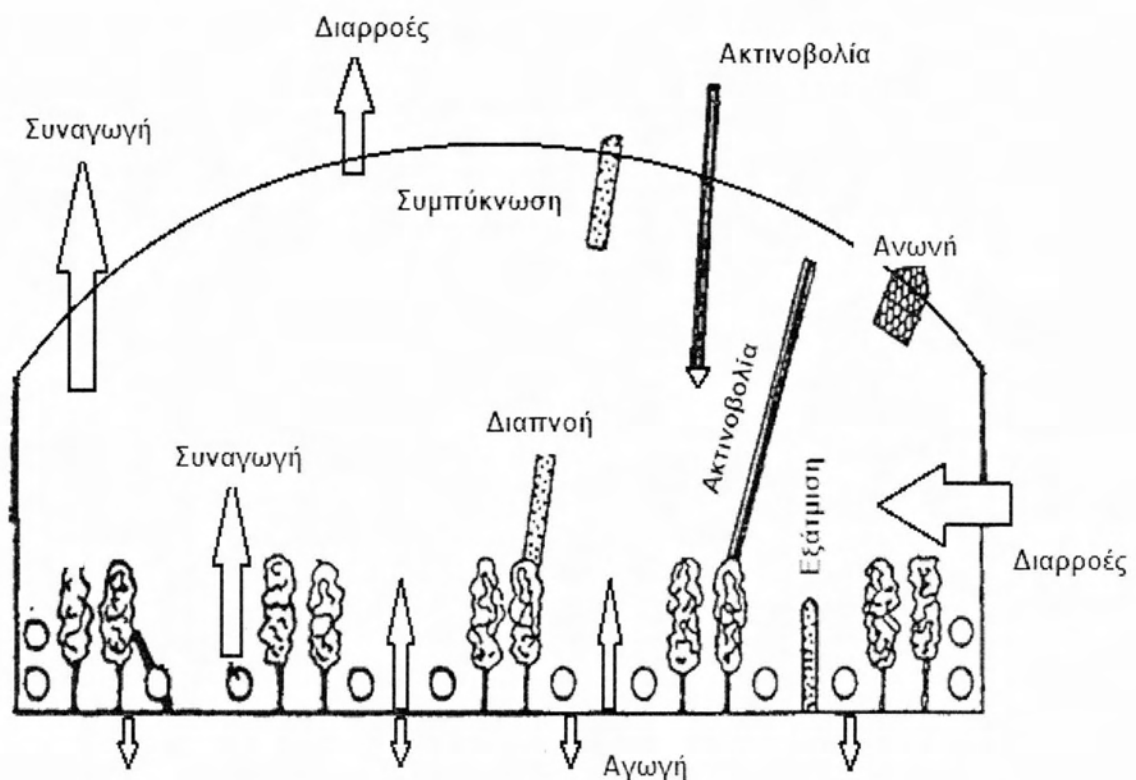
Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει πως για κάθε καλλιέργεια υπάρχει μία βέλτιστη θερμοκρασία στην οποία μεγιστοποιείται η απόδοση και η παραγωγικότητα της ανάλογα και με το στάδιο ανάπτυξης του κάθε φυτού (βλέπε Πίνακα 2.1). Γίνεται λοιπόν επιτακτική η πραγματοποίηση αναλυτικής μελέτης για το σύστημα κλιματισμού που θα πρέπει να επιλεγεί, προκειμένου να διασφαλιστούν οι ιδανικές κλιματικές συνθήκες, για την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης στο θερμοκήπιο (Ολύμπιος, 2001).

Πίνακας 2.1 Ιδανικές θερμοκρασίες για τις σπουδαιότερες καλλιέργειες (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

Είδος καλλιέργειας	Θερμοκρασία αέρα °C										Θερμοκρασία εδάφους θερμοκηπίου °C
	Φύτευμα σπόρου		Ανάπτυξη φυτών στο σπορείο		Ανάπτυξη φυτών στο θερμοκήπιο						
	Ελάχιστη	Άριστη	Ελάχιστη βιολογική	Άριστη	Ημέρα		Νύχτα				
					Ελάχιστη βιολογική	Μέγιστη	Άριστη	Ελάχιστη βιολογική	Ελάχιστη θανατηφ.	Άριστη	
Τομάτα	9-10	29	8-10	10-16	13	32	21-26	8-10	0-1	14-17	15-17
Μελιτζάνα	12-14	29	8-10	16-18	10-12	30	22-25	8-10	0-1	16-17	15-17
Πιπεριά	12-15	29	10	16-18	10-12	30	20-29	8-10	0-1	16-18	15-17
Άγγουρι	13-15	32	8-10	25	10-14	30	20-25	10-13	2-4	18	20
Πεπόνι	14-16	30-34	8-10	25	12-14	28	20-22	8-10	2-4	18-20	20-22
Καλοκυθάκι	13-14	20-25	11-13	20-25	8-10	30-32	25-27	10	0-2	15-17	15-17
Φασολάκι	14-15	20-30			12-14	30	25-28	10	2-5	15-18	15-20
Μαρούλι	5-6	24	3-5	15	4-6	20-22	10-21	5-6	-3	7-10	10-12

## 2.2 Ενεργειακά ισοζύγια στο θερμοκήπιο

Προκειμένου να επιτευχθούν οι ιδανικές κλιματικές συνθήκες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι μηχανισμοί ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ του θερμοκηπίου και του εξωτερικού του περιβάλλοντος. Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου γίνεται με τους τρεις βασικούς μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας: αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Το συνολικό φορτίο θέρμανσης ή ψύξης στο θερμοκήπιο υπολογίζεται λαμβάνοντας υπ' όψιν τους τρεις αυτούς μηχανισμούς μεταφοράς. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται οι τρόποι ανταλλαγής θερμικής ενέργειας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου.



Σχήμα 2.1 Ανταλλαγή θερμότητας του θερμοκηπίου με το περιβάλλον

### 2.2.1 Εισροή θερμότητας στο θερμοκήπιο

Αρχικά θα μελετηθούν οι παράγοντες που προκαλούν εισροή θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον στον εσωτερικό χώρο του θερμοκηπίου. Οι παράγοντες αυτοί θα ταξινομηθούν με βάση τους τρεις μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας, την αγωγή, τη συναγωγή και την ακτινοβολία όπως αναφέρονται παρακάτω (Cengel, 2003).

#### Αγωγή

Η θερμότητα άγεται είτε μέσω ενός υλικού ή μεταξύ αντικειμένων με άμεση φυσική επαφή. Ο ρυθμός αγωγιμότητας εξαρτάται από την επιφάνεια επαφής, το μήκος διαδρομής, την θερμοκρασιακή διαφορά και τις φυσικές ιδιότητες του υλικού (όπως η πυκνότητα). Η μείωση ρυθμού μεταφοράς θερμότητας με αγωγή επιτυγχάνεται με τη χρήση υλικών που παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας με χαμηλό συντελεστή αγωγής (μονωτές). Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε ένα θερμοκήπιο αναφέρεται στη θερμότητα που ανεβαίνει από το εσωτερικό της γης η οποία όμως είναι αμελητέα αφού αντιπροσωπεύει το 0,02 % των απαιτήσεων του θερμοκηπίου σε θέρμανση.

#### Συναγωγή

Η συναγωγή αποτελεί άλλον ένα τρόπο μετάδοσης θερμότητας και συμβαίνει ανάμεσα σε ένα στερεό και ένα κινούμενο συνήθως ρευστό. Οι απώλειες θερμότητας από συναγωγή στο εσωτερικό του θερμοκηπίου γίνονται μέσω του εξαερισμού και τις διείδυσης αέρα (π.χ. με ανεμιστήρες, διαρροές αέρα κ.α.). Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή περιλαμβάνει όχι μόνο την κίνηση του αέρα αλλά και την κίνηση των υδρατμών. Όταν το νερό στο θερμοκήπιο εξατμίζεται απορροφά θερμική ενέργεια. Αντίθετα όταν οι υδρατμοί υγροποιούνται και μετατρέπονται πάλι σε νερό, απελευθερώνεται ενέργεια. Επομένως όταν οι υδρατμοί συμπυκνώνονται στις επιφάνειες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου απελευθερώνεται θερμότητα στο εσωτερικό του.

#### Ακτινοβολία

Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία γίνεται μεταξύ δύο σωμάτων χωρίς άμεση επαφή την ανάγκη για την παρεμβολή κάποιου μέσου μεταφοράς της, όπως για παράδειγμα ο αέρας. Όπως και το φως, η θέρμανση με ακτινοβολία ακολουθεί μια ευθεία γραμμή και μπορεί είτε να

αντανεκλάται, είτε να μεταφέρεται είτε να απορροφάται με την πρόσπτωσή της σε κάποιο αντικείμενο.

Το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που θα απορροφηθεί από το θερμοκήπιο εξαρτάται από τον προσανατολισμό του, το σχήμα του, την καθαρότητα του υλικού κάλυψης και τη σκίαση του έχει (Sparrow & Cess, 1966). Η ακτινοβολία διακρίνεται σε άμεση και διάχυτη. Στην άμεση το ποσοστό της ακτινοβολίας που εισέρχεται από διάφανη επιφάνεια όταν αυτή πέφτει κάθετα είναι περίπου 90 %, ενώ όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι διάφορη των 90° τότε το μεγαλύτερο μέρος της ανακλάται. Όσον αφορά τη διάχυτη ακτινοβολία το ποσοστό που διέρχεται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μετά από την πρόσπτωση της σε αυτό ανέρχεται στο 65 %.

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί την κύρια φυσική πηγή θερμότητας του θερμοκηπίου και τον μόνο υπολογίσιμο παράγοντα προσαγωγής θερμότητας στο θερμοκήπιο στα ενεργειακά ισοζύγια. Η θερμότητα που αποδίδεται στο θερμοκήπιο από την ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται σύμφωνα με τους Kieboom και Stoffers (1982) από την εξίσωση (2.1):

$$q_1 = S_{\text{επικάλυψης ολικό}} \tau I p \quad (2.1)$$

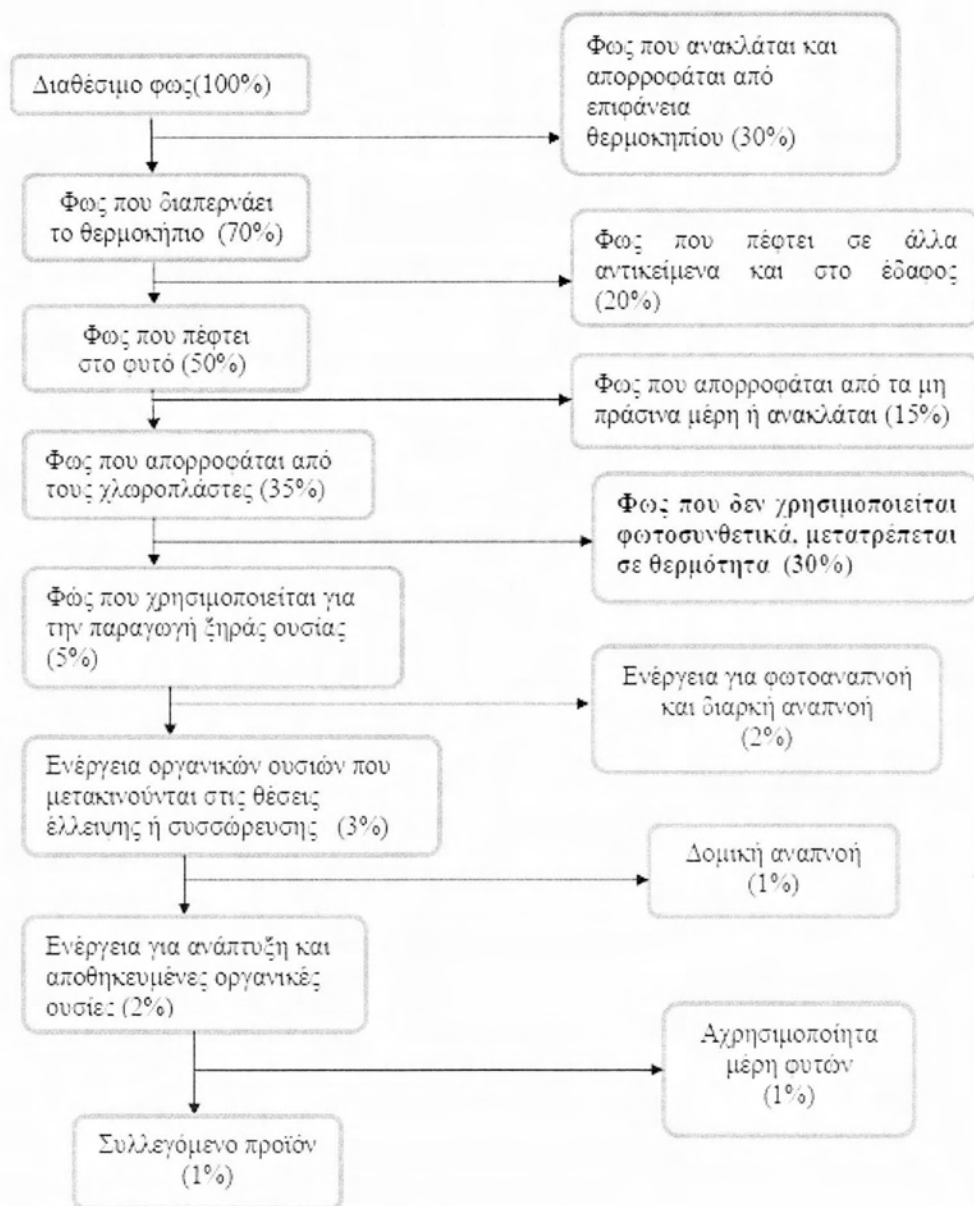
Όπου:

$\tau$ : το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά τη διαφανή κάλυψη του θερμοκηπίου (transmittance, εξαρτάται από το υλικό)

$I$ : η ένταση της ακτινοβολίας σε  $W/m^2$  (μέση τιμή για την περιοχή της Αλεξάνδρειας Ημαθίας για τους χειμερινούς μήνες από την ΕΜΥ για τα τελευταία 10 χρόνια)

$p$ : το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά τη διαφανή κάλυψη του θερμοκηπίου (εξαρτάται από την κλίση πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια)

Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται ο καταμερισμός της διαθέσιμης ακτινοβολίας μέσα στο θερμοκήπιο.



Σχήμα 2.2 Καταμερισμός της διαθέσιμης ακτινοβολίας μέσα στο θερμοκήπιο (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

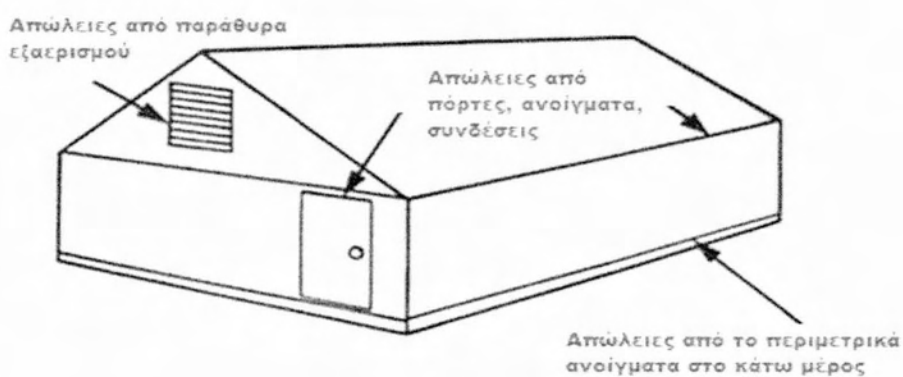
### 2.2.2 Απώλειες θερμότητας από το θερμοκήπιο

Προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία στο εσωτερικό ενός θερμοκηπίου είναι απαραίτητη η προσφορά θερμικής ενέργειας για να αντιμετωπιστούν οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον. Σημαντικές απώλειες θερμότητας στο θερμοκήπιο είναι η εναλλαγή αέρα του εξωτερικού με το εσωτερικό του περιβάλλον, οι απώλειες από τη μεταφορά θερμότητας μέσω των τοιχωμάτων, οι απώλειες από το έδαφος καθώς και οι απώλειες από τις διεργασίες των φυτών (Boyd, 2008).

Παρακάτω ακολουθεί η ανάλυση των κύριων παραγόντων που προκαλούν απώλειες θερμότητας σε ένα θερμοκήπιο και θα διατυπωθούν οι εξισώσεις με τις οποίες υπολογίζονται σύμφωνα με τον Μαυρογιανόπουλλο (2005) και την ASHRAE (2010) .

#### α) Μετακίνηση αέριων μαζών μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου.

Η μετακίνηση του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αρτιότητα της κατασκευής του (ρωγμές γύρω από τις πόρτες ή τρύπες στο υλικό επικάλυψης). Θερμοκήπια που καλύπτονται με πλάκες υαλοπινάκων, πλάκες από fiberglass, ή στρώση από εύκαμπτο πλαστικό έχουν μικρότερη διείσδυση (Σχήμα 2.3). Το σύστημα εξαερισμού που προβλέπεται για τη σωστή λειτουργία του θερμοκηπίου επηρεάζει επίσης σε μεγάλο βαθμό τη μεταφορά του αέρα από και προς το εσωτερικό του.



Σχήμα 2.3 Απώλειες αερισμού στο θερμοκήπιο



Οι απώλεια θερμότητας (σε kWh) που οφείλεται στην μετακίνηση του αέρα υπολογίζεται από την εξίσωση (2.2):

$$Q_l = m(H_i - H_e) \quad (2.2)$$

Όπου:

m: η μάζα του αέρα σε kg

$H_i$ : η ενθαλπία του εσωτερικού αέρα σε kWh · kg<sup>-1</sup>

$H_e$ : η ενθαλπία του εξωτερικού αέρα σε kWh · kg<sup>-1</sup>

Η ολική μάζα m του αέρα που ανταλλάσσεται είναι ίση με τον συνολικό όγκο αέρα  $V_a$  που ανταλλάσσεται συνολικά επί την πυκνότητα  $\rho$  του αέρα.

Επίσης ο όγκος  $V_a$  της αέρια μάζας που ανταλλάσσεται συνολικά, ισούται με τον όγκο  $V_\theta$  του θερμοκηπίου επί τον αριθμό r των ανταλλαγών. Ισχύει επομένως η εξίσωση (2.3):

$$V_a = r V_\theta \quad (2.3)$$

Επομένως η θερμότητα  $Q_A$  που χάνεται συνολικά λόγω της ανταλλαγής αέριων μαζών μεταξύ του εξωτερικού και εσωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου προκύπτει τελικά από την εξίσωση (2.4):

$$Q_A = m C_p \Delta t = r V_\theta \rho C_p \Delta t \quad (2.4)$$

Όπου:

$\Delta t$ : η διαφορά θερμοκρασίας του εξωτερικού ( $t_2$ ) με τον εσωτερικό ( $t_1$ ) αέρα σε °C

Αντικαθιστώντας με τις συνηθισμένες τιμές του αέρα για  $\rho$  και  $C_p$  έχουμε:

$$C_p = 1004,5 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \text{ και } \rho = 1,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Οπότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται:



$$Q_A = 0,31rV_\theta \Delta t \quad (2.5)$$

Επίσης έχει βρεθεί πειραματικά, σύμφωνα με τον Μαυρογιανόπουλλο (2005), ότι ο αριθμός των αλλαγών του αέρα ανά ώρα ( $r$ ) παίρνει τιμές σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 2.3** Τιμές που παίρνει ο αριθμός  $r$

$r = 0,8 - 1$	για νέα κατασκευή από γυαλί
$r = 1,5$	για νέα κατασκευή από γυαλί (με καλή συντήρηση)
$r = 2,5$	για νέα κατασκευή από γυαλί (με κακή συντήρηση)
$r = 0,8 - 2,5$	για νέα κατασκευή από απλό πλαστικό
$r = 0,6 - 1,2$	για νέα κατασκευή από διπλό πλαστικό
$r = 50$	για νέα κατασκευή ανοικτού θερμοκηπίου

**β) Απώλειες θερμότητας λόγω αγωγής από τις διαφανείς επιφάνειες του θερμοκηπίου.**

Τα υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων θα πρέπει να είναι διαφανή προκειμένου να μπορεί να περάσει μέσα από αυτά η ηλιακή ακτινοβολία. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η φωτοσύνθεση των φυτών. Η θερμική μόνωση των υλικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πάχος τους. Για αυτό το λόγο στην περίπτωση των θερμοκηπίων όπου το πάχος κάλυψης των υλικών είναι μικρό η ροή θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου είναι μεγάλη.

Για τον υπολογισμό αυτών των θερμικών απωλειών χρησιμοποιούμε την εξίσωση (2.6):

$$Q_B = U S_{\text{επικάλυψης ολικό}} \Delta t \quad (2.6)$$

Όπου:

U: ο ολικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε  $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$  ή  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

$S_{\text{επικάλυψης ολικό}}$ : η επιφάνεια του υλικού κάλυψης του θερμοκηπίου σε  $\text{m}^2$

$\Delta t$ : η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα μέσα και έξω από το θερμοκήπιο

Το U δίνεται από την εξίσωση (2.7):

$$U = \frac{1}{R_i + R_\lambda + R_o} \quad (2.7)$$

Όπου:

$R_i$ : η θερμική αντίσταση στην εσωτερική επιφάνεια του θερμοκηπίου

$R_\lambda$ : η συνολική θερμική αντίσταση των υλικών που παρεμβάλλονται

$R_o$ : η θερμική αντίσταση της εξωτερικής επιφάνειας

### γ) Απώλειες θερμότητας με αγωγιμότητα από το έδαφος

Εκτός από τις απώλειες ενέργειας λόγω αγωγιμότητας από τα διαφανή υλικά του θερμοκηπίου παρατηρείται και αγωγή θερμότητας από το έδαφος. Το φαινόμενο της αγωγής από το έδαφος εμφανίζεται σε δύο σημεία στο θερμοκήπιο. Στο κεντρικό τμήμα του θερμοκηπίου υπάρχει αγωγή λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας του εδάφους και του στάσιμου αέρα μέσα στο θερμοκήπιο. Στην περίμετρο του θερμοκηπίου υπάρχει αγωγή θερμότητας μεταξύ του εδάφους που περιλαμβάνει το θερμοκήπιο και το έδαφος έξω από αυτό.

Όμοια με πριν, η εξίσωση για τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή από το έδαφος είναι:

$$Q_C = U_{\text{εδάφους}} S_{\text{επικάλυψης εδάφους}} \Delta t \quad (2.8)$$

Όπου:

$U_{\text{εδάφους}}$ : ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του εδάφους σε  $\text{kcal m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{C}^{-1}$  ή  $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$

$S_{\text{επικάλυψης εδάφους}}$ : η επιφάνεια κάλυψης του εδάφους του θερμοκηπίου σε  $\text{m}^2$

$\Delta t$ : η διαφορά θερμοκρασίας αέρα-εδάφους μέσα στο θερμοκήπιο σε  $^{\circ}\text{C}$

Γενικά είναι δύσκολο να προσδιοριστεί το μέγεθος των απωλειών θερμότητας προς το έδαφος για αυτό τον λόγο στον υπολογισμό τους γίνονται αρκετές παραδοχές (Γραφιαδέλλης, 1980). Μια παραδοχή που γίνεται σε μικρότερα θερμοκήπια (μικρού πλάτους) είναι ότι η ανταλλαγή θερμότητας γίνεται κυρίως από της πλευρές του θερμοκηπίου. Σε αυτή την περίπτωση ως  $S_{\text{επικάλυψης εδάφους}}$  ορίζεται μια περιμετρική ζώνη με πλάτος 1,5-2 m (περίπου 20% της συνολικής επιφάνειας) και όχι ολόκληρη η επιφάνεια του εδάφους που καταλαμβάνει το θερμοκήπιο.

Από την άλλη πλευρά μια παραδοχή που γίνεται σε μεγαλύτερα θερμοκήπια, είναι ότι οι απώλειες θερμότητας στην έκταση που καταλαμβάνει το θερμοκήπιο είναι ομοιόμορφα κατανομημένες. Και στις δύο περιπτώσεις σαν  $\Delta t$  λαμβάνεται η διαφορά θερμοκρασίας εξωτερικού με εσωτερικό αέρα.

#### δ) Απώλειες θερμότητας από ακτινοβολία φυτών και εδάφους.

Το έδαφος και τα καλλιεργούμενα φυτά στο θερμοκήπιο όπως κάθε σώμα στον πλανήτη εκπέμπουν μεγάλου μήκους κύματος θερμική ακτινοβολία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται απώλειες οι οποίες εκφράζονται από την εξίσωση (2.9):

$$Q_4 = (a_g T_i^4 - a_a T_e^4) \sigma P S S_{\text{επικάλυψης εδάφους}} \quad (2.9)$$

Όπου :

$\sigma$ : η σταθερά Boltzmann – Stefan σε  $\text{kWh m}^{-2} \text{K}^{-1}$

$D$ : το ποσοστό διαπερατότητας του καλύμματος στην ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος του εδάφους και των φυτών (διαφέρει ανάλογα με το υλικό κάλυψης)

S: το ποσοστό της επιφάνειας του καλύμματος του θερμοκηπίου που είναι ελεύθερο από υδρατμούς

Σεπικάλυψης εδάφους: η επιφάνεια κάλυψης του εδάφους του θερμοκηπίου σε  $m^2$

$a_g$ : ο αριθμός εκπομπής του εδάφους και των φυτών του θερμοκηπίου (συνήθως παίρνει τιμή 0,9)

$a_a$ : ο αριθμός εκπομπής της ατμόσφαιρας (συνήθως παίρνει τιμή 0,73 - 0,8 για καθαρό ουρανό και 1 για συννεφιά)

$T_i$ : η απόλυτη θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου σε K

$T_e$ : η θερμοκρασία του ουρανού σε K (περίπου ίση με τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα)

Στην πράξη επειδή οι απώλειες ακτινοβολίας φυτών και εδάφους είναι δύσκολο να υπολογιστούν υπολογίζουμε πως αυτές τις απώλειες αποτελούν περίπου το 25% των υπόλοιπων.

Οι υπόλοιπες κατηγορίες απωλειών σχετίζονται με τις διεργασίες των φυτών και επειδή είναι πολύ μικρής τάξης μεγέθους (1-2%) συνήθως δεν λαμβάνονται υπόψη στη μελέτη κλιματισμού του θερμοκηπίου (Garzoli & Blackwell, 1981). Παραδείγματα τέτοιων απωλειών είναι οι απώλειες θερμότητας λόγω φωτοσύνθεσης των φυτών, απώλειες της λειτουργίας της διαπνοής των φυτών κ.α.

Σημαντική σημείωση: Σε κάθε περίπτωση από τις παραπάνω το Q ανάλογα με το αν το  $\Delta t$  δηλώνει διαφορά θερμοκρασίας ή βαθμοώρες παίρνει τιμές W ή Wh αντίστοιχα (βλ. 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο).

## 2.3 Συστήματα θέρμανσης θερμοκηπίων

### 2.3.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους το θερμοκρασιακό πεδίο στο εσωτερικό ενός θερμοκηπίου αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο για την ομαλή λειτουργία του θερμοκηπίου. Για αυτό το λόγο ιδιαίτερη σημασία δίνεται στο σωστό σχεδιασμό και μελέτη του συστήματος θέρμανσης.

Είναι σημαντικό κατά τον σχεδιασμό ενός συμβατικού συστήματος θέρμανσης να λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω:

- Η ισχύς του συστήματος θέρμανσης θα πρέπει να επαρκεί για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών και τη διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.
- Η θερμοκρασία κατά την διάρκεια της θέρμανσης να είναι ομοιόμορφη σε ολόκληρο το θερμοκηπίου.
- Η θερμοκρασία των φυτών πρέπει να είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία του σημείου δρόσου, για να εμποδίζεται η συμπύκνωση των υδρατμών και έτσι να μειώνεται ο κίνδυνος μυκητολογικών ασθενειών.
- Η ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος θέρμανσης να μην είναι πολύ υψηλή.
- Η ρύθμιση του συστήματος θα πρέπει να είναι εύκολη, ασφαλής και γρήγορη.
- Η εγκατάσταση του συστήματος θα πρέπει να είναι οικονομικά σκόπιμη.

Τα συστήματα θέρμανσης στα θερμοκήπια διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ως προς τον τρόπο που μεταδίδουν τη θερμότητα στο χώρο:

**α) Συστήματα που μεταδίδουν τη θερμότητα με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία μέσω μιας θερμαινόμενης σταθερής επιφάνειας (μεταλλικοί ή πλαστικοί σωλήνες).**

Τα συστήματα αυτά έχουν μεγάλο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης και η ρύθμιση της λειτουργίας τους είναι δύσκολη. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας στα θερμοκήπια είναι η ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας μέσα σε αυτό. Σε αυτά τα συστήματα όμως η ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας είναι πιο δύσκολα επιτεύξιμη και η χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε ένα μη ομοιόμορφο θερμικό περιβάλλον (Giacomelli, 2002). Παρόλα αυτά πετυχαίνουν ικανοποιητικό επίπεδο σχετικής υγρασίας και θέρμανσης του εδάφους και του αέρα και δημιουργούν ελάχιστα προβλήματα από καυσαέρια τους. Τέλος είναι σημαντικό ότι η πτώση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου γίνεται βαθμιαία, σε περίπτωση βλάβης του συστήματος.

### **β) Συστήματα που μεταδίδουν τη θερμότητα με εξαναγκασμένη συναγωγή (δυναμικά).**

Σε αυτά τα συστήματα, αερόθερμα παράγουν θερμό αέρα που κυκλοφορεί εντός πλαστικών αγωγών πολυαιθυλενίου (PE). Τα συστήματα αυτά έχουν μικρότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, η ρύθμιση της λειτουργίας τους είναι εύκολη. Επίσης διασφαλίζουν μεγαλύτερη ευχέρεια κίνησης στο θερμοκήπιο, αφού καταλαμβάνουν μικρό όγκο και προκαλούν ομοιόμορφη κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Ακόμα η επιθυμητή θερμοκρασία των φυτών επιτυγχάνεται γρήγορα και προκαλούν μείωση της συμπύκνωσης των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια του υλικού κάλυψης λόγω των ρευμάτων αέρα. Παρόλα αυτά παρουσιάζουν και αυτά σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η μείωση της σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου και η μη θέρμανση του εδάφους. Επίσης σε περίπτωση βλάβης του συστήματος η θερμοκρασία ελαττώνεται απότομα. Τέλος επειδή οι συσκευές είναι συνήθως τοποθετημένες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου υπάρχει κίνδυνος να επηρεαστούν τα φυτά από τα καυσαέρια.

Σήμερα στα θερμοκήπια χρησιμοποιούνται συστήματα θέρμανσης τα οποία μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες (Singh & Tiwari, 2000):

- Συμβατικά Συστήματα Θέρμανσης
- Συστήματα Θέρμανσης με Χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ)

#### **2.3.2 Συμβατικά συστήματα θέρμανσης**

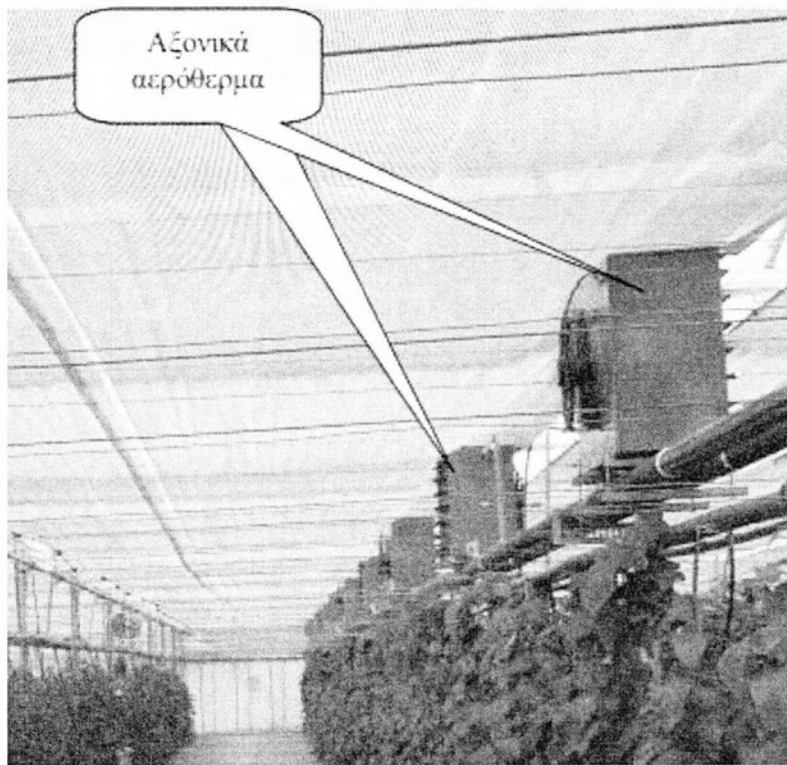
Τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης είναι τα πιο διαδεδομένα συστήματα θέρμανσης και καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μερίδιο στη θέρμανση των θερμοκηπίων. Η ενεργειακή τους απόδοση είναι υψηλή, όμως η χρήση συμβατικών καυσίμων όπως το πετρέλαιο ανεβάζουν πολύ το κόστος χρήσης τους.

Στη συνέχεια θα αναφερθούν τα περισσότερο γνωστά συστήματα συμβατικής θέρμανσης θερμοκηπίων. Ταξινομούνται σε Τοπικά και Κεντρικά συστήματα θέρμανσης (Teitel & Tanny, 1998).

### 2.3.2.1 Τοπικά συστήματα θέρμανσης

#### Εξαναγκασμένη συναγωγή θερμού αέρα με αερόθερμα.

Ανάλογα με την πηγή ενέργειας τους τα αερόθερμα ταξινομούνται σε: ηλεκτρικά, ατμού, ζεστού νερού, φυσικού αερίου, πετρελαίου ή στέρεων καυσίμων. Παρουσιάζουν υψηλή απόδοση, ευκολία στην εφαρμογή συστήματος αυτόματου ελέγχου με τη βοήθεια του οποίου επιτυγχάνει άμεσα την επιθυμητή θερμοκρασία με ελάχιστη αδράνεια. Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν είναι ότι σε περίπτωση βλάβης, η θερμοκρασία του θερμοκηπίου μειώνεται με γοργούς ρυθμούς (ιδιαίτερα σε ψυχρότερα κλίματα), το έδαφος θερμαίνεται λιγότερο συγκριτικά με τα κεντρικά συστήματα θέρμανσης και η πρόσθετη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας η οποία μπορεί να φτάσει μέχρι και 14% της ενέργειας που απαιτείται για θέρμανση.

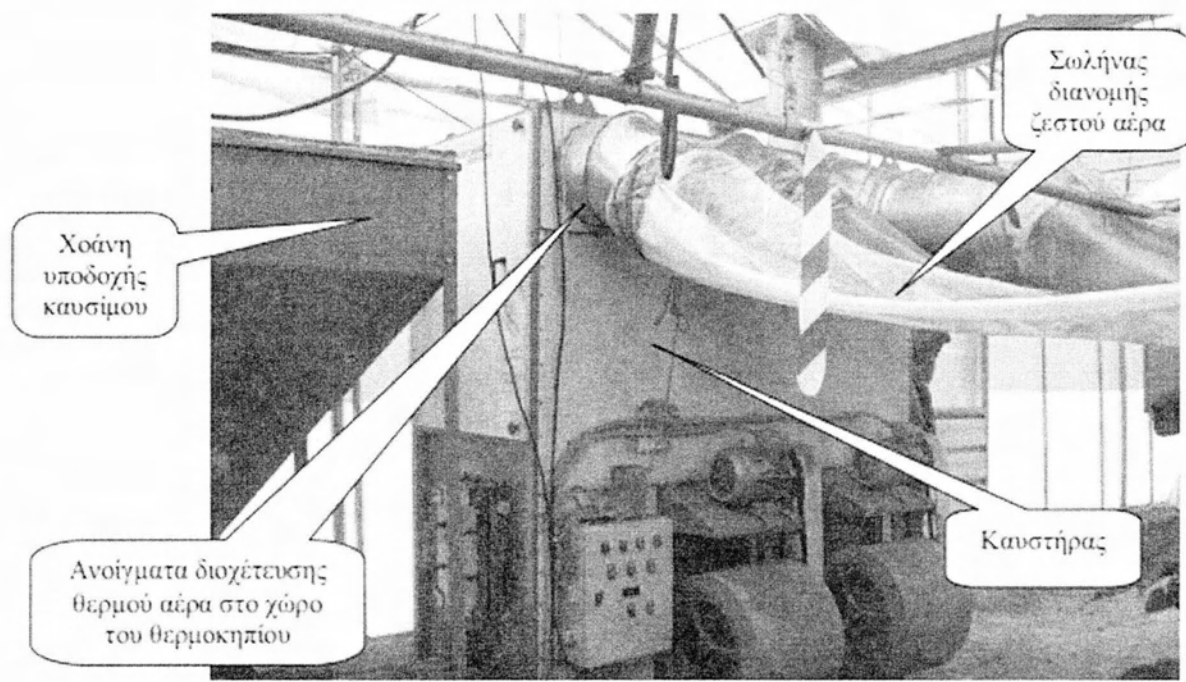


Σχήμα 2.4 Τοπικά αερόθερμα σε θερμοκήπιο



### Εξαναγκασμένη συναγωγή θερμού αέρα με σύστημα σωληνώσεων

Σε θερμοκήπια που έχουν μικρή έκταση γίνεται από το αερόθερμο κατανομή του θερμού αέρα απευθείας από την έξοδό του. Στα μεγάλης έκτασης θερμοκήπια προκειμένου να αποφευχθεί η χρήση πολλών αερόθερμων, για να κατανεμηθεί ομοιόμορφα ο θερμός αέρας στο χώρο, τοποθετούνται λεπτοί διαφανείς σωλήνες πολυαιθυλενίου κατά μήκος του θερμοκηπίου οι οποίοι κατά το μήκος τους έχουν οπές διαμέτρου 5-8 cm. Οι σωλήνες τοποθετούνται άλλοτε στο επίπεδο του εδάφους και άλλοτε αναρτώνται στην οροφή, πάνω από τα φυτά. Η ταχύτητα του αέρα θα πρέπει να είναι μικρή της τάξης των 8 m/s προκειμένου να αποφευχθεί ζημία στην καλλιέργεια. Τέλος όταν δεν υπάρχει ανάγκη για θέρμανση, είναι δυνατόν να λειτουργεί μόνο ο ανεμιστήρας του συστήματος. Καθώς με την κυκλοφορία του αέρα στο θερμοκήπιο επιτυγχάνεται, όχι μόνο ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας στον χώρο του θερμοκηπίου, αλλά και μείωση των ασθενειών από συμπυκνώσεις υγρασίας στην επιφάνεια των φύλλων.



**Σχήμα 2.5** Αερόθερμο στο εσωτερικό θερμοκηπίου με σωλήνα διανομής ζεστού αέρα

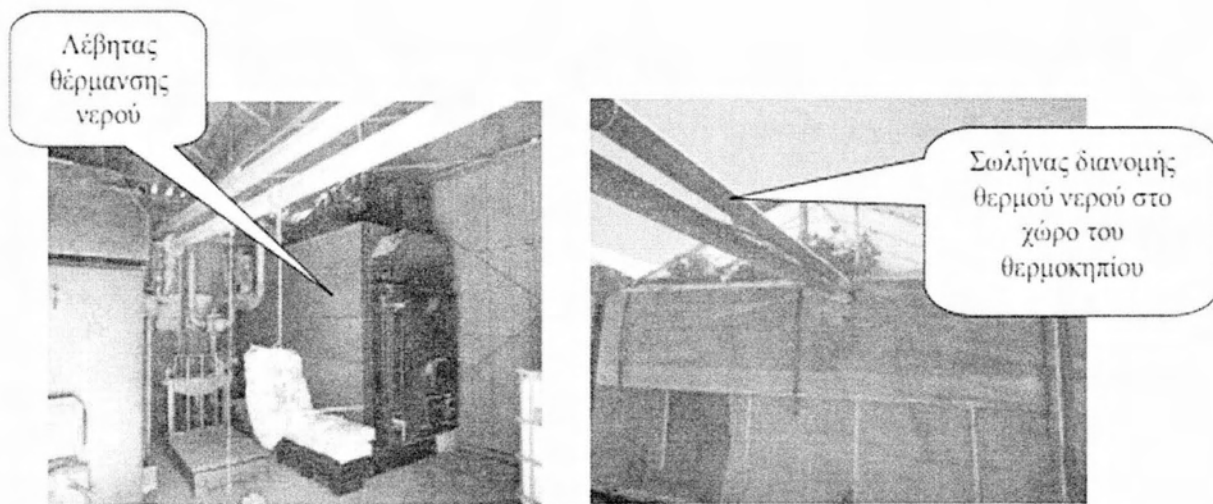


### 2.3.2.2 Κεντρικά συστήματα θέρμανσης

Το κεντρικό σύστημα θέρμανσης είναι κατάλληλο για θερμοκήπια μεγάλης έκτασης αφού η λειτουργία και η συντήρηση του στοιχίζει λιγότερο συγκριτικά με τη χρήση αερόθερμων με αγωγούς πολυαιθυλενίου. Τα κεντρικά συστήματα θέρμανσης διακρίνονται σε συστήματα θέρμανσης με νερό και συστήματα θέρμανσης με ατμό (Boyd, 2008).

#### Κεντρικό σύστημα θέρμανσης με χρήση θερμού νερού

Η θερμότητα σε αυτά τα συστήματα παράγεται μέσα σε λέβητα που μπορεί να βρίσκεται στον εσωτερικό ή στον εξωτερικό χώρο του θερμοκηπίου. Στη συνέχεια με τη χρήση σωληνώσεων η θερμότητα μεταφέρεται στο θερμοκήπιο και αποδίδεται στο χώρο δημιουργώντας με τη χρήση πολλών περασμάτων μια μεγάλη επιφάνεια απόδοσης της θερμότητας. Ο λέβητας επιτυγχάνει θερμοκρασίες νερού που φτάνουν τους 90° C. Οι σωληνώσεις είναι συνήθως κατασκευασμένες από ένα θερμικώς αγωγίμο υλικό, συνήθως χάλυβα ή αλουμίνιο και η διάμετρος του δεν ξεπερνά τα 5cm. Το μήκος εξαρτάται από το απαιτούμενο θερμικό φορτίο και στην επιφάνεια τους μπορεί να φέρουν πτερύγια για καλύτερη απόδοση. Η τοποθέτησή τους γίνεται κυρίως περιμετρικά του θερμοκηπίου όπου υπάρχουν οι περισσότερες απώλειες, αλλά και κατά μήκος των γραμμών τοποθέτησης των φυτών για ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στο χώρο.



Σχήμα 2.6 Συστήματα θέρμανσης με χρήση θερμού νερού

Το πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων θέρμανσης είναι ότι με σωστό σχεδιασμό επιτυγχάνουν ικανοποιητική θέρμανση του αέρα και του εδάφους του θερμοκηπίου και δημιουργούν ένα αρκετά ομοιόμορφο θερμικό πεδίο. Σε αντίθεση όμως με τα συστήματα θερμού αέρα παρουσιάζουν μεγάλη θερμική αδράνεια που σημαίνει ότι ο χρόνος για την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας στο χώρο του θερμοκηπίου είναι μεγαλύτερος. Αυτού του είδους τα συστήματα θέρμανσης χρησιμοποιούνται σε μεγάλα θερμοκήπια και συχνά προτιμώνται από τα συστήματα θέρμανσης με ατμό που θα αναφερθούν στη συνέχεια.

#### Κεντρικό σύστημα θέρμανσης με χρήση ατμού

Τα συστήματα θέρμανσης με ατμό χρησιμοποιούνται σε μεγάλα θερμοκήπια και ψυχρά κλίματα καθώς ο ατμός λόγω της μεγάλης του θερμοχωρητικότητας μπορεί να μεταφερθεί αποδοτικά σε μεγάλες αποστάσεις. Η διάταξη τους αποτελείται από λέβητα, σωλήνες (λείες ή με πτερύγια), βαλβίδες, ατμοπαγίδες και άλλα εξαρτήματα. Στις σωληνώσεις του συστήματος ο ατμός κυκλοφορεί σε θερμοκρασία  $105^{\circ}\text{C}$  και χαμηλή σχετικά πίεση της τάξης των 25 Pa. Συγκριτικά με τα συστήματα θερμού νερού η θερμοκρασία λειτουργίας είναι υψηλότερη. Λόγω της συμπύκνωσης του νερού και της μετατροπής της λανθάνουσας θερμότητας σε αισθητή απαιτείται μικρότερη επιφάνεια εναλλαγής για την απόδοση συγκεκριμένου θερμικού φορτίου συγκριτικά με τα συστήματα θέρμανσης με νερό. Επίσης η διάμετρος του δικτύου των σωληνώσεων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ατμού είναι μικρότερης διαμέτρου λόγω των υψηλών πιέσεων που επικρατούν στο εσωτερικό τους. Συγκριτικά με τα κεντρικά συστήματα θέρμανσης με θερμό νερό τα συστήματα ατμού είναι πιο πολύπλοκα στην εγκατάστασή τους και απαιτούν περισσότερη συντήρηση. Τέλος απαιτούν μία αρχικά υψηλή επένδυση, αλλά έχουν και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

#### Κεντρικό σύστημα θέρμανσης με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας

Η υπέρυθρη ακτινοβολία ή υπέρυθρες ακτίνες είναι τμήμα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με μήκος κύματος στην κλίμακα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από  $0,7\ \mu\text{m}$  έως  $100\ \mu\text{m}$ . Η εκπεμπόμενη υπέρυθρη ενέργεια απορροφάται από τις ψυχρές επιφάνειες χωρίς φυσική

επαφή με την πηγή θερμότητας. Οι επιφάνειες θερμαίνονται και στην συνέχεια απελευθερώνουν θερμότητα στο περιβάλλον με συναγωγή αυξάνοντας την θερμοκρασία του (Blom & Ingratta, 1982).

Τα συστήματα θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία χρησιμοποιήθηκαν αρκετά στα θερμοκήπια στις πετρελαϊκές κρίσεις της δεκαετίας του '70. Στα πρώτα αυτά συστήματα, καυσάερια οδεύουν μέσα από χαλύβδινους σωλήνες διαμέτρου 10-15 cm που αποτελούν την επιφάνεια ακτινοβολίας με θερμοκρασία επιφανείας 480 – 595 °C και μήκος κύματος εκπομπής 3.2-3.8 μm και αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα με αντλία αναρρόφησης. Όσπου να φθάνουν τα αέρια στην αντλία, σχεδόν όλη η θερμική ενέργεια έχει απελευθερωθεί λόγω της εξάπλωσής της σε μεγάλη περιοχή. Για τον έλεγχο της κατανομής της θερμικής ροής χρησιμοποιούνται ανακλαστές διαμέτρου 40 – 50 cm. Τελικά τα αποτελέσματα από την χρήση ενός τέτοιου συστήματος ήταν η ανομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας στο επίπεδο των φυτών και του εδάφους, η υψηλή θερμοκρασία του αέρα στο θερμοκήπιο οι διαφυγές καυσαερίων και η ίδια η πολυπλοκότητα του συστήματος. Για αυτούς τους λόγους η χρήση των συστημάτων αυτών έχει εγκαταλειφθεί.

Την τελευταία δεκαετία όμως το ενδιαφέρον για την υπέρυθρη θέρμανση στα θερμοκήπια άρχισε ξανά να αναπτύσσεται αφού η ανάπτυξη της τεχνολογίας οδήγησε στην κατασκευή σύγχρονων συστημάτων τα οποία φαίνεται να έχουν ξεπεράσει σε κάποιο βαθμό τα προβλήματα του παρελθόντος. Στα συστήματα αυτά ο αέρας δεν θερμαίνεται απευθείας από τα κάτοπτρα υπέρυθρης ακτινοβολίας, αλλά με συναγωγή λόγω της επαφής του με τα φυτά και το έδαφος που θερμαίνονται άμεσα (Nelson, 2003). Τα φυτά λαμβάνουν απευθείας την ενέργεια που χρειάζονται προκειμένου να φτάσουν και να διατηρήσουν την επιθυμητή για την ανάπτυξή τους θερμοκρασία χωρίς να υπάρχει ανάγκη για αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου.

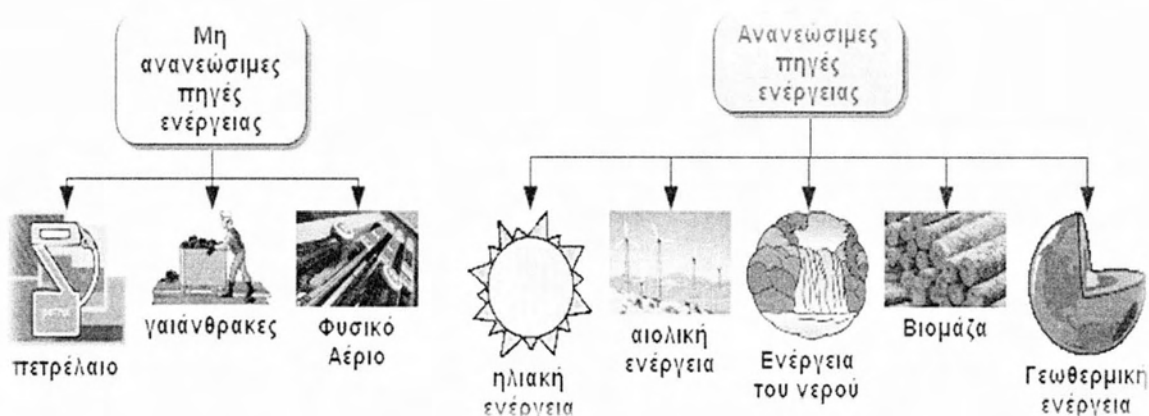
Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα θέρμανσης των θερμοκηπίων με τέτοιου είδους συστήματα έναντι των συμβατικών μεθόδων θέρμανσης αναφέρονται παρακάτω:

- Χαμηλότερο κόστος ενέργειας κατά 40-60% και μεγάλη διάρκεια ζωής
- Ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας
- Ανάπτυξη ζωνών διαφορετικών θερμοκρασιών στο ίδιο ενιαίο θερμοκήπιο

### 2.3.3 Συστήματα θέρμανσης με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)

Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας που χρησιμοποιούμε μέχρι και σήμερα στη θέρμανση των θερμοκηπίων, προέρχεται από τις συμβατικές πηγές ενέργειας που είναι το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και ο άνθρακας (Ανδρίτσος, 2008). Πρόκειται για μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που αργά η γρήγορα θα εξαντληθούν. Η χρήση της ενέργειας που προέρχεται από αυτές τις πηγές εκτός από το ότι δημιουργεί μια σειρά από περιβαλλοντικά προβλήματα αρχίζει ολοένα και περισσότερο να κάνει την παραγωγή ασύμφορη. Η κατανάλωση καυσίμων επομένως αποτελεί ένα σημαντικό οικονομικό παράγοντα, από τη στιγμή που η εφαρμογή των συστημάτων θέρμανσης απαιτείται σχεδόν σε όλα τα θερμοκήπια. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση τεχνικών θέρμανσης χαμηλού κόστους σε σχέση με τη θέρμανση με συμβατικά καύσιμα.

Επομένως εξαιτίας του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, του υψηλού κόστους καθώς και της αβεβαιότητας της διαθεσιμότητας των συμβατικών καυσίμων, έχει δοθεί σημαντική προσοχή από τους μηχανικούς στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) σαν εναλλακτική λύση καυσίμων θέρμανσης των θερμοκηπίων.



Σχήμα 2.7 Ανανεώσιμες και μη Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι ΑΠΕ ανανεώνονται μέσω του κύκλου της φύσης και θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες. Ο ήλιος, ο άνεμος, το νερό, οι οργανικές ύλες, ακόμη και τα απορρίμματα οικιακής και γεωργικής

προέλευσης, αποτελούν πηγές ενέργειας που η προσφορά τους δεν εξαντλείται ποτέ. Οι ΑΠΕ υπάρχουν σε αφθονία στο φύση και είναι οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, σχεδόν αποκλειστικά, μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα, οπότε και στράφηκε στην εντατική χρήση των ορυκτών καυσίμων (Boyd, 2008).

Τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζονται παρακάτω:

- Πρακτικά ανεξάντλητες
- Μειώνουν την εξάρτηση από τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους οι οποίοι εξαντλούνται με το πέρασμα των χρόνων.
- Συνήθως έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος το οποίο επιπλέον δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας συμβάλλοντας έτσι στην εξοικονόμηση ενέργειας στα θερμοκήπια.
- Είναι συνήθως φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι αποδεκτή από την κοινωνία.

Παρόλα αυτό οι ΑΠΕ παρουσιάζουν και μειονεκτήματα τα σημαντικότερα από τα οποία αναφέρονται παρακάτω:

- Παρουσιάζουν διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους (ελλείψεις) που πολλές φορές μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας.
- Εξαιτίας των διακυμάνσεων διάθεσης τους απαιτούν δαπανηρά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.
- Τα συστήματα που χρησιμοποιούν ΑΠΕ έχουν συνήθως μικρό συντελεστή απόδοσης για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται συνήθως ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.

Όσον αφορά τη θέρμανση του θερμοκηπίου κάνοντας χρήση των ΑΠΕ, η γεωθερμική, η ηλιακή, η ενέργεια από βιομάζα και λιγότερο η αιολική ενέργεια, μπορούν στις μέρες μας να χρησιμοποιηθούν με καλά αποτελέσματα από τεχνική και οικονομική σκοπιά.

Η αιολική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί ελάχιστα στη θέρμανση του θερμοκηπίου αφενός γιατί δεν είναι προβλέψιμη και υπάρχει σοβαρή δυσκολία στην αποθήκευσή της προκειμένου να χρησιμοποιηθεί όταν είναι απαραίτητη αφετέρου διότι έχει υψηλό κόστος εγκατάστασης και χρήσης ιδιαίτερα μάλιστα για συστήματα μεγάλης ισχύος. Εφαρμογή με καλά αποτελέσματα στη θέρμανση των θερμοκηπίων έχουν βρει στην πράξη, η ηλιακή και η γεωθερμική ενέργεια καθώς και η βιομάζα (Esen & Yuksel, 2013).

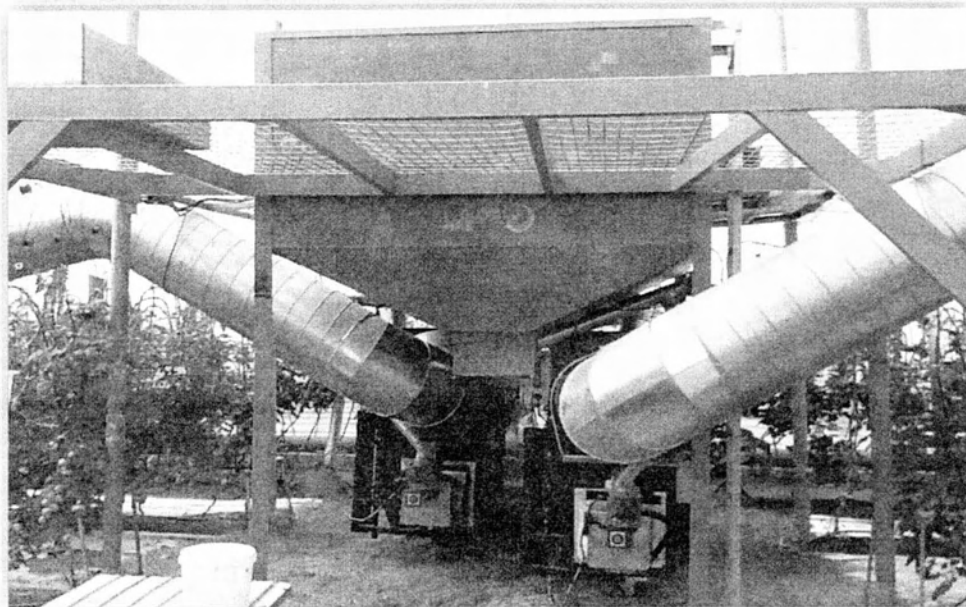
#### **2.3.3.1 Θέρμανση θερμοκηπίων με βιομάζα**

Με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης η ηλιακή ενέργεια μετασχηματίζεται από τα φυτά, χρησιμοποιώντας CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα, νερό και ανόργανα συστατικά από το έδαφος. Η ενέργεια της βιομάζας είναι δευτερογενής ηλιακή ενέργεια. Από τη στιγμή που σχηματίζεται, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας. Από τις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας η καύση βιομάζας για θέρμανση θερμοκηπίων εξαπλώθηκε με γοργούς ρυθμούς στη χώρα μας. Αυτό κυρίως οφείλεται στους εθνικούς και ευρωπαϊκούς πόρους που διατέθηκαν για την κατασκευή θερμοκηπίων με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με έμφαση στη θέρμανση από βιομάζα.

Για τη λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης με βιομάζα απαιτούνται:

- χώρος αποθήκευσης της βιομάζας
- σύστημα που τροφοδοτεί τον καυστήρα με καύσιμα
- θάλαμο καύσης
- σύστημα διανομής της θερμότητας
- μηχανισμούς ασφάλειας και ελέγχου
- συστήματα ελέγχου εκπομπών αιθάλης και καυσαερίων





**Σχήμα 2.8** Εγκατάσταση καυστήρων στερεής βιομάζας σε θερμοκήπιο

Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένα χαρακτηριστικά ενός συστήματος θέρμανσης με βιομάζα. Η τροφοδοσία του θαλάμου καύσης με καύσιμο πραγματοποιείται με μηχανισμό από σιλό μικρής χωρητικότητας εγκατεστημένο στον καυστήρα. Η πλήρωση του σιλό γίνεται από αποθήκη βιομάζας. Οι καυστήρες που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως τύπου σταθερής σχάρας, και στις περισσότερες περιπτώσεις συνδέονται με μονή ή διπλή σειρά κατακόρυφων σωληνώσεων νερού. Η τροφοδοσία του θαλάμου καύσης με αέρα γίνεται από την τροφοδοσία καυσίμου. Τέλος η μετάδοση της θερμότητας, γίνεται συνήθως με επιδαπέδια θέρμανση. Όπου αποτελεί τον τύπο θέρμανσης που χρησιμοποιείται στα περισσότερα θερμοκήπια χαμηλής θερμοκρασίας (έως 50 °C).

Η βιομάζα είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και επιπλέον η ενέργεια που παρέχει είναι αποθηκευμένη σε χημική μορφή. Στα πλεονεκτήματά της συγκαταλέγεται το γεγονός πως μπορεί να αξιοποιηθεί με μετατροπή της με διάφορες μεθόδους σε διάφορα προϊόντα και χρησιμοποιώντας σχετικά απλή τεχνολογία καθώς και το ότι κατά την παραγωγή της δεν δημιουργούνται περιβαλλοντολογικά και οικολογικά προβλήματα.

Παρόλα αυτά η βιομάζα παρουσιάζει και χαρακτηριστικά τα οποία προκαλούν δυσκολίες στη συλλογή τη μεταφορά και την αποθήκευσή της σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα. Επίσης χαρακτηρίζεται από εποχικότητα, χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο λόγω υψηλής περιεκτικότητας σε νερό και χαμηλής πυκνότητας.

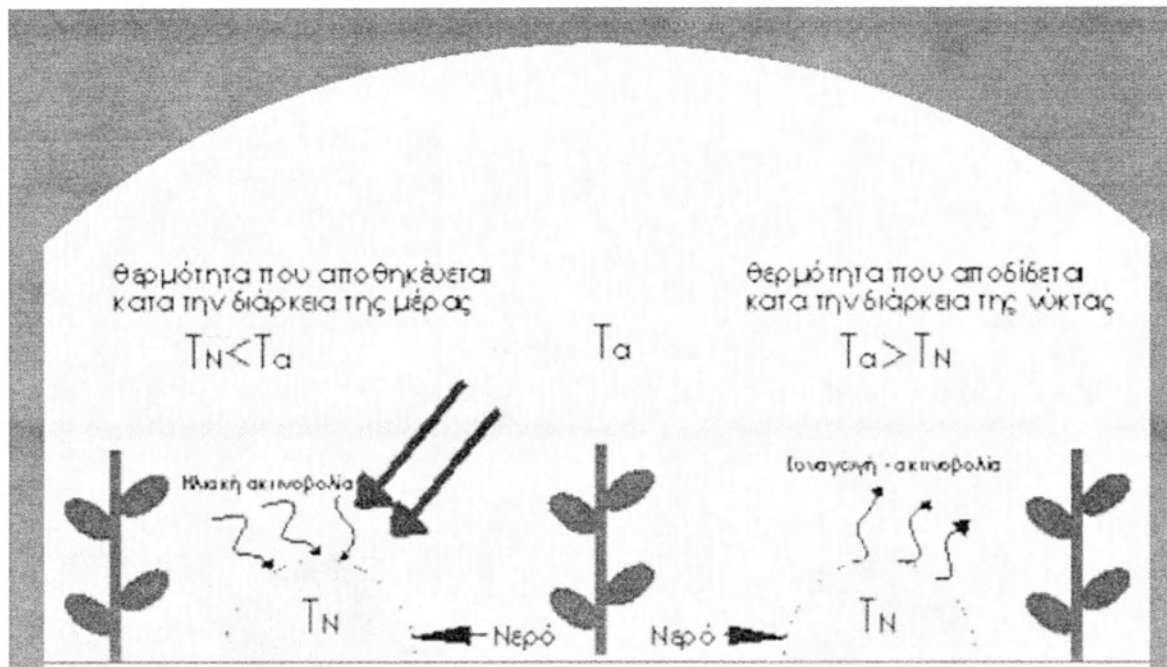
### **2.3.3.2 Θέρμανση θερμοκηπίων με ηλιακή ενέργεια**

Η ηλιακή ενέργεια είναι ελκυστική λύση για εφαρμογή σε θερμοκήπια, καθώς αποτελεί μια εύκολα προσιτή και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Βασικό μειονέκτημά της όμως αποτελεί το γεγονός ότι μπορεί να αξιοποιηθεί μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε περιοχές με ηλιοφάνεια και ακόμα η ένταση της μεταβάλλεται με την αλλαγή των εποχών του έτους. Το παραπάνω αποτελεί σοβαρό πρόβλημα αφού η ζήτηση της ενέργειας είναι αυξημένη κατά τη διάρκεια της νύχτας και ιδιαίτερα το χειμώνα. Αυτό επιβάλλει την χρησιμοποίηση εκτός των συστημάτων συλλογής της ηλιακής ενέργειας και αποθηκών ενέργειας για βραχυχρόνια ή μακροχρόνια χρήση τα οποία αυξάνουν κατακόρυφα το κόστος της επένδυσης.

Τα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται και χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για τη θέρμανσή των θερμοκηπίων ταξινομούνται σε παθητικά και ενεργητικά (Jensen, 1994).

- Στα παθητικά τοποθετούνται συστήματα συλλογής της θερμότητας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (Σχ. 2.9). Ακόμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το ίδιο το θερμοκήπιο ως συλλέκτης. Το μέσο της αποθήκευσης θερμότητας στα παθητικά ηλιακά θερμοκήπια μπορεί να είναι νερό, διάφορα πετρώματα ακόμα και το υπέδαφος του θερμοκηπίου. Τα παθητικά συστήματα χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την αποθήκευση θερμότητας μέσα στο θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια της ημέρας καθώς και για να αφαιρέσουν και να μεταφέρουν την περίσσεια θερμότητας σε κάποιο χώρο αποθήκευσης της, ενώ την νύχτα ανακτάται μέσα στο θερμοκήπιο για να ικανοποιήσει τις θερμικές του ανάγκες. Τέλος έχουν μικρότερο αρχικό και λειτουργικό κόστος σε σχέση με τα ενεργητικά συστήματα για αυτό και η χρήση τους στη θέρμανση των θερμοκηπίων είναι συχνότερη.





Σχήμα 2.9 Παθητικό σύστημα θέρμανσης με αποθήκευση νερού σε διαφανείς σωλήνες

- Στα ενεργητικά τοποθετείται εξοπλισμός ηλιακών συστημάτων που χρησιμοποιούν συστήματα εξωτερικά από το θερμοκήπιο τα οποία συλλέγουν και μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμότητα. Επιπρόσθετα χρησιμοποιούνται ανεξάρτητα συστήματα αποθήκευσης της ενέργειας με ηλιακούς συσσωρευτές κ.α. Τα ενεργητικά προτιμώνται λιγότερο σε σχέση με τα παθητικά συστήματα θέρμανσης. Η χρήση τους είναι περιορισμένη ιδιαίτερα σε μικρής κλίμακας εφαρμογές διότι ο χώρος που χρειάζεται να καταλαμβάνουν είναι μεγάλος και συνήθως δεν είναι διαθέσιμος, το κόστος των ηλιακών συσσωρευτών είναι υψηλό και τέλος λόγω του συστήματος αποθήκευσης της ενέργειας και του συστήματος διανομής της θερμότητας στο χώρο του θερμοκηπίου που πρέπει να διαθέτουν.

### 2.3.3.3 Θέρμανση με χρήση Γεωθερμίας

Με τον όρο γεωθερμική ενέργεια αναφερόμαστε στη θερμική ενέργεια που φέρουν τα γεωθερμικά ρευστά που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους τα οποία βρίσκουν φυσική διέξοδο από το υπέδαφος προς την επιφάνεια ή ανεβαίνουν με ειδικές γεωτρήσεις (Φύτικας & Ανδρίτσος,

2004). Η γεωθερμική ενέργεια βρίσκει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε ηφαιστειογενείς περιοχές όπως η Ελλάδα, διότι σε αυτές τις περιοχές διάπυρο υλικό από το εσωτερικό της γης έχει μετακινηθεί προς τα ανώτερα γεωλογικά στρώματα με τη βοήθεια υπόγειων ρευστών και τα έχει θερμάνει. Στην χρήση της γεωθερμίας, υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες που προσδιορίζουν το κόστος της εκμετάλλευσης σε συνδυασμό με τα φυσικά, χημικά και περιβαλλοντικά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν κατά την παραγωγή και τη χρήση της. Οι παράγοντες αυτοί είναι το βάθος, η θερμοκρασία, η διαθεσιμότητα και η υψηλή περιεκτικότητα διαφόρων χημικών στοιχείων στο γεωθερμικό ρευστό.

Γενικά, η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας συναντά ορισμένα βασικά προβλήματα, τα οποία θα πρέπει να λυθούν για την οικονομική εκμετάλλευση της εναλλακτικής αυτής μορφής ενέργειας και την ένταξη της σε ένα σύστημα θέρμανσης ενός θερμοκηπίου. Οι τύποι αυτοί των προβλημάτων είναι ο σχηματισμός επικαθίσεων σε κάθε σχεδόν επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το γεωθερμικό ρευστό, η διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών, καθώς και ορισμένες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις όπως η διάθεση των ρευστών μετά τη χρήση τους και οι εκπομπές τοξικών αερίων (π.χ. υδρόθειο). Όλα αυτά τα προβλήματα σχετίζονται άμεσα με την ιδιαίτερη χημική σύσταση των περισσότερων γεωθερμικών ρευστών.

Από την άλλη τα πλεονεκτήματα χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας είναι πολλά και σημαντικά, κυρίως για την προστασία του περιβάλλοντος. Επίσης αποτελούν την καλύτερη επένδυση στον χώρο της θέρμανσης και της ψύξης ενός θερμοκηπίου. Έτσι συνολικά προσφέρουν την μεγαλύτερη εξοικονόμηση χρήματος και ενέργειας σε σύγκριση με όλα τα υπόλοιπα μέσα θέρμανσης.

Ορισμένα από τα βασικά πλεονεκτήματα από τη χρήση της αναφέρονται παρακάτω επιγραμματικά:

- Συμβάλλει με τον πιο επιτυχή τρόπο στην κατανάλωση και παράλληλα εξοικονόμηση ενέργειας, επειδή παρουσιάζει την υποστήριξη της υψηλότερης εγκατεστημένης ισχύος.
- Συνεχής παροχή ενέργειας, Είναι διαθέσιμη όλο το 24ωρο, σε όλη τη διάρκεια του χρόνου και δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες, όπως η ηλιακή και η αιολική.
- Μηδενικές ή μικρές εκπομπές αερίων στο περιβάλλον

### **3. ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη θέρμανση θερμοκηπίου με αβαθή γεωθερμία και πιο συγκεκριμένα με τη χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας (ΓΑΘ). Οι βασικές θερμοδυναμικές αρχές που αφορούν την αντλία θερμότητας, ταυτίζονται με εκείνες της γεωθερμικής, με μοναδική διαφορά τη θερμοπηγή. Στην ενότητα αυτή γίνεται εισαγωγή στην αβαθή γεωθερμία. Έπειτα αναλύονται οι βασικές αρχές της αντλίας θερμότητας και της λειτουργία τους. Τέλος γίνεται ανάλυση όλων των στοιχείων και των στοιχείων που αποτελούν το σύστημα θέρμανσης με αβαθή γεωθερμία και του τρόπου που συνεργάζονται.

#### **3.2 Αβαθής γεωθερμία**

##### **3.2.1 Ορισμός**

Τα βασικά στρώματα στα οποία χωρίζεται το έδαφος είναι τρία. Στο επιφανειακό στρώμα, η θερμοκρασία επηρεάζεται από την συνεχή αλλαγή της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας και από παράγοντες όπως την ηλιακή ακτινοβολία, την υγρασία, την βροχόπτωση, τον αέρα κτλ. Το αβαθές στρώμα, που κυρίως επηρεάζεται από εποχιακές καιρικές αλλαγές. Τέλος το βαθύτερο, του οποίου η θερμοκρασία παραμένει σχετικά σταθερή και ανεπηρέαστη από τις καιρικές συνθήκες.

Η μεταβολή της θερμοκρασίας μειώνεται με το βάθος και γίνεται αμελητέα κάτω από 15 μ. Οι τοπικές θερμοκρασίες εδάφους εξαρτώνται από το κλίμα της περιοχής, την κλίση του εδάφους, την υγρασία, ιδιότητες χόματος κ.α (Φύτικας & Ανδρίτσος, 2004).

Η θερμότητα που περιέχεται στο εσωτερικό της γης όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αποτελεί την γεωθερμική ενέργεια και είναι τόσο μεγάλη, ώστε μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ανεξάντλητη μορφή ενέργειας για τις ανθρώπινες απαιτήσεις. Ανάλογα με το βάθος της γεώτρησης και της μεθόδους εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας, ορίζουμε την αβαθή

γεωθερμία η οποία εκμεταλλεύεται σχετικά χαμηλά βάθη και μικρές θερμοκρασιακές μεταβολές εδάφους-ατμόσφαιρας, και τη βαθιά γεωθερμία για μεγαλύτερα βάθη και μεγαλύτερες θερμοκρασιακές μεταβολές (εδάφους-ατμόσφαιρας).

Ως αβαθής γεωθερμία επομένως ορίζεται η θερμική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη σε μικρά σχετικά βάθη του φλοιού της γης (μέχρι 100 m) και με θερμοκρασίες υπεδάφους έως 20° C. Η ενέργεια αυτή προέρχεται κυρίως από την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και πολύ λιγότερο από της θερμικές διεργασίες στο εσωτερικό του πλανήτη.

Τα συστήματα εκμετάλλευσης της αβαθούς γεωθερμίας αποτελούνται από τρία βασικά κομμάτια: την αντλία θερμότητας, τον γεωεναλλάκτη και το σύστημα διανομής της θερμότητας. Συνήθως χρησιμοποιούνται αντλίες θερμότητας νερού/νερού, οι οποίες παράγουν θερμό ή ψυχρό νερό και συνδυάζονται είτε με τερματικές μονάδες ανεμιστήρα/στοιχείου (fan-coil units) είτε με κεντρικές κλιματιστικές μονάδες (Banks, 2012). Ακόμα μπορούν χρησιμοποιηθούν αντλίες θερμότητας νερού/αέρα, που παράγουν θερμό ή ψυχρό αέρα και συνδέονται απευθείας με δίκτυο αεραγωγών. Τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα αβαθούς γεωθερμίας και η λειτουργία τους περιγράφονται με λεπτομέρεια σε επόμενες παραγράφους.

### **3.2.2 Συστήματα ανοιχτού – κλειστού βρόχου**

Στην αβαθή γεωθερμία για τη μεταφορά θερμότητας από το έδαφος προς το χώρο που θέλουμε να θερμανθεί ή αντίστροφα από το χώρο που θέλουμε να ψυχθεί προς το έδαφος, χρησιμοποιείται ένα δίκτυο σωληνώσεων που ονομάζεται γεωεναλλάκτης. Τα συστήματα αβαθούς γεωθερμίας ανάλογα με τον τύπο του γεωεναλλάκτη που χρησιμοποιούν χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες στα συστήματα ανοικτού βρόχου και στα συστήματα κλειστού βρόχου (Hanley & Ellis, 1983).

#### **3.2.2.1 Συστήματα ανοιχτού βρόχου**

Τα συστήματα ανοικτού βρόχου χρησιμοποιούν το νερό υδρολογικών σχηματισμών της περιοχής εγκατάστασης για την τροφοδοσία του πρωτεύοντος κυκλώματος της αντλίας θερμότητας. Ο υδρολογικός σχηματισμός μπορεί να είναι είτε υπόγειος, είτε επιφανειακός

(λίμνη, ποτάμι). Στη συνέχεια το ρευστό απορρίπτεται στον υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής. Τον τύπο του γεωθερμικού εναλλάκτη τον καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος του διαθέσιμου ελεύθερου χώρου και η σύσταση του υπεδάφους. Κύριο πλεονέκτημα αποτελεί η αποδοτικότερη μεταφορά θερμότητας Παρόλα αυτά προϋπόθεση για τη αποδοτική λειτουργία τέτοιων συστημάτων είναι η επαρκής ποσότητα νερού σε όλη τη διάρκεια του έτους, η καλή ποιότητά του και η δυνατότητα διάθεσης του νερού μετά τη χρήση του.

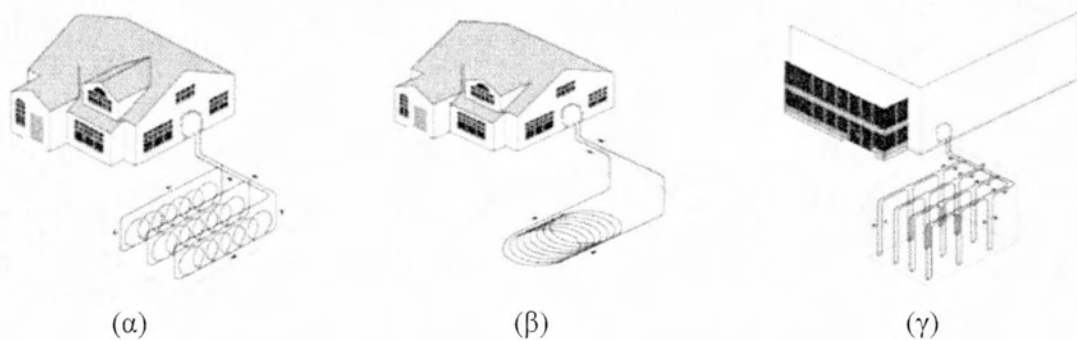
### 3.2.2.2 Συστήματα κλειστού βρόχου

Στους γεωεναλλάκτες κλειστού βρόχου η θερμότητα του εδάφους μεταφέρεται στο ψυκτικό μέσο με ένα ενδιάμεσο μέσο θέρμανσης που κυκλοφορεί στο γεωεναλλάκτη. Σε αυτού του τύπου τα συστήματα, τοποθετείται στο εσωτερικό του εδάφους ένας γεωεναλλάκτης κλειστής διαδρομής, σε οριζόντια ή κατακόρυφη θέση. Τη μεταφορά της θερμότητας από το έδαφος στην αντλία θερμότητας και το αντίστροφο, αναλαμβάνει κάποιο ενδιάμεσο μέσον που κυκλοφορεί στο εσωτερικό των σωληνώσεων και συνήθως είναι νερό ή νερό με αντιψυκτικό. Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτού του τύπου συστημάτων είναι η ανεξαρτησία από την ύπαρξη και την ποιότητα του νερού στην περιοχή της γεώτρησης.

Τα συστήματα κλειστού βρόχου μπορούν να ταξινομηθούν σε 2 κατηγορίες:

α) Συστήματα οριζοντίου βρόχου (Σχήμα 3.8 α, β - Horizontal Loop)

β) Συστήματα κατακόρυφου βρόχου (Σχήμα 3.8 γ - Vertical Loop)



**Σχήμα 3.1** Συστήματα οριζόντιου (α, β) και κατακόρυφου βρόχου (γ)

### α) Συστήματα οριζοντίου βρόχου

Η διάταξη του οριζοντίου γεωεναλλάκτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις που υπάρχει μεγάλος διαθέσιμος περιβάλλοντας χώρος. Οι οριζόντιες εγκαταστάσεις απαιτούν μεγάλη επιφάνεια, χωρίς σκληρά πετρώματα. Είναι ιδανικές για μικρές εγκαταστάσεις και συνήθως για καινούριες κατασκευές. Χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές τοποθέτησης του οριζοντίου γεωεναλλάκτη στο υπέδαφος:

- Πλέγμα: Σε βάθη περίπου δυο μέτρα από την επιφάνεια τοποθετούνται προκατασκευασμένα πλέγματα που αποτελούνται από λεπτούς σωλήνες Φ8 ή Φ10. Η μέθοδος αυτή αποδίδει περίπου 80 W/m<sup>2</sup> εδάφους.

- Σωλήνες η μία πάνω από την άλλη: Η πρώτη σωλήνα τοποθετείται περίπου στα δύο μέτρα ενώ η δεύτερη τοποθετείται 40-50 cm πάνω από την πρώτη. Η μέθοδος αυτή αποδίδει περίπου 50-60 W/m<sup>2</sup> εδάφους.

- Σωλήνες σε παράλληλη διάταξη: Σε βάθος περίπου 1,5 m από την επιφάνεια τοποθετούνται παράλληλα μήκη σωλήνας η μία δίπλα στην άλλη. Η απόσταση μεταξύ των σωλήνων πρέπει να είναι τουλάχιστον 60 cm. Η μέθοδος αυτή αποδίδει 30-40 W/m<sup>2</sup> εδάφους.

- Σωλήνες απλωμένες σε σπείρες: Σε βάθος περίπου 1,5 m από την επιφάνεια απλώνεται κουλούρα πολυαιθυλενίου με τέτοια διάταξη ώστε να σχηματιστούν σπείρες η οποίες να εφάπτονται μεταξύ τους. Η μέθοδος αυτή αποδίδει 30-40 W/m<sup>2</sup> εδάφους.

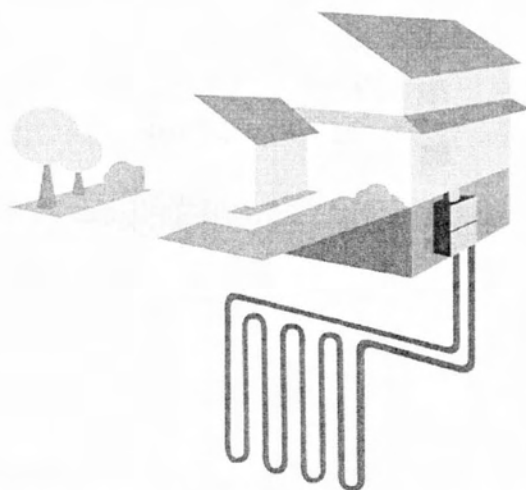
Σε κάθε περίπτωση οι σωλήνες που χρησιμοποιούνται συνήθως (εκτός από το πλέγμα) είναι από πολυαιθυλένιο τρίτης γενιάς HDPE Φ32 ή Φ40. Για την τοποθέτηση των σωλήνων συνήθως σκάβεται ορισμένη επιφάνεια του εδάφους και αφού τοποθετηθούν σε αυτή το σκάμμα καλύπτεται με χώμα. Η επιφάνεια πάνω από τον γεωεναλλάκτη μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί χωρίς περιορισμούς. Το βάθος στο οποίο θα τοποθετηθούν οι σωληνώσεις μεταβάλλεται ανάλογα με την περιοχή. Συνήθως μία εγκατάσταση σε βάθος μεγαλύτερο του 1,5 μέτρου εξασφαλίζει σταθερότερες συνθήκες αλλά αυξάνει το κόστος. Το κόστος πάντως των σκαπτικών είναι υψηλό και συχνά υψηλότερο από το κόστος αγοράς των σωληνώσεων. Αυτός είναι και ο λόγος που ένα σύστημα μπορεί να αποδειχθεί αποδοτικότερο οικονομικά αν τοποθετείται πάνω από μία σειρά σωληνώσεων.



Γενικά οι εγκαταστάσεις οριζόντιου γεωεναλλάκτη θεωρούνται φθηνότερες εγκαταστάσεις από αυτές του κατακόρυφου καθώς απουσιάζει το κόστος της γεώτρησης. Απαιτούν παρ' όλα αυτά μεγαλύτερο μήκος σωληνώσεων από την κατακόρυφη εγκατάσταση διότι το επίπεδο θερμοκρασίας σε αυτά τα βάθη τοποθέτησης είναι πολύ χαμηλότερα σε σχέση με εκείνα της κατακόρυφης εγκατάστασης

### β) Συστήματα κατακόρυφου βρόχου

Τα συστήματα στα οποία ο συλλέκτης τοποθετείται κατακόρυφα, απαιτούν μικρότερη επιφάνεια και χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις όπου ο χώρος είναι περιορισμένος (π.χ. σε αστικά κέντρα). Προτιμάται σε περιπτώσεις όπου η απαιτούμενη ανάγκη δεν μπορεί να καλυφθεί από ένα σύστημα οριζόντιου βρόχου. Επίσης τοποθετούνται σε περισσότερους τύπους εδάφους, ακόμα και με πετρώδη σύσταση με την προϋπόθεση να έχουν τις κατάλληλες θερμικές ιδιότητες.



Σχήμα 3.2 Σύστημα κατακόρυφου γεωεναλλάκτη

Η κατασκευή των κατακόρυφων συστημάτων γίνεται συνήθως με την τοποθέτηση δύο σωλήνων πολυαιθυλενίου μικρής διαμέτρου σε μία γεώτρηση. Οι σωλήνες είναι θερμικά επεξεργασμένοι ώστε στην βάση της γεώτρησης να διαμορφώνεται μια στροφή επιστροφής τύπου U. Οι γεωτρήσεις έχουν βάθος από 45-150 m και η διάνοιξη γίνεται με τις μεθόδους που ακολουθούνται για τις διανοίξεις φρεατίων.



Η κατασκευή του κάθετου γεωθερμικού εναλλάκτη απαιτεί αρχικά την κατασκευή γεωτρήσεων διαμέτρου 8" σε βάθη περίπου 100m. Έπειτα πραγματοποιείται συναρμολόγηση του γεωεναλλάκτη στην επιφάνεια. Ο γεωεναλλάκτης αποτελείται από τέσσερις σωλήνες 2 εισόδου και 2 επιστροφής. Σε επόμενο στάδιο γίνεται δοκιμή αντοχής του γεωεναλλάκτη στην επιφάνεια με νερό στα 10 bar. Ακολουθεί η τοποθέτηση γεωεναλλάκτη μέσα στις γεωτρήσεις και έπειτα γέμισμα των γεωτρήσεων με μείγμα τσιμέντου και άμμου. Τέλος κατασκευάζεται κάποιο φρεάτιο επίσκεψης της εγκατάστασης στην επιφάνεια του εδάφους.

Οι κατακόρυφοι γεωεναλλάκτες αποδίδουν περίπου  $65 \text{ W/m}^2$ . Οι κατακόρυφες εγκαταστάσεις είναι πιο αποδοτικές καθώς επηρεάζονται λιγότερο από τις θερμοκρασιακές μεταβολές της ατμόσφαιρας επίσης. Είναι πιο δαπανηρές εγκαταστάσεις αλλά απαιτούν λιγότερο συνολικό μήκος σωληνώσεων για να επιτύχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα σε σχέση με τα οριζόντια συστήματα

### 3.3 Εισαγωγή στις αντλίες θερμότητας

Είναι γνωστό ότι στη φύση η θερμότητα ρέει από ένα μέσο που βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία προς ένα άλλο που βρίσκεται σε χαμηλότερη, χωρίς να απαιτείται κάποια ειδική διάταξη. Η αντίστροφη διεργασία όμως δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί από μόνη της. Προκειμένου να γίνει μεταφορά θερμότητας από ένα μέσο που βρίσκεται σε χαμηλή θερμοκρασία σε ένα άλλο που βρίσκεται σε υψηλότερη, χρησιμοποιούνται ειδικές διατάξεις που καταναλώνουν έργο και ονομάζονται αντλίες θερμότητας (Cengel & Boles, 2010).

Οι αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούνται για την ψύξη αλλά και την θέρμανση των χώρων. Αυτό επιτρέπει τη χρήση της ίδιας συσκευής για ψύξη και θέρμανση και καθιστά ιδανική τη χρήση της ιδανική για μονάδες κλιματισμού. Ο σκοπός της αντλίας θερμότητας σε λειτουργία ψύξης είναι να διατηρεί το χώρο της ψύξης σε χαμηλότερη θερμοκρασία από το εξωτερικό περιβάλλον του απάγοντας από αυτόν θερμότητα, σε αυτή την περίπτωση η συσκευή ονομάζεται και ψυγείο. Αντίθετα, η αντλία θερμότητας σε λειτουργία θέρμανσης χρησιμοποιείται για να διατηρεί ένα θερμαινόμενο χώρο σε υψηλότερη θερμοκρασία από το εξωτερικό του περιβάλλον απορροφώντας θερμότητα από μια πηγή χαμηλής θερμοκρασίας, όπως το νερό ενός ρεύματος ή ο ψυχρός αέρας του χειμώνα και τη μεταφέρει σε ένα μέσο που βρίσκεται σε υψηλότερη

θερμοκρασία με σκοπό τη θέρμανσή του, όπως για παράδειγμα, το εσωτερικό ενός θερμοκηπίου ή ενός σπιτιού μίας αίθουσας κ.τ.λ.

Για την λειτουργία της αντλίας θερμότητας το μηχανικό έργο που δαπανάται χρησιμεύει για την μεταφορά μιας ποσότητας θερμότητας, που ήδη υπάρχει σε μία πηγή ενέργειας (αέρας, νερό, έδαφος), σε υψηλότερη θερμοκρασία και όχι για την παραγωγή θερμότητας. Συνήθως η διεργασία αυτή της μεταφοράς θερμότητας έχει ένα βαθμό απόδοσης από 2 έως 4, δηλαδή η αντλία θερμότητας παρέχει από 2 έως 4 φορές περισσότερη θερμική ενέργεια από την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει. Αυτό συμβαίνει διότι η θερμότητα που μεταφέρεται στην υψηλή θερμοκρασία περιέχει τόσο το μηχανικό έργο όσο και τη θερμική ενέργεια που απορροφάται στη χαμηλή θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 Φορά μεταφοράς θερμότητας στην αντλία θερμότητας

### 3.4 Αρχές λειτουργίας και κατασκευαστικά μέρη της αντλίας θερμότητας

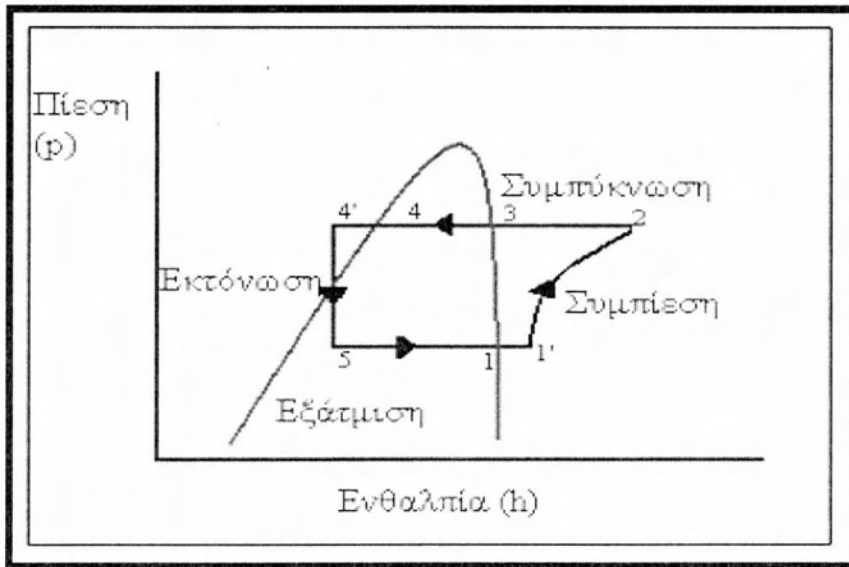
Οι αντλίες θερμότητας όπως και όλες οι θερμικές μηχανές, είναι κυκλικές διατάξεις. Η λειτουργία τους πραγματοποιείται με διάφορους κύκλους ψύξης και το ρευστό λειτουργίας σε ένα κύκλο ψύξης ονομάζεται ψυκτικό. Τα ψυκτικά ρευστά, ακολουθώντας ένα θερμοδυναμικό κύκλο, απορροφούν θερμότητα όταν εξατμίζονται και αποβάλλουν θερμότητα όταν συμπυκνώνονται. Η χρήση των ψυκτικών ρευστών επικράτησε λόγω της ιδιότητάς τους να εξατμίζονται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Οπότε μπορούν να απορροφήσουν θερμότητα ακόμη και όταν η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας (π.χ. αέρα) είναι μικρότερη από τους 0°C (Mc Mullan & Morgan, 1981).

Ο πιο διαδεδομένος κύκλος ψύξης είναι ο κύκλος συμπίεσης ατμού, ο οποίος περιλαμβάνει τέσσερα βασικά εξαρτήματα: ένα συμπιεστή, ένα συμπυκνωτή, μια βαλβίδα εκτόνωσης και ένα εξατμιστήρα. Οι συσκευές αυτές είναι κοινές για όλους τους τύπους των αντλιών θερμότητας.

Εκτός από τις παραπάνω βασικές συσκευές, αντλίες θερμότητας περιλαμβάνουν ανάλογα με την κατασκευή τους και άλλα εξαρτήματα και μηχανισμούς, που αποσκοπούν στην καλύτερη ρύθμιση και την ασφαλή λειτουργία αντλίας θερμότητας όπως:

- το φίλτρο-ξηραντήρας, που συγκρατεί τα στερεά σωματίδια και τα ίχνη υδρατμού ή νερού που περιέχονται στο ψυκτικό ρευστό
- ο διαχωριστής λαδιού, που τοποθετείται στην έξοδο του συμπιεστή και έχει ως σκοπό να διαχωρίσει το λάδι λίπανσης από τους υπέρθερμους ατμούς του ψυκτικού ρευστού
- οι ηλεκτρονικές μονάδες ελέγχου
- οι θερμοστάτες
- οι βαλβίδες αντεπιστροφής, που επιτρέπουν τη ροή του ψυκτικού μόνο προς μία κατεύθυνση
- οι ρυθμιστές υψηλής και χαμηλής πίεσης κ.α.

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της αντλίας θερμότητας βήμα προς βήμα:



Μεταβολή	Διεργασία	Ψυκτικό ρευστό	Μεταβολή ενέργειας
1'-2	Συμπίεση	Παίρνει ενέργεια	Κατανάλωση μηχανικού έργου
2-4'	Συμπύκνωση	Αποβάλλει θερμότητα	Αποβολή θερμότητας στον αποδέκτη θερμότητας
4'-5	Εκτόνωση	Από υγρό υψηλής πίεσης γίνεται υγρός ατμός χαμηλής πίεσης	Καμία ενεργειακή μεταβολή
5-1'	Εξάτμιση	Αντλεί θερμότητα	Απορρόφηση θερμότητας από την πηγή θερμότητας

Σχήμα 3.4 Ψυκτικός κύκλος συμπίεσης ατμών

Το ψυκτικό εισέρχεται στο συμπιεστή με τη μορφή ατμού και συμπιέζεται στην πίεση που απαιτείται για την είσοδο του στο συμπυκνωτή. Στην έξοδο του συμπιεστή, το ψυκτικό βρίσκεται σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία. Έπειτα ρέει μέσα από τις σπείρες του συμπυκνωτή και συμπυκνώνεται, αποβάλλοντας ενέργεια προς το περιβάλλον. Στη συνέχεια, εισέρχεται σε

έναν τριχοειδή σωλήνα όπου η θερμοκρασία και η πίεση του ελαττώνονται δραστικά, λόγω του φαινομένου του στραγγαλισμού. Το ψυκτικό με τη χαμηλή πλέον θερμοκρασία εισέρχεται στον εξατμιστήρα όπου και εξατμίζεται απορροφώντας θερμότητα από το χώρο ψύξης. Ο κύκλος συμπληρώνεται με την έξοδο του ψυκτικού από τον εξατμιστήρα και την είσοδο του στο συμπιεστή. Ακολουθεί ανάλυση της κάθε επιμέρους συσκευής χωριστά .

### Συμπιεστής

Ο συμπιεστής είναι μια αντλία ατμού η οποία αρχικά αναρροφά τους ατμούς του ψυκτικού ρευστού από τον εξατμιστή, και έπειτα από τη χαμηλή πίεση τους συμπιέζει στην υψηλή και έτσι καλύπτει τις πτώσεις πίεσης στις σωληνώσεις και τα εξαρτήματα της αντλίας θερμότητας. Οι τύποι συμπιεστών που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι οι τύπου τυμπάνου, οι παλινδρομικοί, οι κοχλιωτοί, οι σπειροειδείς, καθώς και οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές.

### Συμπυκνωτής

Ο συμπυκνωτής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ του αποδέκτη/πηγής θερμότητας και του ψυκτικού ρευστού. Πιο συγκεκριμένα ο συμπυκνωτής είναι το τμήμα της αντλίας θερμότητας από το οποίο αποβάλλεται η θερμότητα. Όσον αφορά τη λειτουργία του στις λειτουργίες θέρμανσης/ψύξης, ο συμπυκνωτής κατά την λειτουργία θέρμανσης αποδίδει θερμότητα στο μέσον ή το χώρο που πρέπει να θερμανθεί. Ενώ κατά την ψυκτική λειτουργία, λειτουργεί αντίστροφα και απορρίπτει θερμότητα στο εξωτερικό περιβάλλον. Αυτό στην πράξη γίνεται αντιστρέφοντας τον ψυκτικό κύκλο και εναλλάσσοντας τη λειτουργία του συμπυκνωτή και του εξατμιστή.

### Εξατμιστής

Ο εξατμιστής όπως και ο συμπυκνωτής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας. Η εναλλαγή θερμότητας γίνεται μεταξύ ψυκτικού ρευστού και πηγής/αποδέκτη θερμότητας. Πιο αναλυτικά ο εξατμιστής αποτελεί το τμήμα της αντλίας θερμότητας που απορροφά θερμότητα από έναν χώρο

ή ένα μέσον. Η απορρόφηση θερμότητας, γίνεται υπό σταθερή πίεση, με εξάτμιση του ψυκτικού μέσου. Οι εξατμιστές κατασκευάζονται από χαλκοσωλήνες, σε αντίστοιχους τύπους με τους συμπυκνωτές ( υδρόψυκτοι - αερόψυκτοι).

Οι υδρόψυκτοι εξατμιστές συνδυάζονται με αντλίες θερμότητας που έχουν ως πηγή/αποδέκτη θερμότητας το νερό (αντλίες θερμότητας νερού/νερού και εδάφους/νερού). Αντίστοιχα οι αερόψυκτοι εξατμιστές τοποθετούνται στις αντλίες θερμότητας με πηγή/αποδέκτη θερμότητας τον αέρα ( αντλίες θερμότητας αέρα - αέρα και αέρα νερού).

### Σύστημα βαλβίδων εκτόνωσης

Το σύστημα βαλβίδων εκτόνωσης ρυθμίζουν την ποσότητα του υγρού ψυκτικού ρευστού από τον συμπυκνωτή προς τον εξατμιστή και αλλάζουν τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του ψυκτικού ρευστού έτσι ώστε από υγρό υψηλής πίεσης στην έξοδό του, να μετατρέπεται σε μίγμα υγρού-ατμού σταθερής χαμηλής πίεσης. Στις αντλίες θερμότητας οι πιο συνηθισμένοι τύποι εκτονωτικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται είναι ο τριχοειδής σωλήνας και η θερμοστατική εκτονωτική βαλβίδα.

### Τετράοδη Βαλβίδα

Η συσκευή με την οποία γίνεται αντιστροφή του ψυκτικού κύκλου από ψύξη σε θέρμανση ονομάζεται τετράοδη βαλβίδα. Η ενεργοποίησή της γίνεται από το σύστημα ελέγχου που έχει κάθε αντλία θερμότητας.

### 3.5 Αποτελεσματικότητα και συντελεστής λειτουργίας

Η αποτελεσματικότητα της αντλίας θερμότητας εκφράζεται με το βαθμό απόδοσης. Γενικά η απόδοση μιας αντλίας θερμότητας εκφράζεται από την παρακάτω σχέση.

$$\text{Βαθ. απόδ.} = \frac{\text{Επιθυμητό αποτέλεσμα}}{\text{Απαιτούμενη είσοδος}}$$

- Για την περίπτωση της λειτουργίας σε θέρμανση, ο σκοπός της αντλίας θερμότητας είναι να αφαιρεί θερμότητα  $Q_C$  από το εξωτερικό (ψυχρότερο) περιβάλλον και να παρέχει θερμότητα  $Q_H$  σε ένα θερμότερο χώρο. Προκειμένου να γίνει αυτό, απαιτείται κάποιο έργο εισόδου  $W_{\text{net.in}}$ . Οπότε, είναι λογικό ο βαθμός απόδοσης μιας αντλίας θερμότητας να περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση.

$$\text{Βαθ. απόδ. θέρμανσης} = \frac{\text{Ενέργεια που δίνεται στο θερμαινόμενο χώρο}}{\text{Ενέργεια που δαπανάται από το σύστημα}}$$

- Για την περίπτωση της λειτουργίας σε ψύξη, η αντλία θερμότητας έχει σκοπό να αφαιρεί θερμότητα  $Q_C$  από το χώρο ψύξης. Προκειμένου να γίνει αυτό απαιτείται κάποιο έργο εισόδου  $W_{\text{net.in}}$ . Οπότε ο συντελεστής λειτουργίας σε αυτή την περίπτωση εκφράζεται από την παρακάτω σχέση.

$$\text{Βαθ. απόδ. θέρμανσης} = \frac{\text{Ενέργεια που αφαιρείται από τον ψυχόμενο χώρο}}{\text{Ενέργεια που δαπανάται από το σύστημα}}$$

Από τον τύπο του βαθμού απόδοσης προκύπτει πως όσο μικρότερη είναι η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του μέσου από το οποίο αντλείται η θερμότητα και της θερμοκρασίας του μέσου στο οποίο απορρίπτεται η θερμότητα, τόσο λιγότερο έργο απαιτείται για την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας, που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης της συσκευής.

Για την απόδοση μιας αντλίας θερμότητας χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικοί δείκτες. Τους δύο αυτούς δείκτες αποτελούν ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης COP (Coefficient of Performance) και ο εποχιακός βαθμός απόδοσης HSPF (Heating Seasonal Performance Factor).



### Δείκτης COP

Από τους δύο δείκτες ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης COP χρησιμοποιείται συχνότερα. Είναι ο λόγος του επιθυμητού αποτελέσματος  $Q_H$  ή  $Q_C$  σε (W) προς την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ  $W_{net,in}$  σε (W). Οι τιμές του συνήθως κυμαίνονται από 2 έως 4 για τις αντλίες θερμότητας με πηγή τον αέρα. Ενώ οι αντλίες θερμότητας με πηγή το νερό ή το έδαφος, πετυχαίνουν η τιμές του COP κυμαίνεται συνήθως από 3 έως 5.

Ο τύπος που ισχύει για τον συντελεστή COP στην περίπτωση που η αντλία θερμότητας χρησιμοποιείται για θέρμανση ορίζεται ως εξής:

$$COP_H = \frac{Q_H}{W_{net,in}} \quad (3.1)$$

Όπου:

$$W_{net,in} = Q_H - Q_C \quad (3.2)$$

Ο τύπος που ισχύει για τον συντελεστή COP στην περίπτωση που η αντλία θερμότητας χρησιμοποιείται για ψύξη ορίζεται ως εξής:

$$COP_C = \frac{Q_C}{W_{net,in}} \quad (3.3)$$

Ο δείκτης COP βασίζεται σε εργαστηριακές μετρήσεις και δεν μπορεί να αποδώσει τη συμπεριφορά μιας αντλίας θερμότητας σε μακρόχρονη λειτουργία.

### Δείκτης HSPF

Ο δείκτης HSPF ή αλλιώς ο «εποχιακός βαθμός επίδοσης» είναι ο λόγος της συνολικής ωφέλιμης ενέργειας σε (kWh) προς την συνολικά καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε (kWh).

Η σχέση που ισχύει για τον συντελεστή HSPF στην περίπτωση που η αντλία θερμότητας χρησιμοποιείται για θέρμανση, ορίζεται ως εξής:

$$\text{HSPF}_H = \frac{\text{Θερμική ενέργεια που αποδίδεται στο χώρο (kWh)}}{\text{Ενέργεια που καταναλώνεται (kWh)}} = \frac{Q_H}{W_{\text{net.in}}} \quad (3.4)$$

Ο σχέση που ισχύει για τον συντελεστή HSPF στην περίπτωση που η αντλία θερμότητας χρησιμοποιείται για ψύξη ορίζεται ως εξής:

$$\text{HSPF}_C = \frac{\text{Θερμική ενέργεια που αφαιρείται από το χώρο(kWh)}}{\text{Ενέργεια που καταναλώνεται(kWh)}} = \frac{Q_C}{W_{\text{net.in}}} \quad (3.5)$$

Η εποχιακή επίδοση μιας αντλίας θερμότητας θεωρείται ικανοποιητική εάν  $\text{HSPF} > 3$ .

Ο εποχιακός βαθμός απόδοσης HSPF αποδίδει πιο ρεαλιστικά την συμπεριφορά μιας αντλίας θερμότητας, αφού αναφέρεται σε εποχιακή βάση (εβδομάδα, μήνας, περίοδος).

#### Δείκτης EER

Η απόδοση των ψυγείων και των κλιματιστικών μπορεί να εκφραστεί και με τον δείκτη EER, ο οποίος χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στις Η.Π.Α. Ο όρος EER προέρχεται από τα αρχικά του όρου Energy Efficiency Rating (Εκτίμηση Ενεργειακής Αποτελεσματικότητας) και ορίζεται ως το ποσό της θερμότητας που απάγεται από τον ψυχόμενο χώρο σε Btu, για κάθε Wh (watt-hour) κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

### **3.6 Ψυκτικά ρευστά**

Το ρευστό λειτουργίας σε ένα κύκλο ψύξης ονομάζεται ψυκτικό ρευστό ή απλώς ψυκτικό και μπορεί να έχει υγρή ή αέρια μορφή.

Το ψυκτικό χρησιμοποιείται προκειμένου να μεταφερθεί θερμότητα από έναν χώρο σε ένα άλλον χώρο. Η διεργασία απορρόφησης θερμότητας πραγματοποιείται στον εξατμιστή με την ατμοποίηση του ψυκτικού. Αντίθετα η θερμότητα αποδίδεται με τη συμπύκνωση των ατμών του ψυκτικού μέσου, όπου πραγματοποιείται στο συμπυκνωτή.

Η επιλογή του ψυκτικού που απαιτεί η κάθε εφαρμογή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες ενώ δεν υπάρχει ψυκτικό που να είναι ιδανικό για όλες τις περιπτώσεις. Οι ιδιότητες οι οποίες χαρακτηρίζουν το ψυκτικό και ενδιαφέρουν τον μηχανικό προκειμένου να επιλέξει το κατάλληλο για την εκάστοτε εφαρμογή χωρίζονται κυρίως σε 2 κατηγορίες: τις Φυσικές/Χημικές ιδιότητες και τις Θερμοδυναμικές ιδιότητες. Στις Φυσικές/Χημικές ιδιότητες συγκαταλέγεται η χαμηλή διαλυτότητα νερού, η υψηλή διαλυτότητα ελαίου, ο μικρός ειδικός όγκος η αδράνεια κ.α. Ενώ οι Θερμοδυναμικές ιδιότητες περιλαμβάνουν τη χαμηλή θερμοκρασία πήξης, τη χαμηλή θερμοκρασία βρασμού (σε ατμοσφαιρική πίεση), ην υψηλή λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης κ.α. Τέλος υπάρχουν κάποιες ιδιότητες οι οποίες είναι απαραίτητες προκειμένου το ρευστό να είναι ασφαλές κατά τη διάρκεια λειτουργίας, όπως για παράδειγμα η ευφλεκτότητα, η τοξικότητα καθώς και η φιλικότητα του προς το περιβάλλον.

Κάθε ψυκτικό ρευστό χαρακτηρίζεται με το σύμβολο R (Refrigerant), το οποίο ακολουθούν δύο ή τρεις αριθμοί. Οι αριθμοί αυτοί συνήθως εκφράζουν τα άτομα φθορίου (F), υδρογόνου (H) και άνθρακα (C) στη χημική τους ένωση. Συνηθισμένα ψυκτικά μέσα είναι τα R22, R134a, R407C κ.λπ. Ενδεικτικά στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η εξελικτική πορεία των ψυκτικών με το πέρασμα των χρόνων σύμφωνα με τους Mc Mullan & Morgan (1981).

**Πίνακας 3.1** Εξελικτική πορεία των ψυκτικών με το πέρασμα των χρόνων

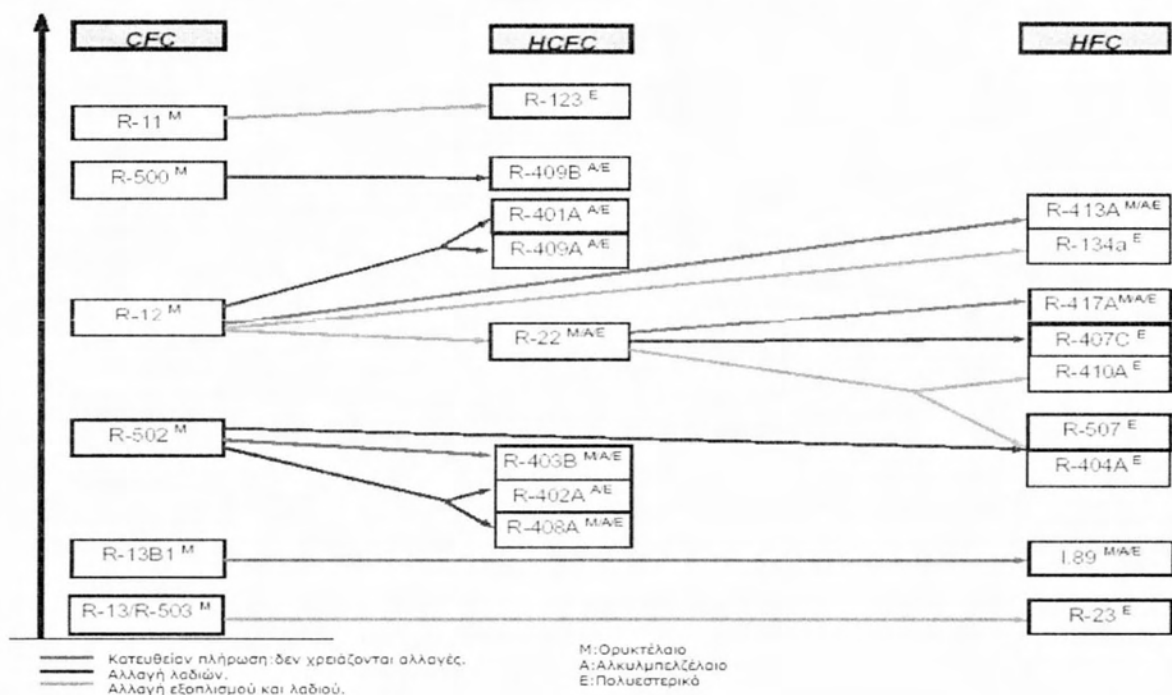


Όλα τα ψυκτικά ρευστά που χρησιμοποιούνται στις ψυκτικές και κλιματιστικές συσκευές καθώς και στις αντλίες θερμότητας προέρχονται από υδρογονάνθρακες, στους οποίους κάποια άτομα υδρογόνου (H) έχουν αντικατασταθεί από άτομα χλωρίου (Cl) ή φθορίου (F). Οι ενώσεις αυτές ονομάζονται αλογονομένοι υδρογονάνθρακες και διακρίνονται ανάλογα με τη χημική τους σύσταση σε:

- χλωροφθοράνθρακες (CFC)
- υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFC)
- υδροφθοράνθρακες (HFC)

Στον παρακάτω Πίνακα παρατηρούμε και την ταξινόμηση των περισσότερων ψυκτικών στις 3 κατηγορίες σύμφωνα με τους McMullan & Morgan (1981). Ακολουθεί ανάλυση των 3 κατηγοριών.

**Πίνακας 3.2** Ψυκτικά χλωροφθορανθράκων, υδροχλωροφθορανθράκων και υδροφθορανθράκων



Οι χλωροφθοράνθρακες (CFC) π.χ. R-12 ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ), R-115 ( $\text{CClF}_2\text{CF}_3$ ) φτιάχτηκαν για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1930. Επειδή υγροποιούνται εύκολα, είναι αδρανείς, μη τοξικοί, μη εύφλεκτοι, είναι φθηνοί, χρησιμοποιήθηκαν σαν ψυκτικά σε ψυγεία και κλιματιστικά και αντικατέστησαν τις πολύ τοξικές ουσίες διοξείδιο του θείου και αμμωνία. Επειδή οι ουσίες αυτές όταν βρεθούν στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας διασπώνται και απελευθερώνουν χλώριο, το οποίο αντιδρά με το όζον ( $\text{O}_3$ ) και το καταστρέφει έχει απαγορευθεί η τοποθέτησή τους στις νέες ψυκτικές/κλιματιστικές συσκευές.

Οι υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFC) π.χ. R-123( $\text{CHCl}_2\text{CF}_3$ ), R-22( $\text{CHClF}_2$ ) αναπτύχθηκαν ως υποκατάστατα των CFCs. Έπειτα από μελέτες διαπιστώθηκε ότι επίσης καταστρέφουν το στρώμα του όζοντος, αλλά σε λιγότερο βαθμό από τους χλωροφθοράνθρακες. Αυτός είναι και ο λόγος που τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει η διαδικασία της σταδιακής αντικατάστασής τους, παρόλα αυτά δεν έχει ακόμη διακοπεί η παραγωγή τους.

Οι υδροφθοράνθρακες (HFC) π.χ. R-32 ( $\text{CH}_2\text{F}_2$ ), R-125 ( $\text{CHF}_2\text{CF}_3$ ), R-134a ( $\text{CH}_2\text{FCF}_3$ ) δεν καταστρέφουν το στρώμα του όζοντος και έχουν πολλές από τις επιθυμητές ιδιότητες των CFC και HCFC. Χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως ως υποκατάστατα των κλασικών ψυκτικών ρευστών. Έχουν όμως και αυτοί ένα μειονέκτημα. Εάν διαρρεύσουν στη ατμόσφαιρα, παραμένουν στα ανώτερα στρώματά της και παγιδεύουν την εκπεμπόμενη ακτινοβολία από τη γη (φαινόμενο του θερμοκηπίου). Για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ψυκτικών ρευστών, έχουν θεσπισθεί νόμοι καθώς και διαδικασίες για τη συλλογή, ανακύκλωση και αναγέννησή τους.

Όσον αφορά τα σημερινά δεδομένα τα ψυκτικά που χρησιμοποιούνται στις νέες εφαρμογές φαίνονται στον Πίνακα 3.3:

**Πίνακας 3.3** Τα ψυκτικά που χρησιμοποιούνται σήμερα και οι εφαρμογές τους

Οικιακή Ψύξη	<ul style="list-style-type: none"><li>• R600a</li><li>• R134a</li></ul>
Εμπορική & Βιομηχανική Ψύξη	<ul style="list-style-type: none"><li>• R134a</li><li>• R404A, R507A , R22L,R22L, R422, CO2</li><li>• NH3</li></ul>
Κλιματισμός	<ul style="list-style-type: none"><li>• R407C, R410A</li><li>• R22M</li><li>• R417A, R422D</li></ul>
Μεταφορές	<ul style="list-style-type: none"><li>• R134a</li><li>• HFO-1234yf</li></ul>

### 3.7 Οι πηγές και οι αποδέκτες θερμότητας

Η ιδιαιτερότητα των αντλιών θερμότητας είναι ότι μπορούν να εκμεταλλευτούν όλες τις διαθέσιμες πηγές θερμικής ενέργειας του περιβάλλοντος. Οι πηγές θερμότητας είναι το νερό, το έδαφος, ο αέρας και ο ήλιος. Ως αποδέκτες της θερμικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ο αέρας, το νερό και το έδαφος. Η κατάλληλη επιλογή της πηγής και του αποδέκτη θερμότητας εξαρτάται από το κλίμα, τη γεωγραφική θέση, τη διαθεσιμότητα καθώς και το κόστος κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας.

Οι αντλίες θερμότητας ανάλογα με την πηγή και τον αποδέκτη θερμότητας διακρίνονται σε αέρα-αέρα, αέρα-νερού, νερού-αέρα, νερού-νερού, εδάφους-νερού και εδάφους-αέρα.

Όσον αφορά τις γεωθερμικές εφαρμογές θέρμανσης στα θερμοκήπια, συνήθως χρησιμοποιούνται αντλίες θερμότητας νερού-νερού, οι οποίες παράγουν θερμό ή ψυχρό νερό και συνδυάζονται είτε με τερματικές μονάδες ανεμιστήρα/στοιχείου είτε με κεντρικές κλιματιστικές μονάδες. Ακόμα μπορούν χρησιμοποιηθούν αντλίες θερμότητας νερού-αέρα, που παράγουν θερμό ή ψυχρό αέρα και συνδέονται απευθείας με δίκτυο αεραγωγών



Στη συνέχεια ακολουθεί αναφορά των τύπων αντλιών θερμότητας ανάλογα με την πηγή και τον αποδέκτη θερμότητας και τα χαρακτηριστικά τους σύμφωνα με τους Aye et al (2006).

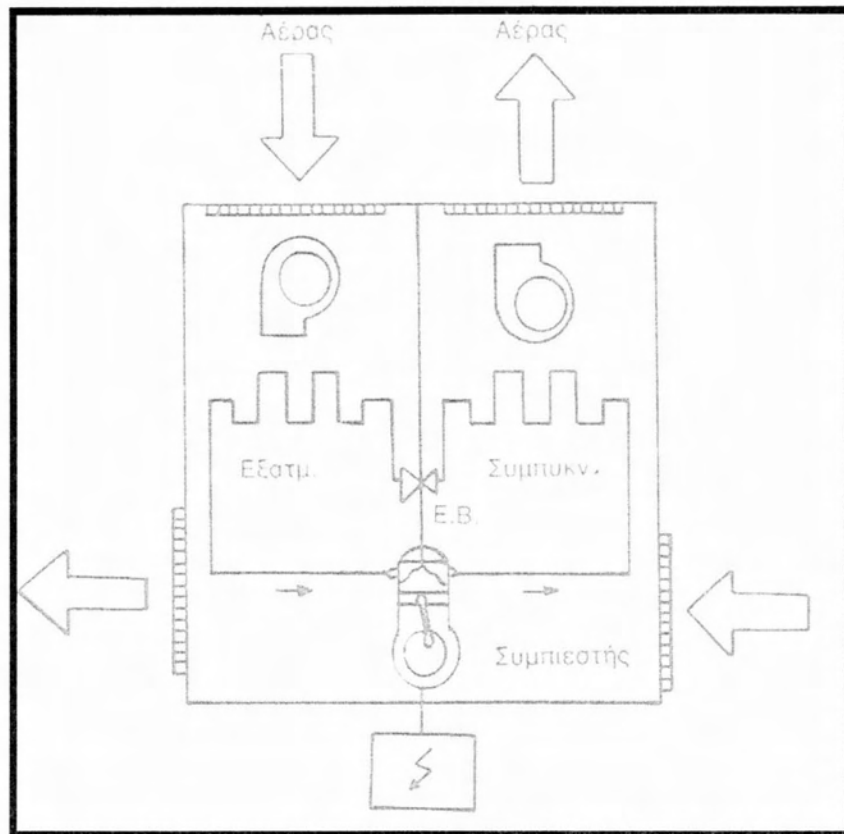
### **3.7.1 Αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα**

Η αντλία θερμότητας αέρα – αέρα είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος αντλίας θερμότητας. Όταν βρίσκεται σε λειτουργία θέρμανσης, ο εξατμιστής απορροφά θερμότητα από τον αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος και την απορρίπτει μέσω του συμπυκνωτή στον εσωτερικό αέρα του χώρου που πρόκειται να θερμανθεί. Αντιστρέφοντας τη λειτουργία του κύκλου ο συμπυκνωτής γίνεται εξατμιστής, απορροφά θερμότητα από τον εσωτερικό αέρα και την απορρίπτει με την βοήθεια του εξατμιστή, που γίνεται συμπυκνωτής, στο εξωτερικό περιβάλλον. Με αυτή τη διαδικασία επιτυγχάνεται η ψύξη του χώρου.

Η πιο χαρακτηριστική εφαρμογή των αντλιών θερμότητας αέρα - αέρα είναι οι κλιματιστικές συσκευές για την ψύξη των χώρων κατά τους θερινούς μήνες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για θέρμανση.

Τα συστήματα αυτά λειτουργούν με μεγάλους συντελεστές απόδοσης κατά τους θερινούς μήνες όπου η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα είναι υψηλή. Όμως κατά τη διάρκεια του χειμώνα όπου η θερμοκρασίες κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα η απόδοσή τους μειώνεται δραματικά και αδυνατούν να ανταποκριθούν στις ανάγκες θέρμανσης. Για το λόγο αυτό τοποθετούνται ηλεκτρικές αντιστάσεις, που χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματική πηγή θερμικής ενέργειας.





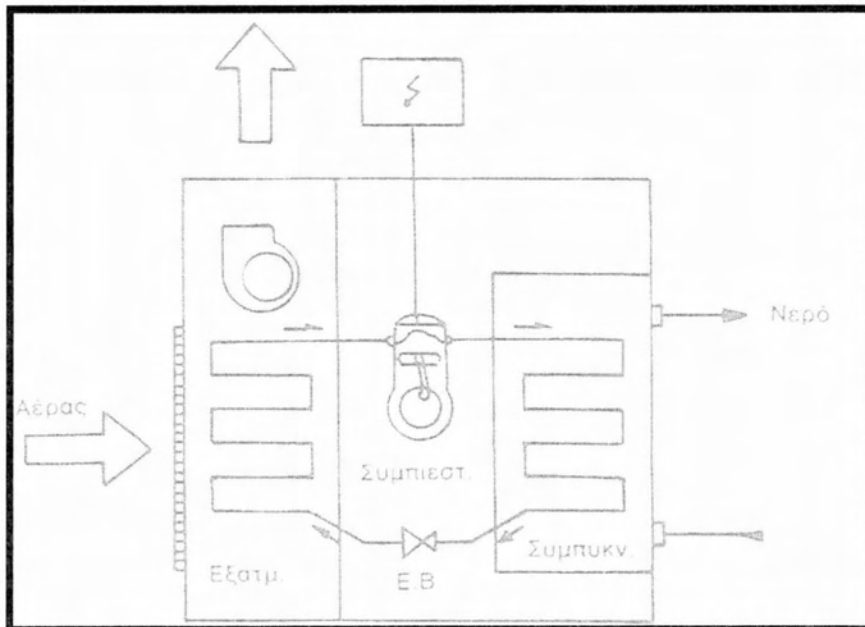
Σχήμα 3.5 Αντλία θερμότητας αέρα-αέρα (Παπάζογλου, 1987)

### 3.7.2 Αντλίες θερμότητας αέρα-νερού

Οι αντλίες θερμότητας αέρα – νερού ή άντληση και η απόρριψη θερμότητας από τον εξωτερικό αέρα, γίνεται όμοια με την αντλία θερμότητας αέρα/αέρα, με αερόψυκτο συμπυκνωτή/εξατμιστή. Στο κύκλωμα νερού, λειτουργεί υδρόψυκτος εναλλάκτης που τροφοδοτεί το δίκτυο σωληνώσεων με θερμό/ψυχρό νερό.

Σε λειτουργία θέρμανσης οι αντλίες θερμότητας αέρα-νερού απορροφούν θερμική ενέργεια από τον αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος και θερμαίνουν το νερό που βρίσκεται σε μια κλιματιστική μονάδα. Ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και τη μείωση της θερμοκρασίας του νερού.

Η αντλία θερμότητας ψύχει το νερό της εγκατάστασης και απορρίπτει στον εξωτερικό αέρα τη θερμότητα, με αντιστροφή του κύκλου λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του ψυχρού νερού και τη μείωση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.



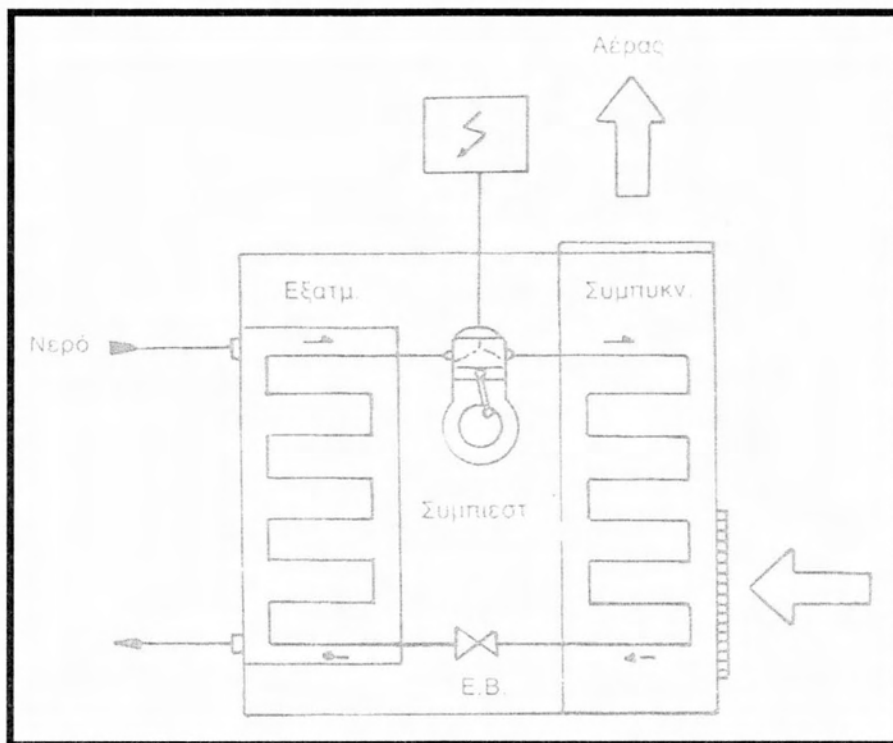
Σχήμα 3.6 Αντλία θερμότητας αέρα-νερού (Παπάζογλου, 1987)

### 3.7.3 Αντλίες θερμότητας νερού-αέρα

Οι αντλίες θερμότητας νερού – αέρα χρησιμοποιούν ως πηγή και αποδέκτη θερμότητας το νερό. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπεδαφικό και επιφανειακό νερό, ακόμα και απόνερα με την κατάλληλη επεξεργασία του νερού για την αποφυγή διαβρώσεων ή οξειδώσεων στα μηχανικά μέρη της αντλίας θερμότητας. Οι εγκαταστάσεις αυτών των συστημάτων χρησιμοποιούν συνήθως νερό πηγής, ποταμού, λίμνης και σπανιότερα θάλασσας για την προσαγωγή/απαγωγή θερμότητας.

Ο αέρας σε αυτού του τύπου τις αντλίες χρησιμοποιείται προκειμένου να μεταφέρουν ή να απάγουν θερμότητα από τον κλιματιζόμενο χώρο. Όσον αφορά τη λειτουργία τους οι συσκευές

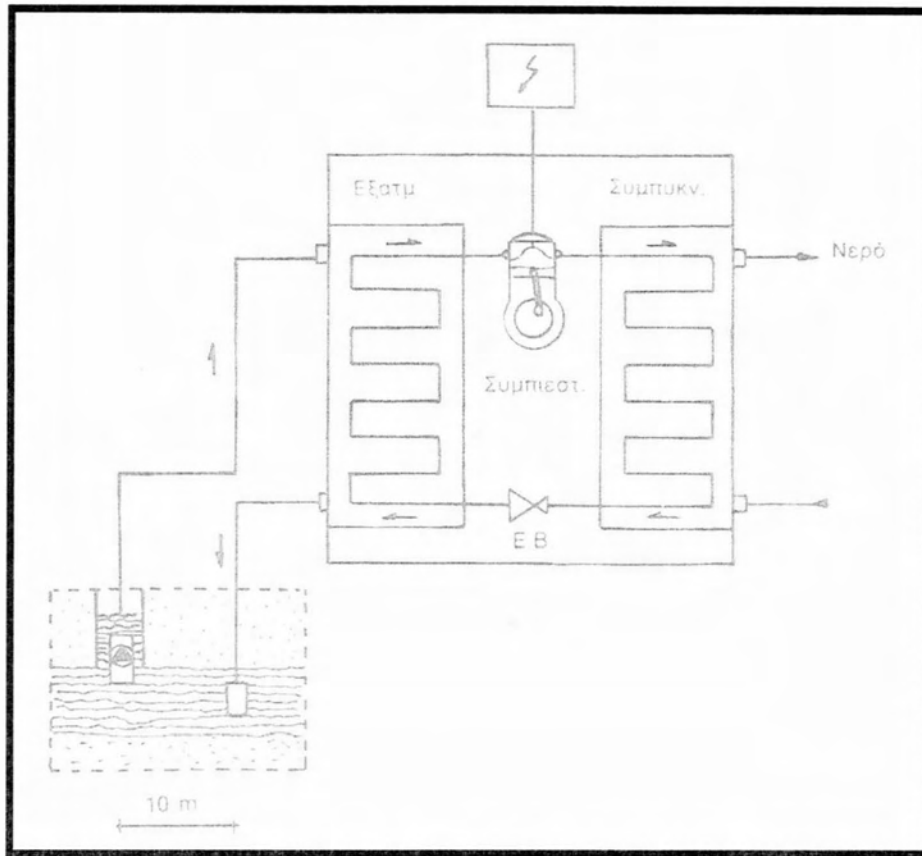
αυτού του τύπου τροφοδοτούνται με νερό μέσω κατάλληλου δικτύου και συνδέονται με δίκτυο αεραγωγών, για την προσαγωγή/απαγωγή του αέρα στους κλιματιζόμενους χώρους. Τέλος η εναλλαγή του κύκλου λειτουργίας της αντλίας από ψύξη σε θέρμανση, γίνεται μέσω τετράοδης βαλβίδας με αντιστροφή του ψυκτικού κύκλου.



Σχήμα 3.7 Αντλία θερμότητας νερού-αέρα (Παπάζογλου, 1987)

#### 3.7.4 Αντλίες θερμότητας νερού-νερού

Οι αντλίες θερμότητας νερού – νερού χρησιμοποιούν ως πηγή και αποδέκτη της θερμικής ενέργειας το νερό. Το σύστημα αποτελείται από δύο κυκλώματα. Το πρωτεύον κύκλωμα τροφοδοτείται από το περιβάλλον με νερό. Το δευτερεύον κύκλωμα συνδέεται με τοπικές μονάδες ανεμιστήρα/στοιχείου (Fan-coils) ή με κεντρικές κλιματιστικές μονάδες.



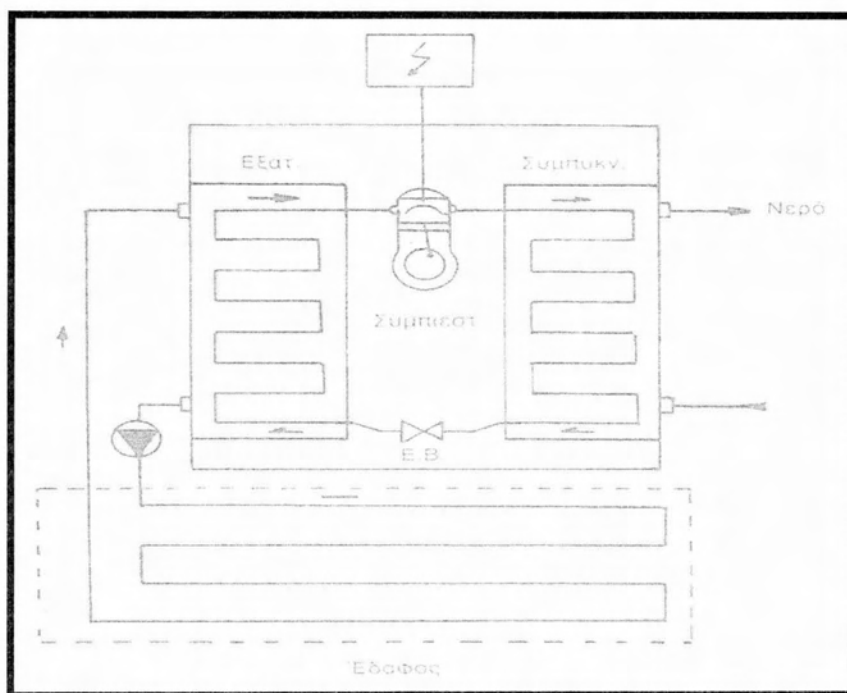
Σχήμα 3.8 Αντλία θερμότητας νερού-νερού (Παπάζογλου, 1987)

### 3.7.5 Αντλίες θερμότητας εδάφους-νερού

Οι αντλίες θερμότητας εδάφους – νερού προκειμένου να κλιματίσουν ένα χώρο χρησιμοποιούν την θερμική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο έδαφος εκμεταλλευόμενες τη θερμοχωρητικότητα του. Για την επίτευξη της παραπάνω διαδικασίας τοποθετείται στο έδαφος δίκτυο σωληνώσεων (γεωεναλλάκτης) μέσα στο οποίο κυκλοφορεί νερό ή διάλυμα αντιψυκτικού, συνήθως προπυλενο-γλυκόλης. Ο εξατμιστής/συμπυκνωτής του πρωτεύοντος κυκλώματος της αντλίας θερμότητας με την βοήθεια του γεωεναλλάκτη απορροφά ή απορρίπτει θερμότητα στο έδαφος, ανάλογα με την επιλογή λειτουργίας για ψύξη ή θέρμανση.

Οι αντλίες θερμότητας εδάφους - νερού παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά εγκατάστασης στις μέρες μας σε προηγμένες χώρες της Ευρώπης. Αυτό οφείλεται στους υψηλότερους βαθμούς επίδοσης

που παρουσιάζουν τα συστήματα αυτά σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους αντλιών θερμότητας, καθώς και στην φιλικότερη προς το περιβάλλον συμπεριφορά λόγω της μειωμένης κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας.



Σχήμα 3.9 Αντλία θερμότητας εδάφους-νερού (Παπάζογλου, 1987)

### 3.7.6 Αντλίες θερμότητας εδάφους-αέρα

Οι αντλίες θερμότητας εδάφους – αέρα παρουσιάζουν λειτουργικά και κατασκευαστικά όμοιο πρωτεύον κύκλωμα με τις αντλίες θερμότητας εδάφους/νερού. όμως αντί του υδρόψυκτου εναλλάκτη (συμπυκνωτή/εξατμιστή) στο δευτερεύον κύκλωμά τους, υπάρχει ανεμιστήρας και αερόψυκτος συμπυκνωτής/εξατμιστής, που τροφοδοτούν με θερμό ή ψυχρό αέρα το δίκτυο αεραγωγών κλιματισμού του χώρου εφαρμογής.

### 3.8 Γιατί γεωθερμική αντλία θερμότητας

Η Γεωθερμική Αντλία Θερμότητας αντί να χρησιμοποιεί τον αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος για να αποβάλλει θερμική ενέργεια τους καλοκαιρινούς μήνες ή να αντλήσει θερμική ενέργεια τους χειμερινούς μήνες, χρησιμοποιεί τη θερμότητα που υπάρχει αποθηκευμένη στα υπόγεια ύδατα, τα νερά των λιμνών και της θάλασσας, ή ακόμα και τη θερμότητα που περικλείει το χώμα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας έναντι των περισσότερο διαδεδομένων, συμβατικών, αντλιών θερμότητας με πηγή τον αέρα (Ochsner, 2007).

- Ο βαθμός απόδοσης (COP) μιας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, αγγίζει τιμές στην πράξη 4,0 έως 5,5. Αρκεί να αναφερθεί ότι π.χ. σε συνθήκες λειτουργίας (είσοδος κυκλώματος γης 18°C έξοδος 10°C/ είσοδος κυκλώματος σπιτιού 35°C έξοδος 40°C) λειτουργούν με συντελεστή βαθμού απόδοσης στη θέρμανση μεγαλύτερο του 500%. Από την άλλη μεριά στις συμβατικές αντλίες θερμότητας με πηγή τον αέρα η τιμή του συντελεστή απόδοσης είναι κατώτερη από 2,8, και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

- Η ΓΑΘ λειτουργεί χωρίς πρόβλημα σε οποιεσδήποτε καιρικές και θερμοκρασιακές συνθήκες περιβάλλοντος, υπό το μηδέν το χειμώνα και πάνω από 40°C το καλοκαίρι, διότι η Αντλία Θερμότητας με πηγή νερό τροφοδοτείται από το Γεωθερμικό Εναλλάκτη με νερό αμετάβλητης θερμοκρασίας, ίσης περίπου με αυτή που επικρατεί στο υπέδαφος κάτω από το κτίριο.

- Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος Γεωθερμικού Κλιματισμού είναι πολύ χαμηλότερο, απ' ό,τι στο σύστημα με Αντλία Θερμότητας με πηγή αέρα και συμβάλλει θετικά σε δύο υψηλούς αναπτυξιακούς – κοινωνικούς στόχους :

α) Στην εξοικονόμηση ενέργειας με την πολύ χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος και την παραγωγή πολλαπλάσιας θερμικής και ψυκτικής ενέργειας από την επιτόπια γεωθερμική

β) Στην προστασία του περιβάλλοντος, διότι, χρησιμοποιώντας την καθαρή γεωθερμική ενέργεια, εκτοπίζει το ρυπογόνο πετρέλαιο και μειώνει την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος, που, όπως είναι γνωστό, παράγεται στη χώρα μας κυρίως στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς από ρυπογόνα καύσιμα

## 4. ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

### 4.1 Εισαγωγή

Στα δύο προηγούμενα κεφάλαια αυτής της εργασίας, έγινε αναφορά στις ανάγκες θέρμανσης του θερμοκηπίου και έγινε μια σύντομη αναφορά στις αντλίες θερμότητας.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η οικονομοτεχνική μελέτη του συστήματος θέρμανσης με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας και πραγματοποιείται η σύγκριση με ένα συμβατικό σύστημα θέρμανσης (φυσικού αερίου) προκειμένου να διαπιστωθεί ποιο από τα δύο συμφέρει οικονομικά. Η εγκατάσταση θα γίνει σε θερμοκήπιο που πρόκειται να κατασκευαστεί στην Αλεξάνδρεια του Ν. Ημαθίας.

### 4.2 Περιγραφή του θερμοκηπίου

Το θερμοκήπιο πρόκειται να εγκατασταθεί στην Αλεξάνδρεια του Ν. Ημαθίας. Η μονάδα θα καταλαμβάνει χώρο 2 στρεμμάτων. Θα έχει προσανατολισμό Βαρά – Νότου για καλύτερη ομοιογένεια των μικροκλιματικών συνθηκών στο εσωτερικό του και αυξημένη αντοχή στους νότιους και βόρειους ανέμους.

Το θερμοκήπιο αποτελείται από 4 αμφίρρικτες μονάδες όπως αυτές του σκαριφήματος που ακολουθεί στην Εικόνα 4.1. Η κάθε μονάδα έχει μήκος  $X = 5$  m, πλάτος  $Y = 100$  m, ύψος ορθογωνίου  $Z_1 = 4$  m και μέγιστο ύψος (στην κορυφή της πυραμίδας)  $Z = 5$  m. Το συνολικό μήκος του θερμοκηπίου ανέρχεται στα 20 m και το συνολικό πλάτος στα 100 m.

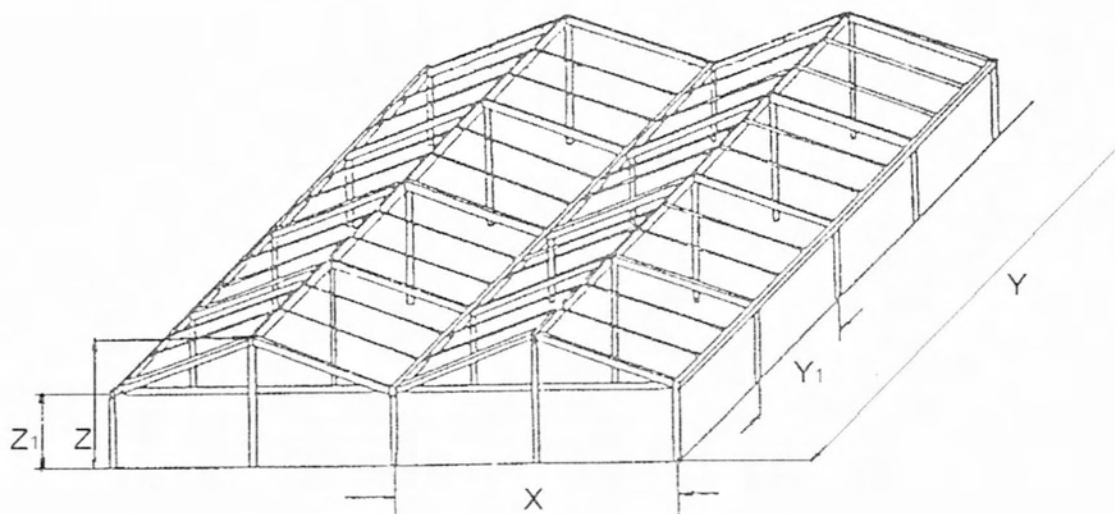
Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτουν οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

Ολικό εμβαδόν υλικού επικάλυψης θερμοκηπίου:  $S_{\text{επικάλυψης ολικό}} = [2 \times 4 \times 20] + [2 \times 100 \times 4] + [8 \times 2,6925 \times 100] + [8 \times (5 \times 1) / 2] = 160 + 800 + 2154 + 20 = 3134 \text{ m}^2$

Ολικό εμβαδόν καλυμμένης επιφάνειας εδάφους:  $S_{\text{επικάλυψης εδάφους}} = 2000 \text{ m}^2$  (2 στρέμματα)



Ολικός όγκος του θερμοκηπίου:  $V_{\text{θερμ.}} = 4 \times [100 \times (5 \times 1 \times 0,5) + 100 \times (5 \times 4)] = 9000 \text{ m}^3$



**Εικόνα 4.1** Σκαρίφημα για 2 από τις 4 αμφίρρικτες μονάδες του θερμοκηπίου:  $X = 5 \text{ m}$ ,  $Y_1 = 2,5 \text{ m}$ ,  $Y = 100 \text{ m}$ ,  $Z_1 = 4 \text{ m}$  και  $Z = 5 \text{ m}$

Το υλικό κατασκευής του δικτυώματος είναι γαλβανισμένος χάλυβας Fe360 και το υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου είναι πολυαιθυλένιο νέας γενιάς και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $5,9 \text{ W/m}^2\text{K}$  με περατότητα στην ακτινοβολία 89%.

## 4.3 Ενεργειακά ισοζύγια

### 4.3.1 Ενεργειακά κέρδη θερμοκηπίου

Όταν ο εξωτερικός αέρας έχει υψηλότερη θερμοκρασία από τον αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου τότε προκαλείται προσαγωγή θερμότητας. Στην παράγραφο 2.2.1 έγινε λόγος για την προσαγωγή ενέργειας στο θερμοκήπιο. Η εισροή θερμικής ενέργειας στο θερμοκήπιο οφείλεται σε πολλούς παράγοντες. Όμως οι παράγοντες προσαγωγής θερμότητας με αγωγή και

συναγωγή στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου που αναφέρονται στην παράγραφο 2.2.1 είναι ασήμαντοι συγκρινόμενοι με την ηλιακή ακτινοβολία.

Η θερμότητα αυτή δίνεται από την εξίσωση (2.1). Με  $I$  την μέση τιμή της έντασης της ακτινοβολίας σε  $W/m^2$  για την περιοχή της Αλεξάνδρειας Ημαθίας για τους χειμερινούς μήνες από την ΕΜΥ για τα τελευταία 10 χρόνια. Επίσης το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά τη διαφανή κάλυψη του θερμοκηπίου  $p$  εξαρτάται από την κλίση πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια και εδώ λαμβάνεται ίσο με 90%.

Οπότε τελικά η εξίσωση (2.1) γίνεται:  $Q_{\text{Κερδών}} = q_1 = 3134 \cdot 0,89 \cdot 80 \cdot 0,9 = 201 \text{ kW}$ .

#### 4.3.2 Ενεργειακές απώλειες θερμοκηπίου

Όταν ο εξωτερικός αέρας έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από τον αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου τότε υπάρχει μεταφορά θερμικής ενέργειας από τον εσωτερικό χώρο του θερμοκηπίου στο εξωτερικό περιβάλλον. Ανάλυση των παραγόντων που προκαλούν θερμικές απώλειες στο θερμοκήπιο γίνεται στην παράγραφο 2.2.2. Σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στην παράγραφο 2.2.2 τέσσερεις είναι οι βασικές παράμετροι που προκαλούν απώλειες θερμότητας στο θερμοκήπιο.

α) Μετακίνηση αέριων μαζών μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου.

Η εξίσωση (2.5) γίνεται:  $Q_A = 0,31 \cdot r \cdot V_{\text{θερμ.}} \cdot \Delta t = 0,31 \cdot 1 \cdot 9000 \cdot \Delta t = 2.790 \cdot \Delta t$

β) Απώλειες θερμότητας από τις διαφανείς επιφάνειες του θερμοκηπίου λόγω αγωγιμότητας.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού κάλυψης (πολυαιθυλένιο νέας γενιάς) είναι  $5,9 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Η εξίσωση (2.6) γίνεται:  $Q_B = U_{ολικό} \cdot S_{επικάλυψης\ ολικό} \cdot \Delta t = 5,9 \cdot 3134 \cdot \Delta t = 18.490,6 \cdot \Delta t$

γ) Απώλειες θερμότητας με αγωγιμότητα από το έδαφος

Η (2.8) γίνεται:  $Q_C = U_{εδάφους} \cdot S_{επικάλυψης\ εδάφους} \cdot \Delta t = 1,88 \cdot 2000 \cdot \Delta t = 3.760 \cdot \Delta t$

δ) Απώλειες θερμότητας από ακτινοβολία φυτών και εδάφους

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.2 αποτελεί το 25% των υπόλοιπων απωλειών:

$$Q_D = (Q_A + Q_B + Q_C) \cdot 0,25 = \Delta t \cdot (2.790 + 18.490,6 + 3.760) \cdot 0,25 = 6.260 \cdot \Delta t$$

Αυτές είναι οι βασικές θερμικές απώλειες σε ένα θερμοκήπιο και το άθροισμά τους μας δίνει τις συνολικές θερμικές απώλειες που προβλέπεται να έχει το προς μελέτη θερμοκήπιο.

$$Q_{Απωλειών} = Q_A + Q_B + Q_C + Q_D = (2.790 + 18.490 + 3.760 + 6.260) \cdot \Delta t = 31300 \cdot \Delta t$$

#### 4.3.3 Υπολογισμός συνολικού θερμικού φορτίου

Οι συνολικές θερμικές ανάγκες του θερμοκηπίου θα υπολογιστούν αφαιρώντας τα συνολικά θερμικά κέρδη από τις συνολικές θερμικές ανάγκες. Οπότε:

$$Q_{Συνολικών\ αναγκών} = Q_{Απωλειών} - Q_{Κερδών} = [(31.300 \Delta t) - 200.826] \quad (4.1)$$

Όπως αναφέρθηκε στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο το Q ανάλογα με το αν το Δt δηλώνει διαφορά θερμοκρασίας (εσωτερικής – εξωτερικής) ή βαθμοώρες παίρνει μονάδες W ή Wh αντίστοιχα (βλ. επόμενες παραγράφους).

#### 4.4 Υπολογισμός μέγιστου θερμικού φορτίου

Θεωρείται ότι η ελάχιστη επιθυμητή εσωτερική νυχτερινή θερμοκρασία είναι 15 °C. Από το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 15927.2:2005 (χειμερινή περίοδος) καθορίζεται η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος (συνθήκες σχεδιασμού). Συνθήκες σχεδιασμού θεωρούνται αυτές που η υπέρβασή τους (εμφάνιση υψηλότερων ή χαμηλότερων τιμών αντίστοιχα για θέρος / χειμώνα) δεν ξεπερνά σε ποσοστό το 1% του συνόλου των μετρήσεων. Σύμφωνα με το πρότυπο και τα στατιστικά κλιματικά δεδομένα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας για την περιοχή της Αλεξάνδρειας, η ελάχιστη θερμοκρασία τους χειμερινούς μήνες για συνθήκη σχεδιασμού 1% είναι -2° C. Οπότε η θερμοκρασιακή μεταβολή μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος για συνθήκη σχεδιασμού 1% σύμφωνα με το παραπάνω πρότυπο είναι 17° C. Επομένως για  $\Delta t_{\max} = 17$  (°C) το μέγιστο θερμικό φορτίου που θα πρέπει να είναι σε θέση να καλύψει το σύστημα θέρμανσης προκύπτει από το  $Q$  Συνολικών αναγκών που υπολογίστηκε από την εξίσωση (4.1) για  $\Delta t = 17$  (°C). Οπότε είναι:  $Q_{\max} = 331.286$  W

#### 4.5 Υπολογισμός συνολικού θερμικού φορτίου σε ετήσια βάση

Σύμφωνα με το T.E.E. και το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 15927.2:2005 η πιο απλή και σύντομη μέθοδος υπολογισμού των απαιτούμενων φορτίων θέρμανσης ενός κτιρίου, είναι οι βαθμοημέρες θέρμανσης. Η παράμετρος αυτή προκύπτει από την μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα εικοσιτετράωρου για τους χειμερινούς μήνες σε μια περιοχή και μια θερμοκρασία αναφοράς η οποία εδώ λαμβάνεται ίση με 15 °C. Η εξίσωση υπολογισμού των βαθμοημερών θέρμανσης DD είναι η (4.2):

$$DD = \sum [N_{mo} \cdot (T_{av} - T_{\alpha})^+ ] \quad (4.2)$$

Όπου:

$N_{mo}$  : ο αριθμός ημερών για το κάθε μήνα

$T_{av}$  : η θερμοκρασία αναφοράς (15°C),

$T_{\alpha}$  : η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος (°C)

(+): το σύμβολο αυτό δηλώνει ότι στους υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη μόνο οι περιπτώσεις κατά τις οποίες η θερμοκρασία  $T_a$  δεν υπερβαίνει τη θερμοκρασία αναφοράς  $T_{av}$ , δηλαδή έχουμε θετική τιμή στην παρένθεση.

Οπότε από το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 15927.2:2005, τα στοιχεία της ΕΜΥ για τα έτη 2003-2013 και τον παραπάνω τύπο προκύπτει για τις βαθμομέρες της Αλεξάνδρειας Ημαθίας  $DD = 1236 \text{ BH/έτος}$

Πολλαπλασιάζοντας επί 24 ώρες οι βαθμομέρες μετατρέπονται σε βαθμοώρες.

Οπότε είναι  $29.683 \text{ B}\Omega/\text{έτος}$

Για τον υπολογισμό των συνολικών θερμικών απωλειών που πρέπει να καλυφθούν ανά έτος για τα 2 στρέμματα του θερμοκηπίου και για  $29.683 \text{ B}\Omega/\text{έτος}$  από την εξίσωση (4.1) έχουμε:

$$Q_{\text{έτους}} = 31.300 \cdot 29.683 - 200.826 = 928.905 \text{ kWh (ανά έτος)}$$

#### **4.6 Παραδοχές μελέτης θέρμανσης**

Η μελέτη κάλυψης του μέγιστου θερμικού φορτίου από το κεντρικό σύστημα θέρμανσης θα γίνει για το 95% του μέγιστου θερμικού φορτίου του θερμοκηπίου που υπολογίστηκε προηγουμένως, διότι σε σημεία αιχμής (πλήρους φορτίου) το επιπρόσθετο φορτίο θα καλύπτεται με βοηθητικά συστήματα θέρμανσης (π.χ. αερόθερμα κ.λπ.). Το 95% του μέγιστου θερμικού φορτίου αντιστοιχεί σε  $314.722 \text{ W}$  και είναι και το μέγιστο φορτίο που θα πρέπει να μπορεί να καλύψει το σύστημα θέρμανσης.

Η οικονομοτεχνική μελέτη κάλυψης των θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου θα γίνει για τις βαθμοώρες με τον τρόπο που υπολογίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο και θα είναι για έξι χρόνια.

#### 4.7 Κάλυψη των θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου με ΓΑΘ

Το γεωθερμικό σύστημα θέρμανσης που προτείνεται αποτελείται από τρία βασικά τμήματα:

- Τον γεωεναλλάκτη
- Την γεωθερμική αντλία θερμότητας (νερού – νερού)

Ο συντελεστής απόδοσης του γεωθερμικού συστήματος θέρμανσης είναι 5 . Ο μεγάλος βαθμός απόδοσης οφείλεται κυρίως στη χρήση της ΓΑΘ. Από τον βαθμό απόδοσης θα βρεθεί η μέγιστη και η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση του γεωθερμικού συστήματος θέρμανσης με χρήση της εξίσωσης (3.1).

Για τη μέγιστη ενεργειακή κατανάλωση το μέγιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο είναι 314.722 W. Οπότε για βαθμό απόδοσης συστήματος 5 η μέγιστη ενεργειακή κατανάλωση είναι:  $314.722 / 5 = 62.944 \text{ W}$ .

Για την ετήσια ενεργειακή κατανάλωση το ετήσιο απαιτούμενο θερμικό φορτίο είναι: 928.905 kWh. Οπότε για βαθμό απόδοσης συστήματος 5 η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση είναι:  $928.905 / 5 = 185.780 \text{ kWh}$

##### Αντλίες Θερμότητας

Οι αντλίες θερμότητας που θα θερμαίνουν το θερμοκήπιο θα είναι νερού – νερού της εταιρείας Carrier. Θα είναι 4 στον αριθμό μέγιστης ισχύος 80 kW και η κάθε μία και συνολικής μέγιστης ισχύος 320 kW.

##### Γεωεναλλάκτης

Ο γεωεναλλάκτης θα είναι της εταιρείας REHAU και θα αποτελείται από επιμέρους εναλλάκτες κατακόρυφης διάταξης. Ο υπολογισμός των συνολικών απαιτούμενων μέτρων γεώτρησης υπολογίζονται από την εξίσωση (4.3).

$$\text{Μήκος γεωεναλλάκτη} = \frac{\text{Ονομαστική ισχύς αντλίας [W]} \times (1 - 1/\text{COP})}{\text{Αποδιδόμενη ενέργεια από γεωεναλλάκτη} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]} \quad (4.3)$$

$$\text{Οπότε: Μήκος γεωεναλλάκτη} = \frac{320.000 \text{ W} \times \left(1 - \frac{1}{5}\right)}{65 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = 3.938 \text{ m} \sim 4 \text{ km}$$

Θα γίνουν συνολικά 40 γεωτρήσεις των 100 μέτρων, σύνολο 4 km.

Σε κάθε μία από τις γεωτρήσεις τοποθετούνται 2 ζεύγη σωληνώσεων. Οι σωλήνες που θα αποτελούν τον εναλλάκτη θα είναι πολυαιθυλενίου PE 100 με διατομή Φ32x3.0 με ακροσωλήνια, και εξαρτήματα (PE 100), που συνδέονται με αυτογενή συγκόλληση. Ανά 10 m τοποθετείται αποστάτης, ο οποίος διασφαλίζει την παραλληλότητα των σωλήνων και την ασφαλέστερη τοποθέτησή τους. Θα χρησιμοποιηθούν βαρίδια που προσαρμόζονται στα ακροσωλήνια. Ταυτόχρονα με τη διάταξη των σωληνώσεων, θα κατασκευαστεί και ο κεντρικός σωλήνας που απαιτείται για το γέμισμα της με θερμοαγώγιμο μίγμα. Τα ζεύγη σωληνώσεων των κατακόρυφων εναλλακτών συνδέονται παράλληλα στο συλλέκτη. Ο οποίος συνδέεται με την γεωθερμική αντλία. Το δίκτυο θα δοκιμαστεί σε πίεση 1,5 φορές της πίεσης λειτουργίας του συστήματος.

#### 4.8 Κάλυψη των θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου με λέβητα φυσικού αερίου

Προκειμένου να γίνει σύγκριση του γεωθερμικού συστήματος θέρμανσης με το πιο διαδεδομένο συμβατικό σύστημα θέρμανσης. Παράλληλα με την μελέτη θέρμανσης με ΓΑΘ γίνεται και μελέτη θέρμανσης του θερμοκηπίου με σύστημα φυσικού αερίου. Η μελέτη της περίπτωσης θέρμανσης με καυστήρες αερίου γίνεται διότι αυτοί χρησιμοποιούνται στις μέρες μας κατά κόρων για τη θέρμανση επαγγελματικών χώρων και άλλες βιομηχανικές θερμικές εφαρμογές.



Αλλά και επειδή θεωρούνται από πολλούς επενδυτές ως τα πιο οικονομικά ανάμεσα στα συμβατικά συστήματα θέρμανσης.

Στην προς μελέτη εγκατάσταση για την κάλυψη συνολικού μέγιστου φορτίου 314.722 W προτείνεται λέβητας υψηλής αντίθλιψης της εταιρείας AIRCOLINE μέγιστης ισχύος 320 kW.

Ο καυστήρας που προτείνεται είναι της εταιρείας BOSCH είναι σχεδιασμένος για λέβητα υψηλής αντίθλιψης. Ο καυστήρας είναι διβάθμιος, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ρύθμιση της ισχύος του σε δύο διαφορετικά επίπεδα φορτίου για λόγους οικονομίας. Έχει επομένως ευρύ φάσμα θερμικού φορτίου. Η ρύθμιση του αέρα εισαγωγής γίνεται με σερβοκινητήρα.

Ο συντελεστής απόδοσης του συστήματος ΦΑ είναι 0,95. Από τον βαθμό απόδοσης και με χρήση της εξίσωσης (3.1) θα βρεθεί η μέγιστη και η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος θέρμανσης με φυσικό αέριο.

Το μέγιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο είναι 314.722 W. Οπότε για βαθμό απόδοσης συστήματος 0,95 η μέγιστη ενεργειακή κατανάλωση είναι:  $314.722 / 0,95 = 331.286$  W.

Για την ετήσια ενεργειακή κατανάλωση το ετήσιο απαιτούμενο θερμικό φορτίο είναι: 928.905,59 kWh. Οπότε για βαθμό απόδοσης συστήματος 0,95 η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση είναι:  $928.905 / 0,95 = 977.795$  kWh

#### **4.9 Σύστημα διανομής θερμότητας**

Για το θερμοκήπιο προτείνεται επιδαπέδιο σύστημα θέρμανσης. Η επιλογή επιδαπέδιου συστήματος θέρμανσης οφείλεται στα παρακάτω πλεονεκτήματα του:

- Συμβατότητα με τα περισσότερα συστήματα παραγωγής θερμότητας. (Συστήματα εσωτερικής καύσης υγρών ή στερεών καυσίμων, αντλίες θερμότητας, ηλιακά συστήματα κ.α.)
- Εξοικονόμηση χώρου στο εσωτερικό του θερμοκηπίου λόγω της απουσίας σωμάτων και άλλων ογκώδων μηχανισμών διανομής της θερμότητας, βελτιώνοντας την αισθητική του χώρου και την κυκλοφορία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

- Τα φυτά θερμαίνονται κυρίως στη ρίζα τους με αποτέλεσμα τη δημιουργία δυνατού ριζικού συστήματος.

- Παρατηρείται αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης των φυτών σε σύγκριση με άλλες κατασκευές διανομής θερμότητας.

- Μείωση του κόστους θέρμανσης, αφού το σύστημα θέρμανσης θερμαίνει κυρίως τα φυτά και όχι το συνολικό όγκο του θερμοκηπίου.

Οι κεντρικοί σωλήνες θέρμανσης που διακινούν το νερό του εσωτερικού κυκλώματος από τις ΓΑΘ και οι σωλήνες επιστροφής θα τοποθετηθούν στην περιφέρεια του θερμοκηπίου. Οι σωλήνες διανομής του νερού θέρμανσης τοποθετούνται παράλληλα στις γραμμές τοποθέτησης των φυτών, προκειμένου να επιτευχθεί ομαλό θερμοκρασιακό πεδίο στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Η θερμοκρασία του νερού που κινείται στο εσωτερικό των σωλήνων θα είναι στους 55° C.

Το σύστημα διανομής της θερμότητας του θερμοκηπίου δεν θα περιληφθεί στη οικονομική σύγκριση του γεωθερμικού και συμβατικού (με φυσικό αέριο) συστήματος θέρμανσης που ακολουθεί, επειδή σε κάθε περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο.

## **4.10 Οικονομική μελέτη**

### **4.10.1 Θέρμανση με ΓΑΘ**

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά το συνολικό κόστος θέρμανσης του θερμοκηπίου με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας.

#### **Κόστος κατασκευής**

##### **I. Κόστος υλικών και εργασίας για τους κατακόρυφους γεωεναλλάκτες**

Κόστος υλικών:

- Σωλήνες PE

- Υλικό πλήρωσης
- Υγρό με αντιψυκτικό
- Συλλέκτες

Κόστος εργασιών:

- Διάνοιξη Γεωτρήσεων και τροφοδότηση υλικού πλήρωσης

Συνολικό κόστος υλικών και εργασίας για τους κατακόρυφους γεωεναλλάκτες:

25 ευρώ / m

Οπότε για σύνολο 3.940 m γεώτρησης το συνολικό κόστος θα είναι:

$$4.000 \cdot 25 = 100.000 \text{ ευρώ}$$

II. Κόστος εργασιών & λοιπά εξαρτήματα μηχανοστασίου:

4.500 ευρώ (εξαιρούνται οι ΓΑΘ)

III. Κόστος ΓΑΘ

Carrier 61WGH08 : 19.500 ευρώ (τιμή μονάδας)

Για τις 4 ΓΑΘ: 78.000 ευρώ

### Κόστος λειτουργίας

Η τιμή της κιλοβατώρας σύμφωνα με το αγροτικό τιμολόγιο της ΔΕΗ είναι 0,06412 € / kWh.

Για ετήσια κατανάλωση 185.780 kWh το κόστος λειτουργίας για ένα έτος είναι:

$$0,06412 \cdot 185.780 = 11.912 \text{ ευρώ / έτος.}$$

### Κόστος συντήρησης

Το κόστος συντήρησης υπολογίζεται ως το 10% του κόστους λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση προκύπτει ότι είναι:  $0,1 * 11.912 = 1.191$  ευρώ / έτος

Στους παρακάτω Πίνακες φαίνονται το κόστος κατασκευής και το ετήσιο κόστος (λειτουργίας και συντήρησης). Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης αναφέρεται στο πρώτο έτος λειτουργίας. Για κάθε επόμενο έτος θεωρείται πως υπάρχει προσαύξηση 5 %.

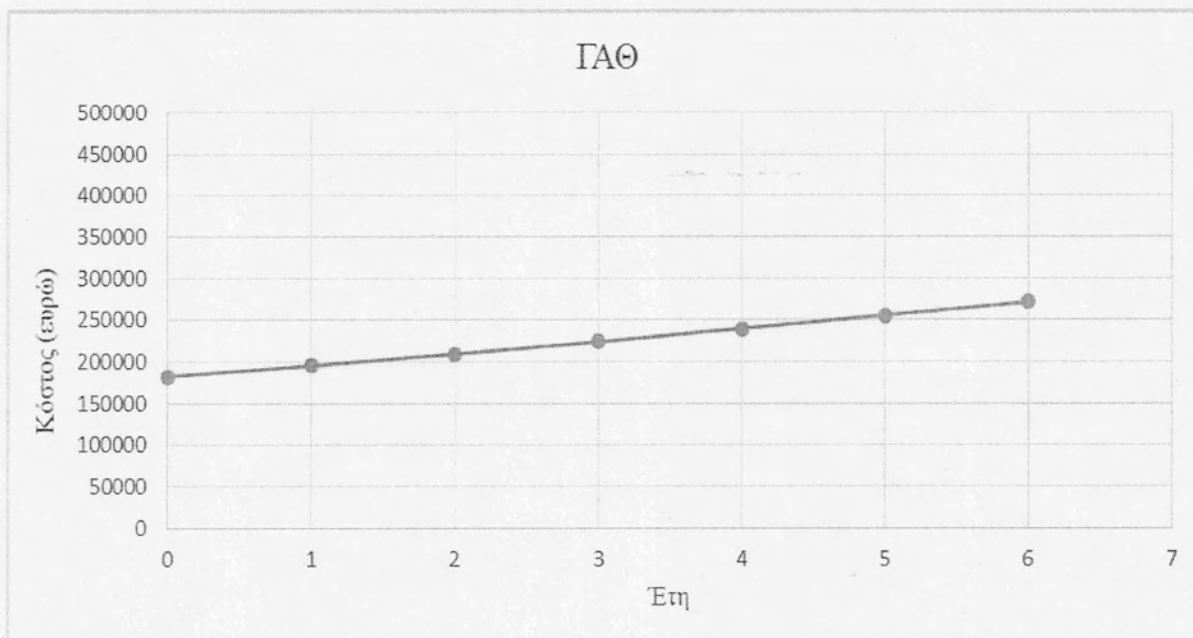
**Πίνακας 4.1** Συνολικό κόστος κατασκευής και Συνολικό ετήσιο κόστος (λειτουργίας και συντήρησης) για το πρώτο έτος λειτουργίας

<b>Κόστος κατασκευής</b>	Ευρώ
Κόστος υλικών και εργασίας για τους κατακόρυφους γεωεναλλάκτες	100.000
Κόστος εργασιών & λοιπά εξαρτήματα μηχανοστασίου:	4.500
Κόστος ΓΑΘ	78.000
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ</b>	<b>182.500</b>

<b>Ετήσιο Κόστος (Λειτουργίας - Συντήρησης)</b>	Ευρώ / Έτος
Κόστος λειτουργίας	11.912,28
Κόστος συντήρησης	1.191,22
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ (Λειτουργίας - Συντήρησης)</b>	<b>13.103,5</b>

### Διάγραμμα κόστους

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται το διάγραμμα κόστους για το σύστημα ΓΑΘ. Η γραφική παράσταση του κόστους είναι σχεδόν ευθεία γραμμή και παρουσιάζει πολύ μικρή κλίση με το πέρασμα των χρόνων λόγω του χαμηλού κόστους χρήσης.



Σχήμα 4.1 Κόστος ΓΑΘ

#### 4.10.2 Θέρμανση με λέβητα φυσικού αερίου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά το συνολικό κόστος θέρμανσης του θερμοκηπίου με σύστημα φυσικού αερίου.

##### Κόστος κατασκευής

Στον Πίνακα 4.2 φαίνεται το κόστος κατασκευής του συστήματος θέρμανσης με ΦΑ.

Πίνακας 4.2 Κόστος κατασκευής συστήματος φυσικού αερίου

Κόστος κατασκευής	Ευρώ
Κόστος Λέβητα (+ εργασία)	13.100
Κόστος Κουστήρα (+ εργασία)	4.400
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ</b>	<b>17.500</b>

### Κόστος λειτουργίας

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το συνολικό κόστος θέρμανσης του θερμοκηπίου με λέβητα φυσικού αερίου.

Η τιμή της kWh σύμφωνα με το τιμολόγιο της ΕΠΑ για επαγγελματική χρήση κεντρικής θέρμανσης χωρίς πάγια χρέωση είναι 0,057 €/kWh. Για ετήσια κατανάλωση 977.795,35 kWh το κόστος λειτουργίας για ένα έτος είναι:

$$0,057 * 977.795,35 = \boxed{55.734,33 \text{ ευρώ / έτος}}$$

### Κόστος συντήρησης

Το κόστος συντήρησης υπολογίζεται ως το 10% του κόστους λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση προκύπτει ότι είναι:  $0,1 * 55.734,33 = \boxed{5.573,43 \text{ ευρώ / έτος}}$

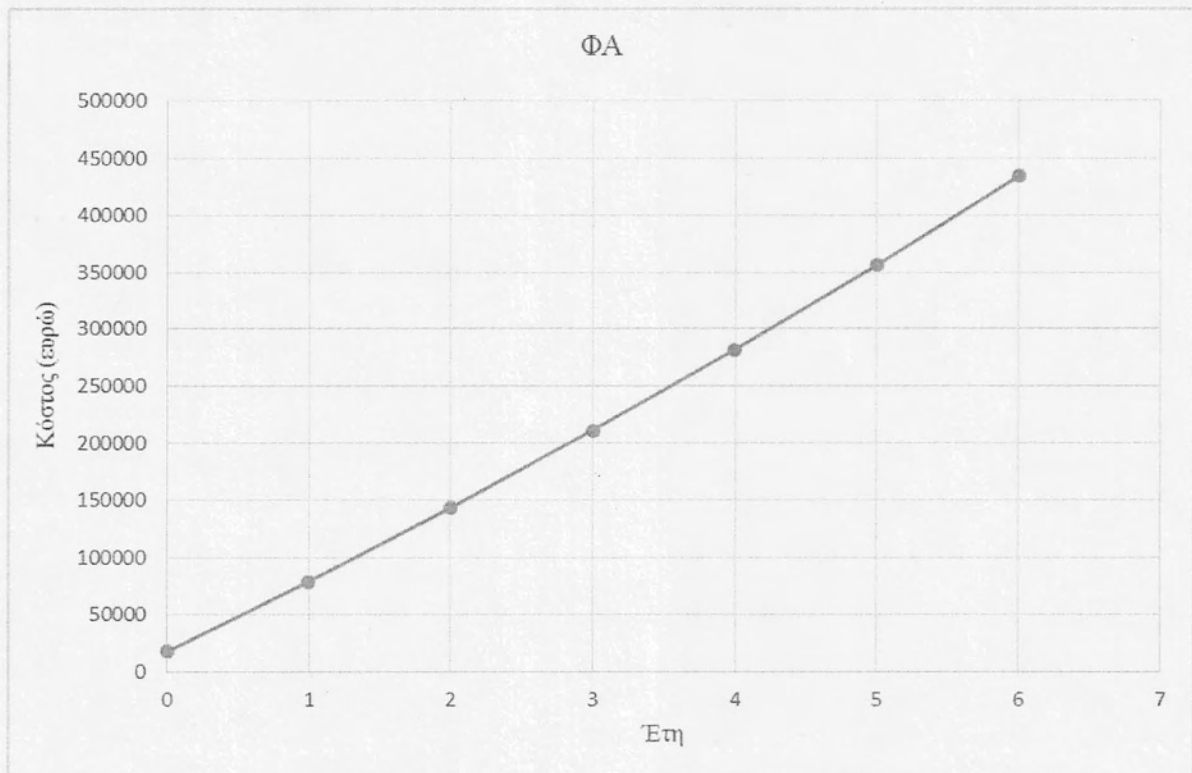
Στον Πίνακα 4.3 φαίνονται τα οικονομικά στοιχεία χρήσης του συστήματος θέρμανσης με λέβητα φυσικού αερίου. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης αναφέρεται στο πρώτο έτος λειτουργίας. Για κάθε επόμενο έτος θεωρείται πως υπάρχει προσαύξηση 5 %.

**Πίνακας 4.3** Ετήσιο Κόστος (Λειτουργίας – Συντήρησης) συστήματος φυσικού αερίου

Ετήσιο Κόστος (Λειτουργίας - Συντήρησης)	Ευρώ /έτος
Κόστος λειτουργίας	55.734,33
Κόστος συντήρησης	5.573,43
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ (Λειτουργίας - Συντήρησης)</b>	<b>61.307,76</b>

### Διάγραμμα Κόστους

Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται το διάγραμμα κόστους για το σύστημα ΦΑ για τα έξι έτη λειτουργίας του. Η γραφική παράσταση του κόστους είναι σχεδόν ευθεία γραμμή και παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη κλίση από την αντίστοιχη του κόστους για το σύστημα ΓΑΘ. Αυτό προκύπτει από το μεγάλο κόστος λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος ΦΑ.

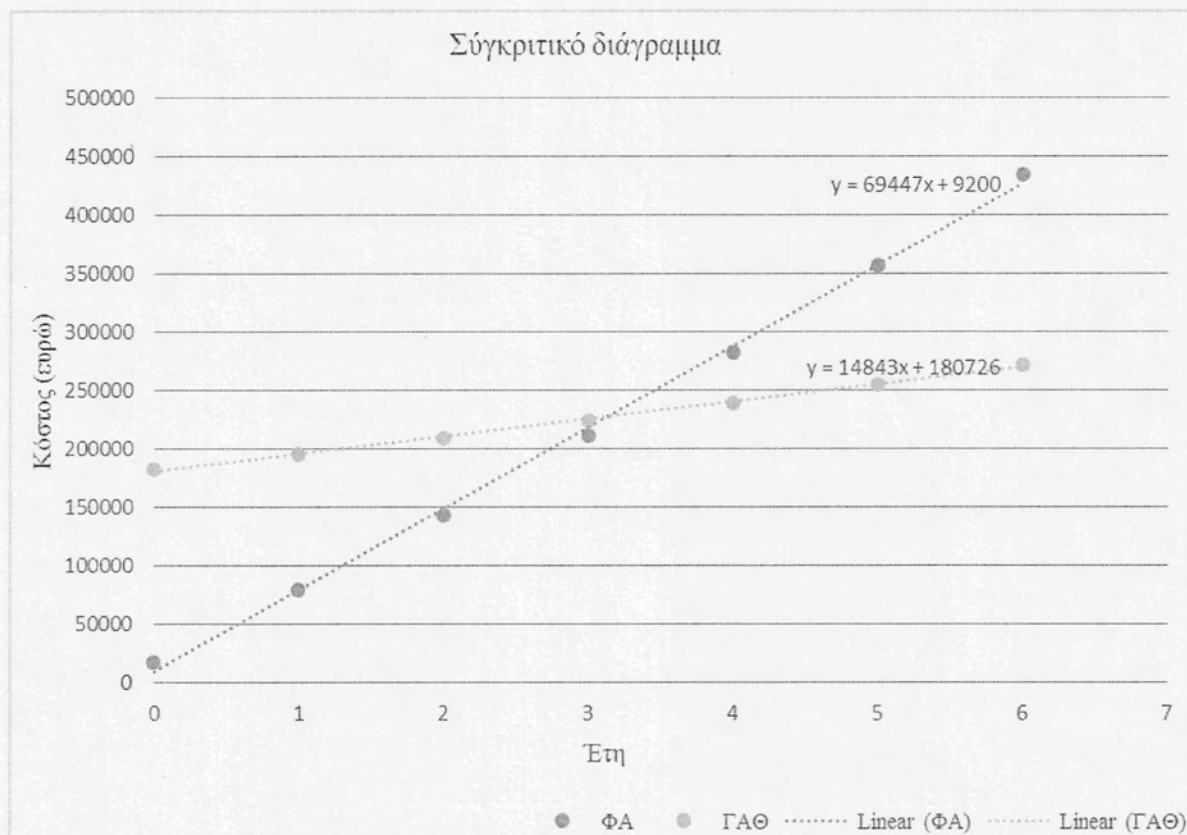


**Σχήμα 4.2** Καμπύλη κόστους συστήματος ΦΑ



#### 4.11 Συγκριτικά οικονομικά στοιχεία

Από την οικονομοτεχνική μελέτη για χρήση Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας για τη θέρμανση του θερμοκηπίου έναντι της συνηθισμένης συμβατικής μεθόδου θέρμανσης με σύστημα Φυσικού Αερίου προκύπτουν ορισμένα χρήσιμα οικονομικά στοιχεία.



Σχήμα 4.3 Συγκριτικό Διάγραμμα κόστους χρήσης ΦΑ και ΓΑΘ.

Με τη βοήθεια του συγκριτικού διαγράμματος των οικονομικών διαγραμμάτων των συστημάτων ΦΑ και ΓΑΘ στο Σχήμα 4.3 παρατηρούμε πως οι δύο γραφικές παραστάσεις κόστους λειτουργίας έχουν μορφή σχεδόν ευθείας γραμμής

Σημαντικό γεγονός είναι πως η κλίση της γραμμής κόστους χρήσης του συστήματος ΦΑ είναι σημαντικά μεγαλύτερη αυτής του συστήματος ΓΑΘ. Αυτό καταδεικνύει το μεγάλο κόστος χρήσης του συστήματος ΦΑ σε σχέση με το σύστημα ΓΑΘ.

Από το τρίτο περίπου έτος και μετά υπάρχει κέρδος στη χρήση συστήματος θέρμανσης ΓΑΘ έναντι του ΦΑ. Πιο συγκεκριμένα εξάγοντας τις εξισώσεις των ευθειών υπολογίζεται το σημείο τομής τους (έτος, κόστος).

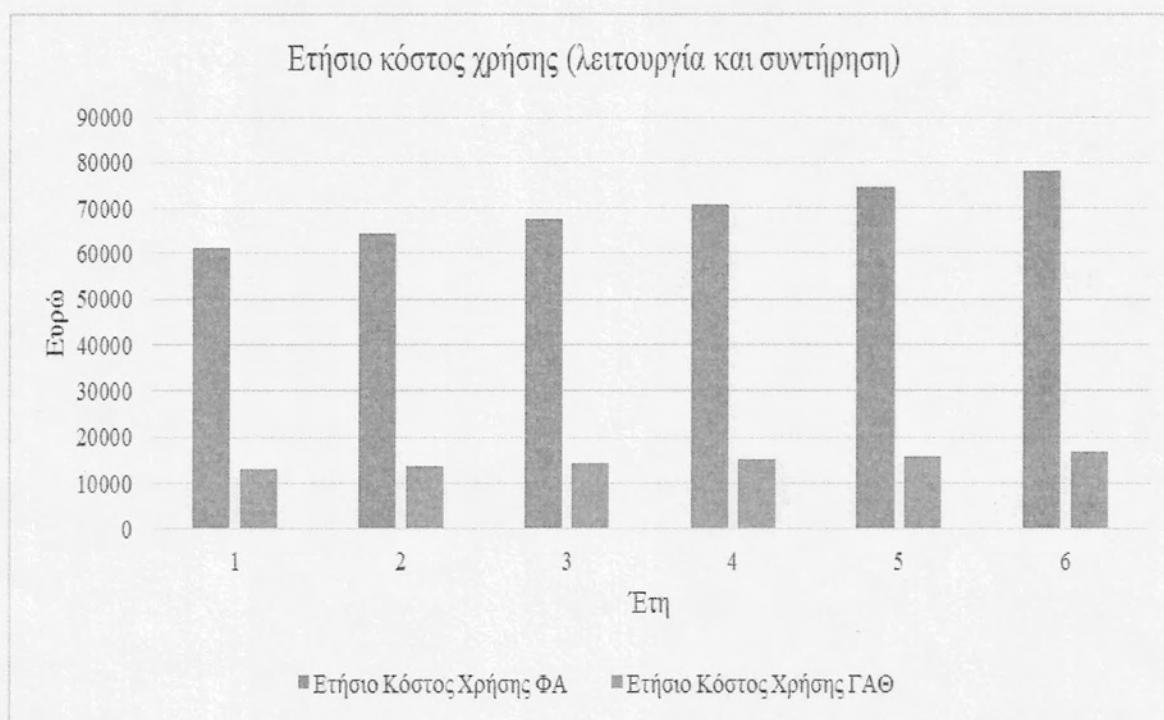
Είναι:

$$69447x + 9200 = 14843x + 180726 \Rightarrow 54604x = 171526 \Rightarrow x = \frac{171526}{54604} = 3 \text{ έτη}$$

Και  $y = 227.263$  ευρώ

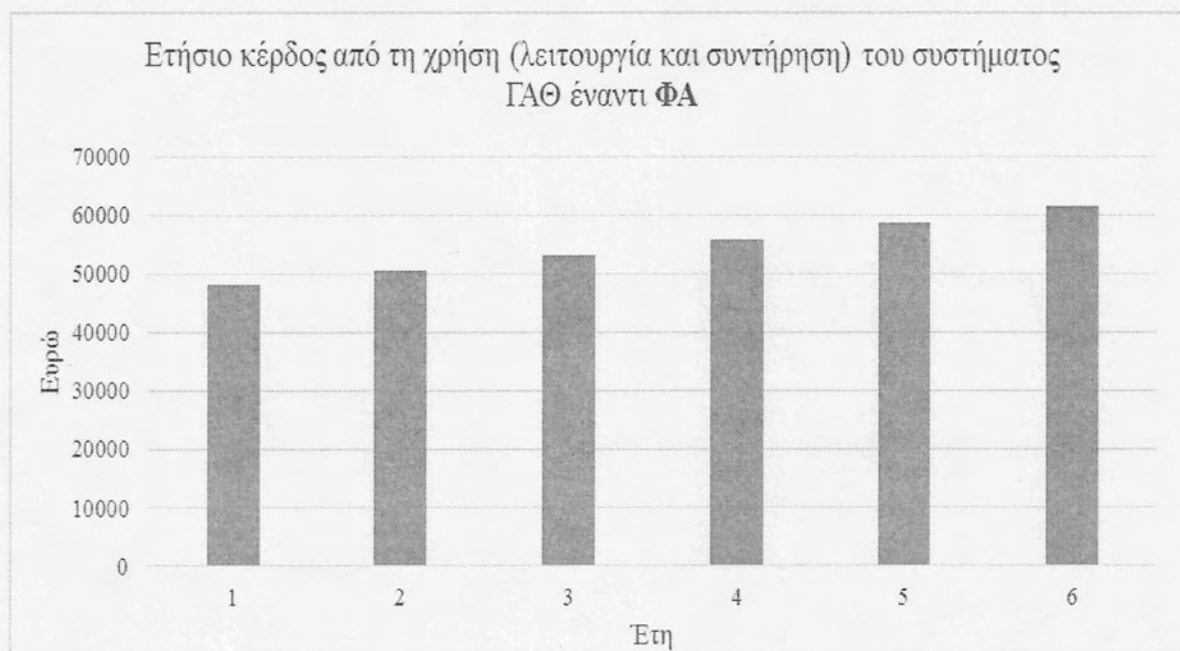
Από το σημείο αυτό και έπειτα υπάρχει καθαρό κέρδος του συστήματος από την κατασκευή και χρήση του συστήματος ΓΑΘ σε σύγκριση με την κατασκευή και χρήση του συστήματος ΦΑ.

Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται συγκριτικά το ετήσιο κόστος χρήσης (λειτουργία και συντήρηση) του συστήματος ΓΑΘ και του συστήματος ΦΑ. Παρατηρείται η μεγάλη διαφορά στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης των δύο συστημάτων.



**Σχήμα 4.4** Σύγκριση ετήσιου κόστους χρήσης

Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται η αυξητική πορεία του ετήσιου κέρδους από τη χρήση (λειτουργία και συντήρηση) του συστήματος ΓΑΘ σε σχέση με το σύστημα ΦΑ με το πέρασμα των χρόνων.



**Σχήμα 4.5** Ετήσιο κέρδος από τη χρήση (λειτουργία και συντήρηση) του συστήματος ΓΑΘ έναντι αυτού με ΦΑ

Από τη Οικονομοτεχνική μελέτη προκύπτει ότι επιλέγοντας την εγκατάσταση ενός συστήματος ΓΑΘ για τη θέρμανση του θερμοκηπίου αποφέρει γρήγορα σχετικά κέρδος και πολύ χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Παρόλα αυτά προϋποθέτει τη δαπάνη μεγάλου αρχικού κεφαλαίου. Τη στιγμή που πραγματοποιήθηκε η παρούσα οικονομοτεχνική μελέτη οι τράπεζες επιφυλάσσονταν ιδιαίτερα για τη χορήγηση τόσο μεγάλων ποσών λόγω της οικονομικής κρίσης που πλήττει ελληνικό κράτος. Για αυτό το λόγο η επένδυση στα συστήματα ΓΑΘ αφορά επενδυτές που διαθέτουν το αρχικό κεφάλαιο προκειμένου να επωφεληθούν το μεγάλο κέρδος (σε σύγκριση με την εγκατάσταση συστήματος ΦΑ) έπειτα από διάστημα 3 ετών.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας και λαμβάνοντας υπόψη όσα αναφέρθηκαν, μπορεί να γίνει διατύπωση ορισμένων συμπερασμάτων.

Με τη χρήση των θερμοκηπίων είναι δυνατή η ανάπτυξη φυτών ακόμα και σε περιοχές με δυσμενείς για αυτά συνθήκες λόγω του κλίματος της εκάστοτε περιοχής ή της εποχής του έτους. Συμπεραίνουμε επομένως πως η μελέτη θέρμανσης αποτελεί το σημαντικότερο κεφάλαιο στη μελέτη και κατασκευή μίας νέας θερμοκηπιακής μονάδας. Προκειμένου να επιλεγεί σύστημα θέρμανσης το οποίο ικανοποιεί βέλτιστες λύσεις σε υπολογιστικά μοντέλα βελτιστοποίησης της παραγωγικότητας αλλά και ταυτόχρονα να ικανοποιούνται φιλόδοξοι περιβαλλοντικοί στόχοι θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το ενεργειακό πρόβλημα.

Η ουσία του ενεργειακού προβλήματος στα θερμοκήπια βρίσκεται στην συσχέτιση των ενεργειακών αποθεμάτων που διαρκώς μειώνονται με τις απαιτήσεις για συνεχή βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας των θερμοκηπίων που συνεχώς αυξάνονται. Σε αυτά έρχονται να προστεθούν τα περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργούνται λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων

Λύση στα παραπάνω σοβαρά ζητήματα έρχεται να δώσει η εκμετάλλευση της υπόγειας θερμότητας που βρίσκεται κάτω από το έδαφος, προέρχεται από τον ήλιο και αποτελεί ένα τεράστιο απόθεμα ενέργειας που περιμένει να αξιοποιηθεί. Αυτή την ενέργεια δεν είναι άλλη από την αβαθή γεωθερμία η εκμετάλλευση της οποίας πραγματοποιείται με Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας (ΓΑΘ). Με τις ΓΑΘ είναι δυνατή η αξιοποίηση της διάχυτης ενέργειας που βρίσκεται στη φύση ξοδεύοντας μικρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Αξιοποιώντας τη μέτρια και σταθερή θερμοκρασία του υπεδάφους σε όλη τη διάρκεια του έτους, προκειμένου να παρέχουν αποδοτική θέρμανση στο θερμοκήπιο με φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο.

Στην οικονομοτεχνική ανάλυση παρουσιάζεται το αρχικά μεγάλο κόστος εγκατάστασης του συστήματος ΓΑΘ. Στη συνέχεια όμως το μικρό χρονικό διάστημα της απόσβεσης (σε σχέση με το σύστημα ΦΑ) και το μεγάλο κέρδος από τη χρήση του συστήματος ΓΑΘ μετά την απόσβεση αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα του

συστήματος ΓΑΘ και σημαντικοί λόγοι για την επιλογή του ως σύστημα θέρμανσης αντί του συμβατικού συστήματος με ΦΑ.

Για τους παραπάνω λόγους, θα πρέπει να γίνει εμπειριστατωμένη ενημέρωση των επενδυτών – παραγωγών από τους αρμόδιους φορείς για τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, ώστε να διευκολυνθεί η διάδοσή τους.

Τέλος το κράτος θα πρέπει να θεσπίσει φορολογικά κίνητρα (φορολογικές απαλλαγές ή φορολογικές ελαφρύνσεις) για την εγκατάσταση συστημάτων ΓΑΘ που θα οδηγήσουν αφενός σε ευκαιρίες ανάπτυξης τεχνογνωσίας στον ελλαδικό χώρο της κατασκευής και προώθησης των ΓΑΘ και αφετέρου στην αντικατάσταση των μηχανημάτων που καταναλώνουν πετρέλαιο για τη λειτουργία τους με μηχανές που καταναλώνουν εγχώριες πηγές ενέργειας για τη λειτουργία τους.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ελληνική**

Ανδρίτσος Ν., «Ενέργεια και περιβάλλον», Διδακτικές Σημειώσεις, Βόλος, 2008.

Γραφιαδέλλης Μ., 1980, «Σύγχρονα θερμοκήπια», Γαρταγάνης, Θεσσαλονίκη, 1980.

Μαυρογιανόπουλος Γ., «Θερμοκήπια», Δ' Έκδοση, Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα, 2005.

Ολύμπιος Χ.Μ. «Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στο θερμοκήπιο», Εκδόσεις Σταμούλης, Αθήνα, 2001.

Φύτικας Μ., Ανδρίτσος Ν., «Γεωθερμία», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2004.

### **Αγγλόφωνη**

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, "ASHRAE Handbook", ASHRAE, 2007.

Aye L., R.J. Fuller, A. Canal, "Evaluation of a heat pump system for greenhouse heating", International Journal of Thermal sciences, 49, 202-208, 2010.

Bakker J.C., Adams S.R., Boulard T., Montero J.I., "Innovative technologies for an efficient use of energy", Acta Horticulturae, 801, 49-62, 2007.

Blom, J. T. H., J. F. Ingratta., "The use of low infrared for greenhouse heating in Southern Ontario", Acta Horticulturae, 115, 205-216, 1981.

Boyd T., "Geothermal greenhouse information package", Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, 1997.

Cengel Y., "Heat transfer: a practical approach", MacGraw-Hill, 2003.

- Esen M., Yuksel T, "Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse", *Energy and Buildings*, ELSEVIER, 65, 340–351, 2013.
- Garzoli K.V. and Blackwell J.,1981, An analysis of the nocturnal heat loss from a single skin plastic greenhouse, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 26, 204–214, 1981.
- Giacomelli G. A., "Considerations for Energy Management of Greenhouse Heating and Cooling", Southern Greenhouse Vegetable Growers Association Conference, Shreveport, 2002.
- Henley, R.W. and Ellis, A.J., "Geothermal systems ancient and modern", *Earth Sci. Reviews*, 19, 1-50, 1983.
- Jensen T., "Hybrid Systems on an Isolated Island in Northern Norway", Research Council of Norway, Hydroenergia, 1994.
- Kieboom A., Stoffers J.A., "Radiation properties of greenhouse roof covering materials and greenhouses", IMAG, 1982.
- Mc Mullen J.T. and Morgan R., "Heat Pumps", Adam Hilger Ltd, Bristol, 1981.
- Nelson P.V., "Greenhouse operation and management", Prentice Hall, New Jersey, 2003.
- Ochsner, K., "Geothermal Heat Pumps", Cromwell Press, Trowbridge, 2007.
- Singh, R.D., Tiwari, G.N., "Thermal heating of a controlled environment greenhouse", ELSEVIER, 41(5), 505-522, 2000.
- Sparrow E.M., Cess R.D., "Radiation heat transfer", Brooks Pub. Co., 1966.
- Teitel M., Tanny J., "Radiative heat transfer from heating tubes in a greenhouse", *Journal of Agriculture Engineering Research*, 69(2), 185-188, 1998.
- Van Henten E.J., Bakker J.C., Marcelis L.F.M., Ooster A., Van Dekker E., Stanghellini E., Vanthoor B., "The adaptive greenhouse – an integrated systems approach to developing protected cultivation systems", *Acta Horticulturae*, 718, 399-406, 2006.





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000123953