



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΠΑΣΣΑΛΟΙ: ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ-  
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΙΜΙΛΙΟΣ Μ. ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ

ΒΟΛΟΣ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2016



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

Αριθ. Εισ.: 14705/1  
Ημερ. Εισ.: 07-09-2017  
Δωρεά: Συγγραφέας  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ  
2016  
ΠΑΠ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΠΑΣΣΑΛΟΙ: ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ-ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ :

**ΑΙΜΙΛΙΟΣ Μ. ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ D.E.A, Ph.D.**

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ &

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΠΘ.

ΠΡΟΕΔΡΟΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΕΓΚΡΙΘΗΚΕ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ..... ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2016

.....  
ΑΙΜΙΛΙΟΣ ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ

.....  
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΝΤΑΚΟΥΛΑΣ

.....  
ΠΟΥΛΥΞΕΝΗ ΚΑΛΛΙΟΓΛΟΥ

ΒΟΛΟΣ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2016

Copyright © Παπαθανασίου Κωνσταντίνος, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκε για την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του πανεπιστημίου Θεσσαλίας κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015.

Πριν την παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας, των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων αυτής θα ήθελα να ευχαριστήσω τους παράγοντες που συνέλεξαν στην εκπόνησή της, αλλά και σε όλη την ακαδημαϊκή μου ζωή.

Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ το οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωμοδρόμο Αιμίλιο για το ενδιαφέρον του, την υπομονή του και τη διάθεσή του να με καθοδηγήσει και να με συμβουλέψει τόσο κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, όσο και κατά τη διάρκεια των μαθημάτων του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και συναδέλφους μου, που ήταν κοντά μου σε οποιαδήποτε στιγμή χρειάστηκα είτε τη βοήθειά τους είτε τη στήριξή τους. Τους ευχαριστώ για τα τόσο όμορφα φοιτητικά χρόνια που περάσαμε μαζί και είμαι πραγματικά χαρούμενος που μου δόθηκε η ευκαιρία στη ζωή μου να τους γνωρίσω.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ αξίζει πραγματικά στην οικογένειά μου, η οποία δεν έπαψε ποτέ να πιστεύει στις ικανότητες και στις δυνατότητές μου, που στήριξε την κάθε επιλογή μου σαν να ήταν δικιά της και που ήταν εκεί και θα είναι εκεί σε κάθε δυσκολία, χαρά και λύπη της ζωής μου.

Κωνσταντίνος Παπαθανασίου

## **ABSTRACT**

Thermo-active foundations use shallow geothermal energy to heat or cool buildings. By making use of this green and renewable energy form, this technology can significantly reduce building energy and maintenance costs in the long term and reduce carbon dioxide emissions. However, a complete understanding of the thermal-mechanical behavior of such foundations has not yet been achieved which has been a major obstacle to the uptake and the industrial development of this technology.

First of all, in this thesis we have made a brief mention in geothermal energy, geothermal classification and the definition of the shallow geothermal energy in order to clearly understand the field of the investigation. We have described the ground heat pump systems (GHPS) as the main systems which are used to efficiently heat or cool a building. Then we focused on energy piles as a ground heat pump system how they work, how they are constructed and some successful applications of this renewable energy form.

Following the theoretical background of this thesis, we have carried out two different analyses in order to better understand the conduction of the geothermal system. First we have carried out a thermal analysis of a single pile in two different soil layers and then a group of 9 piles in the same ground field. The system was subjected to two month –thermal flux injection and then two month –thermal flux extraction simulating the heating and the cooling of the pile respectively.

Conclusions of this study were extracted showing that the thermal conductivity of the soils and the influence of the group of piles in the temperature field are the main factors of the response of the geothermal system.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ενεργειακοί πάσσαλοι χρησιμοποιούν την αβαθή γεωθερμική ενέργεια για τη θέρμανση ή ψύξη των κτιρίων. Με τη χρήση αυτής της πράσινης και ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, η τεχνολογία μπορεί να μειώσει σημαντικά την κατασκευή του ενεργειακού κόστους και συντήρησης σε μακροπρόθεσμη βάση και να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Ωστόσο, η πλήρης κατανόηση της θερμικής συμπεριφοράς των εν λόγω συστημάτων δεν έχει ακόμη επιτευχθεί η οποία έχει αποτελέσει σημαντικό εμπόδιο για την πρόσληψη και την βιομηχανική ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας.

Πρώτα απ' όλα, σε αυτή τη διατριβή κάναμε μια σύντομη αναφορά στη γεωθερμική ενέργεια, στην γεωθερμική ταξινόμηση και στον ορισμό της αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας, προκειμένου να κατανοήσουμε με σαφήνεια το πεδίο της έρευνας. Εν συνεχεία περιγράφηκαν τα συστήματα αντλιών θερμότητας εδάφους (GHPS) ως τα κύρια συστήματα που χρησιμοποιούνται για την αποτελεσματική θέρμανση ή την ψύξη ενός κτιρίου. Στη συνέχεια, επικεντρωθήκαμε στην ενεργειακούς πασσάλους ως ένα σύστημα άντλησης θερμότητας εδάφους, πώς λειτουργεί, πώς είναι κατασκευασμένοι και μερικές επιτυχημένες εφαρμογές αυτής της μορφής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Μετά το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας αυτής, διεξήχθησαν δύο διαφορετικές αναλύσεις, προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα τη συμπεριφορά του γεωθερμικού συστήματος. Πρώτα εκτελέστηκε μια θερμική ανάλυση ενός μεμονωμένου πασσάλου σε δύο διαφορετικά εδαφικά στρώματα και στη συνέχεια μια ομάδα 9 πασσάλων στον ίδιο εδαφικό προφίλ. Το σύστημα υποβλήθηκε δύο μήνες σε εισαγωγή θερμότητας και σε δυο μήνες απαγωγή θερμότητας προσομοιώνοντας έτσι την θέρμανση και την ψύξη του πασσάλου, αντίστοιχα.

Συμπεράσματα της μελέτης αυτής δείχνουν ότι η θερμική αγωγιμότητα των εδαφών και η επιρροή της ομάδας των πασσάλων στο θερμοκρασιακό πεδίο είναι οι κύριοι παράγοντες συμπεριφοράς του γεωθερμικού συστήματος.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

### Κεφάλαιο 1: ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.1 Η έννοια της γεωθερμίας .....	12
1.2 Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων .....	13
1.3 Αβαθής γεωθερμία .....	15
1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αβαθούς γεωθερμίας .....	16
1.5 Η γεωθερμία στην Ελλάδα .....	17
1.6 Εφαρμογές της γεωθερμίας .....	19

### Κεφάλαιο 2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή .....	20
2.2 Γεωεναλλάκτες .....	24
2.2.1 Συστήματα ανοικτού τύπου .....	26
2.2.2 Συστήματα κλειστού τύπου .....	29
2.3 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας .....	33
2.4 Συστήματα διανομής στο εσωτερικό των χώρων .....	34
2.4.1 Ενδοδαπέδια θέρμανση .....	34
2.4.2 Σώματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας .....	36

### Κεφάλαιο 3: Ο ΠΑΣΣΑΛΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΩΣ ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ (ENERGY PILE)

3.1 Εισαγωγή .....	38
3.2 Το πεδίο των πασσάλων θεμελίωσης κτιρίου ως γεωεναλλάκτης .....	38
3.3 Οι τεχνικές κατασκευής πασσάλων – γεωεναλλακτών .....	40
3.4 Γνωστές εφαρμογές .....	44

### Κεφάλαιο 4 : ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΑΣΣΑΛΩΝ

4.1 Εισαγωγή .....	52
4.2 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας .....	52



4.3 Μεταφορά θερμότητας στους εδαφικούς σχηματισμούς .....	54
4.3.1 Θερμική αγωγιμότητα εδαφικών σχηματισμών και σκυροδέματος .....	55
4.3.2 Θερμική διαστολή εδαφικών σχηματισμών και σκυροδέματος .....	57
4.4 Μεταφορά θερμότητας στους πασσάλους-γεωεναλλάκτες .....	59
4.5 Αντικείμενο αριθμητικής ανάλυσης .....	60
4.6 Προσομοίωση αριθμητικού μοντέλου .....	60
4.7 Ιδιότητες πασσάλων- εδάφους και καταστατικοί νόμοι .....	61
4.8 Συνοριακές και αρχικές συνθήκες αριθμητικής ανάλυσης .....	63
4.9 Προσομοίωση θερμικού φορτίου και χρονική εξάρτηση του προβλήματος .....	64
4.10 Επίλυση σε μεμονωμένο πάσσαλο-Αποτελέσματα .....	65
4.11 Επίλυση σε ομάδα πασσάλων- Αποτελέσματα .....	73
4.12 Σύγκριση των επιλύσεων .....	80

## **Κεφάλαιο 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**

5.1 Συμπεράσματα .....	82
5.2 Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση .....	83

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	84
---------------------------	----

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</b> .....	86
--------------------------	----

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β</b> .....	98
--------------------------	----

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ</b> .....	110
--------------------------	-----

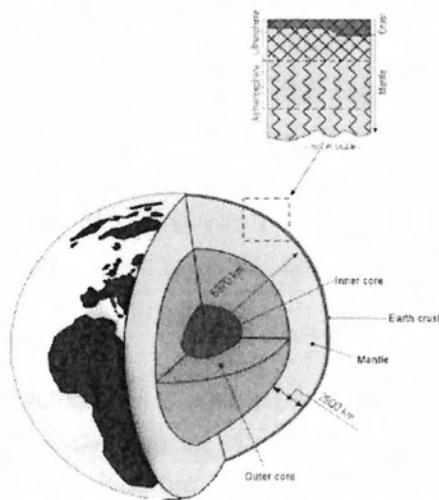
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

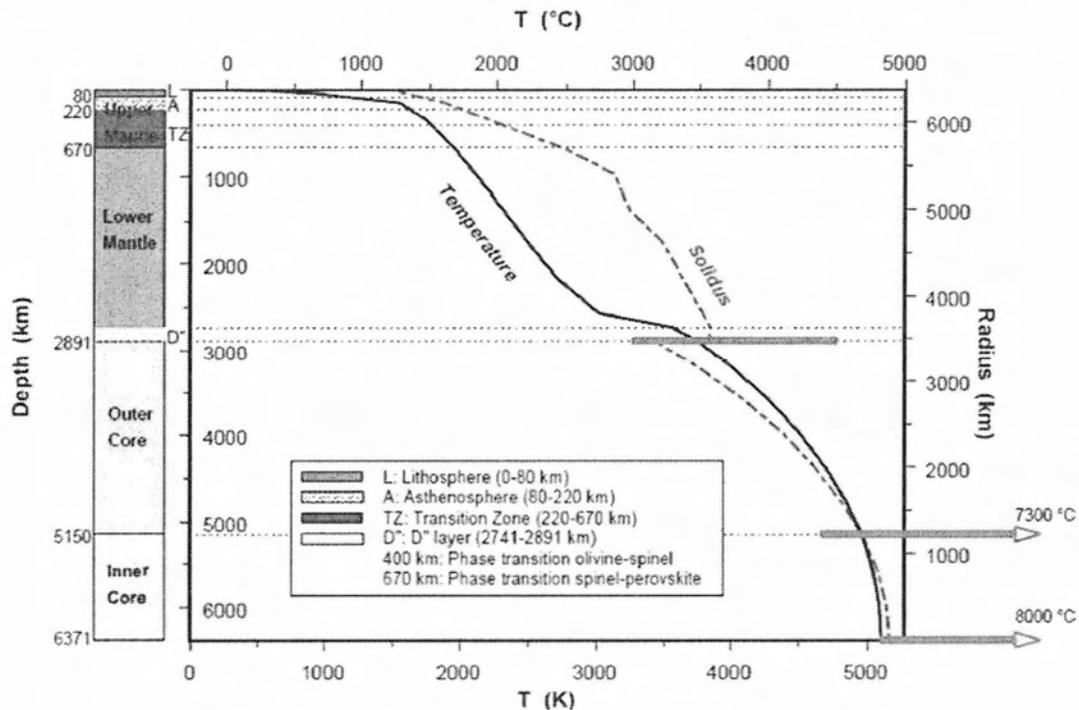
### 1.1 Η έννοια της γεωθερμίας

Γεωθερμία ή Γεωθερμική ενέργεια ονομάζουμε τη φυσική θερμική ενέργεια της Γης που ρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια, είτε μέσω ηφαιστειακών εκροών, είτε μέσω ρηγμάτων του υπεδάφους, από τα οποία αναβλύζουν ατμοί και θερμό νερό. Συνήθως όμως, ο όρος «γεωθερμική ενέργεια» χρησιμοποιείται σήμερα για να δηλώσει εκείνο το τμήμα της γήινης θερμότητας που μπορεί να ανακτηθεί και να αξιοποιηθεί από τον άνθρωπο.

Οι πόροι της γεωθερμικής ενέργειας κυμαίνονται από το επιφανειακό έδαφος έως μερικά χιλιόμετρα κάτω από την επιφάνεια της γης όπου θερμό νερό και βραχώμαζα μπορούν να βρεθούν και ακόμα βαθύτερα σε υψηλότερες θερμοκρασίες λιωμένης βραχώμαζας γνωστής ως μάγμα. Γεωθερμική βαθμίδα ονομάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με το βάθος και η τιμή της καθορίζει το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας παράλληλα με την αύξηση του βάθους (σχήμα 1.2). Η μέση τιμή της γεωθερμικής βαθμίδας κυμαίνεται μεταξύ 25-30 °C/km (στην λιθόσφαιρα) ανάλογα τις περιοχές (Banks, 2008).



Σχήμα 1  
Ο Φλοιός, ο Μανδύας και ο Πυρήνας της γης. Πάνω δεξιά : τομή του φλοιού και του ανώτερου μανδύα



Σχήμα 1.2 Μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους με το βάθος (Clauser, 2006)

## 1.2 Ταξινόμηση Γεωθερμικών Συστημάτων

Τα γεωθερμικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορα κριτήρια, όπως είναι το είδος των γεωθερμικών πόρων, ο τύπος και η θερμοκρασία των ρευστών, ο τύπος του πετρώματος που φιλοξενεί τα ρευστά, το είδος της εστίας θερμότητας, αν κυκλοφορούν ή όχι ρευστά στον ταμιευτήρα κ.ά.

Σε σχέση με το είδος των γεωθερμικών πόρων διακρίνονται πέντε κατηγορίες συστημάτων (Σχήμα 1.3), που περιγράφονται συνοπτικά ως εξής:

- Τα υδροθερμικά συστήματα ή πόροι, δηλ. τα φυσικά υπόγεια θερμά ρευστά που βρίσκονται σε έναν ή περισσότερους ταμιευτήρες, θερμαίνονται από μία εστία θερμότητας και συχνά εμφανίζονται στην επιφάνεια της γης με τη μορφή θερμών εκδηλώσεων. Τα συστήματα αυτά συχνά ταυτίζονται με το σύνολο σχεδόν των γεωθερμικών πεδίων, αφού σήμερα ουσιαστικά είναι τα μόνα συστήματα που αξιοποιούνται.
- Αβαθής γεωθερμία (earth energy), κατά την οποία λαμβάνονται (ή και απορρίπτονται) ποσότητες ενέργειας από μικρά βάθη με την ανακυκλοφορία νερού στα πρώτα 100 m από την επιφάνεια της γης ή με την κυκλοφορία υπόγειων νερών ή νερών από λίμνες, ποτάμια και τη θάλασσα. Αποτελεί την ταχύτερα αναπτυσσόμενη μορφή της γεωθερμικής ενέργειας.

- Τα προχωρημένα γεωθερμικά συστήματα (enhanced geothermal systems) αναφέρονται στα θερμά πετρώματα σε βάθος από 2 μέχρι 10 km, από τα οποία μπορεί να ανακτηθεί ενέργεια χρησιμοποιώντας νερό που διοχετεύεται από την επιφάνεια, μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων, και ανακτάται αρκετά θερμότερο με τη μορφή νερού ή ατμού μέσω άλλων γεωτρήσεων.
- Τα γεωπεπιεσμένα συστήματα (geopressed systems) αποτελούνται από ρευστά εγκλεισμένα σε μεγάλο βάθος, βρίσκονται περιορισμένα από μη περατά πετρώματα και η πίεσή τους υπερβαίνει την υδροστατική.
- Τα μαγματικά συστήματα (magma systems) αναφέρονται στην απώληση θερμότητας με κατάλληλες γεωτρήσεις σε μαγματικές διεισδύσεις, που βρίσκονται σε μικρό σχετικά βάθος.



Σχήμα 1.3 Μορφές γεωθερμικής ενέργειας κατά σειρά ενδιαφέροντος χρήσεων σήμερα και προοπτικής στο εγγύς μέλλον από αριστερά προς τα δεξιά.

Ανάλογα με τη θερμοκρασία των ρευστών που ανέρχονται στην επιφάνεια, η γεωθερμική ενέργεια χαρακτηρίζεται ως:

- υψηλής ενθαλπίας (για θερμοκρασίες άνω των 150°C), η οποία χρησιμοποιείται συνήθως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σχετικά μεγάλες μονάδες με την διαδικασία του κύκλου Rankin.
- μέσης ενθαλπίας (για θερμοκρασίες 100 -150°C), η οποία χρησιμοποιείται για θέρμανση ή ξήρανση ξυλείας και αγροτικών προϊόντων και σε μικρές μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού με εργαζόμενο μέσο φρέον.
- χαμηλής ενθαλπίας (για θερμοκρασίες μικρότερες από 100°C), η οποία χρησιμοποιείται για θέρμανση κατοικιών και γενικά χώρων, θέρμανση θερμοκηπίων, ιχθυοκαλλιέργειες και παραγωγή γλυκού νερού από την θάλασσα με την διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης (αβαθής γεωθερμία).

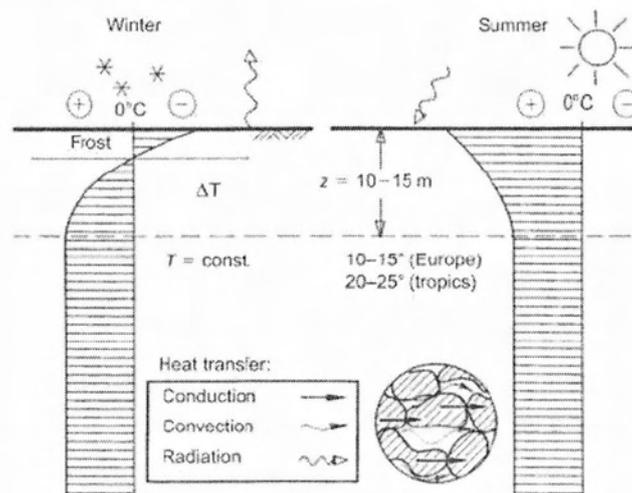
### 1.3 Αβαθής Γεωθερμία

Επεκτείνοντας την ευρύτερη έννοια της γεωθερμίας, αναφέρεται και η εκμετάλλευση της ενέργειας που συσσωρεύεται σε μικρά βάθη (μικρότερο από 150 μετρά) του φλοιού της Γης (σχεδόν επιφανειακά) και ονομάζεται **αβαθής γεωθερμία**. Με αυτόν τον όρο χαρακτηρίζεται η ενέργεια των γεωλογικών σχηματισμών και των ρευστών, επιφανειακών και υπογείων, που δεν χαρακτηρίζονται ως γεωθερμικό δυναμικό, έχουν δηλαδή θερμοκρασίες οι οποίες δεν ξεπερνούν τους 25°C.

Η αβαθής (ή επιφανειακή) γεωθερμία είναι βασισμένη στη συνεχόμενη ηλιακή ακτινοβολία του ήλιου. Η μέση τιμή ακτινοβολίας του ήλιου, η οποία απορροφάται από το έδαφος, ανέρχεται στις 1500kWh/m<sup>2</sup> ετησίως, ενώ η γεωθερμική διαθέσιμη ενέργεια ή δυναμικότητα, λ.χ. για τη Γερμανία, δεν ξεπερνά το 0,6 kWh/m<sup>2</sup> ετησίως. Με απλά λόγια αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια την οποία απορροφά ένα τέτοιο γεωθερμικό σύστημα είναι αποτέλεσμα της ηλιακής ενέργειας και όχι της γεωθερμικής ενέργειας η οποία προέρχεται από τα βάθη της γης.

Χαρακτηριστικό πλεονέκτημα της αβαθούς γεωθερμίας είναι η σταθερότητα της θερμοκρασίας του εδάφους καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, ανεξαρτήτως από τις κλιματολογικές μεταβολές. Η διατήρηση της θερμοκρασίας αυτής οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ο ήλιος ζεσταίνει την επιφάνεια του εδάφους, το οποίο απορροφά στο βάθος την θερμότητα που του παρέχεται, ενώ στη διάρκεια του χειμώνα η ίδια επιφάνεια ψύχεται και αφαιρεί θερμότητα από εκείνη που είχε συσσωρευτεί στο υπέδαφος. Αυτό όμως γίνεται πολύ αργά και με μεγάλη διαφορά φάσης, έτσι ώστε ενώ στην επιφάνεια του εδάφους η θερμοκρασία παρουσιάζει σημαντική διακύμανση, όσο προχωρούμε σε βάθος η διακύμανση αυτή στη διάρκεια ενός έτους γίνεται μικρότερη και ουσιαστικά κάτω από τα 10-15 μέτρα σχεδόν εξαφανίζεται. Έτσι αποκαθίσταται μια κατάσταση ισορροπίας στο επίπεδο 18-20°C. Σε βόρειες χώρες, όπως η Σουηδία ή ο Καναδάς αυτή η ισορροπία αποκαθίσταται σε χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας.

Στις ευρωπαϊκές χώρες εν γένει η θερμοκρασία κάτω από τα 10-15 μετρά κυμαίνεται μεταξύ 10-15 °C παραμένοντας σταθερή. Κάτω από τα 50 μετρά η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 3 °C ανά 100 μετρά. Αντίστοιχα στις τροπικές περιοχές η θερμοκρασία κυμαίνεται στους 20 με 25 °C όπως παρουσιάζεται και παρακάτω (σχήμα 1.4)



Σχήμα 1.4 Διακύμανση θερμοκρασίας με το βάθος σε ευρωπαϊκές και τροπικές περιοχές.

#### 1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αβαθούς γεωθερμίας

Τα κύρια πλεονεκτήματα της αβαθούς γεωθερμίας είναι:

- Αξιοπίστη τεχνολογία, φιλική προς το περιβάλλον χωρίς εκπομπές αέριων ρύπων. Επειδή δεν χρησιμοποιούνται καύσιμα, δεν συμβάλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου που είναι υπεύθυνο για την αύξηση της θερμοκρασίας στον πλανήτη.
- Ενέργεια σε χαμηλό κόστος. Λόγω της χαμηλής κατανάλωσης και της σχεδόν ανύπαρκτης συντήρησης του εξοπλισμού, τα γεωθερμικά συστήματα κλιματισμού μπορούν να εξοικονομήσουν από 55% μέχρι και 70% από την ετήσια δαπάνη σε σύγκριση με ένα συμβατικό σύστημα θέρμανσης και δροσισμού. Το μόνο λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης είναι η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από τον συμπιεστή και τις αντλίες, το οποίο είναι οικονομικότερο σε σχέση με τη χρήση λέβητα και πετρελαίου κατά 65-85%.
- Ένα γεωθερμικό σύστημα είναι τρεις έως πέντε φορές αποδοτικότερο από ένα συμβατικό σύστημα. Επειδή δεν καίει ορυκτά καύσιμα για να παράγει θερμότητα, παρέχει τρεις έως πέντε μονάδες ενέργειας για κάθε μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτεί το σύστημα.
- Ένα σύστημα γεωθερμίας παρέχει μεγαλύτερη ασφάλεια σε σχέση με μία εγκατάσταση πετρελαίου ή φυσικού αερίου, διότι δεν υπάρχει καύση και φλόγα. Επίσης δεν υπάρχουν καπνοί, καπναγωγοί και οσμές. Δεν υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης, φωτιάς ή ασφυξίας από το μονοξείδιο.

- Απαιτείται μικρότερος χώρος για την εγκατάσταση του εξοπλισμού σε σχέση με το συμβατικό λεβητοστάσιο. Δεν απαιτείται λέβητας, δεξαμενή πετρελαίου ή καπνοδόχος, όπως επίσης και αερόψυκτος ψύκτης για τον κλιματισμό του κτιρίου.
- Μεταφορά (άντληση) δωρεάν ενέργειας από και προς το υπέδαφος για θέρμανση και ψύξη κτιρίων αντίστοιχα, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες.
- Αθόρυβη λειτουργία. Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν για να είναι σχεδόν αθόρυβες.
- Ανεξαρτησία από το πετρέλαιο θέρμανσης.
- Γρήγορη απόσβεση.
- Ζεστό νερό χειμώνα και καλοκαίρι.
- Δροσιά χωρίς κόστος το καλοκαίρι.
- Συμβολή στη μείωση της ενεργειακής εξάρτησης μιας χώρας, με τον περιορισμό των εισαγωγών ορυκτών καυσίμων.

Τα κύρια μειονεκτήματα της αβαθούς γεωθερμίας είναι:

- Το αρχικό κόστος ενός γεωθερμικού συστήματος είναι υψηλότερο από αυτό των συμβατικών συστημάτων, αλλά κάνει απόσβεση μέσα σε λίγα χρόνια.
- Κατά την ανόρυξη των γεωτρήσεων δημιουργείται λάσπη, η οποία θα πρέπει να ξηραθεί και να απομακρυνθεί από το χώρο ανέγερσης της κατοικίας.
- Για τα ανοιχτά γεωθερμικά κυκλώματα απαιτείται παροχή καθαρού νερού, διαφορετικά θα σχηματιστούν επικαθίσεις σε σχεδόν κάθε επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το γεωθερμικό ρευστό, διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών, καθώς και περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις (διάθεση των ρευστών μετά τη χρήση τους, εκπομπές τοξικών αερίων, ιδίως του υδροθείου).

### 1.5 Η γεωθερμία στην Ελλάδα

Λόγω κατάλληλων γεωλογικών συνθηκών, ο Ελλαδικός χώρος διαθέτει σημαντικές γεωθερμικές πηγές και των τριών κατηγοριών (υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας) σε οικονομικά βάθη (100-1500μ.). Σε μερικές περιπτώσεις τα βάθη των γεω-

θερμικών ταμιευτήρων είναι πολύ μικρά, κάνοντας ιδιαίτερα ελκυστική, από οικονομική άποψη, τη γεωθερμική εκμετάλλευση.

Η έρευνα για την αναζήτηση γεωθερμικής ενέργειας άρχισε ουσιαστικά το 1971 με βασικό φορέα το Ι.Γ.Μ.Ε. και μέχρι το 1979 (πριν από την δεύτερη ενεργειακή κρίση) αφορούσε μόνο τις περιοχές υψηλής ενθαλπίας. Κατά την εξέλιξη των εργασιών η Δ.Ε.Η. σαν άμεσα ενδιαφερόμενη για την ηλεκτροπαραγωγή, ανέλαβε τις παραγωγικές γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας και την ανάπτυξη των πεδίων, χρηματοδοτώντας επιπλέον τις έρευνες στις πιθανές για τέτοια ρευστά γεωθερμικές περιοχές. Συντάχθηκε ο προκαταρκτικός χάρτης γεωθερμικής ροής του ελληνικού χώρου, όπου φάνηκε ότι η γεωθερμική ροή στην Ελλάδα είναι σε πολλές περιοχές εντονότερη από τη μέση γήινη. Από το 1971 ερευνήθηκαν οι περιοχές : Μήλος, Νίσυρος, Λέσβος, Μέθανα, Θερμοπύλες, Υπάτη, Αιδηψός, Κίμωλος, Πολύαιγος, Σαντορίνη, Κως, Νότια Θεσσαλία, Αλμωπία, περιοχή Στρυμόνα, Ξάνθη, Σαμοθράκη και άλλες.

Η αυξημένη ροή θερμότητας, λόγω της έντονης τεκτονικής και μαγματικής δραστηριότητας, δημιούργησε εκτεταμένες θερμικές ανωμαλίες, με μέγιστες τιμές γεωθερμικής βαθμίδας που πολλές φορές ξεπερνούν τους 100°C/km. Σε κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες, η ενέργεια αυτή θερμαίνει «ρηχούς» υπόγειους ταμιευτήρες ρευστών σε θερμοκρασίες μέχρι 100°C. Τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας είναι διάσπαρτα στη νησιωτική και ηπειρωτική Ελλάδα. Η συμβολή τους στο ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να γίνει σημαντική, καθόσον αποτελούν ενεργειακό πόρο φιλικό στο περιβάλλον, κοινωνικά αποδεκτό και παρουσιάζουν σημαντικό οικονομικό και αναπτυξιακό ενδιαφέρον.

Στη Μήλο και στη Νίσυρο έχουν ανακαλυφθεί σπουδαία γεωθερμικά πεδία και έχουν γίνει γεωτρήσεις παραγωγής (5 και 2 αντίστοιχα). Στη Μήλο μετρήθηκαν θερμοκρασίες μέχρι 325°C σε βάθος 1000 μέτρων και στη Νίσυρο 350°C σε βάθος 1500 μέτρων. Οι γεωτρήσεις αυτές θα μπορούσαν να στηρίξουν μονάδες ηλεκτροπαραγωγής 20 και 5 MW, ενώ το πιθανό συνολικό δυναμικό υπολογίζεται να είναι της τάξης των 200 και 50 MW αντίστοιχα.

Στη βόρεια Ελλάδα η γεωθερμία προσφέρεται για θέρμανση, θερμοκήπια, ιχθυοκαλλιέργειες κ.τ.λ. Στη λεκάνη του Στρυμόνα έχουν εντοπισθεί τα πολύ σημαντικά πεδία Θερμών -Νιγρίτας,Λιθότοπου Ηράκλειας, Θερμοπηγής -Σιδηροκάστρου και Αγκίστρου. Πολλές γεωτρήσεις παράγουν νερά μέχρι 75°C, συνήθως αρτεσιανά και πολύ καλής ποιότητας και παροχής. Μεγάλα και μικρότερα γεωθερμικά θερμοκήπια λειτουργούν στη Νιγρίτα και το Σιδηρόκαστρο.

Στην πεδινή περιοχή του Δέλτα Νέστου έχουν εντοπισθεί δύο πολύ σημαντικά γεωθερμικά πεδία, στο Ερατεινό Χρυσούπολης και στο Ν. Εράσμιο Μαγγάνων Ξάνθης. Νερά άριστης ποιότητας μέχρι 70°C και σε πολύ οικονομικά βάθη παράγονται από γεωτρήσεις στις εύφορες αυτές πεδινές περιοχές. Στη Ν. Κεσσάνη και στο Πόρτο



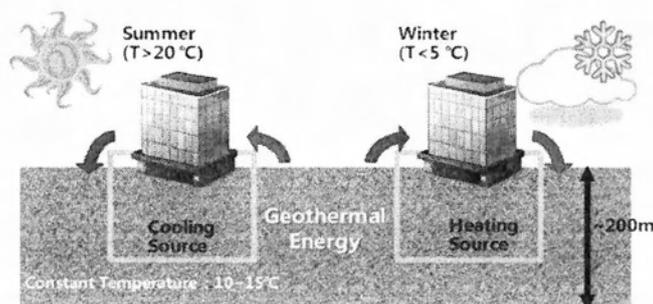
Λάγος Ξάνθης, σε μεγάλης έκτασης γεωθερμικά πεδία, παράγονται νερά θερμοκρασίας μέχρι  $82^{\circ}\text{C}$ . Στη λεκάνη των λιμνών Βόλβης και Λαγκαδά έχουν εντοπισθεί τρία πολύ ρηχά πεδία με θερμοκρασίες μέχρι  $56^{\circ}\text{C}$ . Στη Σαμοθράκη υπάρχουν ενθαρρυντικά στοιχεία, καθώς γεωτρήσεις βάθους μέχρι 100 μέτρων συνάντησαν νερά της τάξης των  $100^{\circ}\text{C}$ .

Η αβαθής γεωθερμία από την άλλη, αναφέρεται σε ολόκληρη την ελληνική επικράτεια και δύναται να καλύψει τις ανάγκες τόσο σε θέρμανση όσο και ψύξη κτιριακών εγκαταστάσεων, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής του ζεστού νερού χρήσης.

### 1.6 Εφαρμογές της γεωθερμίας

Οι εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας ποικίλουν ανάλογα με τη θερμοκρασία και περιλαμβάνουν :

- Ηλεκτροπαραγωγή ( $\theta > 90^{\circ}\text{C}$ ), παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με δυαδικό κύκλο (Rankine).
- Θέρμανση χώρων (με καλοριφέρ για  $\theta > 60^{\circ}\text{C}$ , με αερόθερμα για  $\theta > 40^{\circ}\text{C}$ , με ενδοδαπέδιο σύστημα για  $\theta > 25^{\circ}\text{C}$ ).
- Ψύξη και κλιματισμό (με αντλίες θερμότητας απορρόφησης για  $\theta > 60^{\circ}\text{C}$ , ή με υδρόψυκτες αντλίες θερμότητας για  $\theta < 30^{\circ}\text{C}$ ).
- Θέρμανση θερμοκηπίων και εδαφών, επειδή τα φυτά αναπτύσσονται γρηγορότερα και γίνονται μεγαλύτερα με τη θερμότητα ( $\theta > 25^{\circ}\text{C}$ ), ή και για αντιπαγετική προστασία.
- Ιχθυοκαλλιέργειες ( $\theta > 15^{\circ}\text{C}$ ), επειδή τα ψάρια χρειάζονται ορισμένη θερμοκρασία για την ανάπτυξή τους.
- Βιομηχανικές εφαρμογές, όπως αφαλάτωση θαλασσινού νερού ( $\theta > 60^{\circ}\text{C}$ ), ξήρανση αγροτικών προϊόντων, κτλ.
- Θερμά λουτρά ( $\theta = 25-40^{\circ}\text{C}$ ).



Σχήμα 1.5 Θέρμανση και ψύξη κτιρίων

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

#### 2.1 Εισαγωγή

Η γη προσφέρει μία σταθερή και απίστευτα μεγάλη πηγή θερμότητας, δεξαμενή θερμότητας και αποθήκη θερμότητας για θερμικές ενεργειακές χρήσεις, όπως είναι τα συστήματα γεωεναλλακτών σε συνδυασμό με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας. Είναι ευρύτατα γνωστό ότι η φυσική ροή της θερμότητας γίνεται από τις υψηλότερες στις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Η αντλία θερμότητας είναι μία μηχανή η οποία προκαλεί τη ροή θερμότητας προς την αντίθετη κατεύθυνση από τη φυσική της ροή, από τις χαμηλότερες δηλαδή προς τις ανώτερες θερμοκρασίες. Ένα γεωθερμικό σύστημα, το οποίο αποτελείται από μια μονάδα εντός του κτιρίου και ένα θαμμένο γεωεναλλάκτη, αξιοποιεί τις σταθερές θερμοκρασίες του υπεδάφους για να δεσμεύσει την "ελεύθερη" ενέργεια. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι το χειμώνα, το ρευστό που κυκλοφορεί μέσα στο κύκλωμα του γεωεναλλάκτη απορροφά την αποθηκευμένη θερμότητα του εδάφους και την φέρνει στη μονάδα εσωτερικά του κτιρίου. Η μονάδα αντλεί τη θερμότητα σε μια υψηλότερη θερμοκρασία και την διανέμει στο κτίριο. Το καλοκαίρι, το σύστημα αντιστρέφεται, απάγει τη θερμότητα από το κτίριο, τη μεταφέρει στο κύκλωμα του γεωεναλλάκτη και την αποθέτει στην πιο δροσερή γη. Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα, τα συστήματα Γεωεναλλακτών δεν καίνε ορυκτά καύσιμα για να παράγουν θερμότητα. Απλά μεταφέρουν τη θερμότητα από και προς τη γη για να παρέχουν την αποδοτική, προσιτή και φιλική προς το περιβάλλον θέρμανση και ψύξη. Ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την λειτουργία του συστήματος δηλαδή του συμπιεστή και των κυκλοφορητών.

Το σύστημα αποτελείται από τρία κύρια μέρη τα οποία θα περιγραφούν αναλυτικά παρακάτω:

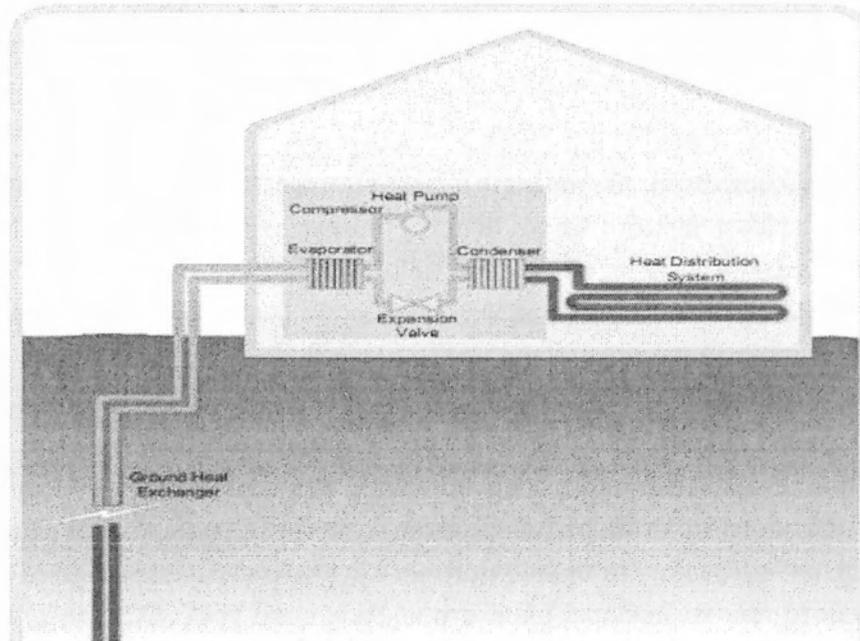
1) Γεωεναλλάκτης (heat exchangers). Πρόκειται για ένα σύστημα ανταλλαγής θερμότητας με το έδαφος. Διακρίνονται σε:

- Συστήματα κλειστού βρόγχου τα οποία εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που βρίσκεται αποθηκευμένη στους γεωλογικούς σχηματισμούς.

- Ανοιχτά συστήματα τα οποία εκμεταλλεύονται την παρουσία υπόγειου νερού ή επιφανειακού υδροφόρου ορίζοντα.

2) Γεωθερμική αντλία θερμότητας (Heat pump)

3) Εσωτερικό σύστημα διανομής θερμότητας στο κτίριο



Σχήμα 2.1 Σύστημα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας (γεωεναλλάκτης-αντλία θερμότητας-εσωτερικό σύστημα διανομής)

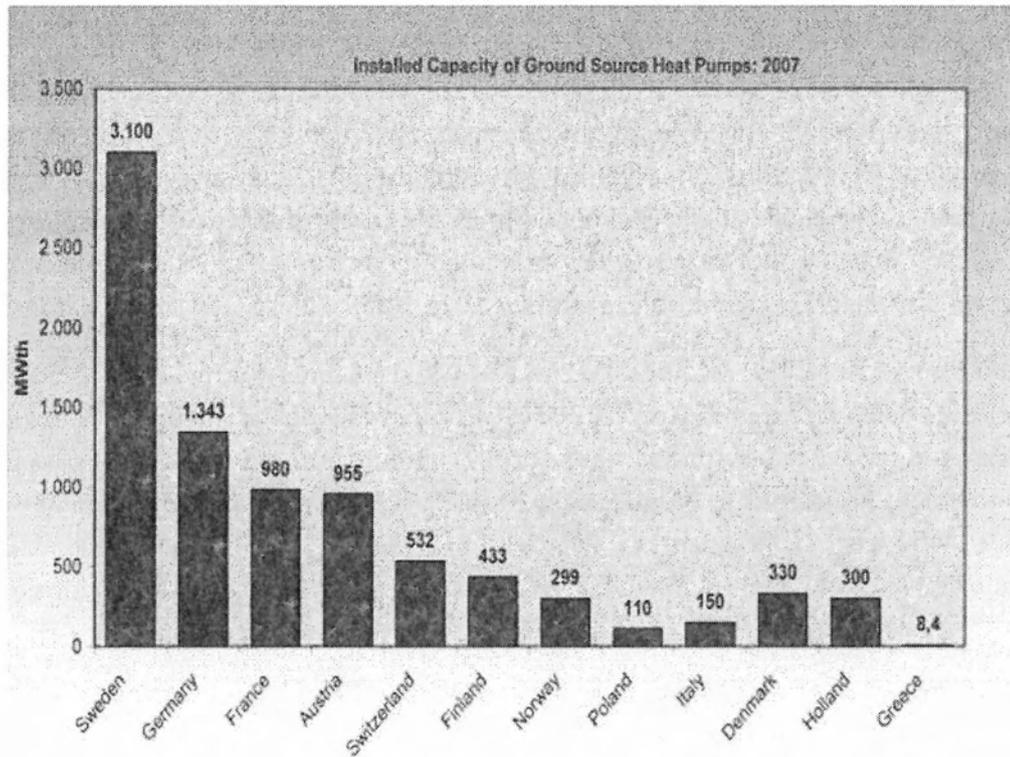
Ένα σύστημα Γεωεναλλάκτη είναι τρεις έως πέντε φορές αποδοτικότερο από ένα συμβατικό σύστημα. Επειδή τα συστήματα γεωεναλλάκτη δεν καίνε ορυκτά καύσιμα για να παράγουν θερμότητα, παρέχουν τρεις έως πέντε μονάδες ενέργειας για κάθε μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτεί το σύστημα. Τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης βαθμονομούνται για την απόδοσή τους σύμφωνα με τις διεθνείς και ευρωπαϊκές προδιαγραφές (ISO και EN). Οι καυστήρες ορυκτών καυσίμων βαθμονομούνται με την επί τοις εκατό απόδοσή τους σε σχέση με την θερμογόνο δύναμη του καυσίμου που καταναλώνουν. Οι καυστήρες φυσικού αερίου, προπανίου και πετρελαίου βαθμονομούνται για την απόδοσή τους σε ειδικά εργαστήρια. Για να εκτιμηθεί η ακριβής απόδοση μιας εγκατάστασης πρέπει να συμπεριληφθούν παράγοντες όπως οι απώλειες θερμότητας καυσαερίων, οι πολλαπλές εναύσεις λόγω υπερδιαστασιολόγησης, η ηλεκτρική κατανάλωση των κυκλοφορητών, κλπ.

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, όπως όλοι οι άλλοι τύποι αντλιών θερμότητας, βαθμονομούνται σύμφωνα με το συντελεστή απόδοσης (COP). Είναι ο επιστημονικός τρόπος προσδιορισμού της ενέργειας που το σύστημα παράγει σε σχέση με αυτή που χρησιμοποιεί. Τα περισσότερα συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας έχουν COPs 3~5. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε μία μονάδα ενέργειας που χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει το σύστημα, 3~5 μονάδες παρέχονται ως θερμότητα. Δηλαδή ένας καυστήρας ορυκτών καυσίμων μπορεί να είναι 78-95% αποδοτικός, ενώ μια γεωθερμική αντλία θερμότητας είναι 300% -500%

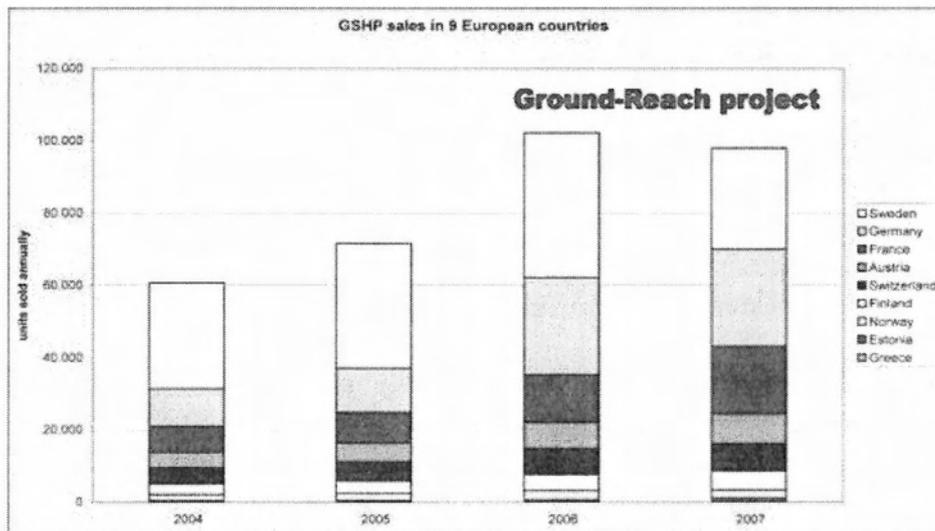
Γενικά θα πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα το γεγονός ότι πέρα από την αποδοτικότητα τους, τα γεωθερμικά συστήματα λειτουργούν σε συνεργασία με τη φύση και όχι ενάντια σε αυτήν. Δεν εκπέμπουν αέρια θερμοκηπίου, τα οποία έχουν συνδεθεί με την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας, την όξινη βροχή και άλλους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Τα μηχανήματα της WFI χρησιμοποιούν το R410A, ένα ψυκτικό υγρό υψηλής απόδοσης που δεν θα βλάψει το στρώμα του όζοντος στη ατμόσφαιρα.

Ένα συνηθισμένο παράδειγμα κατανόησης της λειτουργίας των αντλιών θερμότητας αποτελούν τα ψυγεία και τα κλιματιστικά μηχανήματα, τα οποία είναι αντλίες θερμότητας που κινούν τη θερμότητα από τους πιο κρύους εσωτερικούς χώρους στους θερμότερους εξωτερικούς χώρους με σκοπό την ψύξη των πρώτων. Οι αντλίες θερμότητας κινούν επίσης την θερμότητα από χαμηλής θερμοκρασίας πηγές σε υψηλής θερμοκρασίας χώρους με σκοπό τη θέρμανση. Παραδείγματος χάριν, μια αντλία θερμότητας με πηγή θερμότητας τον εξωτερικό αέρα, λαμβάνει τη θερμότητα από τον υπαίθριο χώρο και την αντλεί στο εσωτερικό του κτιρίου. Μια γεωθερμική αντλία θερμότητας λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο, με τη διαφορά ότι η πηγή θερμότητάς της είναι η πιο ζεστή γη αντί του κρύου αέρα. Η διαδικασία της ανύψωσης της θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας σε άνω των 30°C και μεταφορά στον εσωτερικό χώρο περιλαμβάνει έναν κύκλο εξάτμισης, συμπίεσης, συμπύκνωσης και εκτόνωσης. Το ψυκτικό υγρό χρησιμοποιείται ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας που κυκλοφορεί μέσα στην αντλία θερμότητας.

Το γεγονός ότι μια γεωθερμική αντλία θερμότητας μπορεί να προσφέρει θέρμανση και ψύξη την κάνει ιδιαίτερα ελκυστική. Με ένα απλό γύρισμα του διακόπτη στον εσωτερικό θερμοστάτη μπορείτε να περάσετε από την μία λειτουργία στην άλλη. Κατά τη διάρκεια της ψύξης η γεωθερμική αντλία θερμότητας απάγει την θερμότητα από τους εσωτερικούς χώρους και τη μεταφέρει στη δροσερή γη μέσω του γεωεναλλάκτη, ανοικτού ή κλειστού κυκλώματος. Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης η διαδικασία αντιστρέφεται. Τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, έχουν καταστήσει τα συστήματα που λειτουργούν με βάση την αβαθή γεωθερμία ιδιαίτερα αναπτυσσόμενες εφαρμογές σε παγκόσμια κλίμακα. Στην Ευρωπαϊκό χώρο, έχουν βρει ευρεία εφαρμογή σε χώρες όπως η Σουδία, η Γερμανία, η Αγγλία.



Σχήμα 2.2 Η Ευρωπαϊκή αγορά Γ.Α.Θ το 2007



Σχήμα 2.3 Ετήσιες πωλήσεις Γ.Α.Θ σε 9 χώρες το 2007

## 2.2 Γεωεναλλάκτες

Χρησιμοποιώντας το έδαφος σαν πηγή ή δεξαμενή θερμότητας είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί σύνδεση μεταξύ του αντικειμένου το οποίο πρόκειται να θερμανθεί ή να ψυχθεί (κτίριο, κατοικία κλπ. ) και του εδάφους. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνουν οι λεγόμενοι γεωεναλλάκτες. Πρόκειται για υπόγειους αγωγούς τοποθετημένους σε υπόγειες τάφρους ,μέσα από τους οποίους διέρχεται το ρευστό, το οποίο ανάλογα το είδος του συστήματος μπορεί να είναι νερό, ψυκτικό υγρό ή και αέρας. Η σύνδεση αυτή με το έδαφος καλείται κύκλωμα ή βρόγχος. Οι γεωθερμικές αυτές συνδέσεις με το έδαφος μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες ,όπως προαναφέρθηκε:

- Γεωεναλλάκτες κλειστού βρόγχου οι οποίοι εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που βρίσκεται αποθηκευμένη στους γεωλογικούς σχηματισμούς.
- Γεωεναλλάκτες ανοιχτού βρόγχου οι οποίοι εκμεταλλεύονται την παρουσία υπόγειου νερού ή επιφανειακού υδροφόρου ορίζοντα.



Γεωεναλλάκτης οριζώντιος



Γεωεναλλάκτης κατακόρυφος

Σχήμα 2.4 Γεωεναλλάκτες κλειστού βρόγχου α)οριζώντιος β)κατακόρυφοι



Γεωεναλλάκτες ανοιχτού βρόγχου

Σχήμα 2.5 Γεωεναλλάκτης ανοιχτού βρόγχου

Οι παράγοντες σχεδιασμού που επηρεάζουν το είδος του κυκλώματος που θα εφαρμοσθεί είναι:

- Οι γεωλογικές συνθήκες (τα θερμικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους),
- Οι τεχνικές παράμετροι όπως είναι το μήκος η διάμετρος και το υλικό του αγωγού που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και το είδος και η ποιότητα του υλικού εμποτισμού των αγωγών
- Το απαιτούμενο θερμικό και ψυκτικό φορτίο
- Το εμβαδό του κτιρίου που πρόκειται να θερμανθεί/ψυχθεί, καθώς και η διαθέσιμη επιφάνεια του οικοπέδου
- Η θερμοκρασία του εδάφους

Το κύριο πλεονέκτημα ενός γεωθερμικού συστήματος κλειστού κυκλώματος έναντι του ανοιχτού είναι το γεγονός ότι το πρώτο είναι ανεξάρτητο από υπάρχοντες υδροφορείς και το είδος του νερού που κυκλοφορεί σε αυτούς. Τουναντίον, γεωθερμικά συστήματα ανοιχτού κυκλώματος παρουσιάζουν μεγαλύτερη ικανότητα μετάδοσης θερμότητας από γεωτρήσεις σε σύγκριση με κάθετα συστήματα κλειστού βρόγχου. Ανάλογα με το ρευστό που κυκλοφορεί στο εσωτερικό των γεωεναλλακτών διακρίνονται σε:

- Γεωθερμικά συστήματα ,στα οποία το ρευστό που κυκλοφορεί είναι νερό ή αντιψυκτικό υγρό
- Γεωθερμικά συστήματα ,στα οποία το ρευστό που κυκλοφορεί είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας



Σχήμα 2.6 Υπόγεια εγκατάσταση συστήματος

### 2.2.1 Συστήματα ανοικτού τύπου

Τα συστήματα ανοικτού κύκλου αντλούν το νερό επιφανειακών υδρολογικών σχηματισμών της περιοχής για την τροφοδοσία του πρωτεύοντος κυκλώματος της αντλίας θερμότητας. Το νερό αφού αποδώσει την ενέργεια του στο σύστημα στη συνέχεια επαναπροωθείται στην πηγή από την οποία αντλήθηκε, είτε σε ένα γειτονικό υδροφόρο στρώμα της περιοχής. Ο υδρολογικός σχηματισμός μπορεί να είναι είτε επιφανειακός (θάλασσα, λίμνη, ποτάμι), είτε υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας μέσω γεώτρησης ή πηγαδιού.

Για την σωστή λειτουργία του συστήματος πρέπει να υπάρχει σταθερή παροχή νερού καθ' όλη την διάρκεια του έτους. Η απαιτούμενη παροχή του νερού εξαρτάται από τις θερμικές απώλειες του χώρου θέρμανσης και την ισχύ που απορροφά ο συμπιεστής της ΓΑΘ. Ενδεικτικά για την θέρμανση μιας μονοκατοικίας με εμβαδόν  $150 \text{ m}^2$  η μαζική παροχή του νερού, είναι της τάξης των  $2 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Τα συστήματα ανοικτού τύπου διακρίνονται σε:

- α) φρέατος
- β) επιφανειακά
- γ) μεικτά

#### Συστήματα φρέατος ανοικτού τύπου

Τα συστήματα φρέατος με την βοήθεια της αντλίας αναρρόφησης αντλούν νερό από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα μέσω γεώτρησης και αφού αυτό αποδώσει την θερμική του ενέργεια στον χώρο που θέλουμε, απορρίπτεται στον ίδιο υδροφόρο ορίζοντα με την βοήθεια μιας δεύτερης αντλίας απόρριψης και του κατάλληλου σωλήνα της σε αρκετή απόσταση και κατάντη του σημείου άντλησης για να αποφεύγεται η ανάμιξη του νερού.

#### Επιφανειακά συστήματα ανοικτού τύπου

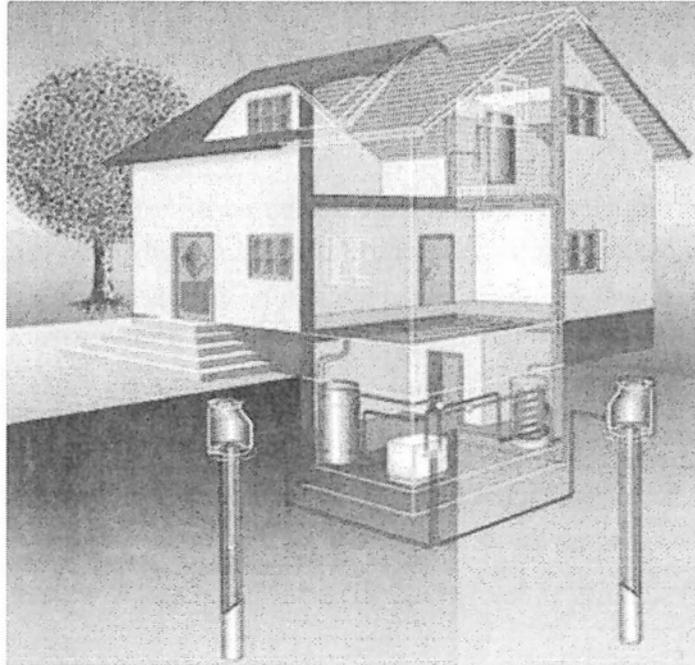
Στα επιφανειακά συστήματα ανοικτού τύπου με την βοήθεια της αντλίας αναρρόφησης αντλούν νερό από μια επιφανειακή πηγή, (θάλασσα, λίμνη, ποταμός) και αφού αυτό αποδώσει την θερμική του ενέργεια στον χώρο που θέλουμε, απορρίπτεται στην ίδια επιφανειακή πηγή.

#### Μεικτά συστήματα ανοικτού τύπου

Τα μεικτά συστήματα ανοικτού τύπου αποτελούν ένα συνδυασμό συστήματος φρέατος και επιφανειακού. Το νερό με την βοήθεια της αντλίας αναρρόφησης αντλείται είτε από την επιφανειακή πηγή, είτε από το φρέαρ και αφού αυτό αποδώσει την



θερμική του ενέργεια στον χώρο που θέλουμε, απορρίπτεται αντίστοιχα, είτε στο φρέαρ είτε στην επιφανειακή πηγή. Δηλαδή τα σημεία άντλησης και απόρριψης του νερού είναι διαφορετικά.



Σχήμα 2.7 Σύστημα φρέατος αβαθούς γεωθερμίας ανοιχτού τύπου για θέρμανση κατοικίας



Σχήμα 2.8 Μεικτό σύστημα αβαθούς γεωθερμίας για θέρμανση κατοικίας

Σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν την λειτουργία αλλά και το βαθμό απόδοσης των υπεδαφικών ανοιχτών συστημάτων είναι:

α) Η ποιότητα του υπόγειου νερού ώστε να μην δημιουργούνται διαβρώσεις ή φραξίματα στην υποβρύχια αντλία από σωματίδια στο νερό.

β) Η ποιότητα της γεώτρησης και ειδικά ο τρόπος κατασκευής, η χαλίκωση γύρω από το φίλτρο και η σταθεροποίηση των διαφορετικών σχηματισμών του υπεδάφους.

γ) Ο σχεδιασμός των γεωτρήσεων όσον αφορά την απόσταση μεταξύ της γεώτρησης άντλησης και αυτής της επαναφοράς, η διάμετρος της γεώτρησης και της εσωτερικής σωλήνωσης.

δ) Αρτεσιανά νερά παρουσιάζουν μεταβολές στις θερμοκρασίες του νερού και μεταβάλλουν τους συντελεστές απόδοσης.

Σε περιπτώσεις που η γειννίαση με τη θάλασσα ή με λίμνη είναι τέτοια που να επιτρέπει την χρήση της, δεν υπάρχει ανάγκη για διάνοιξη γεωτρήσεων αφού με ένα απλό υδραυλικό δίκτυο το νερό προσάγεται και απάγεται από την αντλία θερμότητας μέσω ενός κυκλοφορητή. Φυσικά στα συστήματα αυτά και ειδικά στις θάλασσας, είναι απαραίτητος ο ενδιάμεσος εναλλάκτης θερμότητας από τιτάνιο -Ti-, ή ντουραλουμίνιο -Ni/Cu-, για να προστατεύει τα εσωτερικά κυκλώματα της αντλίας θερμότητας από το υφάλμυρο νερό.

Τα συστήματα ανοιχτού τύπου προτείνονται:

Όταν υπάρχει συνεχόμενη και πλούσια υδροφορία χωρίς μεταβολές στη στάθμη της (π.χ. παραθαλάσσιες περιοχές) με σταθερή παροχή. Ενδείκνυται για ενεργή και παθητική ψύξη.

Πλεονεκτήματα:

- Σταθερή και υψηλή απόδοση σε όλη την διάρκεια του χρόνου.
- Απαιτείται μικρή επιφάνεια εδάφους.
- Πολύ υψηλός βαθμός απόδοσης ( $> 5$ ).

Μειονεκτήματα:

- Υψηλό κόστος επένδυσης.
- Εξειδικευμένη εγκατάσταση.
- Περιορισμοί από την ποιότητα του νερού.
- Άμεση εξάρτηση της απόδοσης του συστήματος από την παροχή νερού της γεώτρησης.

### 2.2.2 Συστήματα κλειστού τύπου

Τα συστήματα κλειστού τύπου αποτελούνται από ένα κλειστό δίκτυο σωληνώσεων πολυαιθυλενίου, το οποίο βρίσκεται θαμμένο στο έδαφος σε κάθετη ή οριζόντια διάταξη ή είναι ποντισμένο σε κάποια λίμνη. Το δίκτυο σωληνώσεων στην περίπτωση αυτή ονομάζεται γεωεναλλάκτης, μέσα στον οποίο κυκλοφορεί νερό ή διάλυμα νερού/αντιπηκτικού, (π.χ. νερού και αιθυλενογλυκόλης), ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και ανταλλάσει ενέργεια με το έδαφος.

Τα συστήματα κλειστού τύπου διακρίνονται σε:

- α) οριζόντια
- β) κατακόρυφα

#### Οριζόντια συστήματα κλειστού τύπου

Ο οριζόντιος γεωεναλλάκτης κατασκευάζεται σε σκάμμα ορισμένης επιφάνειας στον περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου σε βάθος 1,0-2,5m και με πυκνότητα σωληνώσεων 0,5-0,8m. Στο επίπεδο αυτό αναπτύσσεται το οριζόντιο σύστημα αποτελούμενο από κυκλώματα σωλήνων δικτυωμένου πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας μέγιστου μήκους 100m, τα οποία μέσω των επιμέρους συλλεκτών οδηγούνται στην αντλία θερμότητας.

Στο οριζόντιο κλειστό γεωθερμικό σύστημα το υπέδαφος λειτουργεί και ως εποχιακή αποθήκη θερμικής και ψυκτικής ενέργειας, γεγονός που συμβάλλει σημαντικά στην υψηλότερη απόδοση της εγκατάστασης.

Τα οριζόντια γεωθερμικά συστήματα αποτελούν ίσως την οικονομικότερη κατασκευαστική λύση από οποιοδήποτε άλλο γεωθερμικό σύστημα. Η απαιτούμενη έκταση που είναι αναγκαία είναι συνάρτηση των θερμικών και ψυκτικών απαιτήσεων του κτιρίου. Για την διαστασιολόγηση του γεωθερμικού εναλλάκτη, απαιτείται η γνώση των θερμοκρασιών του εδάφους και των θερμικών αποκρίσεων στο βάθος εγκατάστασης.

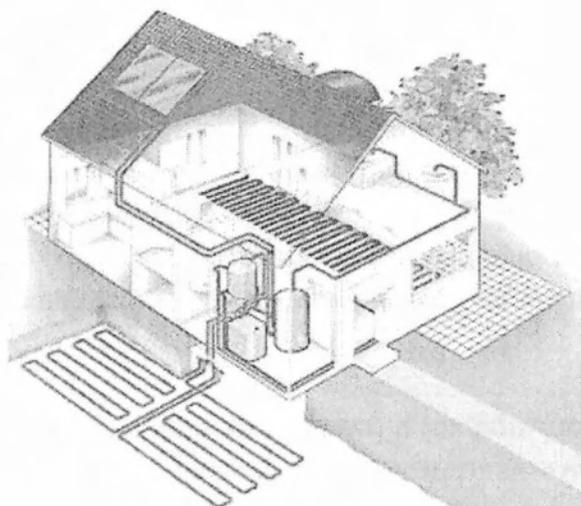
Επιπρόσθετα, καθορίζονται η περιοχή εγκατάστασης, η θερμική αντίσταση του εδάφους και του σωλήνα, καθώς και τα όρια μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας του διαλύματος που εισέρχεται στην αντλία θερμότητας. Η απόδοση του οριζόντιου εναλλάκτη κυμαίνεται μεταξύ 20-35W/m<sup>2</sup>, ανάλογα με τα γεωλογικά στοιχεία του υπεδάφους.

Με την σειρά τους τα οριζόντια συστήματα κλειστού τύπου, ανάλογα με την διάταξη των σωλήνων του γεωεναλλάκτη, διακρίνονται σε:

- 1) Σειριακά

2) Παράλληλα

3) Σπιράλ



Σχήμα 2.9 Οριζόντιο σύστημα σε σειρά αβαθούς γεωθερμίας κλειστού τύπου για θέρμανση κατοικίας.

Τα συστήματα οριζοντίων συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας κλειστού τύπου δίνουν συνήθως  $20-30\text{W}/\text{m}^2$ . Απαιτείται επιφάνεια σκαμμένου εδάφους  $1.5 - 2 \text{m}^2$  ανά  $\text{m}^2$  θερμαινόμενης επιφάνειας. Δηλαδή για μια μονοκατοικία  $150 \text{m}^2$  θερμαινόμενης επιφάνειας απαιτούνται περίπου  $220-300 \text{m}^2$  σκάμματος. Το βάθος εκσκαφής είναι περίπου  $1.20-1.40 \text{m}$ . Κατάλληλα είναι όλα τα εδάφη που μπορούν να σκαφτούν με εκσκαφέα-μπουλντόζα

Τα οριζόντια συστήματα προτείνονται σε περιπτώσεις που υπάρχει διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση του γεωεναλλάκτη, τουλάχιστον διπλάσιου εμβαδού, από το εμβαδόν του χώρου θέρμανσης.

Πλεονεκτήματα:

- Εύκολη τοποθέτηση.
- Μικρό κόστος εγκατάστασης.
- Βαθμός απόδοσης (COP)  $4 - 4.5$ .
- Ευκολότερη αδειοδότηση.

Μειονεκτήματα:

- Απαιτείται μεγάλη επιφάνεια για το στρώσιμο του γεωεναλλάκτη.
- Σχετικά μειωμένη απόδοση στην ψύξη.
- Περιορισμοί στην φύτευση και ενδεχομένως επιρροή στις φάσεις της βλάστηση

### Κατακόρυφα συστήματα κλειστού τύπου

Το μέγεθος του διαθέσιμου ελεύθερου χώρου και η σύσταση του υπεδάφους καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τον τύπο του γεωθερμικού εναλλάκτη. Ο κάθετος γεωεναλλάκτης κλειστού κυκλώματος εφαρμόζεται σε εγκαταστάσεις με περιορισμένο περιβάλλοντα χώρο και σε περιοχές με αδυναμία πρόσληψης νερού από τον υδροφόρο ορίζοντα. Το πλήθος των γεωτρήσεων είναι συνάρτηση της ισχύος της εγκατάστασης, ενώ η απόδοσή των κατακόρυφων συστημάτων παρουσιάζει σταθερότητα σε όλη τη διάρκεια του έτους. Σημαντικό πλεονέκτημα των κάθετων συστημάτων αποτελεί το γεγονός της γρήγορης αποκατάστασης των θερμοκρασιακών διαταραχών του υπεδάφους, οι οποίες προκαλούνται από την εκμετάλλευση του θερμικού περιεχομένου του.

Ο σχεδιασμός, η εγκατάσταση και η δοκιμαστική λειτουργία των γεωθερμικών εναλλακτών περιγράφονται λεπτομερώς και ακολουθούν το γερμανικό πρότυπο VDI 4460. Σύμφωνα με αυτό, η ανάπτυξη του κατακόρυφου γεωθερμικού εναλλάκτη γίνεται με τις παρακάτω γενικές προδιαγραφές.

α) Η διάμετρος της κάθε γεώτρησης είναι 6-8" και το βάθος τους κυμαίνεται μεταξύ 60 –120m.

β) Στα γεωθερμικά συστήματα θέρμανσης-ψύξης, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση σωληνώσεων από ακτινοδικτυωμένο πολυαιθυλένιο Pex για την εξασφάλιση της λειτουργίας σε βάθος χρόνου. Μετά την τοποθέτηση του δικτύου, γίνεται η πλήρωση των γεωτρήσεων με θερμοαγωγίμο μίγμα (τσιμέντο, μπετονίτης ή με το παράγωγο διάνοιξης της ίδιας της γεώτρησης).

γ) Η απόσταση μεταξύ των κάθετων γεωτρήσεων, προτείνεται να είναι μεγαλύτερη των 6m για την αποφυγή τοπικού θερμικού κορεσμού του υπεδάφους.

δ) Η μέση απόδοση του κάθετου γεωθερμικού εναλλάκτη κυμαίνεται μεταξύ 35–65W/m ανάλογα με τα γεωλογικά στοιχεία του υπεδάφους και τη συνεχή απαίτηση σε μέγιστο φορτίο.

Με την σειρά τους τα κατακόρυφα συστήματα κλειστού τύπου, ανάλογα με την διάταξη των σωλήνων του γεωεναλλάκτη, διακρίνονται σε:

- 1) Σειριακά
- 2) Παράλληλα
- 3) Σπιράλ

Τα συστήματα κατακόρυφων συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας κλειστού τύπου δίνουν συνήθως 50-80W/m βάθους γεώτρησης. Για ένα σπίτι 150 m<sup>2</sup> απαιτούνται περίπου 100 - 160 m γεώτρησης. Αυτά μπορούν να μοιραστούν και σε περισσότερες μικρότερες γεωτρήσεις. Το μέγιστο βάθος γεώτρησης είναι συνήθως τα 120 m.

Τα συστήματα αυτά είναι κατάλληλα σχεδόν για όλα τα εδάφη.

Τα συστήματα κατακόρυφων γεωεναλλακτών προτείνονται:

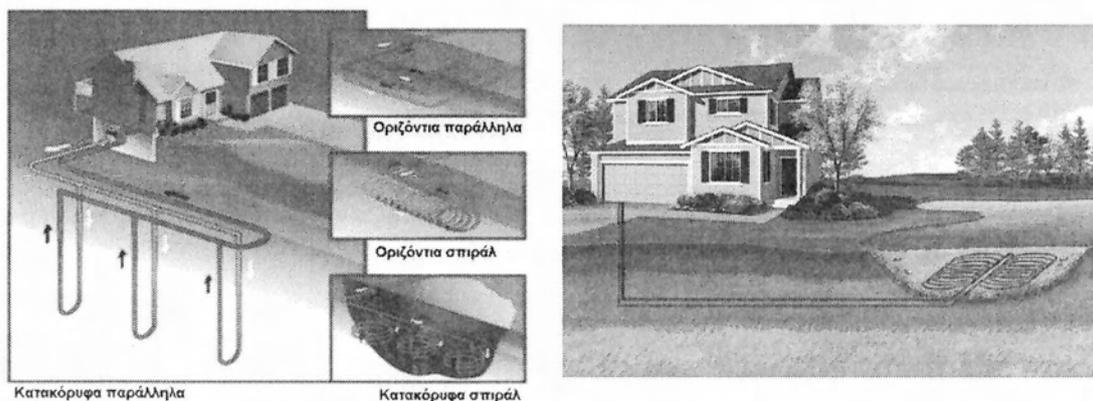
- Όταν δεν επαρκεί ο περιβάλλον χώρος.
- Όταν το έδαφος είναι βραχώδες, οπότε και αντενδείκνυται η χρήση οριζόντιων γεωεναλλακτών.

Πλεονεκτήματα:

- Σταθερή και υψηλή απόδοση σε όλη την διάρκεια του χρόνου.
- Απαιτείται μικρή επιφάνεια εδάφους.
- Βαθμός απόδοσης 4.5 – 5.
- Ενδείκνυται για ενεργή και παθητική ψύξη.

Μειονεκτήματα:

- Υψηλό κόστος επένδυσης.
- Εξειδικευμένη εγκατάσταση.
- Δυσκολότερη αδειοδότηση.

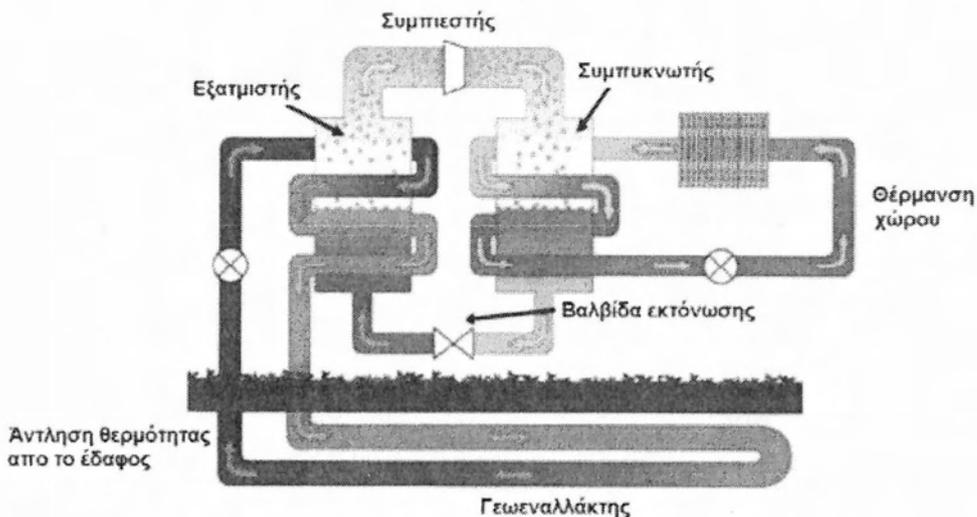


Σχήμα 2.10 Κατακόρυφες και οριζόντιες διατάξεις γεωεναλλακτών αβαθούς γεωθερμίας κλειστού τύπου για θέρμανση

Σχήμα 2.11 Επιφανειακό σύστημα αβαθούς γεωθερμίας κλειστού τύπου για θέρμανση κατοικίας.

### 2.3 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας

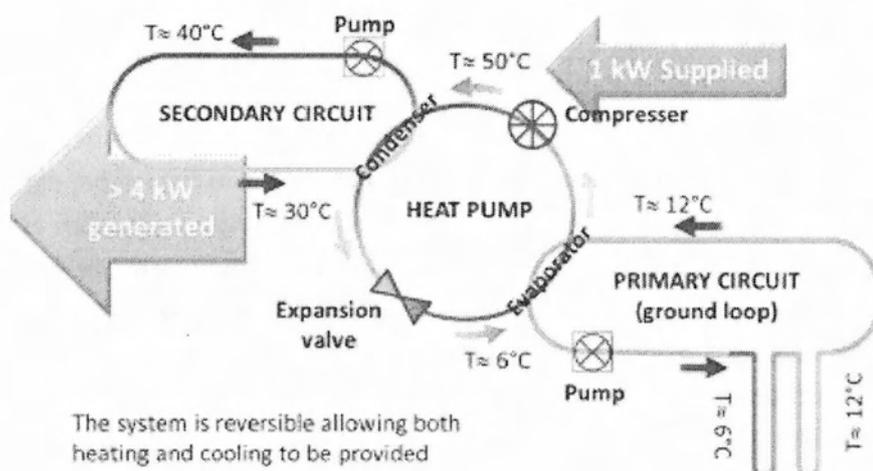
Η διαδικασία μεταφοράς του θερμικού φορτίου από το κτίριο προς το υπέδαφος και αντιστρόφως, γίνεται διά μέσου μίας συσκευής που ονομάζεται γεωθερμική αντλία θερμότητας (ΓΑΘ). Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας είναι διατάξεις που κατευθύνουν τη θερμότητα αντίθετα από τη διεύθυνση που θα ακολουθούσε με φυσικό τρόπο, δηλαδή την εξαναγκάζουν να κατευθυνθεί από ένα ψυχρό μέσο σε ένα άλλο θερμότερο. Οι αντλίες θερμότητας δεν είναι τίποτα περισσότερο από συσκευές που λειτουργούν όπως τα κοινά ψυγεία. Κάθε ψυκτική συσκευή (air-condition, ψυγείο, καταψύκτης κ.λ.π.) παίρνει θερμότητα από ένα χώρο που πρέπει να παραμείνει σε χαμηλή θερμοκρασία και την απελευθερώνει σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η μόνη διαφορά της αντλίας θερμότητας από μια ψυκτική μονάδα εντοπίζεται στην αντιστρέψιμη λειτουργία των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, δηλαδή στην ικανότητά τους να παρέχουν τόσο ψύξη όσο και θέρμανση στο χώρο.



Σχήμα 2.12 Αρχή λειτουργίας συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας για θέρμανση κατοικίας.

Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, το μίγμα νερού και γλυκόλης που κυκλοφορεί στο κύκλωμα του γεωεναλλάκτη απορροφά ενέργεια από το έδαφος, που οδηγείται στον εξατμιστή της ΓΑΘ, ο οποίος τη δεσμεύει. Μέσω του εξατμιστή μεταδίδεται θερμότητα στο ψυκτικό μέσο της αντλίας το οποίο μετατρέπεται από υγρό σε αέριο. Το ψυκτικό μέσο, το οποίο κινείται σε ένα κλειστό κύκλωμα, περνάει από το συμπιεστή και συμπιέζεται, ώστε να αυξηθεί η πίεση και η θερμοκρασία του. Έπειτα, οδηγείται στο συμπυκνωτή όπου και αποβάλλει όλη τη θερμότητα που έχει αποθηκεύσει στο νερό του κυκλώματος της εσωτερικής εγκατάστασης. Το ψυκτικό μέσο μεταφέρεται στη βαλβίδα εκτόνωσης και εκτονώνεται, ώστε να επιστρέψει στον εξατμιστή και να επαναλάβει την ίδια διαδικασία. Η διαδικασία αυτή μπορεί να αν-

τιστραφεί το καλοκαίρι, οπότε οι ΓΑΘ απάγουν θερμότητα από το κτίριο - ή αλλιώς παρέχουν ψύξη/δροσισμό σε αυτό - και τη διοχετεύουν στο υπέδαφος μέσω του γεωεναλλάκτη.



Σχήμα 2.13 Γεωθερμική αντλία θερμότητας και αλληλεπίδραση με το πρωτεύων και δευτερεύων κύκλωμα

## 2.4 Συστήματα διανομής θερμικών-ψυκτικών φορτίων στο εσωτερικό των χώρων.

Με τον όρο συστήματα διανομής θερμικών-ψυκτικών φορτίων στο εσωτερικό του κτιρίου, εννοείται το σύνολο από τα δίκτυα, τα εξαρτήματα και τους αυτοματισμούς που φροντίζουν για την διανομή της παραγόμενης θερμότητας ή ψύξης στο εσωτερικό των κτιρίων. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας έχουν τη δυνατότητα απόδοσης της θερμότητας-ψύξης απευθείας σε συστήματα αέρα ή νερού. Οι αντλίες θερμότητας δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τα κοινά σώματα των καλοριφέρ, καθώς αυτά απαιτούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες νερού, αλλά μόνο με σώματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα (Fan Coils) ή με ενδοδαπέδια / επιτοιχία θέρμανση. Η ενδοδαπέδια θέρμανση είναι και η πιο ενδεδειγμένη καθώς εξασφαλίζει τις βέλτιστες συνθήκες θερμικής άνεσης και επιτρέπει και την εκμετάλλευση άλλων ήπιων συστημάτων όπως οι ηλιακοί συλλέκτες. Επιπλέον είναι ιδανική για χώρους με μεγάλο ύψος καθώς αποτρέπει την θερμική διαστρωμάτωση του αέρα. Εν τέλει ωστόσο, η διαμόρφωση των εσωτερικών δικτύων αποτελεί αρχιτεκτονική επιλογή και αποτέλεσμα μηχανολογικής μελέτης.

### 2.4.1 Ενδοδαπέδια θέρμανση

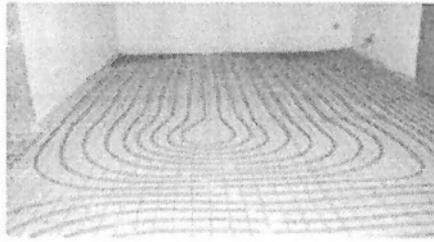
Μία εγκατάσταση ενδοδαπέδιας θέρμανσης καλύπτει απόλυτα τις ανάγκες, κατοικιών, σχολείων, δημόσιων κτηρίων, επαγγελματικών χώρων, ξενοδοχείων, υπόγειων



κατασκευών κλπ χωρίς όμως να περιορίζεται εκεί το εύρος των εφαρμογών της . Λόγω της ομοιόμορφης και οριζόντιας κατανομής θερμότητας από το δάπεδο προς την οροφή, επιτρέπει τηνθέρμανση χώρων με μεγάλο ύψος οροφής όπως βιομηχανικές εγκαταστάσεις , εκκλησίες κτλ. Η ενδοδαπέδια θέρμανση, λειτουργεί με νερό χαμηλής θερμοκρασίας, από 30οC έως 45 οC που κυκλοφορεί σε σωλήνες εγκιβωτισμένους στο δάπεδο. Το ζεστό νερό μεταφέρει θερμότητα στο θερμοπετόν που περιβάλλει τους πλαστικούς σωλήνες και στη συνέχεια το δάπεδο ακτινοβολεί θερμότητα. Αυτό σημαίνει ότι αυτή η μορφή θέρμανσης χρησιμοποιεί σαν θερμαντικό σώμα το δάπεδο και αυτό ακριβώς είναι το χαρακτηριστικό που προσδίδει στην ενδοδαπέδια θέρμανση την πλειοψηφία των πλεονεκτημάτων που εμφανίζει. Η θέρμανση του χώρου πραγματοποιείται με ακτινοβολία θερμότητας από το δάπεδο, και διαχέεται ομοιόμορφα από τα πόδια προς το κεφάλι, προσφέροντας μία αίσθηση θερμικής θαλπωρής. Προσφέρει πολύ χαμηλό λειτουργικό κόστος γιατί λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες, με συνέπεια την χαμηλή κατανάλωση καυσίμου. Το σύστημα αυτό είναι σημαντικά οικονομικότερο, φιλικό προς το περιβάλλον και ταυτόχρονα πολύ αποδοτικό, αφού η επιφάνεια των σωμάτων ενός αντίστοιχου συστήματος, έχει αντικατασταθεί στην δαπεδοθέρμανση, με την επιφάνεια όλου του δαπέδου, με συνέπεια την μεγάλη αύξηση της θερμαντικής ισχύς. Απαλλάσσοντας το κτήριο από τα εμφανή θερμαντικά σώματα, επιτρέπει την εκμετάλλευση όλων των χώρων με λειτουργικό τρόπο προσφέροντας ένα καλαίσθητο αρχιτεκτονικό αποτέλεσμα.

Οι χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας της ενδοδαπέδιας θέρμανσης, απαλλάσσουν από την ξηρότητα του αέρα του χώρου και δίνουν ένα πραγματικά υγιεινό περιβάλλον. Επιπλέον, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών το σύστημα αυτό δεν δημιουργεί ρεύματα αέρα κι έτσι δεν υπάρχουν φαινόμενα όπως μαυρίσματα στους τοίχους ή μεταφορά σωματιδίων και μικροβίων. Ορισμένοι από τους παράγοντες που συμβάλλουν στην απόσβεση του κόστους μιας εγκατάστασης ενδοδαπέδιας θέρμανσης είναι:

- Η μειωμένη κατανάλωση καυσίμων, που προαναφέρθηκε (πάνω από 30%).
- Το μειωμένο κόστος κτηριακής συντήρησης
- Το μηδενικό κόστος συντήρησης και αντικατάστασης θερμαντικών σωμάτων
- Αύξηση του χρόνου ζωής του καυστήρα ο οποίος λειτουργεί λιγότερες ώρες.



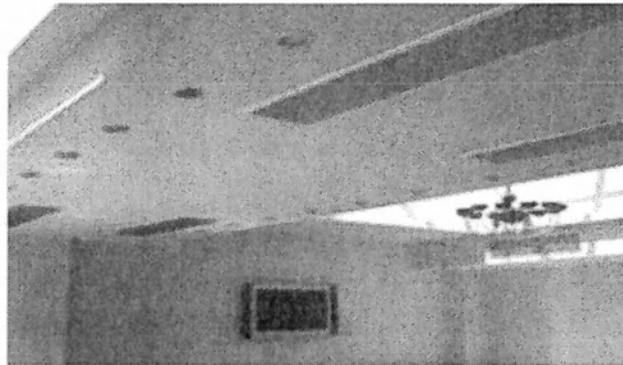
Σχήμα 2.13 Ενδοδαπέδια θέρμανση

Το σύστημα δαπεδοδροσισμού λειτουργεί εκμεταλλευόμενο το ήδη υπάρχον δίκτυο σωληνώσεων τις ενδοδαπέδιας θέρμανσης . Είναι ένα λειτουργικό σύστημα που προσφέρει άνεση, απορροφώντας ομοιόμορφα θερμότητα από όλες τις κατευθύνσεις. Όταν αναφερόμαστε στην έννοια του δροσισμού εννοούμε ότι μετατρέπουμε το δάπεδο σε μια τεράστια ψυχρή επιφάνεια. Η θερμοκρασία νερού προσαγωγής του δροσισμού στις σωληνώσεις είναι 18 οC – 20 οC, ενώ η θερμοκρασία του δαπέδου είναι 20 οC - 22οC. Με την λειτουργία του δροσισμού επιτυγχάνουμε μείωση της θερμοκρασίας του χώρου 4 οC – 6 οC. Η πηγή ενέργειας που τροφοδοτεί μία εγκατάσταση ενδοδαπέδιας θέρμανσης – δροσισμού είναι η αντλία θερμότητας αέρα-νερού. Ο δροσισμός θα μπορούσε να τεθεί σε λειτουργία πολύ αργότερα από την ενδοδαπέδια θέρμανση αρκεί κατά την εγκατάσταση του συστήματος να έχει ληφθεί μέριμνα για τοποθέτηση τερματικών μονάδων νερού στο χώρο, οι οποίες θα εξυπηρετήσουν στην αφύγρυνση του κατά τη λειτουργία του δαπεδοδροσισμού, καθώς και των σωλήνων προσαγωγής και επιστροφής κρύου νερού για την τροφοδοσία τους και του σχετικού συστήματος αυτονομίας.

Ο δροσισμός λόγω της χρήσης μεγάλης ψυκτικής επιφάνειας εμφανίζει πλεονεκτήματα όπως άνεση και υγιεινό περιβάλλον, απόλυτη ελευθερία στην διαμόρφωση των χώρων, μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας και μειωμένο αρχικό κόστος κτήσης αφού χρησιμοποιούμε το ήδη υπάρχον δίκτυο σωληνώσεων, ενώ το ψυκτικό μηχάνημα υπό διαστασιολογείται γιατί στην συγκεκριμένη εγκατάσταση εκμεταλλευόμαστε την αδράνεια και την θερμοχωρητικότητα του συστήματος.

#### 2.4.2 Σώματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας

Παρόμοια με την ενδοδαπέδια εγκατάσταση που προαναφέρθηκε, έτσι και τα σώματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα (fan coil) , απαιτούν για την λειτουργία τους νερό χαμηλών θερμοκρασιών. Τα Fan Coils μοιάζουν εξωτερικά με τα κοινά κλιματιστικά, αλλά λειτουργούν με τροφοδοσία θερμού ή κρύου νερού, το οποίο χρησιμοποιούν για να ζεστάνουν ή να δροσίσουν τον αέρα. Αντίθετα με τα κλιματιστικά, τα Fan Coils δεν χρειάζονται πολλές μικρές μονάδες στους εξωτερικούς χώρους, αλλά μόνο μία κεντρική αντλία θερμότητας.



Σχήμα 2.14 Fan Coils ενσωματωμένα στην οροφή

Μία μονάδα fan coil είναι ένα απλό μηχάνημα το οποίο ουσιαστικά αποτελείται από ένα θερμικό/ψυκτικό πηνίο και τον ανεμιστήρα. Η λειτουργία τους βασίζεται στην θέρμανση –ψύξη του ψυκτικού μέσου που ρέει στις σπείρες σωλήνων στο εσωτερικό τους οι οποίες με τη σειρά τους θερμαίνουν ή ψύχουν τον αέρα που κυκλοφορεί μέσω των ειδικών πτερυγίων και διανέμεται στο εσωτερικό του κτιρίου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η θέρμανση/ψύξη προέρχεται από την αντλία θερμότητας. Κατά την ψυκτική λειτουργία της σπείρας σωληνών, προβλέπεται η ταυτόχρονη αφύγρανση του εισερχόμενου αέρα. Το προϊόν της συμπύκνωσης είναι διασταλλάζοντας υγρά η απομάκρυνση των οποίων πραγματοποιείται με ειδικό κύκλωμα αποστράγγισης. Τα σώματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας μπορούν να είναι εντοιχισμένα στην οροφή και στο δάπεδο καθώς και εγκατεστημένα σε φανερά σημεία ανάλογα με τα συμβατικά σώματα θέρμανσης. Συγκριτικά με τα συμβατικά κλιματιστικά θέρμανσης/ψύξης αποτελούν πολύ οικονομικότερη επιλογή. Από τον πίνακα του σχήματος 2.4.1 φαίνεται πως η απόδοση (COP) της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας είναι μικρότερη στην περίπτωση των α coils απ'ότι στην ενδοδαπέδια θέρμανση το οποίο προκύπτει και από το γεγονός ότι απαιτούν μεγαλύτερες θερμοκρασίες για τη λειτουργία τους. Η εξοικονόμηση χρημάτων σε σύγκριση με ένα σύστημα καυστήρα-λέβητα εκτιμάται στο 55% , ενώ όσον αφορά την ψύξη, η εξοικονόμηση χρημάτων αγγίζει το 35% συγκριτικά με ένα κλιματιστικό αέρα-αέρα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Ο ΠΑΣΣΑΛΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΩΣ ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ (ENERGY PILE)

#### 3.1 Εισαγωγή

Η ιδέα της αξιοποίησης των πασσάλων θεμελίωσης για τη σύζευξή τους με τα συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού των κτιρίων διερευνάται συστηματικά στην Αυστρία, στην Ελβετία και στη Γερμανία από τα μέσα της δεκαετίας του '80. Στο σώμα των πασσάλων θεμελίωσης ενσωματώνονται βρόχοι σωλήνων, μέσω των οποίων είναι δυνατή η ανταλλαγή θερμότητας με το ίδιο το σώμα τους και με το έδαφος που τους περιβάλλει. Στη σχετική βιβλιογραφία της αρχικής αυτής φάσης παρουσιάζεται η τεχνική κατασκευής των πασσάλων – γεωεναλλακτών, των Energy Piles όπως επικράτησε να ονομάζονται και οι πρώτες εφαρμογές της στη Βόρεια Ευρώπη. Περίπου μια δεκάδα συστημάτων με πασσάλους – γεωεναλλάκτες είχε εγκατασταθεί μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '90 στην Ελβετία και στην Αυστρία. Ωστόσο ερευνητές αναφέρουν ότι η ιδέα της χρήσης των πασσάλων θεμελίωσης για τη θέρμανση και τον κλιματισμό των κτιρίων είχε διατυπωθεί στην Ιαπωνία ήδη από το 1962. Έμφαση στη χώρα αυτή δόθηκε στους χαλυβδοπασσάλους – γεωεναλλάκτες που προτάθηκαν και δοκιμάστηκαν από το 1994. Οι σχετικές τεχνικές στους πασσάλους αυτού του τύπου αναπτύχθηκαν αρχικά στην Αυστρία στην Ελβετία και στη Γερμανία. Σχετικά πρόσφατα εφαρμογές αναφέρονται σε όλες σχεδόν τις Ευρωπαϊκές χώρες, στον Καναδά και στις χώρες της ΝΑ Ασίας. Η σημαντική ερευνητική δουλειά στους χαλυβδοπασσάλους – γεωεναλλάκτες που γίνεται στην Ιαπωνία επεκτάθηκε την τελευταία δεκαετία και στους πασσάλους από σκυρόδεμα.

#### 3.2 Το πεδίο των πασσάλων θεμελίωσης κτιρίου ως γεωεναλλάκτης

Από την ενεργειακή πλευρά, με την ενσωμάτωση δικτύων σωλήνων στους πασσάλους θεμελίωσης κτιρίων, όπου αυτοί απαιτείται να κατασκευαστούν, επιδιώκεται η θερμική ενεργοποίηση της ίδιας της θεμελίωσης και της περιοχής του εδάφους που βρίσκεται κάτω από το κτίριο. Στόχος είναι η βελτιωμένη λειτουργία των εγκαταστάσεων θέρμανσης και ψύξης των κτιρίων. Οι εκτεταμένες και ιδιαίτερα δαπανηρές εργασίες που έτσι κι αλλιώς θα λάβουν χώρα στο υπέδαφος για τη θεμελίωση

ενός κτιρίου δίνουν την ευκαιρία να κατασκευαστεί, κάτω από το κτίριο, κάτι αντίστοιχο με το πεδίο των κατακόρυφων βρόχων σε γεωτρήσεις (κατακόρυφες γεωτρήσεις - boreholes).

Από την άποψη του τρόπου της θερμικής ενεργοποίησης του εδάφους, τα συστήματα των γεωεναλλακτών γενικά μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει τα συστήματα στα οποία στον γεωεναλλάκτη, δηλαδή στην θερμικά ενεργοποιούμενη περιοχή του εδάφους, κυριαρχεί ο μηχανισμός της θερμικής αναγέννησής της. Αυτό συμβαίνει σε συστήματα με μία μόνο φάση λειτουργίας, δηλαδή κατά βάση στα συστήματα που λειτουργούν μόνο για τη θέρμανση των κτιρίων. Στα συστήματα αυτά κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους απορροφάται θερμότητα από το έδαφος.

Μέρος αυτής της θερμότητας ανακτάται στην ενεργοποιούμενη περιοχή του εδάφους από τις εισροές θερμότητας από τις συνορεύουσες περιοχές. Μετά το πέρας της περιόδου θέρμανσης τα συστήματα αυτού του τύπου τίθενται εκτός λειτουργίας για μεγάλη περίοδο. Έτσι η περιοχή του ενεργοποιημένου εδάφους αναγεννιέται θερμικά, με τη μετάδοση της θερμότητας από τις περιοχές εκτός των ορίων της (επιφάνεια του εδάφους, περιοχές του υπεδάφους σε επαφή με την περιοχή του γεωεναλλάκτη). Τυπικό παράδειγμα τέτοιων συστημάτων είναι αυτά των οριζόντιων γεωεναλλακτών που αναπτύσσονται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Το μεγαλύτερο τμήμα των εκροών θερμότητας από την ενεργοποιούμενη περιοχή του εδάφους που απαιτείται για την κάλυψη των απαιτήσεων του κτιρίου σε θέρμανση, προέρχεται κυρίως από την ηλιακή ενέργεια που απορροφάται στην επιφάνεια του εδάφους.

Ο μηχανισμός της θερμικής αναγέννησης κυριαρχεί επίσης σε συστήματα, άσχετα με τις φάσεις απαιτήσεών τους σε θέρμανση ή ψύξη, στα οποία στην περιοχή του γεωεναλλάκτη η θερμική διαχυτότητα του εδάφους είναι μεγάλη. Αυτό είναι δυνατό να συμβεί περισσότερο στα πεδία των πασσάλων – γεωεναλλακτών όπου είναι πιθανή η διαβροχή τους από υπόγεια νερά που βρίσκονται σε κίνηση (ταχύτητα του υπόγειου νερού στον υδροφόρο ορίζοντα μεγαλύτερη από 0,5 m/ημέρα). Η θερμότητα που μεταφέρεται στην περίπτωση αυτή από ή προς το έδαφος γρήγορα διαχέεται στην ενεργοποιούμενη περιοχή του εδάφους, αλλά και στην περιοχή έξω από αυτήν. Στα συστήματα αυτού του τύπου κρίσιμο ζήτημα είναι η θερμική «ρύπανση» που μπορεί να προκληθεί στην περιοχή έξω από το πεδίο. Αυτή μπορεί να είναι είτε στην περιοχή του εδάφους αμέσως έξω από τα όρια του οικοπέδου του κτιρίου, είτε στον υδροφόρο ορίζοντα. Πιθανές απαγορευτικές σχετικές διατάξεις μπορεί να μην επιτρέψουν την εγκατάσταση συστημάτων αυτού του τύπου σε μια περιοχή.

Στη δεύτερη κατηγορία εντάσσονται τα συστήματα που σε ετήσια βάση αξιοποιούν την ενεργοποιούμενη περιοχή του εδάφους κυρίως ως αποθήκη θερμότητας. Θερμότητα που απορρίπτεται στην ενεργοποιούμενη περιοχή του εδάφους κατά τη δι-

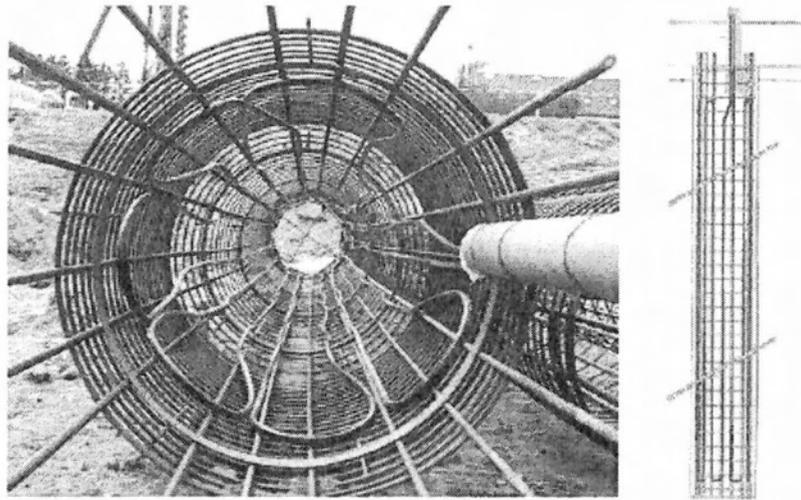
άρκεια της θερινής περιόδου (ψύξη στο κτίριο), δεν απομακρύνεται εύκολα έξω από την περιοχή, αλλά αποθηκεύεται σε αυτήν και χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου (θέρμανση στο κτίριο). Κρίσιμο ζήτημα εδώ είναι η σχέση μεταξύ των απαιτήσεων του κτιρίου σε θέρμανση και σε ψύξη. Όταν οι διαφορές των απαιτήσεων αυτών είναι μεγάλες, υπάρχει μια βαθμιαία άνοδος ή πτώση της θερμοκρασίας από χρονιά σε χρονιά, που μπορεί να καταστήσει τη λειτουργία του συστήματος αντιοικονομική.

### 3.3 Οι τεχνικές κατασκευής πασσάλων – γεωεναλλακτών

Ένας πάσσαλος θεμελίωσης από σκυρόδεμα για να λειτουργεί ως γεωεναλλάκτης έχει στο σώμα του ενσωματωμένο ένα δίκτυο σωλήνων μέσα στο οποίο κυκλοφορεί ρευστό που αποτελεί το μέσο μεταφοράς θερμότητας από το έδαφος προς το κτίριο και αντίστροφα.

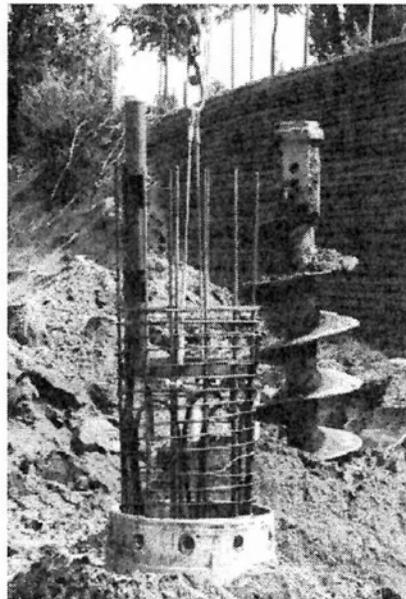
Η τεχνική που έχει αναπτυχθεί για την κατασκευή έγχυτων πασσάλων – γεωεναλλακτών σε γενικές γραμμές ακολουθεί τα παρακάτω βήματα

1. Στη μονάδα κατασκευής του οπλισμού του πασσάλου ή επί τόπου στο εργοτάξιο, μετά την κατασκευή του οπλισμού, προσαρμόζονται επάνω του σωλήνες πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HD-PE) ονομαστικής πίεσης λειτουργίας 10 ή 16 atm. Οι σωλήνες τοποθετούνται ώστε να αναπτύσσονται με τα ευθύγραμμα μήκη κατά μήκος του οπλισμού, σχηματίζοντας πολλαπλούς βρόχους, δηλαδή πολλαπλά U (σχήμα 3.1). Οι βρόχοι αυτοί είναι κατά το δυνατό ισοκατανεμημένοι σε μια περίμετρο αμέσως μέσα από τον οπλισμό ώστε να προστατεύονται από αυτόν, δεμένοι κυρίως επάνω στο ελικοειδές τσέρκι, επειδή πρέπει να διασφαλιστεί ότι οι σωλήνες θα διατηρήσουν τις θέσεις τους κατά τις επόμενες φάσεις. Είναι πιθανό μάλιστα να απαιτηθεί μείωση του βήματος περιέλιξης στο τσέρκι, ώστε η σύνδεση των σωλήνων να είναι ασφαλέστερη και η προστασία των σωλήνων αποτελεσματικότερη.
2. Στις δύο το ελάχιστο απολήξεις του σωλήνα στο άνω άκρο, που εκτείνονται τουλάχιστον 60 cm επάνω από τη στέψη του πασσάλου τοποθετούνται δικλίδες και μανόμετρο. Το δίκτυο των σωλήνων του πασσάλου πληρώνεται με αέρα υπό πίεση 7 - 8 bar, σφραγίζεται και γύρω από τα άνω άκρα (απολήξεις, δικλίδες, μανόμετρο) εφαρμόζεται προσωρινά προστατευτικός πλαστικός σωλήνας από PVC. Η εφαρμογή πίεσης στους σωλήνες θα τους προστατεύσει κατά την έγχυση και πήξη του σκυροδέματος, ενώ θα επιτρέψει τον έλεγχο της κατάστασης της σωλήνωσης κατά την εξέλιξη των επόμενων σταδίων.



Σχήμα 3.1 Οι βρόχοι σωλήνων και ο οπλισμός σε έγχυτο πάσσαλο – γεωεναλλάκτη. Φωτογραφία της διατομής και σχέδιο καθ' ύψος.

3. Ο οπλισμός μαζί με το δίκτυο των βρόχων των σωλήνων βυθίζεται μέσα στο διάτρημα με προσοχή (σχήμα 3.2), ώστε να μην τραυματιστούν οι σωλήνες. Οι κατασκευές πασσάλων με τις τεχνικές της προστασίας του διατρήματος είτε με χαλυβδοσωλήνες είτε με μπεντονίτη, είναι περισσότερο κατάλληλες για εγκατάσταση βρόχων σωλήνων από ότι εκείνες στις οποίες ο οπλισμός βυθίζεται στην οπή που ήδη έχει πληρωθεί με σκυρόδεμα, γιατί οι σωλήνες των βρόχων καταπονούνται λιγότερο.



Σχήμα 3.2 Βύθιση του οπλισμού με τους βρόχους των σωλήνων μέσα στον χαλυβδοσωλήνα σταθεροποίησης του διατρήματος έγχυτου πασσάλου.

4. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται ώστε να μην τραυματιστούν οι σωλήνες των βρόχων, τόσο κατά τη βύθιση του σωλήνα έγχυσης του σκυροδέματος, όσο και κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των χειρισμών έγχυσης. Μικροί σωλήνες έγχυσης και ιδιαίτερη προσοχή απαιτούνται στους πασσάλους μικρής διαμέτρου. Είναι η φάση στην οποία οι σωληνώσεις δέχονται τις μεγαλύτερες καταπονήσεις, μηχανικές κατά την έγχυση του σκυροδέματος και θερμικές κατά την πήξη του.
5. Μετά την πήξη του σκυροδέματος γίνεται η αφαίρεση της κορυφής του πασσάλου μέχρι το επιθυμητό ύψος και η σύνδεση του οπλισμού του με αυτόν της πλάκας του κτιρίου που εδράζει (σχήμα 3.3). Η εργασία της κοπής στην κορυφή του πασσάλου γίνεται με προσοχή στην περιοχή των άκρων των σωλήνων ώστε αυτοί να μην τραυματιστούν. Στη συνέχεια αφαιρείται ο προστατευτικός σωλήνας των άκρων και γίνονται έλεγχοι της κατάστασης των σωλήνων του πασσάλου.



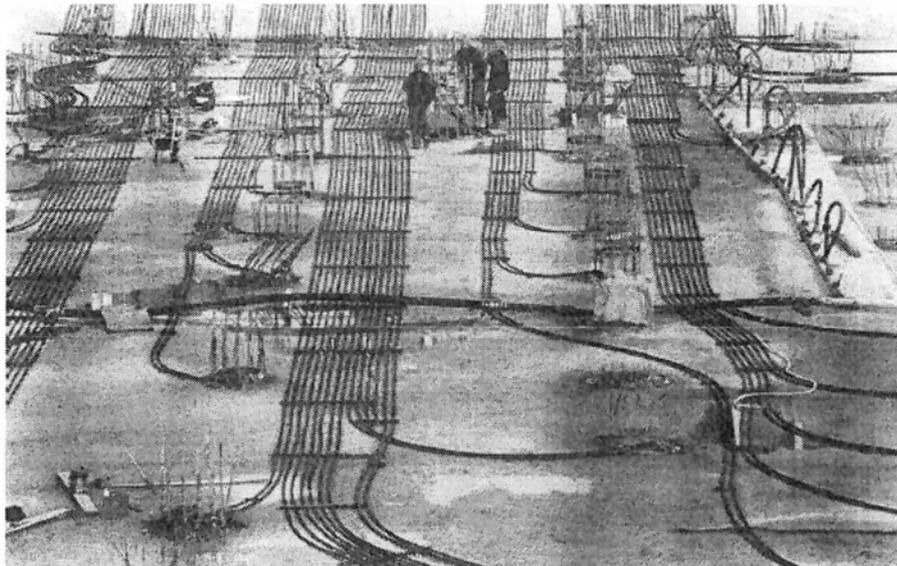
Σχήμα 3.3 Αφαίρεση του σκυροδέματος στην κορυφή έγχυτου πασσάλου για την σύνδεση του οπλισμού του με την πλάκα.

6. Αφαιρείται ο αέρας από τους βρόχους και τα άκρα τους συνδέονται με θερμική σύντηξη με το οριζόντιο συλλεκτήριο δίκτυο. Οι κατασκευή του οριζόντιου συλλεκτήριου δικτύου (σχήμα 3.4) γίνεται με εξαιρετική προσοχή και εξελίσσεται σταδιακά, παράλληλα με τις εργασίες σκυροδέτησης της πλάκας, με τρόπο που να διασφαλίζεται η ορθή εκτέλεση των εργασιών επί των σωληνώσεων και η προστασία τους. Το οριζόντιο δίκτυο τις περισσότερες φορές αναπτύσσεται ακριβώς κάτω από την πλάκα ή στο κάτω μέρος της.



Προτείνεται η κατασκευή ενός ζεύγους οριζόντιων σωλήνων για κάθε πάσσαλο και η συγκέντρωση αυτών των ζευγών κατ' ομάδες σε συλλέκτες – διανομείς (σχήμα 3.5), ώστε να είναι δυνατή η απομόνωση, ο έλεγχος και πιθανόν η αποκοπή κάθε ξεχωριστού δικτύου πασσάλου, εάν υπάρξει πρόβλημα σε αυτό. Η διασύνδεση των συλλεκτών και των διανομέων, η ολοκλήρωση δηλαδή αυτού που ονομάζεται πρωτεύον δίκτυο, γίνεται αργότερα.

7. Μετά την ολοκλήρωση των οικοδομικών εργασιών ολοκληρώνονται οι συνδέσεις των σωλήνων στο οριζόντιο δίκτυο και στους συλλέκτες. Αυτό πληρώνεται με νερό ή υγρό αντιψυκτικό διάλυμα και γίνονται σχολαστικοί έλεγχοι πίεσης σε κάθε κύκλωμα. Η τελική σειρά ελέγχων και ρυθμίσεων θα γίνει μετά τη διασύνδεση των συλλεκτών και των διανομέων με την αντλία θερμότητας



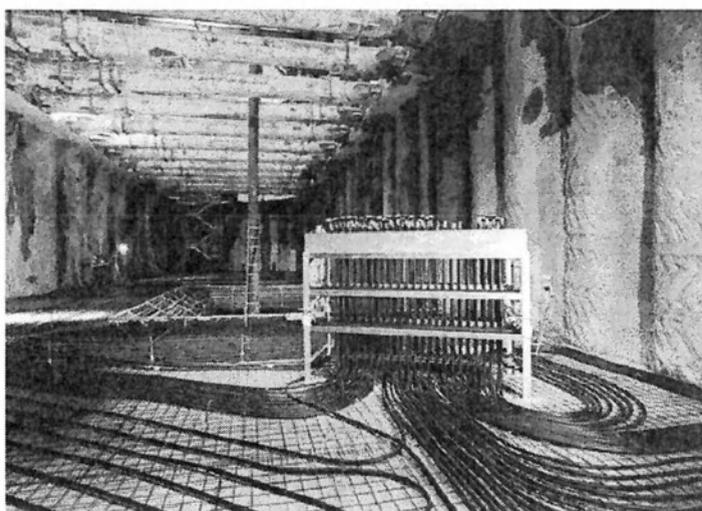
Σχήμα 3.4 Οριζόντιο δίκτυο σε πεδίο πασσάλων γεωεναλλακτών πριν από την σκυροδέτηση της πλάκας.

Είναι φανερό από τα παραπάνω ότι τα κρίσιμα σημεία στην κατασκευή πασσάλων γεωεναλλακτών είναι:

- Μηχανικοί διαφορετικών ειδικοτήτων (γεωτεχνικοί, μηχανικοί θεμελιώσεων, μηχανολόγοι μηχανικοί) πρέπει να έχουν λύσει πριν από την έναρξη κατασκευής, όλα τα τεχνικά προβλήματα τα σχετικά με την κατασκευή των πασσάλων και τη διάταξη των δικτύων. Οι τεχνικές εφαρμογές πρέπει να έχουν πλήρως αποσαφηνιστεί.
- Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην προστασία των σωλήνων των βρόχων σε πρώτη φάση και των σωλήνων των οριζόντιων συλλεκτήριων κυκλωμάτων σε επόμενη, με δεδομένο ότι μετά την έγχυση του σκυρο-

δέματος δεν είναι δυνατή η επισκευή τους. Η προσοχή μάλιστα αυτή πρέπει να δοθεί κάτω από τις δυσμενείς συνθήκες ενός εργοταξίου θεμελιώσεων και σκυροδετήσεων. Αυτό επιβάλλει τεχνικές και ελέγχους που επιβραδύνουν τους ρυθμούς και αυξάνουν το κόστος της κατασκευής της θεμελίωσης και λόγω αυτής της επιβράδυνσης.

- Οι εργασίες κατασκευής των δικτύων και οι υπόλοιπες που σχετίζονται καθαρά με τη θεμελίωση και τις σκυροδετήσεις πρέπει να εξελίσσονται παράλληλα. Πέραν της πολυπλοκότητας στα καθαρά τεχνικά ζητήματα που υπεισέρχονται, πολυπλοκότερος κατά πολύ σε σχέση με τις απλές θεμελιώσεις με πασσάλους γίνεται και ο προγραμματισμός των εργασιών, αφού απαιτείται συντονισμός και συνεργασία πολλών διαφορετικών συνεργείων, πιθανόν και διαφορετικών εργολάβων, μεταξύ τους. Παρόλα αυτά η κατασκευή πασσάλων – γεωεναλλακτών δεν παρουσιάζει ανυπέβλητες δυσκολίες. Οι τεχνικές έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε μεγάλο αριθμό εγκαταστάσεων, ώστε θεωρούνται πλέον δοκιμασμένες.



Σχήμα 3.5 οριζόντιο δίκτυο και συλλέκτες διανομής πρωτεύοντος κυκλώματος σε σύστημα συζευγμένο με πασσάλους- γεωεναλλάκτες.

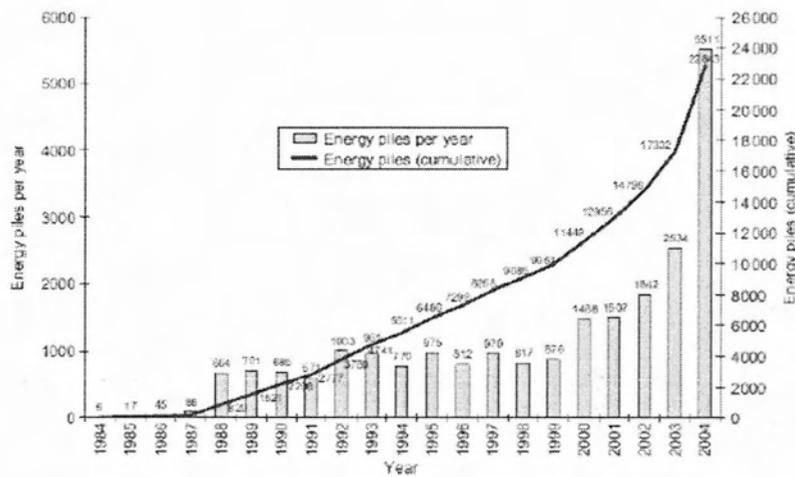
### 3.4 Γνωστές εφαρμογές

Ένας σημαντικός αριθμός συστημάτων με πασσάλους – γεωεναλλάκτες έχει εγκατασταθεί και βρίσκεται σε λειτουργία κυρίως στις χώρες της Κεντρικής και Βόρειας Ευρώπης. Η έκρηξη στους ρυθμούς εγκατάστασης αντίστοιχων συστημάτων παρατηρείται μετά το 2000. Παράλληλα προτάθηκαν νέες εφαρμογές, πέραν του κλιματισμού των κτιρίων, όπως αυτές για την αποπάγωση καταστροφικών γεφυρών. Όπως σημειώθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, οι μεγαλύτεροι αριθμοί συστημάτων έχουν εγκατασταθεί στην Ελβετία, στην Αυστρία, στη Γερμανία και τα τελευταία χρόνια στη Μ. Βρετανία. Μεγάλες εταιρίες κα-

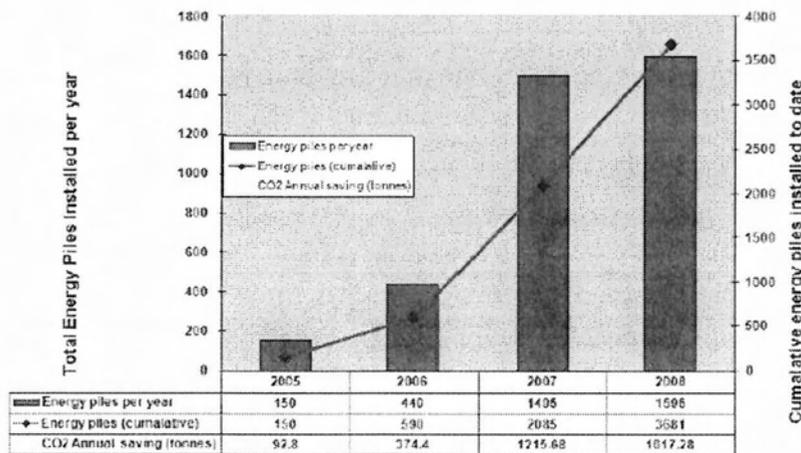
τασκευών θεμελιώσεων δομικών κατασκευών στις χώρες αυτές έχουν εντάξει τους πασσάλους – γεωεναλλάκτες στις δραστηριότητές τους.

Στο σχήμα 3.6 φαίνεται ο ρυθμός κατασκευής πασσάλων γεωεναλλακτών στην Αυστρία κατά την εικοσαετία 1984-2004. Στη χώρα αυτή, μέχρι το 2004 είχαν κατασκευαστεί περισσότεροι από 23000 πάσσαλοι - γεωεναλλάκτες, με ρυθμούς που το 2004 έφτασαν τους 5500 ανά έτος.

Ο ρυθμός αυτός στη Μ. Βρετανία, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7, έφτασε το 2007 τους 1500 πασσάλους ανά έτος, έξι μόλις χρόνια μετά την πρώτη εφαρμογή στη χώρα αυτή .



Σχήμα 3.6 Ο ρυθμός κατασκευής πασσάλων γεωεναλλακτών στην Αυστρία την εικοσαετία 1984-2004



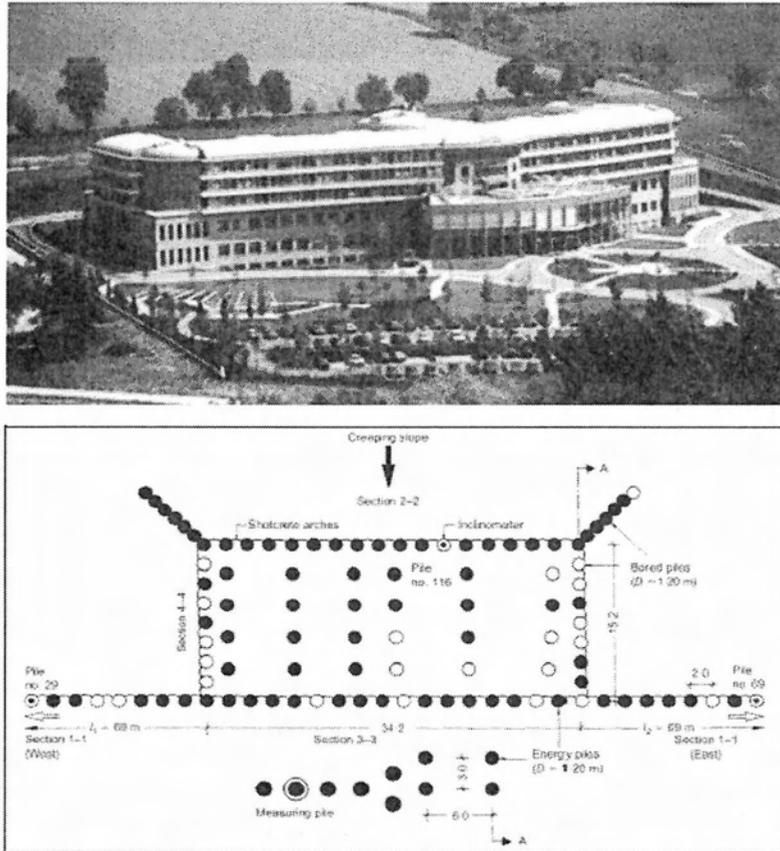
Σχήμα 3.7 Ρυθμός κατασκευής πασσάλων γεωεναλλακτών στην Μ.Βρετανία την τετραετία 2005-2008

Τα συστήματα που ήταν εγκατεστημένα στην Ελβετία και στηρίζονται στους γεωεναλλάκτες που είναι ενσωματωμένοι στις θεμελιώσεις κατασκευών (GeoStructures) είχαν το 2004 συνολική θερμική ισχύ 7 MW και απέδιδαν κατά τη λειτουργία ετήσια συνολικά 15,2 GWh θερμικής ενέργειας. Σε εργασία του Τεχνικού Πανεπιστημίου του Αμβούργου το 2004 καταγράφονται τα χαρακτηριστικά των σημαντικότερων εφαρμογών πασσάλων – γεωεναλλακτών στην Ευρώπη.

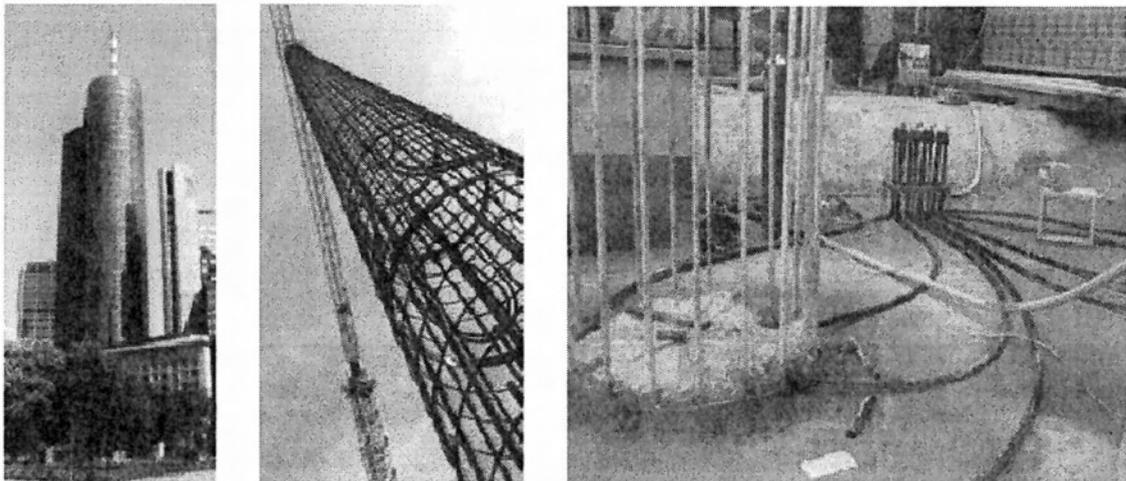
Η εγκατάσταση κέντρου αποκατάστασης στο Bad Schallerbach της Αυστρίας (σχήμα 3.8) είναι μια από τις παλαιότερες εγκαταστάσεις πασσάλων γεωεναλλακτών καθώς ολοκληρώθηκε το 1997. Οι 143 από τους 175 πασσάλους αντιστήριξης και θεμελίωσης του κτιρίου, με διάμετρο 120 cm, έχουν εφοδιαστεί με βρόχους σωλήνων για την ανταλλαγή θερμότητας με το έδαφος. Το συνολικό μήκος των πασσάλων – γεωεναλλακτών είναι 2040 m. Το πεδίο των πασσάλων – γεωεναλλακτών είναι συζευγμένο με αντλία θερμότητας ισχύος 270 kW (στο συμπυκνωτή). Οι καταστάσεις λειτουργίας είναι για θέρμανση, απευθείας ψύξη (direct cooling) και ψύξη μέσω της αντλίας θερμότητας. Η διανομή της θέρμανσης – ψύξης στο κτίριο γίνεται με ενδοδαπέδια κυκλώματα. Στοιχεία για το σύστημα βρίσκει κανείς σε δημοσιεύσεις των Αυστριακών τεχνικών που αναπτύσσουν τις εφαρμογές με εξαιρετική επιτυχία

Η εγκατάσταση πασσάλων – γεωεναλλακτών στο κτίριο γραφείων Main Tower στο κέντρο της Φρανκφούρτης (σχήμα 3.9) είναι μια από τις γνωστότερες και η πρώτη από μια σειρά εφαρμογών του ίδιου τύπου στην ίδια περιοχή. Ο ουρανοξύστης αυτός, ύψους περίπου 200 m με 5 υπόγειους ορόφους, θεμελιώθηκε σε 112 πασσάλους με διάμετρο 1,5 m και μήκος 30 m, σε σκάμμα που δημιουργήθηκε με πασσαλοδιάφραγμα από 260 πασσάλους με διάμετρο 0,9 και 0,5 m. Όλοι οι πάσσαλοι θεμελίωσης και 101 πάσσαλοι του πασσαλοδιαφράγματος, δηλαδή στο σύνολο 213 πάσσαλοι, εφοδιάστηκαν με βρόχους σωλήνων για τη δημιουργία γεωεναλλάκτη. Το πεδίο των πασσάλων – γεωεναλλακτών χρησιμοποιείται κατά βάση για την παραλαβή των αιχμών στη ζήτηση ψύξης κατά τη θερινή περίοδο. Η λειτουργία του συστήματος προβλέπει την αποθήκευση ψύξης στο πεδίο κατά τη χειμερινή περίοδο, για χρήση τη θερινή περίοδο.

Η παραγωγή ψύξης κατά τη διάρκεια του χειμώνα γίνεται από τον αέρα του περιβάλλοντος, μέσω μονάδων ψύξης νερού στο δώμα του κτιρίου, που λειτουργούν κατά τη θερινή περίοδο ως πύργοι ψύξης συζευγμένοι με τους συμβατικούς υδρόψυκτους ψύκτες του κτιρίου. Η εγκατεστημένη ψυκτική ισχύς του πεδίου των πασσάλων γεωεναλλακτών είναι 500 kW και αντιπροσωπεύει το 14% του συνολικού φορτίου ψύξης του κτιρίου. Στοιχεία για την εφαρμογή βρίσκει κανείς σε πολλές 28 δημοσιεύσεις.

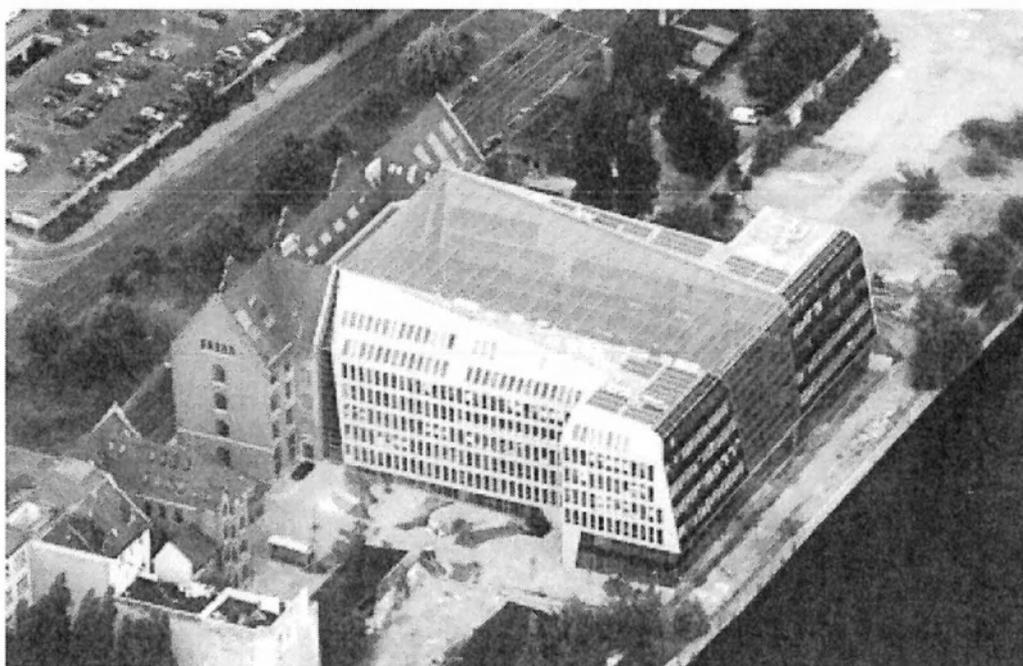


Σχήμα 3.8 Εφαρμογή πασσάλων – γεωναλλακτών στο Bad Schallerbach της Αυστρίας. Επάνω φωτογραφία του κτιρίου και κάτω κάτοψη του πεδίου των γεωναλλακτών. Με μαύρο χρώμα φαίνονται οι πάσσαλοι που εφοδιάζονται με βρόχους σωλήνων.



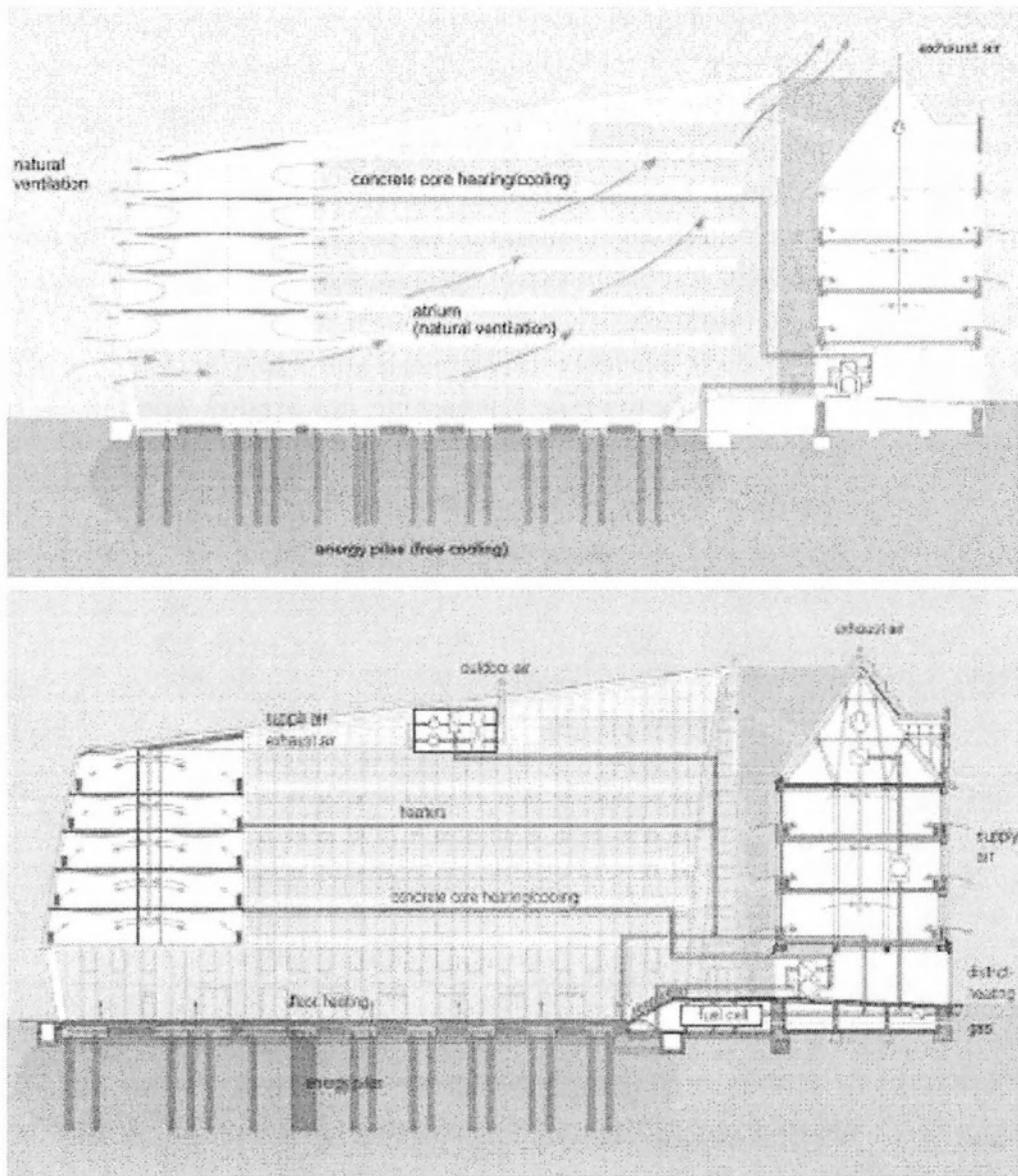
Σχήμα 3.9 Εφαρμογή συστήματος με πασσάλους – γεωναλλάκτες στον ουρανοξύστη Main Tower στη Φρανκφούρτη. Φωτογραφίες του κτιρίου και των πασσάλων – γεωναλλακτών κατά την κατασκευή τους.

Οι 198 πάσσαλοι θεμελίωσης του κτιρίου γραφείων Energieforum στο Βερολίνο, (σχήμα 3.10) έχουν εφοδιαστεί με βρόχους σωλήνων για την ανταλλαγή θερμότητας με το έδαφος. Πρόκειται για πασσάλους αιχμής διαμέτρου 50 cm, που φτάνουν σε βάθος 8,5 m και εδράζουν τις νέες πτέρυγες του κτιρίου και το εσωτερικό αίθριο. Κατά τη χειμερινή περίοδο, το πεδίο των πασσάλων – γεωεναλλακτών είναι συζευγμένο με αντλία θερμότητας ισχύος 100 kW για τη θέρμανση περιοχών του κτιρίου. Κατά τη θερινή περίοδο, προβλέπεται απευθείας ψύξη (direct cooling) περιοχών του κτιρίου μέσω του πεδίου (σχήμα 3.11). Η διανομή θέρμανσης και ψύξης στους χώρους του κτιρίου, γίνεται μέσω κυκλωμάτων νερού σε δάπεδα και οροφή (core concrete heating/ cooling). Το σύστημα είναι σχεδιασμένο για να καλύπτει ένα μικρό σχετικά μέρος των απαιτήσεων θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου και του εσωτερικού του αιθρίου. Οι ειδικές συνθήκες στην περιοχή που αφορούν στη διαχείριση των υπόγειων νερών, απαιτούν την ετήσια ισορροπία στη θερμική φόρτιση και αποφόρτιση του εδάφους.



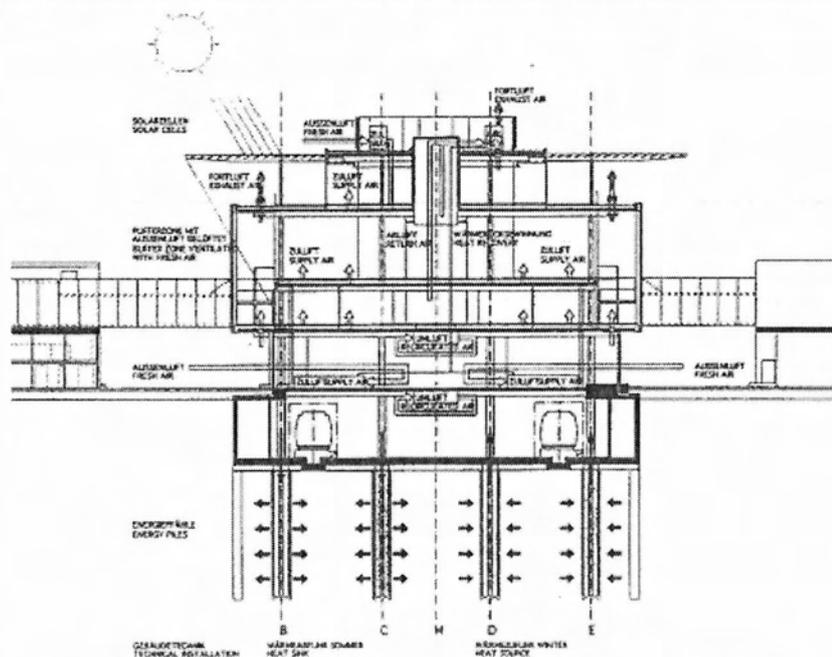
Σχήμα 3.10 Το κτίριο Energieforum στο Βερολίνο





Σχήμα 3.11 Το σύστημα αξιοποίησης των πασσάλων – γεωεναλλακτών κατά τη περίοδο ψύξης (επάνω) και την περίοδο θέρμανσης (κάτω) του κτιρίου Energieforum στο Βερολίνο

Η πληρέστερη από την άποψη της τεκμηρίωσης εφαρμογή είναι αυτή της πτέρυγας E του Αεροσταθμού Dock Midfield της Ζυρίχης. Από τους 350 πασσάλους θεμελίωσης του κτιρίου (σχήμα 3.12), οι 306 έχουν κατασκευαστεί ώστε να λειτουργούν ως γεωθερμικές. Οι πάσσαλοι είναι πάσσαλοι αιχμής, κατασκευασμένοι επί τόπου από σκυρόδεμα, με διαμέτρους 90 - 150 cm και μέσο βάθος 26,8 m. Οι πάσσαλοι – γεωθερμικές είναι συζευγμένοι με μονάδα αντλίας θερμότητας για τη θέρμανση του κτιρίου. Το 85% των ετήσιων απαιτήσεων του κτιρίου σε θέρμανση καλύπτεται από τη λειτουργία του συστήματος της αντλίας θερμότητας και το υπόλοιπο από το δίκτυο τηλεθέρμανσης. Ψύξη του κτιρίου από το πεδίο των γεωθερμικών είναι δυνατή μόνον απευθείας (direct cooling). Όταν δεν είναι δυνατή η κάλυψη των φορτίων ψύξης μέσω του πεδίου πασσάλων – γεωθερμικών, χρησιμοποιείται η αντλία θερμότητας, της οποίας όμως το κύκλωμα ψύξης του συμπυκνωτή οδηγείται σε πύργους ψύξης και όχι στο πεδίο των πασσάλων – γεωθερμικών. Συμβατικοί ψύκτες επίσης αναλαμβάνουν την κάλυψη των φορτίων αερισμού του κτιρίου.



Σχήμα 3.12 Το κτίριο της πτέρυγας E του Αεροσταθμού Dock Midfield της Ζυρίχης. Φωτογραφία του κτιρίου και σχέδιο τομής του





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΑΣΣΑΛΩΝ

#### 4.1 Εισαγωγή

Πριν την περιγραφή του αντικειμένου της αριθμητικής ανάλυσης είναι σημαντικό να αναφέρουμε το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης για την καλύτερη κατανόηση τόσο του προβλήματος όσο και των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Παρατείνονται λοιπόν παρακάτω οι κύριοι τρόποι(μηχανισμοί) μεταφοράς θερμότητας σε κάποιο μέσο, στους εδαφικούς σχηματισμούς, στο σκυρόδεμα και στο σύστημα πασσάλων –γεωεναλλακτών. Περιγράφονται επίσης οι κύριες θερμικές ιδιότητες των εδαφικών σχηματισμών και του σκυροδέματος όπως: η θερμική αγωγιμότητα και ο συντελεστής θερμικής διαστολής.

#### 4.2 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας

##### Γενικά

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι τρεις κύριοι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας (αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία). Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή θα αναπτυχθεί εκτενέστερα καθώς αποτελεί τον κύριο μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας στους εδαφικούς σχηματισμούς.

Κάθε σώμα εμπεριέχει μια συγκεκριμένη ποσότητα εσωτερικής θερμότητας η οποία σχετίζεται με την άτακτη κίνηση των ατομικών σωματιδίων (κινητική και δυνητική ενέργεια) και την φάση αυτού (υγρό, στερεό, αέριο). Αυτή η εσωτερική θερμότητα είναι γνωστή ως θερμική ενέργεια. Η μεταφορά της θερμικής ενέργειας ορίζεται ως θερμότητα και μετριέται σε joule (J). Ροή θερμότητας μπορεί να συμβεί λόγω αλλαγής φάσης ή μέσω των τριών διαφορετικών μηχανισμών: αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία.

##### Αγωγή

Εάν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μέσα σε ένα σώμα, η θερμότητα ρέει από τις περιοχές με υψηλότερες θερμοκρασίες προς τις περιοχές με χαμηλότερες θερμοκρασίες εξαιτίας της αλληλεπίδρασης και της κίνησης των μορίων. Το φαινόμενο αυ-

τό είναι γνωστό ως αγωγή το οποίο συμβαίνει μόνο μέσα ένα σώμα ή μεταξύ δύο σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή.

Η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής ορίζεται στην σταθερή κατάσταση εφόσον ο ρυθμός της μεταφοράς θερμότητας δεν αλλάζει με τον χρόνο (η ποσότητα της θερμότητας που εισρέει στο σώμα είναι ίση με την θερμότητα που εξέρχεται από αυτό). Στην σταθερή κατάσταση, η εμπειρία έχει δείξει ότι η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής εκφράζεται με τον νόμο του Fourier, ο οποίος στην μια διάσταση είναι:

$$\frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dx}$$

Σύμφωνα με τον νόμο του Fourier, ο ρυθμός της μεταφοράς θερμότητας μέσα σε ένα υλικό,  $Q/A$ , είναι ανάλογος με το μέγεθος της θερμοκρασιακής μεταβολής,  $Dt/dx$ . Η σταθερά,  $k$  (W/mK), ονομάζεται θερμική αγωγιμότητα και εκφράζει την ικανότητα ενός συγκεκριμένου υλικού να άγει θερμότητα.

Όταν οι θερμοκρασίες αλλάζουν με τον χρόνο και κατά συνέπεια και οι θερμοκρασιακές μεταβολές δεν είναι σταθερές, η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής βρίσκεται σε προσωρινή κατάσταση. Σε αυτήν την κατάσταση η εξίσωση δεν ισχύει και η μαθηματική επίλυση είναι πιο περίπλοκη καθώς τις περισσότερες φορές απαιτούνται αριθμητικές μέθοδοι ή θεωρίες προσέγγισης. Στην προσωρινή κατάσταση, η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής μπορεί να περιγραφεί με την εξίσωση διάχυσης θερμότητας:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{\rho c}{k} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{D} \frac{dT}{dt}$$

Όπου  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) είναι η πυκνότητα, και  $c$  (J/kg.K) η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού (η ενέργεια ανά μονάδα μάζας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος κατά έναν βαθμό). Η θερμική διαχυτότητα,  $D$  (m<sup>2</sup>/s)=( $k/\rho c$ ), είναι μια μονάδα μέτρησης που δείχνει πόσο γρήγορα ένα υλικό ανταποκρίνεται στις θερμοκρασιακές μεταβολές.

### Συναγωγή

Συναγωγή είναι η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας μέσω της κίνησης ενός υγρού ή ενός αερίου. Γενικά, γίνεται αντιληπτή ως η θερμότητα που μεταφέρεται μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός κινούμενου υγρού σε διαφορετική θερμοκρασία. Για παράδειγμα, μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μπορεί να συμβεί σε διαπερατά εδάφη σαν αποτέλεσμα της ροής. Εάν ο εδαφικός σχηματισμός και το νερό βρίσκον-

ται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, τότε θα έχουμε μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Η συναγωγή μπορεί να περιγραφεί με τον παρακάτω νόμο του Newton:

$$\frac{Q}{A} = h(T - T_f)$$

Όπου  $h$  (W/m<sup>2</sup>K) είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Αυτή η παράμετρος εξαρτάται από τις ιδιότητες του υγρού, όπως το ιξώδες, η πυκνότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα καθώς και από τις ιδιότητες της επιφάνειας, όπως από την τραχύτητα και την γεωμετρία της διεπιφάνειας.  $T$  και  $T_f$  είναι η θερμοκρασία του υγρού και της επιφάνειας αντίστοιχα.

### Ακτινοβολία

Όλα τα σώματα εκπέμπουν συνεχώς ενέργεια μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ένταση της ενέργειας αυτής εξαρτάται από την θερμοκρασία του σώματος και την φύση της επιφάνειάς του. Για παράδειγμα, εάν σταθούμε μπροστά από μια φωτιά η θερμότητα που θα νιώσουμε μεταφέρεται σε εμάς με ακτινοβολία. Ο νόμος του Stefan Boltzmann περιγράφει την ποσότητα της ενέργειας που ακτινοβολείται σε σχέση με την απόλυτη θερμοκρασία:

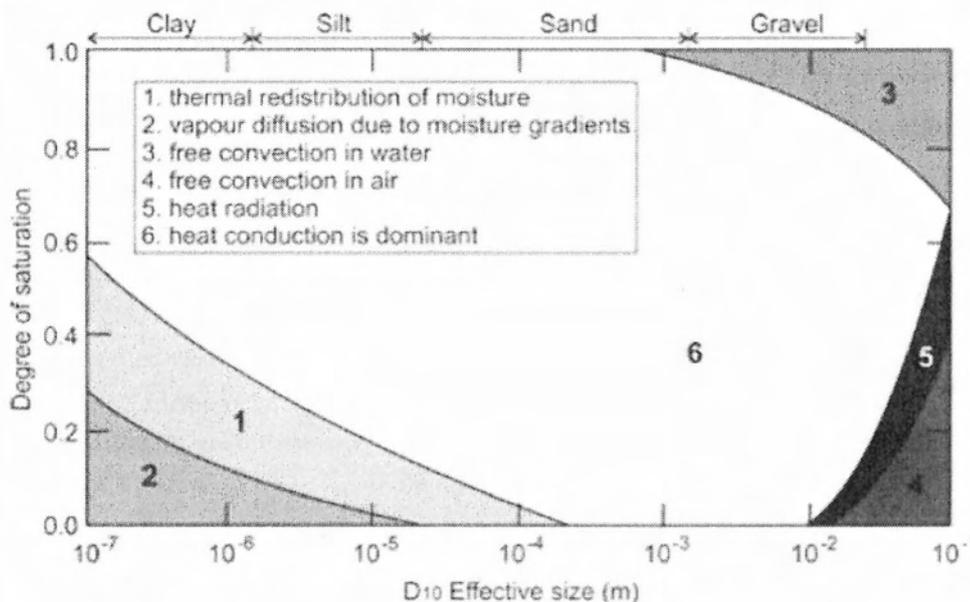
$$\frac{Q}{A} = \sigma T^4$$

Όπου  $\sigma$  είναι η σταθερά του Stefan Boltzmann και ισούται με  $5.670373(21) \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup> και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία σε Kelvin, K. Καθώς τα περισσότερα σώματα δεν είναι μαύρα ο ακριβής υπολογισμός της ακτινοβολούμενης θερμότητας είναι δύσκολο να μετρηθεί και θα είναι μικρότερη από αυτή του νόμου Stefan Boltzmann. Για τον προσδιορισμό της ακτινοβολούμενης θερμότητας ενός μη μαύρου σώματος, το αποτέλεσμα της εξίσωσης συνήθως πολλαπλασιάζεται με έναν παράγοντα εκπεψιμότητας, ο οποίος στην περίπτωση του σκυροδέματος είναι μεταξύ 0,85-0,94.

### 4.3 Μεταφορά θερμότητας στους εδαφικούς σχηματισμούς

Ακόμη και αν όλοι οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας που αναφέρθηκαν λαμβάνουν χώρα σε εδαφικό μέσο, η μεταφορά θερμότητας με αγωγή είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός, ενώ η συναγωγή και η ακτινοβολία συνήθως έχουν μηδενική ή μικρή επιρροή. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις, όπως όταν το έδαφος είναι κορεσμένο και χονδρόκοκκο, η συναγωγή γίνεται ο πιο σημαντικός μηχανισμός καθώς αναμένουμε ουσιαστική διήθηση του νερού μέσα στον εδαφικό σχηματισμό. Στα ακόρεστα εδάφη, η αποδήμηση της υγρασίας, εξαιτίας της εξάτμισης και της επακόλουθης

συμπύκνωσης, ίσως αποτελεί την πιο σημαντική διεργασία μιας και εισάγει αλλαγές φάσεων στο έδαφος και έτσι επηρεάζει τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους μεταβάλλοντας, κυρίως, τον βαθμό κορεσμού του. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει μερικές από τις περιπτώσεις αυτές σύμφωνα με το βαθμό κορεσμού και το μέγεθος των κόκκων, όταν οι κύριοι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας είναι η συναγωγή η ακτινοβολία καθώς και η αποδήμηση της υγρασίας.



Σχήμα 4.1 Κυρίαρχοι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας σύμφωνα με το μέγεθος των κόκκων και τον βαθμό κορεσμού (Loveridge 2012, redrawn from Farouki, 1986).

#### 4.3.1 Θερμική αγωγιμότητα εδαφικών σχηματισμών και σκυροδέματος

Η θερμική αγωγιμότητα των εδαφικών σχηματισμών είναι μια παράμετρος που δύσκολα μπορεί να μετρηθεί ή να εκτιμηθεί καθώς εξαρτάται από μια σειρά από παράγοντες όπως η περιεκτικότητα σε νερό, η ανόργανη σύνθεση, το πορώδες, η πυκνότητα και η θερμοκρασία. Για παράδειγμα, κορεσμένα εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε χαλαζία θα έχουν γενικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα, μιας και ο χαλαζίας είναι ένα εξαιρετικά αγωγίμο μεταλλικό και η θερμική αγωγιμότητα του νερού είναι μία τάξη μεγέθους υψηλότερη από αυτή του αέρα. Κατεψυγμένα εδάφη παρουσιάζουν επίσης υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα απ' ό,τι όταν δεν είναι παγωμένα γιατί ο πάγος έχει θερμική αγωγιμότητα περίπου τέσσερις φορές μεγαλύτερη από ότι το νερό. Οι πίνακες 4.2-4.3, δείχνουν τυπικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας των κοινών συστατικών του εδάφους:

Soil or Weak Rock	Thermal Conductivity (W/mK)	
	Range of quoted values	Recommended Values
Sand, dry	0.3 – 0.8	0.4
Gravel, dry	0.3 – 0.4	0.4
Peat, soft lignite	0.2 – 0.7	0.4
Clay/silt, dry	0.4 – 1.0	0.5
Clay/silt, water saturated	0.9 – 2.3	1.7
Gravel, water saturated	1.6 – 2.0	1.8
Claystone, siltstone	1.1 – 3.5	2.2
Sand, water saturated	1.5 – 4.0	2.4
Gypsum	1.3 – 2.8	1.6
Marl	1.5 – 3.5	1.8
Sandstone	1.3 – 5.1	2.3

Table B.1 Thermal Conductivity of Soil and Weak Rock

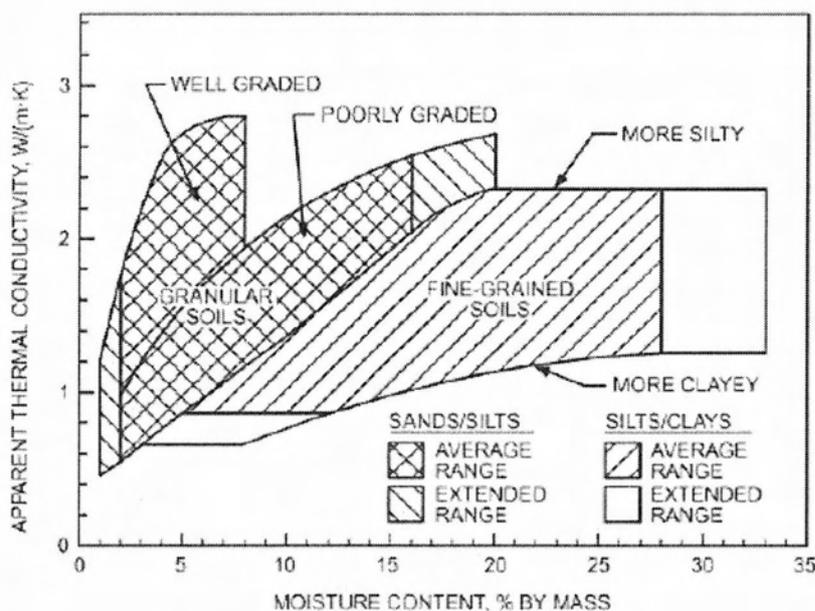
Σχήμα 4.2 Σύνηθες τιμές θερμικής αγωγιμότητας εδαφικών σχηματισμών.

Substance	Thermal conductivity (W/mK)
Quartz	8.79
Clay Minerals	2.93
Organic Matter	0.25
Water	0.57
Ice	2.18
Air	0.025

Σχήμα 4.3 Σύνηθες τιμές θερμικής αγωγιμότητας των κύριων ουσιών του εδάφους (Rees et al. 2000).

Όσον αφορά τις επιδράσεις της θερμοκρασίας επί της θερμικής αγωγιμότητας των εδαφών, Hiraiwa et al (2000) μέτρησε την θερμική αγωγιμότητα από δύο διαφορετικά εδάφη ως συνάρτηση της θερμοκρασίας (μηδέν έως 75C). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, σε γενικές γραμμές, η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Αυτή η αύξηση στο έδαφος της θερμικής αγωγιμότητας, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας (μηδέν έως 75c) ήταν μέχρι 0.75 W /mK, ανάλογα επίσης με την περιεκτικότητα σε νερό και το είδος του εδάφους που αναλύθηκαν.

Δεδομένου της υψηλής εξάρτησης της θερμικής αγωγιμότητας στα χαρακτηριστικά του εδάφους, είναι αναμενόμενο ότι μια ευρεία ποικιλία των τιμών θερμικής αγωγιμότητας βρίσκονται στη βιβλιογραφία και χρησιμοποιούνται σε αριθμητικές προσομοιώσεις. Τυπικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας των εδαφών από 0,5 W / mK έως 3 W / mK.



Σχήμα 4.4 Τιμές θερμικής αγωγιμότητας εδαφών συναρτήσει της υγρασίας (ASHRAE fundamentals, 2009)

Όπως το έδαφος, έτσι και το σκυροδέμα αποτελείται από διαφορετικά υλικά / ουσίες που παρουσιάζουν διαφορετικές χημικές και φυσικές ιδιότητες. Ως σύνθετο υλικό, η θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος θα είναι συνάρτηση των θερμικών και φυσικών ιδιοτήτων των συστατικών του, όπως το τσιμέντο, τα αδρανή και τα πρόσθετα. Η πυκνότητα, η περιεκτικότητα σε υγρασία και θερμοκρασία του σκυροδέματος επηρεάζουν επίσης την θερμική αγωγιμότητα.

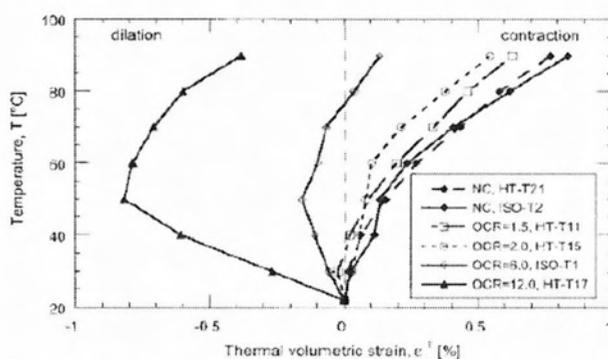
Ανάλογα με αυτούς τους παράγοντες, η θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ  $1 W / mK$  και  $4W / mK$ . Για παράδειγμα, ο Neville (1995), αναφέρει τυπικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας του κορεσμένου σκυροδέματος μεταξύ  $1.4 W / mK$  και  $3,6 W / mK$ .

#### 4.3.2 Θερμική διαστολή εδαφικών σχηματισμών και σκυροδέματος

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής περιγράφει την τάση ενός υλικού να μεταβάλει τον όγκο του όταν υποβάλλεται σε μια αλλαγή της θερμοκρασίας και ορίζεται ως η κλασματική αύξηση του μήκους ανά μονάδα αύξησης της θερμοκρασίας. Τα περισσότερα υλικά αυξάνουν σε όγκο όταν θερμαίνονται, λόγω της αυξημένης θερμικής δόνησης των ατόμων τους που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης απόστασης διαχωρισμού των γειτονικών ατόμων, ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει στα εδάφη, τα οποία μπορούν επίσης να παρουσιάσουν μια συσταλτική συμπεριφορά όταν θερμαίνονται.

Οι θερμικές παραμορφώσεις στα εδάφη λόγω θερμικού φορτίου είναι το αποτέλεσμα της θερμικής διαστολής / συστολής του εδάφους και των πόρων του νερού, η οποία λόγω των διαφορετικών θερμικών συντελεστών διαστολής τους έχει ως αποτέλεσμα την συσσώρευση περίσσειας πίεσης πόρου, και την αναδιάταξη του στερεού σκελετού του εδάφους. Πολλές παλαιότερες μελέτες (Cekerevac & Λάλου, 2004, σουλτάνος et al., 2004 και Baldi et al., 1988) αναφέρουν μεγάλη επιρροή του λόγου υπερστερεοποίησης (OCR) στις θερμικές μεταβολές του όγκου των αργίλων. Όταν θερμαίνεται, η κανονική και ελαφρώς υπερστερεοποιημένη αργίλος παρουσιάζει πλαστική συστατική συμπεριφορά, ενώ αργίλος υψηλής OC ελαστική διασταλτική συμπεριφορά η οποία αυξάνει με το OCR και ακολουθείται από πλαστική συστολή όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4-5. Αυτό σημαίνει ότι οι άργιλοι μπορούν να παρουσιάσουν θετικό ή αρνητικό συντελεστή θερμικής διαστολής ανάλογα κυρίως με τις τιμές OCR τους, την ορυκτολογική τους ιδιότητα και τη θερμοκρασία που υφίστανται.

Όπως με τα περισσότερα υλικά κατασκευής και σε αντίθεση με το έδαφος, το σκυρόδεμα παρουσιάζει πάντοτε θετικό συντελεστή θερμικής διαστολής δηλαδή αυξάνεται σε όγκο όταν θερμαίνεται και μειώνεται σε όγκο όταν ψύχεται. Τα αδρανή είναι το κύριο συστατικό του σκυροδέματος και έχουν μεγάλη επιρροή στην θερμική διασταλτική συμπεριφορά του. Διαφορετικοί τύποι αδρανών παρουσιάζουν διαφορετική ορυκτολογική σύσταση η οποία τα καθιστά περισσότερο ή λιγότερο θερμικά διασταλτικά. Για παράδειγμα, πυριτικά αδρανή παρουσιάζουν υψηλή θερμική διαστολή και κατά συνέπεια, το σκυροδέμα που περιέχει αυτά τα συσσωματώματα θα παρουσιάζει επίσης υψηλή θερμική διαστολή. Ο Tatro (2006) αναφέρει τιμές συγκεκριμένων γραμμικών συντελεστών θερμικής διαστολής οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ  $0.76E-5$  m / m / K και  $1.36E-5$  m / m / K. Η αναλογία νερού / τσιμέντου επηρεάζει επίσης την τιμή του συντελεστή θερμικής διαστολής του σκυροδέματος καθώς αλλάζει τη θερμική διαστολή του τσιμέντου το οποίο συνιστά το 15 έως 20% του σκυροδέματος Σε γενικές γραμμές, ο συντελεστής θερμικής διαστολής του σκυροδέματος αυξάνει με μια μείωση στην αναλογία νερού / τσιμέντου.

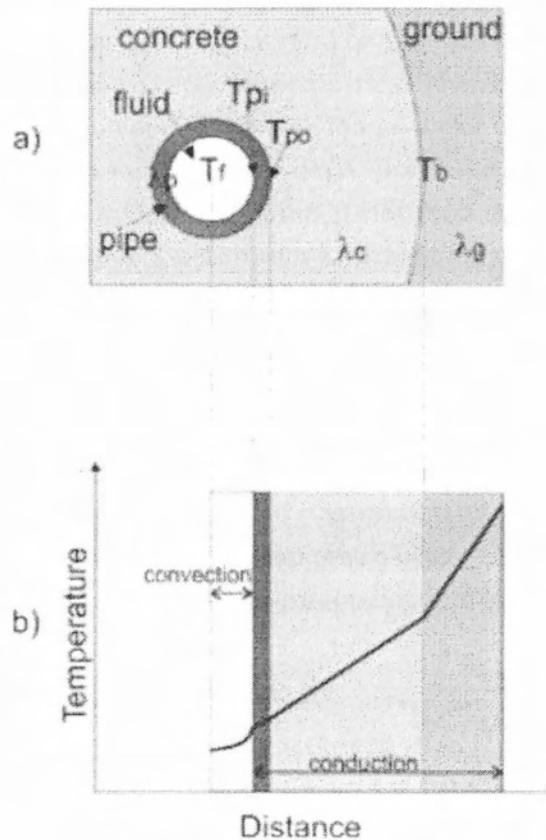


Σχήμα 4.5 θερμική ογκομετρική παραμόρφωση αργίλου κατά την διάρκεια ξηρής θέρμανσης( Cekerevac & Laloui, 2004).



#### 4.4 Μεταφορά θερμότητας στους πασσάλους-γεωεναλλάκτες (energy-piles)

Οι δύο κύριες διεργασίες μεταφοράς θερμότητας που παρατηρούνται σε έναν πάσσαλο-γεωεναλλάκτη είναι η συναγωγή και η αγωγή. Καθώς το νερό κυκλοφορεί μέσα στους σωλήνες, ανταλλάσσει θερμότητα με τα τοιχώματα του σωλήνα με συναγωγή. Εξαιτίας των μοριακών δονήσεων και της αλληλεπίδρασής τους, τα τοιχώματα των σωληνώσεων ανταλλάσσουν θερμότητα με το σκυρόδεμα και αυτό με το έδαφος με αγωγή. Το σκυρόδεμα, το έδαφος και το πλαστικό, το οποίο είναι συνήθως το υλικό που χρησιμοποιείται για τους σωλήνες, παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας και ειδικής θερμότητας, ο δε ρυθμός της ροής θερμότητας δεν θα είναι συνεχής μέσα σε αυτά τα υλικά. Το σχήμα 4.6 απεικονίζει τη διαδικασία της μεταφοράς θερμότητας στους πασσάλους-γεωεναλλάκτες που περιγράφηκε προηγουμένως, όπου  $\lambda$  η θερμική αγωγιμότητα και  $T$  η θερμοκρασία.



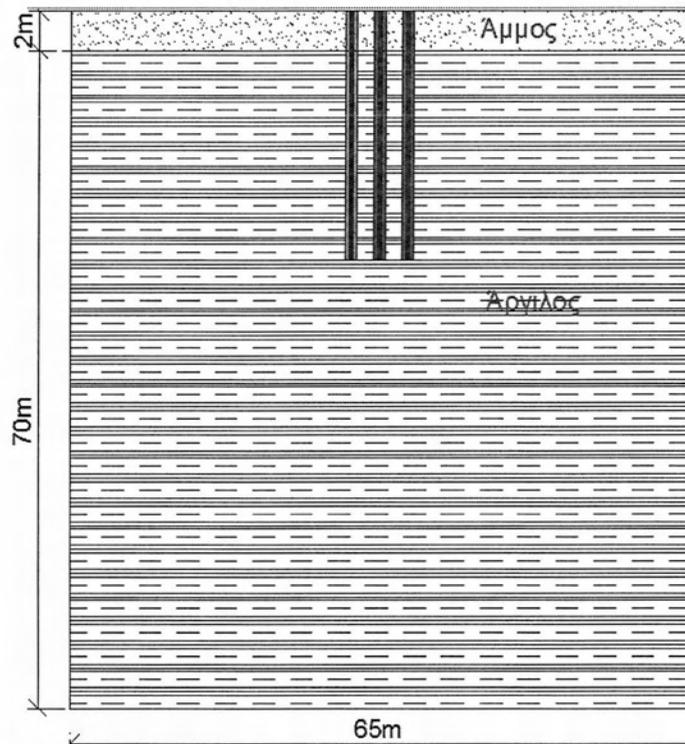
Σχήμα 4.6 Μεταφορά θερμότητας στους ενεργειακούς πασσάλους: α) επίπεδο των στοιχείων του ενεργειακού πασσάλου β) θερμοκρασιακές διαφορές (Powrie & Loveridge, 2013)

#### 4.5 Αντικείμενο της αριθμητικής ανάλυσης

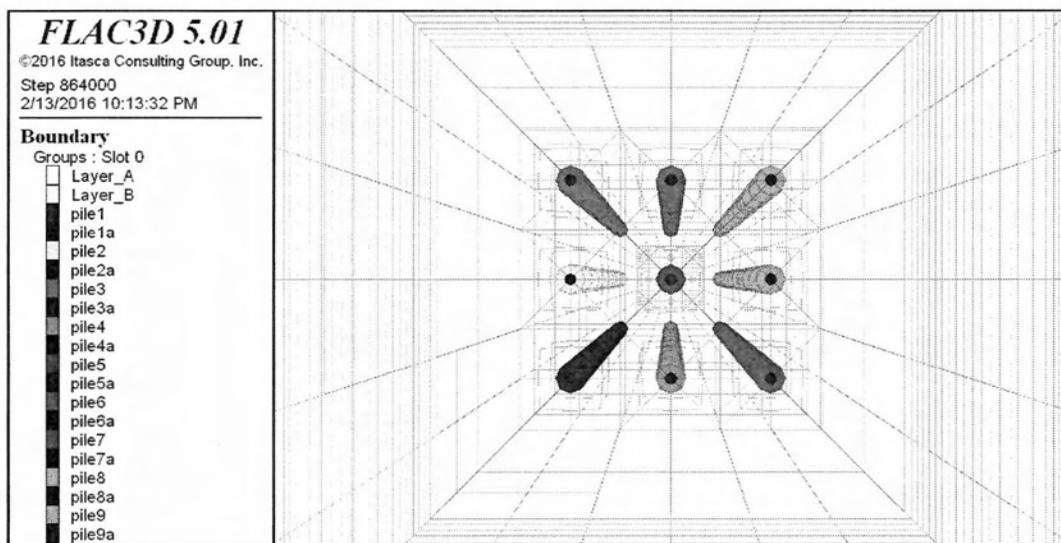
Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος πασσάλων –γεωεναλλακτών – εδάφους από καθαρά θερμική σκοπιά. Αρχικά μελετήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος με έναν πάσσαλο για ένα χρόνο λειτουργίας (2 μήνες καλοκαίρι , 2 μήνες χειμώνα) και εν συνεχεία η συμπεριφορά του ίδιου συστήματος με ενσωμάτωση 9 πασσάλων. Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα αριθμητικής ανάλυσης FLAC3D της εταιρείας Itasca Consulting Group.

#### 4.6 Προσομοίωση αριθμητικού μοντέλου

Κατά την προσομοίωση του προβλήματος δημιουργήθηκε πλέγμα με πλευρική διάσταση 32μ από την αρχή των αξόνων και κατακόρυφη διάσταση 70μ. Το πλέγμα αποτελείται από δύο στρώσεις. Η μια μέχρι τα 2 πρώτα μέτρα και η άλλη από τα 2-70 μέτρα προσομοιώνοντας έτσι τα δύο διαφορετικά εδαφικά προφίλ του προβλήματος (σχήμα 4.7) . Στον κίονα εισήχθησαν 9 πάσσαλοι διαμέτρου 60cm και μήκους 20m. Ο υπό εξέταση πάσσαλος(κόκκινος) τοποθετήθηκε στην αρχή των αξόνων του πλέγματος και οι υπόλοιποι σε απόσταση 3m περιμετρικά από αυτόν όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8. Στο εσωτερικό και στο κέντρο των πασσάλων δημιουργήθηκαν άλλοι πάσσαλοι(μαύροι) ακτίνας 20cm και μήκους 20m οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τους σωλήνες ανταλλαγής θερμότητας (absorber pipes) με το σκυρόδεμα και το έδαφος. Μέσα σε αυτούς γίνεται η ροή θερμότητας. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι η προσομοίωση των σωλήνων ανταλλαγής θερμότητας ως εσωτερικοί κεντρικοί πάσσαλοι αποτελεί παραδοχή για την επίλυση του προβλήματος και πως στην πραγματικότητα τοποθετούνται εφάπτοντας στον κλωβό του οπλισμού (χάλυβα). Ο τρόπος προσομοίωσης των σωλήνων ανταλλαγής θερμότητας γνωστοί στην ξένη βιβλιογραφία ως absorber pipes αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνών που ασχολήθηκαν με την περίπτωση του πασσάλου-γεωεναλλάκτη για χρήση της γεωθερμίας.



Σχήμα 4.7 Κατακόρυφο επίπεδο εδαφικού προφίλ αριθμητικής ανάλυσης



Σχήμα 4.8 Κάτοψη προσομοίωσης αριθμητικής ανάλυσης

#### 4.7 Ιδιότητες πασσάλων-εδάφους και καταστατικοί νόμοι

Η μελέτη περιλαμβάνει, όπως ήδη αναφέρθηκε, δυο εδαφικές στρώσεις(layers). Η πρώτη στρώση από την επιφάνεια και μέχρι τα 2m αποτελείται από αμμώδες έδαφος με τις παρακάτω μηχανικές και θερμικές ιδιότητες: μέτρο ελαστικότητας 75MPa, λόγος poisson 0.25, συνοχή ίση με την μονάδα (σχεδόν μηδενική), γωνία τριβής  $32,5^\circ$ , γωνία διασταλτικότητας μηδενική, θερμική αγωγιμότητα 3,4 W/mK,

ειδική θερμοχωρητικότητα  $0,93 \cdot 10^{-3}$  J/kgK, και συντελεστή θερμικής διαστολής  $1 \cdot 10^{-5}$ .

Η δεύτερη στρώση, από τα 2m μέχρι τα 70m, αποτελείται από αργιλικό έδαφος με τις παρακάτω μηχανικές και θερμικές ιδιότητες: μέτρο ελαστικότητας 35MPa, λόγος poisson 0.25, συνοχή ίση με 20KPa, γωνία τριβής  $20^\circ$ , γωνία διασταλτικότητας μηδενική, θερμική αγωγιμότητα 2,4 W/mK, ειδική θερμοχωρητικότητα  $0,0093 \cdot 10^{-3}$  J/kgK, και συντελεστή θερμικής διαστολής  $1 \cdot 10^{-7}$

Οι 9 πάσσαλοι(εσωτερικοί-εξωτερικοί) έχουν τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες: μέτρο ελαστικότητας 23,5GPa, και λόγο poisson  $\nu=0,20$ . Οι εξωτερικοί πάσσαλοι έχουν θερμική αγωγιμότητα 1,7 W/mK, ειδική θερμοχωρητικότητα  $0,88 \cdot 10^{-3}$  J/kgK, και συντελεστή θερμικής διαστολής  $1 \cdot 10^{-5}$  ενώ οι εσωτερικοί πάσσαλοι θερμική αγωγιμότητα 0,57 W/mK, ειδική θερμοχωρητικότητα  $0,88 \cdot 10^{-3}$  J/kgK, και συντελεστή θερμικής διαστολής  $1 \cdot 10^{-7}$ . Οι άνω τιμές επιλέχθηκαν σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα (Riederer et al. 2007)

Στις εδαφικές στρώσεις τα στοιχεία προσομοιώθηκαν με τον καταστατικό νόμο του Mohr ενώ τα στοιχεία των πασσάλων με τον νόμο ελαστικότητας του προγράμματος Flac3D. Για την θερμική απόκριση της ανάλυσης εισήχθη ο καταστατικός νόμος της ισοτροπικής μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής σε όλα τα στοιχεία, καθώς αποτελεί τον κύριο μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας στο σύστημα.

Soil type	Hydraulic conductivity $k_w$ (m/s)	Thermal conductivity $\lambda_T$ (W/m K)		Volumetric heat capacity $C_v$ (MJ/m <sup>3</sup> K)	
		Non saturated	Saturated	Non saturated	Saturated
Clay	$10^{-8} - 10^{-10}$	0.2 – 0.3	1.1 – 1.6	0.3 – 0.6	2.1 – 3.2
Silt	$10^{-5} - 10^{-8}$	0.2 – 0.3	1.2 – 2.5	0.6 – 1.0	2.1 – 2.4
Sand	$10^{-3} - 10^{-4}$	0.3 – 0.4	1.7 – 3.2	1.0 – 1.3	2.2 – 2.4
Rock	$10^{-1} - 10^{-3}$	0.3 – 0.4	1.8 – 3.3	1.2 – 1.6	2.2 – 2.4

Σχήμα 4.9 Πίνακας θερμικών και υδραυλικών ιδιοτήτων στους εδαφικούς σχηματισμούς (Riederer et al. 2007)

Παρατηρούμε ότι τα αμμώδη εδάφη έχουν γενικά μεγαλύτερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με τους αργιλικούς σχηματισμούς. Το ίδιο συμβαίνει και με τον συντελεστή διαπερατότητας. Η θερμική αγωγιμότητα αποτελεί το θερμικό ανάλογο του συντελεστή διαπερατότητας. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής διαπερατότητας (θερμική αγωγιμότητα) τόσο μεγαλύτερη παροχή νερού(ροή θερμότητας) θα διέλθει δια μέσου του εδαφικού υλικού.

Ιδιότητες	Λιμμος	Αργίλος	Εξωτερικός Πάσσαλος	Εσωτερικός Πάσσαλος
Μέτρο Ελαστικότητας Young E (KPa)	75000	35000	23600000	23600000
Λόγος Poisson ν	0.25	0.35	0.20	0.20
Γωνία Τριβής φ	32.5°	20°	-	-
Συνοχή c (KPa)	1	20	-	-
Γωνία Διασταλτικότητας ψ	0°	0°	-	-
Θερμική Αγωγιμότητα k (W/mK)	3.4	2.4	1.7	0.57
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Cv (J/kgK)	$0,93 \cdot 10^{-3}$	$0,0093 \cdot 10^{-3}$	$0,88 \cdot 10^{-3}$	$0,88 \cdot 10^{-3}$
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής α	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$

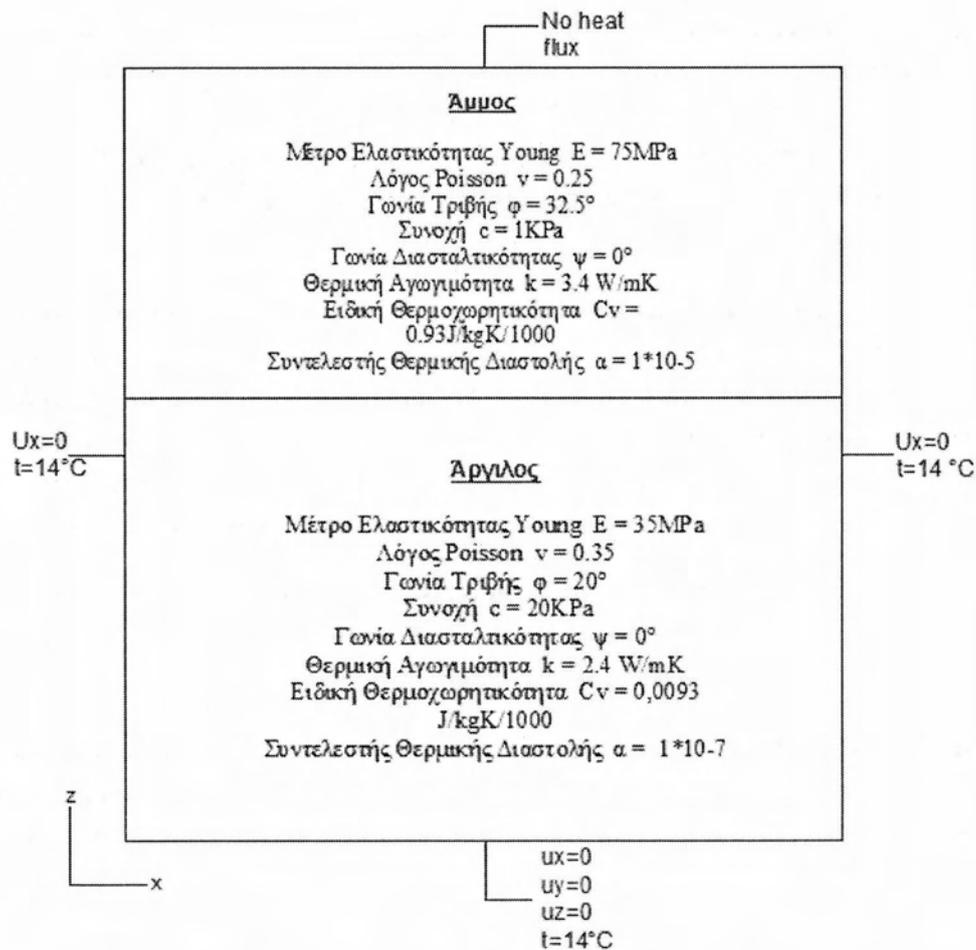
Σχήμα 4.10 Ιδιότητες αριθμητικής ανάλυσης

#### 4.8 Συνοριακές και αρχικές συνθήκες του αριθμητικού μοντέλου

Όσον αφορά τις μηχανικές συνοριακές συνθήκες του προβλήματος, στο κάτω σύνορο- επίπεδο του πλέγματος εισάγουμε σταθερή μετακίνηση και ίση με το μηδέν προς όλες τις κατευθύνσεις σε όλα τα στοιχεία του επιπέδου. Στο αριστερό και το δεξί σύνορο-επίπεδο εισάγουμε σταθερή μηδενική μετακίνηση κατά την οριζόντια x κατεύθυνση του συνόρου (αδυναμία κίνησης κατά τον x άξονα και ελεύθερη κίνηση κατά τον κατακόρυφο άξονα). Στο εμπρός και πίσω σύνορο-επίπεδο εισάγουμε μηδενική μετακίνηση κατά y αντίστοιχα. Το άνω σύνορο-επίπεδο είναι ελεύθερο ν κινηθεί προς όλες τις κατευθύνσεις.

Όσον αφορά τις θερμικές συνοριακές συνθήκες της ανάλυσης, το άνω σύνορο ορίστηκε να μην έχει θερμική ροή (αδιαβατικό όριο) μιας και στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν λαμβάνουμε υπόψιν την επίδραση της εξωτερικής θερμοκρασίας (παραδοχή). Τα υπόλοιπα σύνορα ( δεξί, αριστερό, εμπρός, πίσω και κάτω) έχουν σταθερή (fix) θερμοκρασία ίση με 14 °C (Σχήμα 4.11)

Όλα τα στοιχεία παρουσιάζουν μηδενικές μετακινήσεις ως αρχική συνθήκη. Επίσης εισήχθησαν η επίδραση των γεωστατικών τάσεων, το ίδιο βάρος των πασσάλων ως αρχικές μηχανικές συνθήκες. Η αρχική θερμοκρασία όλων των στοιχείων του πλέγματος ορίστηκε σταθερή στους 14 °C. Αυτό αποτελεί άλλη μια παραδοχή της ανάλυσης μιας και στην πραγματικότητα, όπως αναφέρθηκε ήδη στο κεφάλαιο 1, η θερμοκρασία άνω των πρώτων 10-15 μέτρων του εδάφους επηρεάζεται από τις κλιματικές αλλαγές και μεταβάλλεται με το βάθος. Μόνο κάτω από τα 10-15 μέτρα είναι σταθερή όλον τον χρόνο και ίση με 10-15 °C στις ευρωπαϊκές χώρες.



Σχήμα 4.11 Μηχανικές-θερμικές ιδιότητες και συνοριακές συνθήκες της ανάλυσης

#### 4.9 Προσομοίωση θερμικού φορτίου και χρονική εξάρτηση του προβλήματος

Το θερμικό φορτίο στους πασσάλους προσομοιώνεται στα αριθμητικά μοντέλα συχνά εφαρμόζοντας είτε μια σταθερή θερμοκρασιακή αύξηση ( $\Delta T = \text{σταθερό}$ ) ή μια ροή θερμότητας  $Q$  σε όλα τα στοιχεία ( $\text{W/m}^3$ ) ή κόμβους του πασσάλου ( $\text{W}$ ). Στην πραγματικότητα, η θερμότητα ρέει στους σωλήνες ανταλλαγής θερμότητας οι οποίοι τοποθετούνται στον κλωβό του σπλισμού. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία στον πάσσαλο δεν είναι ομοιόμορφη και τείνει να είναι μεγαλύτερη κοντά στους σωλήνες ανταλλαγής θερμότητας (absorber pipes), όπου ρέει το υγρό θερμότητας, και μειώνεται με την απόσταση από αυτά. Η εφαρμογή του θερμικού φορτίου συνεπώς εφαρμόζεται στους εσωτερικούς πασσάλους του προβλήματος και προσομοιώθηκε με ροή θερμότητας ανά κόμβο του πασσάλου ( $\text{W}$ ).

Κατά την καλοκαιρινή περίοδο και κατά την έναρξη λειτουργίας του συστήματος στο εσωτερικό των σωλήνων ανταλλαγής θερμότητας (absorber pipes) ρέει το υγρό

σε υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με αυτή που βρίσκεται στο εσωτερικό του εδάφους(μεταφορά θερμότητας από τον πάσσαλο στο έδαφος). Εισάγεται στο σύστημα θερμότητα η οποία εναποτίθεται στην δροσερή γή (εισαγωγή-αποθήκευση θερμότητας) με σκοπό να αξιοποιηθεί η γεωθερμία για την ψύξη του κτιρίου. Αυτή η εισαγωγή θερμότητας εφαρμόζεται στους εσωτερικούς πασσάλους ανά κόμβο και είναι ίση με 60 W.

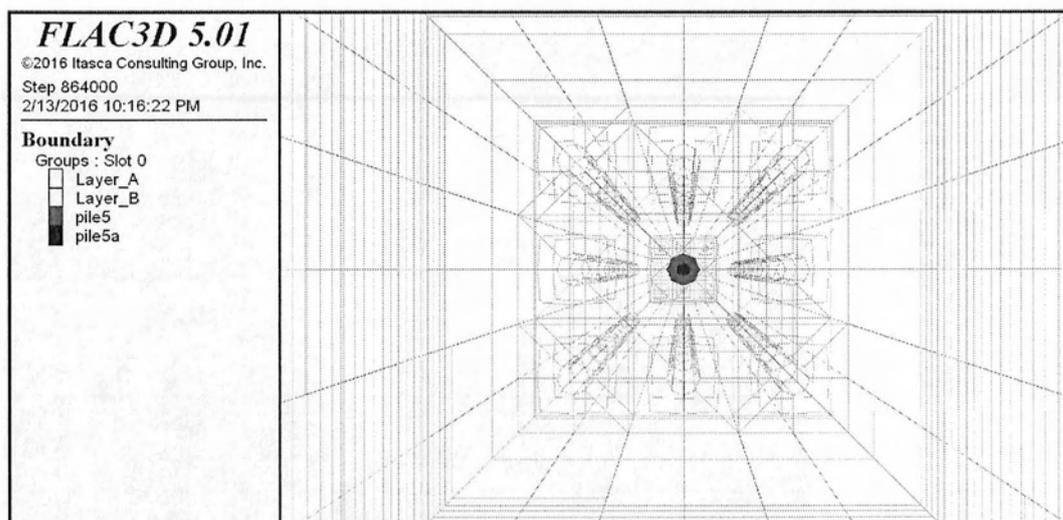
Αντίθετα, κατά την χειμερινή περίοδο στο εσωτερικό των σωλήνων ανταλλαγής θερμότητας (absorber pipes) ρέει το υγρό σε χαμηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με αυτή που βρίσκεται στο εσωτερικό του εδάφους(μεταφορά θερμότητας από το έδαφος στον πάσσαλο). Έτσι το σύστημα άγει θερμότητα από το έδαφος (απαγωγή θερμότητας) με σκοπό την θέρμανση του κτιρίου. Αυτή η απαγωγή θερμότητας εφαρμόζεται στους εσωτερικούς πασσάλους ανά κόμβο και είναι ίση με 30W.

Οι τιμές αυτές ροής θερμότητας στο εσωτερικό των πασσάλων είναι σταθερές και συγκεκριμένες μιας και όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, τα κατακόρυφα συστήματα κλειστού τύπου δίνουν συνήθως 50-80W/m.

Εφαρμόστηκε λοιπόν στην αριθμητική ανάλυση του προβλήματος θερμικό φορτίο 60W/κόμβο για 2 μήνες λειτουργίας του συστήματος (καλοκαιρινή περίοδος- θέρμανση) και κατόπιν 30W/κόμβο (50%) για άλλους 2 μήνες (χειμερινή περίοδος- ψύξη) σε μεμονωμένο πάσσαλο και σε ομάδα πασσάλων.

#### **4.10 Επίλυση σε μεμονωμένο πάσσαλο: Αποτελέσματα**

Κατά την επίλυση του προβλήματος και για την καλύτερη κατανόηση και εξαγωγή συμπερασμάτων δημιουργήθηκαν 8 χρονοιστορίες θερμοκρασίας (διαγράμμα θερμοκρασίας-χρόνου) σε διαφορετικά σημεία του πλέγματος. Ένα στο μέσο του πασσάλου, ένα σε απόσταση 1m από το μέσο του πασσάλου, 2m από το μέσο του πασσάλου, 3m, 4m, 5m, 10m και 20m αντίστοιχα. Επίσης εξήχθη το προφίλ θερμοκρασιών μετά από 1, 2, 5, 12 ώρες, 1 μέρα, 2 μέρες, 5, 10, 20, 40 μερές και 2 μήνες λειτουργίας του συστήματος σε θέρμανση και το αντίστοιχο προφίλ κατά την ψύξη. Τέλος εξήχθησαν τα ανύσματα της θερμοροής στους κόμβους του εξεταζόμενου πασσάλου σχήμα 4.12 (όλα τα διαγράμματα παρατείνονται στο παράρτημα Α).

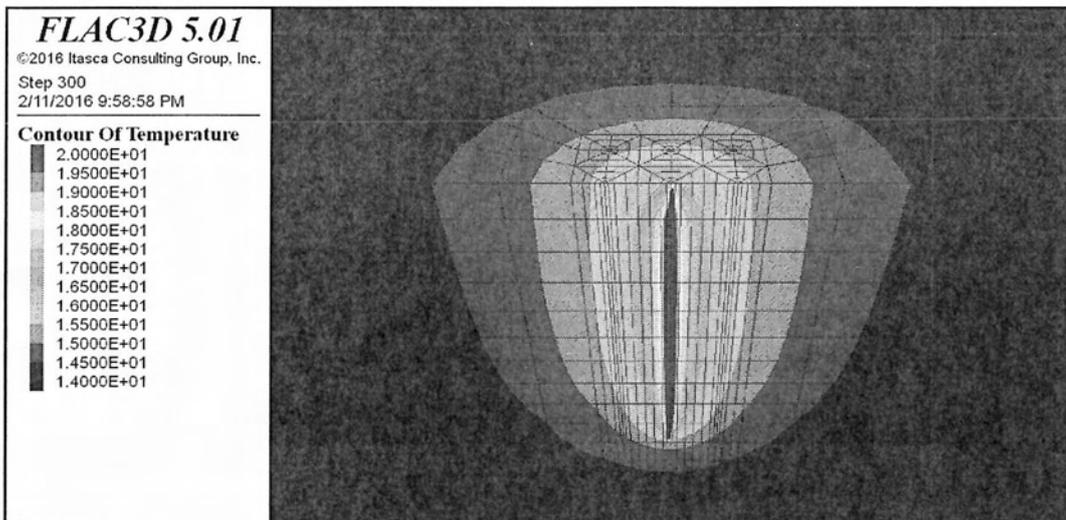


Σχήμα 4.12 Κάτοψη εξεταζόμενου μεμονωμένου πασσάλου αριθμητικής ανάλυσης

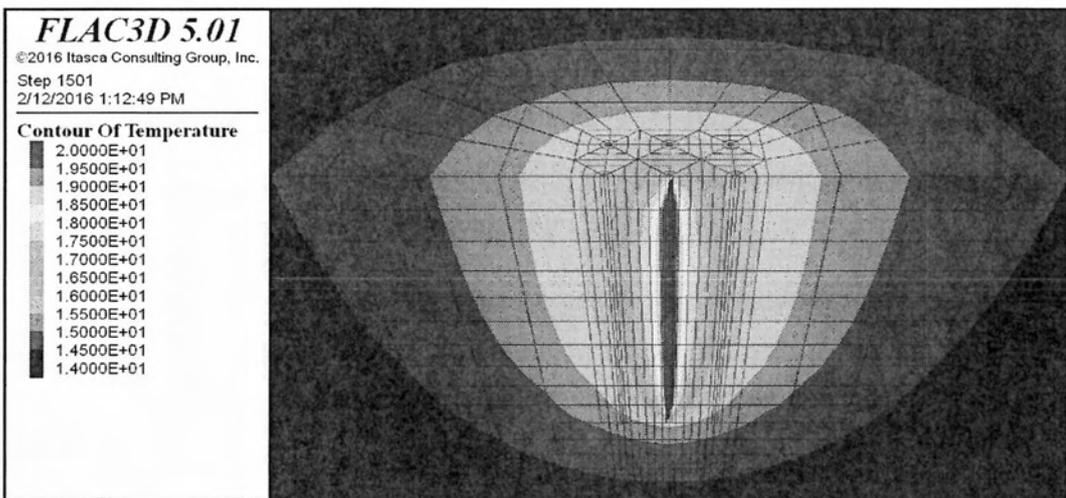
Κατά την εισαγωγή θερμότητας στον εσωτερικό πάσσαλο το καλοκαίρι, δηλαδή κατά την θέρμανση του πασσάλου και κατ επέκταση του εδάφους (σχήμα 4.13-4.16) παρατηρούμε ότι:

- Η ισορροπία του συστήματος επέρχεται μετά από 1 ημέρα λειτουργίας.
- Οι θερμοκρασίες μειώνονται προοδευτικά καθώς απομακρυνόμαστε από τον πάσσαλο όπου γίνεται η εισαγωγή θερμότητας ώσπου επέρχεται η ισορροπία του συστήματος..
- Μετά από 1 ημέρα λειτουργίας ο πάσσαλος έχει θερμοκρασία περίπου 20 °C στα εξωτερικά του τοιχώματα και καθώς απομακρυνόμαστε από αυτόν η θερμοκρασία μειώνεται στους 14 °C, όσο πλησιάζουμε τα εξωτερικά σύνορα του πλέγματος.
- Το προφίλ θερμοκρασιών παραμένει το ίδιο για 2 ημέρες λειτουργίας. Ομοίως για 5,10,20,40,60 ημέρες. (Σχήμα 4.15-4.16)

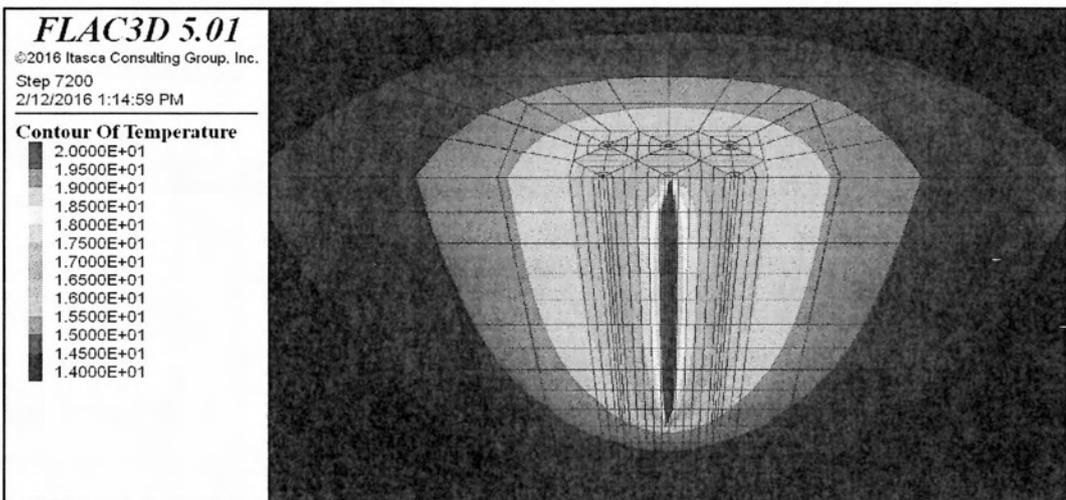




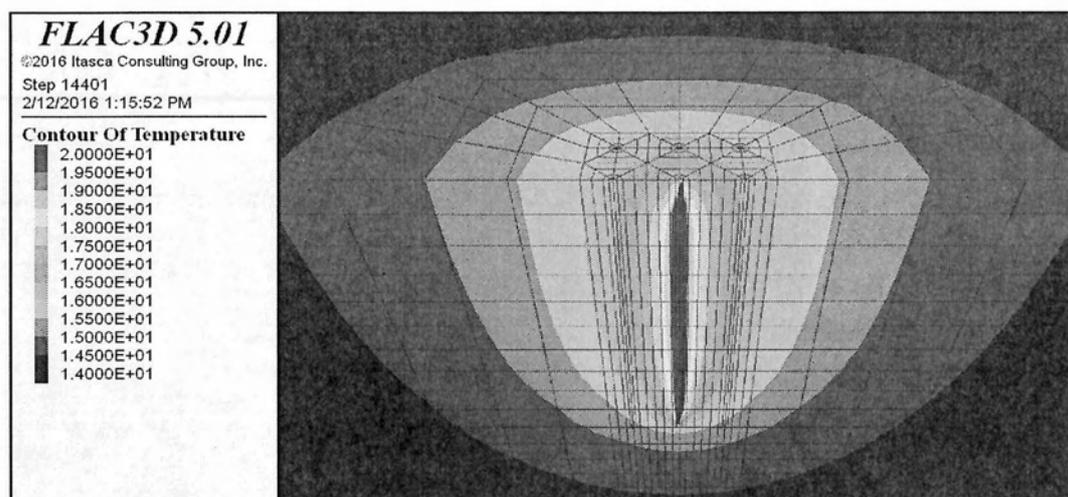
Σχήμα 4.13 Προφίλ θερμοκρασιών κατά την θέρμανση μετά από 1h



Σχήμα 4.14 Προφίλ θερμοκρασιών κατά την θέρμανση μετά από 5h



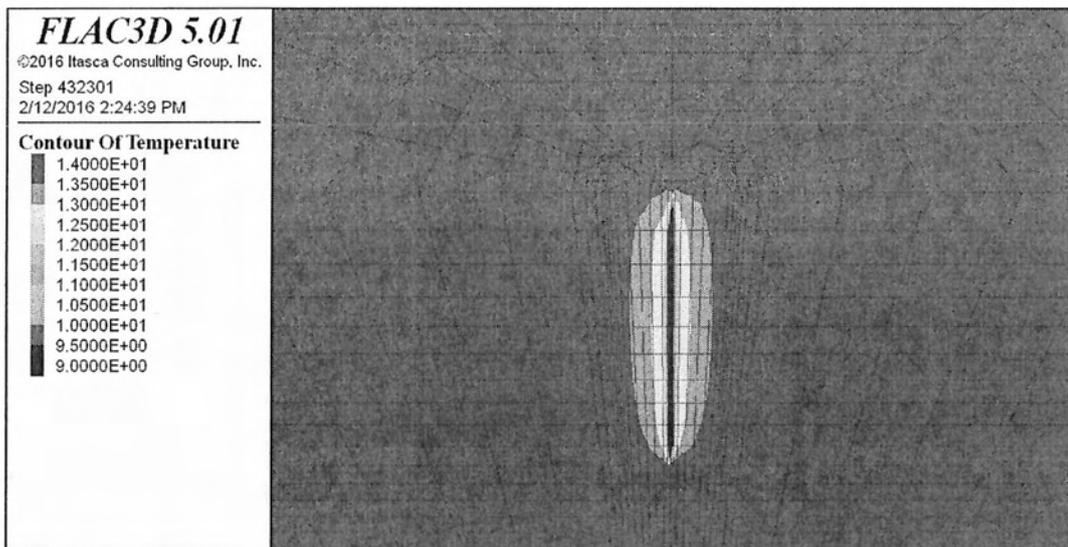
Σχήμα 4.15 Προφίλ θερμοκρασιών κατά την θέρμανση μετά από 1d



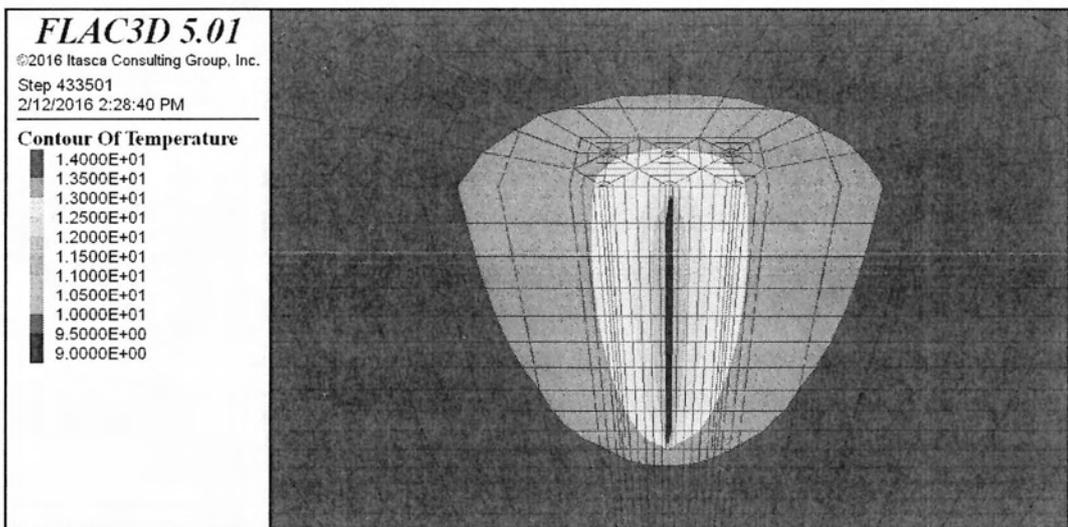
Σχήμα 4.16 Προφίλ θερμοκρασιών κατά την θέρμανση μετά από 2d

Κατά την απαγωγή θερμότητας το χειμώνα, δηλαδή κατά την ψύξη του πασσαλού και κατ επέκταση του εδάφους(σχήμα 4.17-4.20) παρατηρούμε ότι:

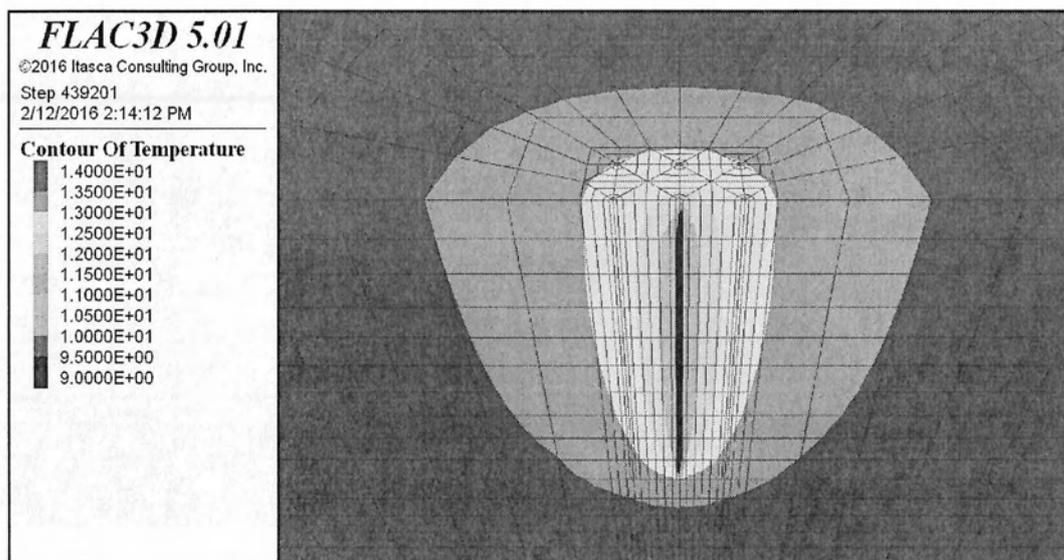
- Η ισορροπία του συστήματος επέρχεται μετά από 1 ημέρα εναλλαγής του φορτίου.
- Οι θερμοκρασίες αυξάνονται προοδευτικά καθώς απομακρυνόμαστε από τον πάσσαλο όπου γίνεται η απαγωγή θερμότητας ώπου επέρχεται η ισορροπία του συστήματος.
- Μετά από 1 ημέρα ψύξης ο πάσσαλος έχει θερμοκρασία περίπου  $9^{\circ}\text{C}$  στα εξωτερικά του τοιχώματα και καθώς απομακρυνόμαστε από αυτόν η θερμοκρασία αυξάνεται στους  $14^{\circ}\text{C}$ , όσο πλησιάζουμε τα εξωτερικά σύνορα του πλέγματος.
- Το προφίλ θερμοκρασιών παραμένει το ίδιο για 2 ημέρες λειτουργίας.. Ομοίως για 5,10,20,40,60 ημέρες.
- Το εδαφικό προφίλ λίγο έξω από τον πάσσαλο δεν φαίνεται να έχει επηρεαστεί από την εναλλαγή του φορτίου.(Σχήμα 4.17)



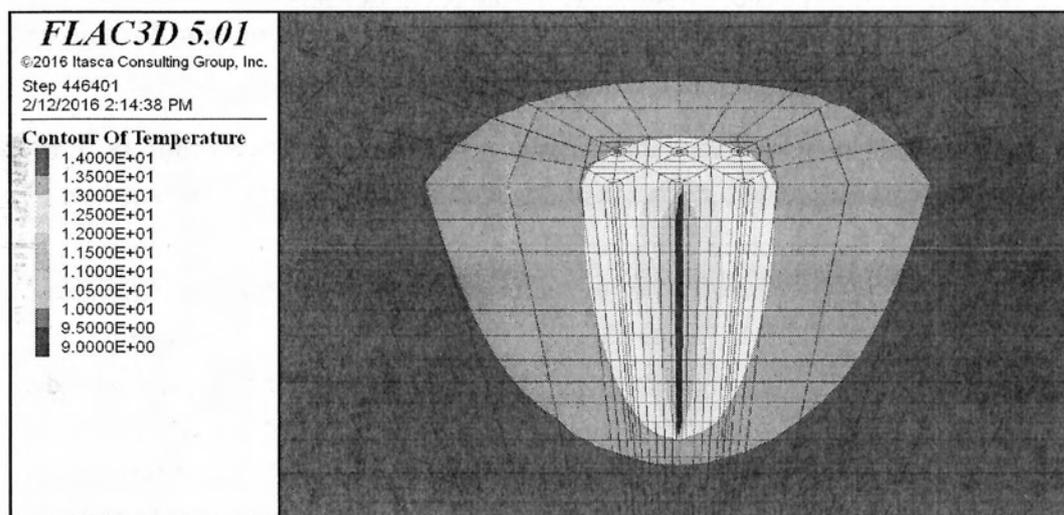
Σχήμα 4.17 Προφίλ θερμοκρασιών κατά την ψύξη μετά από 1h



Σχήμα 4.18 Προφίλ θερμοκρασιών κατά την ψύξη μετά από 5h

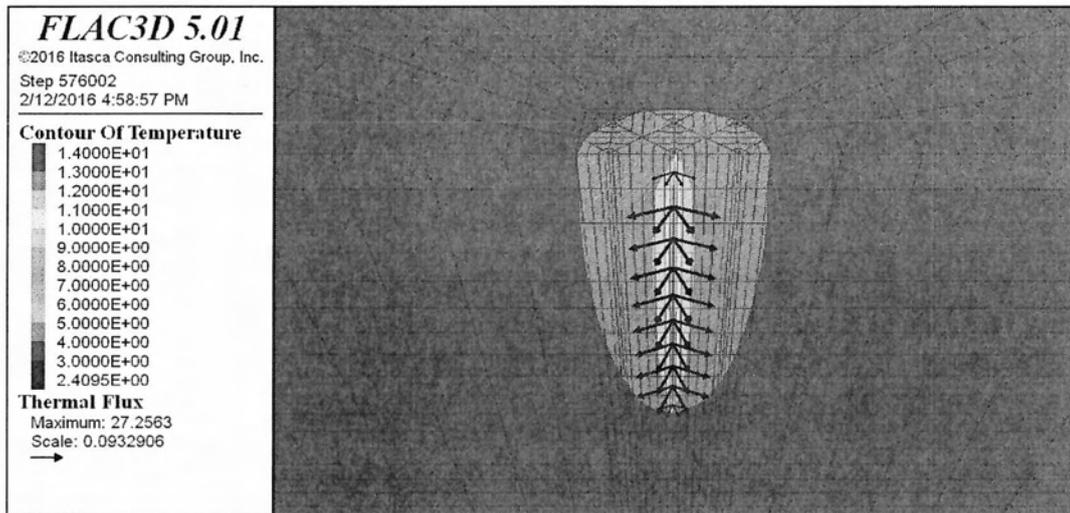


Σχήμα 4.19 Προφίλ θερμοκρασιών κατά την ψύξη μετά από 1d



Σχήμα 4.20 Προφίλ θερμοκρασιών κατά την ψύξη μετά από 2d

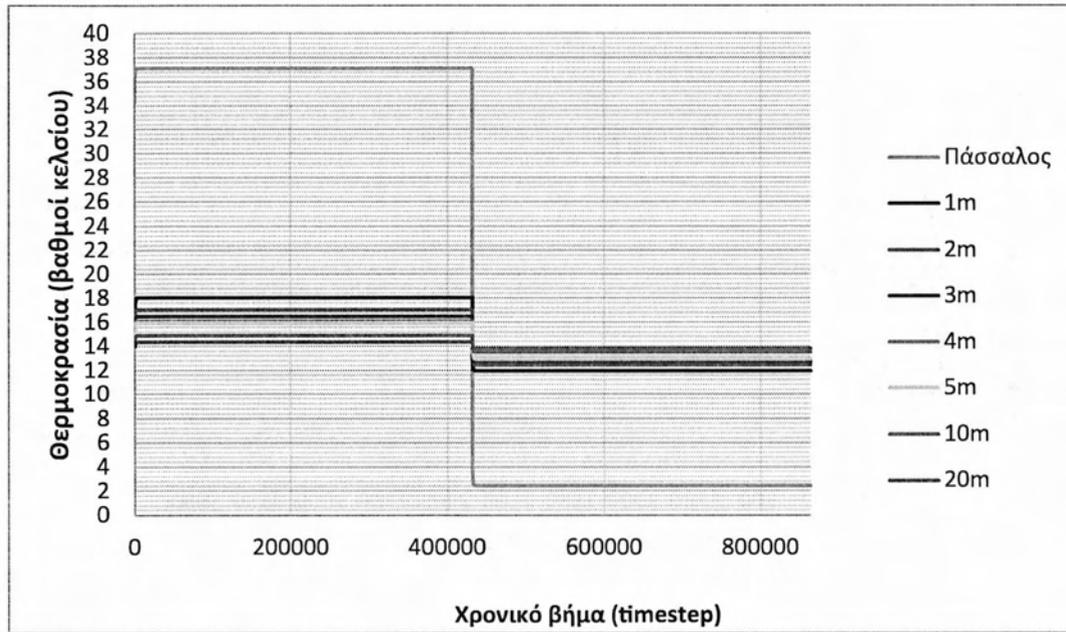
Στο σχήμα 4.21 απεικονίζεται το διάνυσμα της ροής θερμότητας στους κόμβους του εσωτερικού πασσάλου. Παρατηρούμε ότι στην κορυφή και στην βάση το διάνυσμα είναι μικρότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα. Στην θέρμανση η μέγιστη θερμοροή στον πάσσαλο είναι 55W και η ελάχιστη 26 W ενώ στην ψύξη η μέγιστη 27W και η ελάχιστη 13,5W .Αυτό οφείλεται στην δυνατότητα της θερμότητας να εξαπλωθεί προς όλες τις κατευθύνσεις εν αντιθέσει με τα υπόλοιπα που διαχέονται μόνο οριζόντια.



Σχήμα 4.21 Διανύσματα ροής θερμότητας κατά μήκος του πασσάλου

Στο σχήμα 4.22 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη των θερμοκρασιών 8 διαφορετικών σημείων (ένα στο μέσο του εξεταζόμενου πασσάλου, ένα σε απόσταση 1m από το μέσο του πασσάλου κτλ). Από το σχήμα παρατηρούμε ότι:

- Στο μέσο του πασσάλου (εσωτερικός) η θερμοκρασία φτάνει τους 38 °C το καλοκαίρι και πέφτει απότομα με την εναλλαγή του φορτίου το χειμώνα στους 3 °C.
- Όσο απομακρυνόμαστε από τον πάσσαλο η θερμοκρασία γενικά σταθεροποιείται στους 14-18 °C το καλοκαίρι και στους 12-14 °C το χειμώνα.
- Κατά την εναλλαγή του φορτίου η πτώση της θερμοκρασίας είναι πιο έντονη όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στον πάσσαλο. Αυτή η απότομη πτώση στην πραγματικότητα δεν υφίσταται καθώς υπάρχει περίοδος μη λειτουργίας του συστήματος π.χ φθινόπωρο-άνοιξη όπου το έδαφος επέρχεται στην αρχική του θερμοκρασία που είναι οι 14 °C. Όμως αυτό δεν λήφθηκε υπόψιν στην παρούσα διπλωματική και αποτελεί παραδοχή για την ευκολότερη επίλυση του προβλήματος.



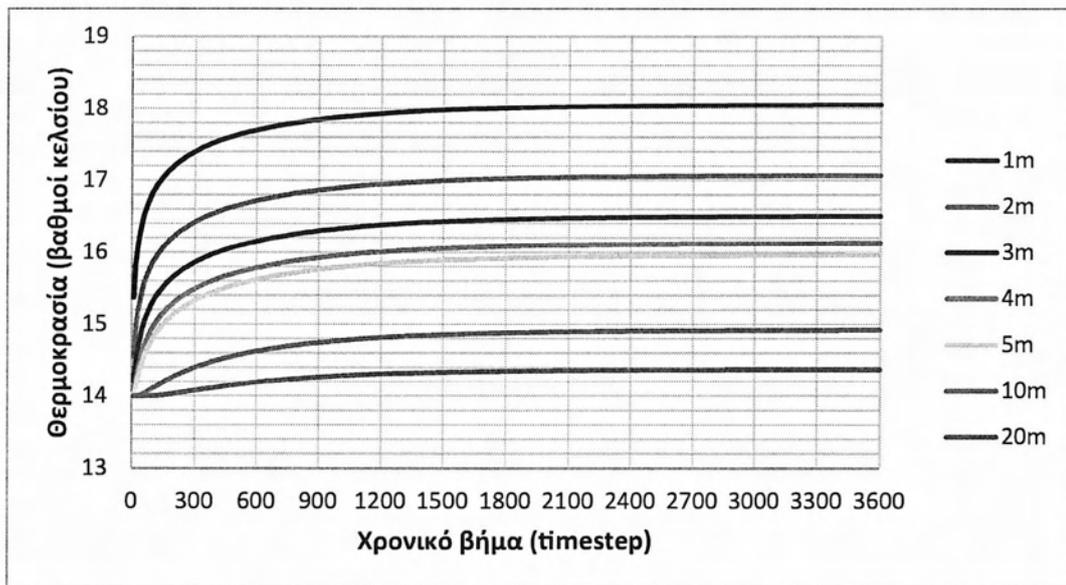
Σχήμα 4.22 Εξέλιξη θερμοκρασίας 8 σημείων του εδάφους για 1 έτος λειτουργίας του συστήματος

Κατά την εισαγωγή ροής θερμότητας στον πάσσαλο (θέρμανση) το καλοκαίρι (σχήμα 4.23) παρατηρούμε ότι:

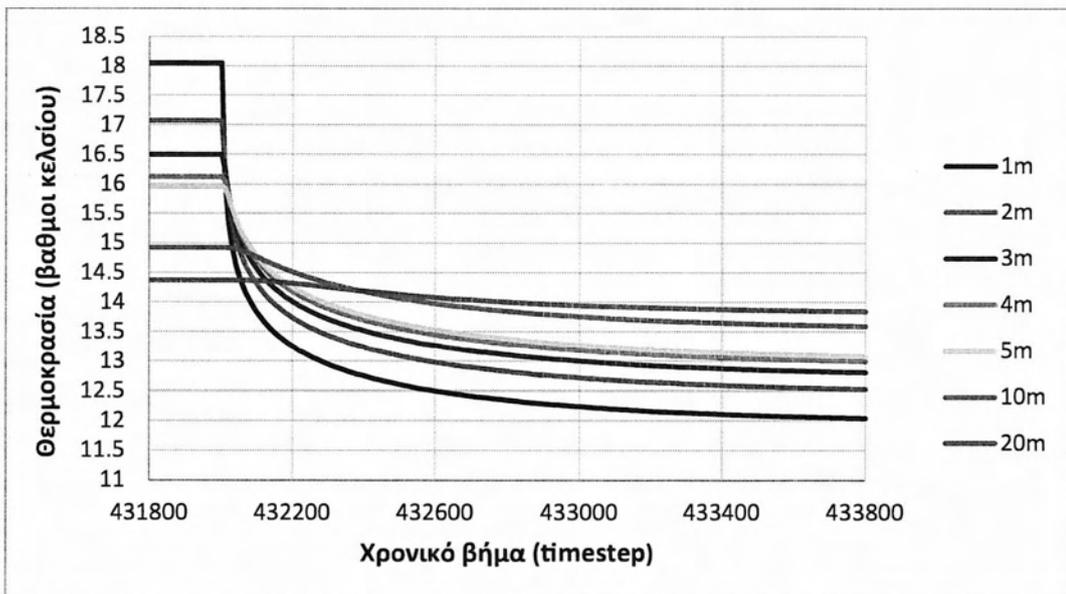
- Η αύξηση της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο ακολουθεί εκθετική μεταβολή με τον χρόνο.
- Όσο απομακρυνόμαστε από τον πάσσαλο η αύξηση αυτή είναι μικρότερη (μικρότερη κλίση) και τείνει να είναι σταθερή στους 14 °C (μηδενική κλίση).

Κατά την απαγωγή ροής θερμότητας από τον πάσσαλο (ψύξη) το χειμώνα (σχήμα 4.24), με την εναλλαγή του φορτίου, παρατηρούμε ότι:

- Η μείωση της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο ακολουθεί εκθετική μεταβολή με τον χρόνο.
- Όσο απομακρυνόμαστε από τον πάσσαλο η μείωση αυτή είναι μικρότερη (μικρότερη κλίση) και τείνει να είναι σταθερή στους 14 °C (μηδενική κλίση).



Σχήμα 4.23 Εξέλιξη θερμοκρασιών σημείων του εδάφους 12h μετά την έναρξη λειτουργίας του συστήματος.



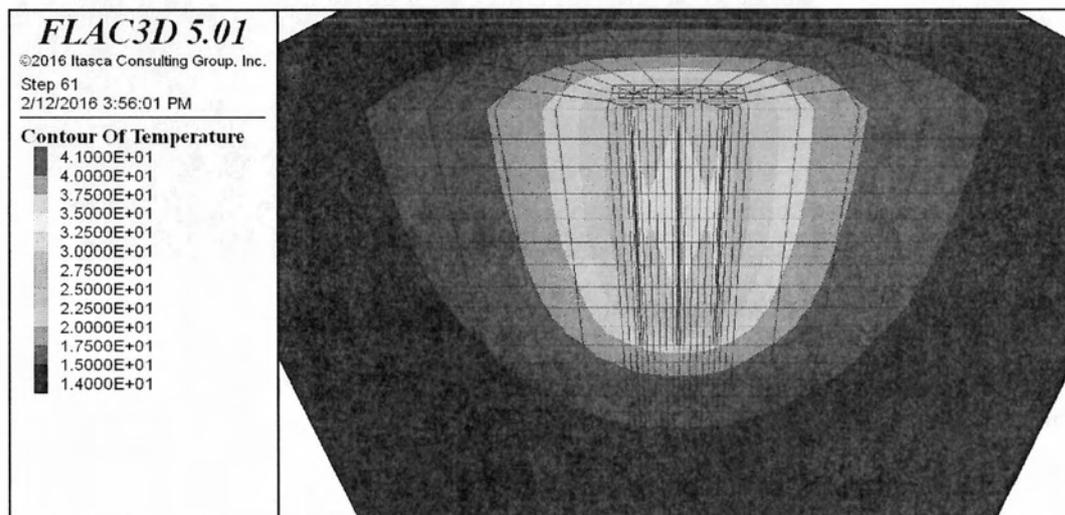
Σχήμα 4.24 Χρονική εξέλιξη θερμοκρασιών σημείων του εδάφους κατά την εναλλαγή του φορτίου (θέρμανση σε ψύξη)

#### 4.11 Επίλυση σε ομάδα πασσάλων: Αποτελέσματα

Κατά την δεύτερη περίπτωση της επίλυσης εφαρμόστηκαν τα ίδια φορτία ( εισαγωγή 60W/κόμβο για 2 μήνες – απαγωγή 30W/κόμβο για άλλους 2 μήνες) με την περίπτωση μεμονωμένου πασσάλου, σε 9 πασσάλους. Τα διαγράμματα και τα σχήματα που εξήχθησαν είναι τα ίδια με αυτά της προηγούμενης παραγράφου.

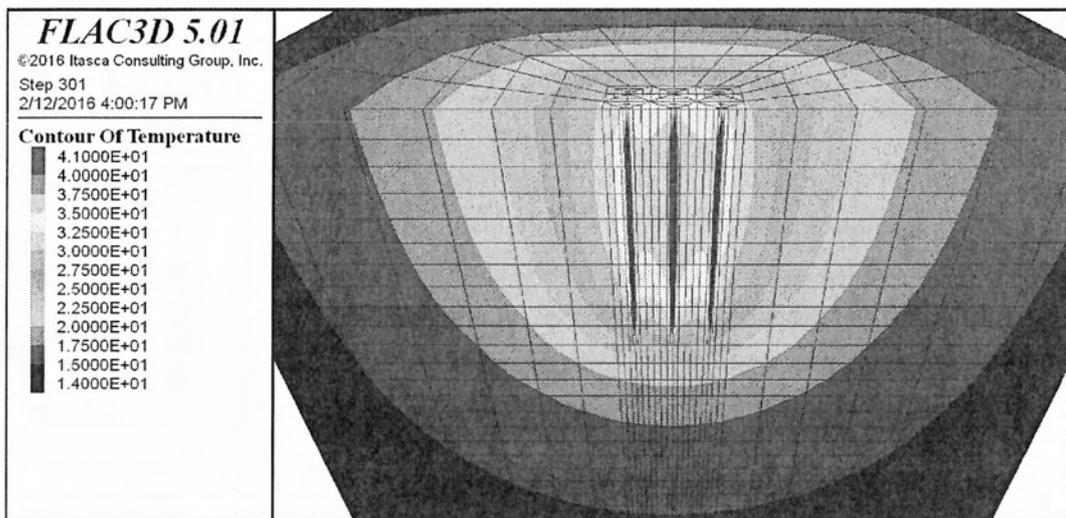
Κατά την εισαγωγή θερμότητας στον εσωτερικό των πασσάλων το καλοκαίρι (σχήμα 4.25-4.27), δηλαδή κατά την θέρμανση των πασσάλων και κατ επέκταση του εδάφους παρατηρούμε ότι:

- Η ισορροπία του συστήματος επέρχεται μετά από 1 ημέρα λειτουργίας.
- Μετά από μία μέρα λειτουργίας του συστήματος οι πάσσαλοι έχουν θερμοκρασία περίπου 38-40 °C. Ο αριστερός(όσο και ο δεξής) πάσσαλος έχει διαφορετικές θερμοκρασίες μεταξύ αριστερού και δεξιού τοιχώματος.
- Το έδαφος που εσωκλείεται ανάμεσα στους πασσάλους έχει υψηλότερη θερμοκρασία γενικά από αυτή εκτός αυτών.
- Στο μέσο του κεντρικού πασσάλου έχω υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα άκρα. Το διάνυσμα της ροής εκεί έχει οριζόντια κατεύθυνση ενώ στα άκρα υπάρχει και το έδαφος πάνω και κάτω αντίστοιχα που απάγει θερμότητα από τον πάσσαλο.
- Στα 2 πρώτα μέτρα όπου υπάρχει η στρώση της άμμου η θερμοκρασία είναι εν γένει υψηλότερη σε σχέση με τα 2 κάτω μέτρα των πασσάλων όπου υπάρχει αργιλικό έδαφος. Η άμμος απορροφά για συγκεκριμένο χρόνο μεγαλύτερη θερμότητα σε σχέση με την άργιλο.
- Το προφίλ θερμοκρασιών παραμένει το ίδιο για 2 ημέρες λειτουργίας. Ομοίως για 5,10,20,40,60 ημέρες.

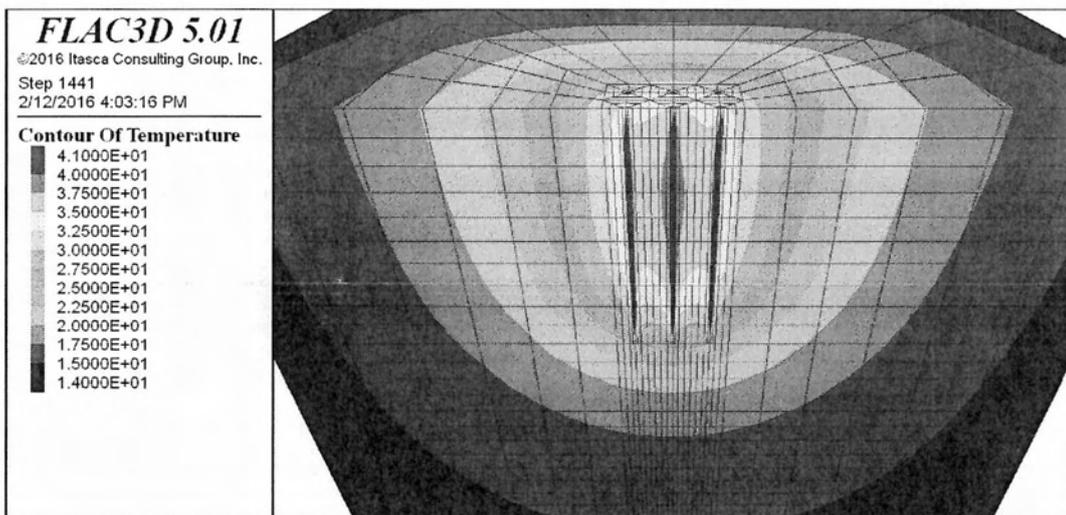


Σχήμα 4.25 Προφίλ θερμοκρασιών κατά την θέρμανση μετά από 1h





Σχήμα 4.26 Προφίλ θερμοκρασιών κατά την θέρμανση μετά από 5h

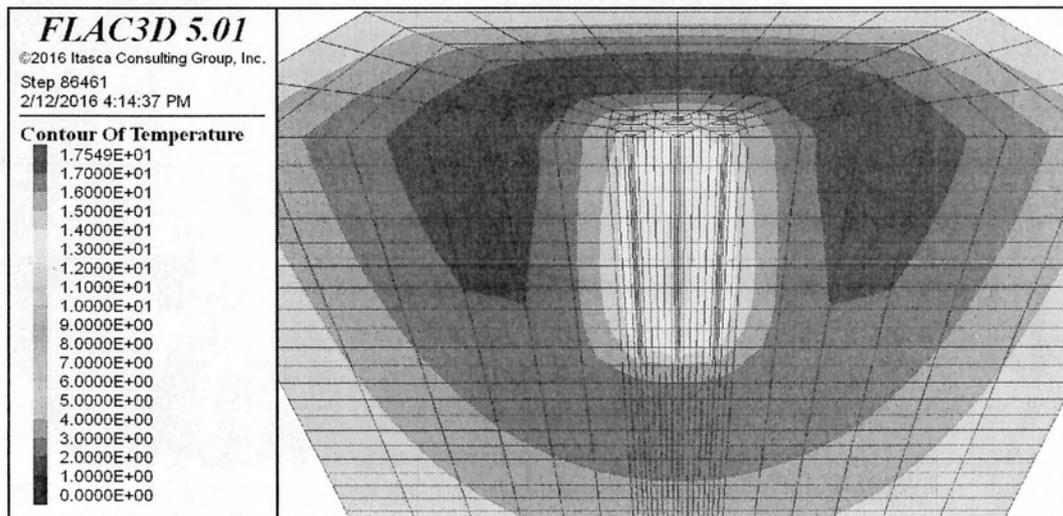


Σχήμα 4.27 Προφίλ θερμοκρασιών κατά την θέρμανση μετά από 1d

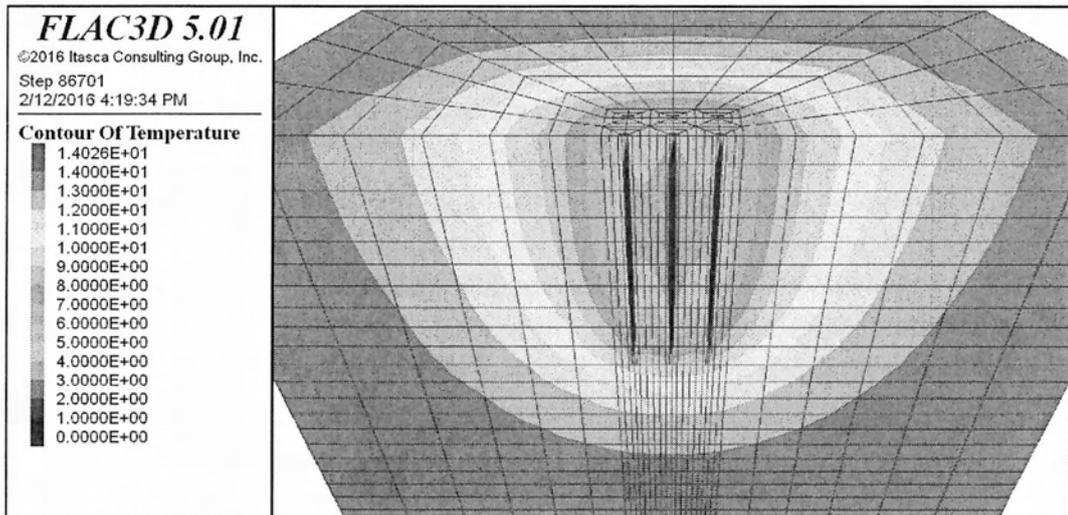
Κατά την ψύξη των πασσάλων το χειμώνα, με την απαγωγή δηλαδή θερμότητας από το έδαφος (σχήμα 4.28-4.30) παρατηρούμε ότι:

- Η ισορροπία του συστήματος επέρχεται μετά από 1 ημέρα ψύξης των πασσάλων..
- Μετά από 1 ημέρα ψύξης οι πάσσαλοι έχουν θερμοκρασία κοντά στα τοιχώματα στους 0-2°C και στους σωλήνες ανταλλαγής θερμότητας -7°C. Αυτό πρακτικά είναι μη επιθυμητό γιατί διαβρώνεται το σκυρόδεμα και υπάρχει κίνδυνος να παγώσει το νερό στο εσωτερικό των σωλήνων. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει καθώς το υγρό εμπεριέχει μίγμα νερού και γλυκόλης. Ο αριστερός(όσο και ο δεξιάς) πάσσαλος έχει διαφορετικές θερμοκρασίες μεταξύ αριστερού και δεξιού τοιχώματος

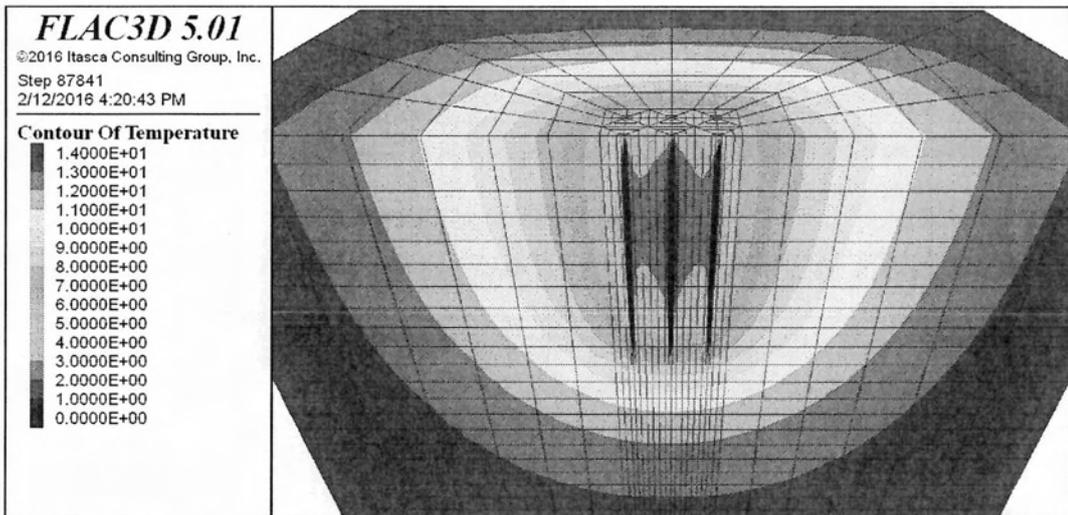
- Στο μέσο του κεντρικού πασσάλου έχω χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα άκρα. Το διάνυσμα της ροής εκεί έχει οριζόντια κατεύθυνση ενώ στα άκρα υπάρχει και το έδαφος πάνω και κάτω αντίστοιχα που εισάγει-προσδίδει θερμότητα στον πάσσαλο.
- Στα 2 πρώτα μέτρα όπου υπάρχει η στρώση της άμμου η θερμοκρασία είναι εν γένει χαμηλότερη σε σχέση με τα 2 κάτω μέτρα των πασσάλων όπου υπάρχει αργιλικό έδαφος. Η άμμος προσδίδει για συγκεκριμένο χρόνο μεγαλύτερη θερμότητα σε σχέση με την άργιλο.
- Το προφίλ θερμοκρασιών παραμένει το ίδιο για 2 ημέρες λειτουργίας. Ομοίως για 5,10,20,40,60 ημέρες.
- Κατά την εναλλαγή του φορτίου παρατηρώ ότι το έδαφος δεξιά και αριστερά των πασσάλων δεν πρόλαβε να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση (14 °C) αλλά παρουσιάζει αυξημένη θερμοκρασία. Η επιρροή της ομάδας στην θέρμανση του εδάφους είναι εμφανής(σχήμα 4.).



Σχήμα 4.28 Προφίλ θερμοκρασιών κατά την ψύξη μετά από 1h



Σχήμα 4.29 Προφίλ θερμοκρασιών κατά την ψύξη μετά από 5h



Σχήμα 4.30 Προφίλ θερμοκρασιών κατά την ψύξη μετά από 1d

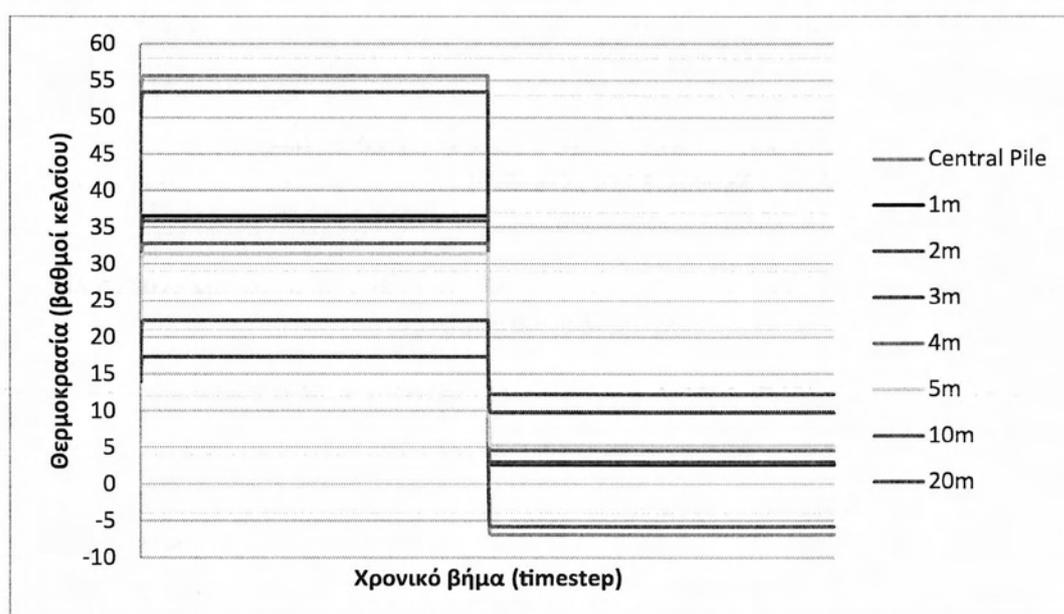
Στο σχήμα 4. 31 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη των θερμοκρασιών 8 διαφορετικών σημείων( ένα στο μέσο του κεντρικού πασσάλου , ένα σε απόσταση 1m από το μέσο του πασσάλου κτλ). Από το σχήμα παρατηρούμε ότι:

- Στο μέσο του κεντρικού εσωτερικού πασσάλου( absorber pipe) η θερμοκρασία φτάνει τους  $55^{\circ}\text{C}$  το καλοκαίρι και πέφτει απότομα με την εναλλαγή του φορτίου το χειμώνα στους  $-7^{\circ}\text{C}$ . Σε απόσταση 3m από τον κεντρικό πάσσαλο βρίσκεται ο δεξής πάσσαλος ο οποίος έχει θερμοκρασία  $53^{\circ}\text{C}$  και με την εναλλαγή του φορτίου πέφτει απότομα στους  $-5^{\circ}\text{C}$
- Όσο απομακρυνόμαστε από τον κεντρικό πάσσαλο οι θερμοκρασίες σταδιακά πέφτουν στους  $14^{\circ}\text{C}$
- Κατά την εναλλαγή του φορτίου η πτώση της θερμοκρασίας είναι πιο έντονη όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στην πηγή της φόρτισης..

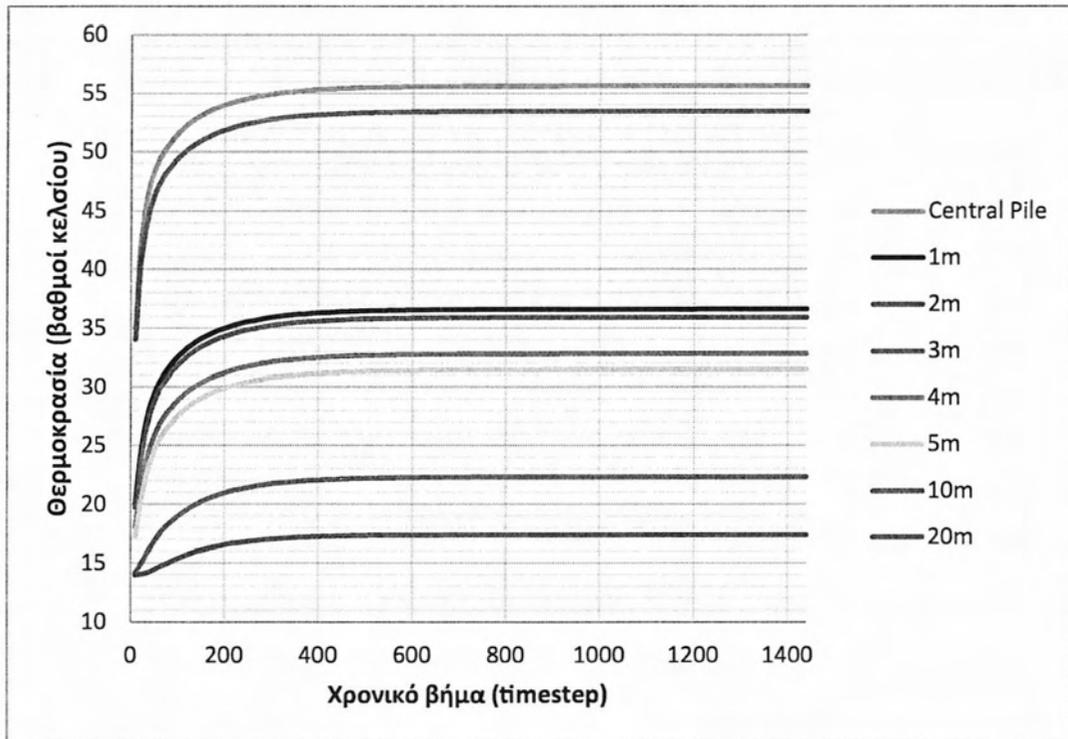
Στο σχήμα 4.32 με την έναρξη λειτουργίας του συστήματος το καλοκαίρι παρατηρούμε ότι:

- Η αύξηση της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο ακολουθεί εκθετική μεταβολή με τον χρόνο.
- Όσο απομακρυνόμαστε από τον κεντρικό πάσσαλο η αύξηση αυτή είναι μικρότερη (μικρότερη κλίση) και τείνει να είναι σταθερή στους  $14^{\circ}\text{C}$  (μηδενική κλίση).
- Τα σημεία σε απόσταση 1m και 2m από τον κεντρικό πάσσαλο εσωκλείονται από 2 πασσάλους παρουσιάζοντας υψηλότερες θερμοκρασίες.

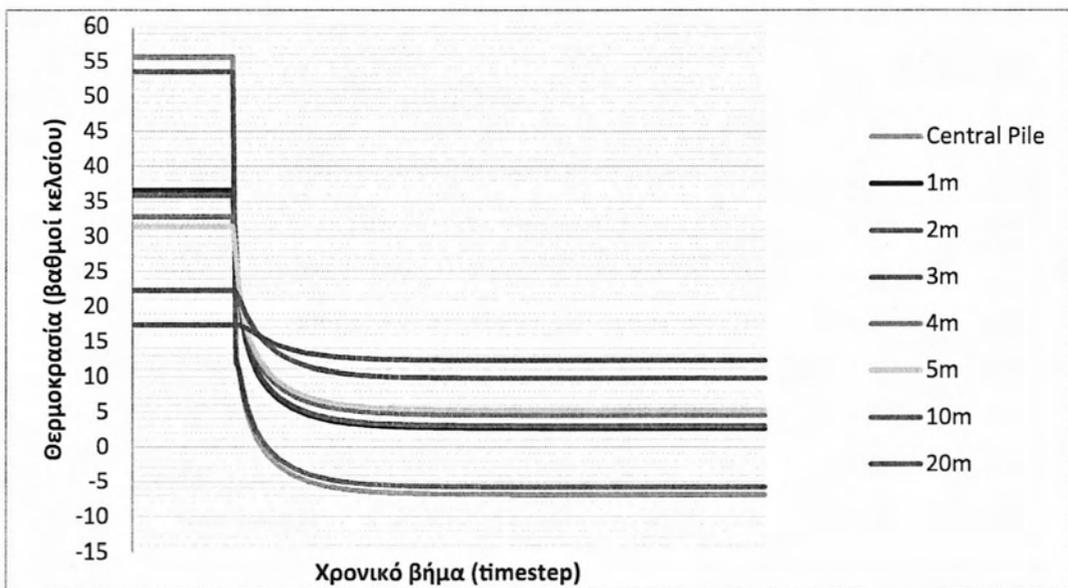
Με την αντίστοιχη λογική λειτουργεί το σύστημα και στην ψύξη (σχήμα 4.33)



Σχήμα 4.31 Εξέλιξη θερμοκρασίας 8 σημείων του εδάφους για 1 έτος λειτουργίας του συστήματος



Σχήμα 4.32 Εξέλιξη θερμοκρασιών σημείων του εδάφους 1d μετά την έναρξη λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα 4.33 Χρονική εξέλιξη θερμοκρασιών σημείων του εδάφους κατά την εναλλαγή του φορτίου (θέρμανση σε ψύξη)

#### 4.12 Σύγκριση των επιλύσεων

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των δύο προηγούμενων ενοτήτων παρατηρώ ότι:

- Με την ίδια φόρτιση(εισαγωγή-απαγωγή θερμότητας) και στις δυο επιλύσεις στην φάση ισορροπίας του συστήματος παρατηρώ εν γένει μεγαλύτερες θερμοκρασίες στον κεντρικό πάσσαλο και στο έδαφος όταν φορτίζω και τους 9 πασσάλους σε σχέση με όταν φορτίζω τον μεμονωμένο πάσσαλο μόνο(σχημα .
- Και στις δύο περιπτώσεις έχω ισορροπία του συστήματος σε 1μέρα από την έναρξη της επιφόρτισης.
- Και στις δυο περιπτώσεις η αύξηση- μείωση των θερμοκρασιών ακολουθεί εκθετική μεταβολή.
- Κατά την εναλλαγή του φορτίου στον μεμονωμένο πάσσαλο η θερμοκρασία του εδάφους μοιάζει ανεπηρέαστη από την θέρμανση ενώ στην ομάδα οι θερμοκρασίες του εδάφους εμφανίζουν υψηλή εξάρτηση από την θέρμανση.
- Και στις δύο περιπτώσεις τα ανύσματα της ροής θερμότητας είναι σταθερά σε κάθε στρώση και έχουν την ίδια κατεύθυνση



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

#### 5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε αριθμητική ανάλυση μεμονωμένου ενεργειακού πασσάλου και ομάδας πασσάλων από καθαρά θερμική σκοπιά χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FLAC3D Itasca Consulting Group. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων της παρούσας διπλωματικής παρουσιάζουν σημαντικά και ενδιαφέροντα συμπεράσματα, τα οποία συνεισφέρουν στην καλύτερη δυνατή γνώση και εξέλιξη της θερμικής απόκρισης των ενεργειακών πασσαλοθεμελιώσεων. Μερικά από τα ευρήματα της παρούσας εργασίας ίσως βοηθήσουν στην μελλοντική ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων καθώς διενεργήθηκαν μια σειρά από απλοποιήσεις και υποθέσεις προσομοίωσης προκειμένου να μελετήσουμε την συμπεριφορά τους.

Μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων συμπεραίνουμε ότι η ισορροπία του συστήματος είναι ανεξάρτητη του αριθμού των πασσάλων που τοποθετούνται στο έδαφος και επέρχεται και στις 2 επιλύσεις μετά από μία ημέρα λειτουργίας του συστήματος με ίδιες ιδιότητες εδάφους –πασσάλων και ίδια απαίτηση σε θερμικό φορτίο.

Η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην αποδοτικότητα του συστήματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους τόσο πιο γρήγορη είναι η διάχυση της θερμότητας στον χώρο. Η άμμος (μη συνεκτικό έδαφος) έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα εν γένει από την άργιλο (συνεκτικό έδαφος) συνεπώς η διάχυση της θερμότητας στην άμμο σε δεδομένο χρονικό διάστημα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την άργιλο (πιο αποδοτικό σύστημα). Αυτό έγινε αντιληπτό από την διαφορετική διάχυση των θερμοκρασιών στο άνω (αμμώδες έδαφος) και κάτω άκρο (αργιλικό έδαφος) του πασσάλου με σταθερή ροή θερμότητας και σταθερή θερμική αγωγιμότητα του πασσάλου. Στην άμμο για δεδομένο χρόνο οι θερμοκρασίες κοντά στον πάσσαλο είναι μεγαλύτερες το καλοκαίρι με την εισαγωγή θερμότητας στο σύστημα (θέρμανση) σε σχέση με την άργιλο. Ομοίως τον χειμώνα με την απαγωγή θερμότητας από το σύστημα (ψύξη), στην άμμο για δεδομένο χρόνο οι θερμοκρασίες κοντά στον πάσσαλο είναι μικρότερες σε σχέση με την άργιλο.



Τέλος, με την ίδια εισαγωγή και απαγωγή θερμότητας στο σύστημα, με την ίδια δηλαδή απαίτηση σε θερμικό φορτίο η επίδραση της ομάδας πασσάλων στην θέρμανση και στην ψύξη του εδάφους είναι μεγαλύτερη. Τόσο ο πάσσαλος όσο και το έδαφος παρουσιάζουν μεγαλύτερες(μικρότερες) θερμοκρασίες στην θέρμανση (ψύξη) σε σχέση με τον μεμονωμένο πάσσαλο. Κατά την εναλλαγή του φορτίου από θέρμανση σε ψύξη το προφίλ του εδάφους μακριά από τους πασσάλους επηρεάζεται από την ροή θερμότητας της ομάδας ενώ στον μεμονωμένο πάσσαλο όχι.

## 5.2 Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση

Ακολουθώντας την λογική της αριθμητικής ανάλυσης που εκτελέστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ήταν σημαντικό να διερευνηθεί η θερμομηχανική συμπεριφορά μεμονωμένου πασσάλου αλλά και της ομάδας πασσάλου. Είναι σημαντικό να διερευνηθούν οι επιπρόσθετες θερμικά επιβαλλόμενες τάσεις στον πάσσαλο και να μελετηθεί η συστολή και η διαστολή του πασσάλου κατά την θέρμανση και ψύξη. Επίσης θα μπορούσε να μελετηθεί η επιρροή του εδάφους και η δυσκαμψία της διεπιφάνειας εδάφους-πασσάλου στην θερμο-μηχανική συμπεριφορά του πασσάλου.

Τέλος θα μπορούσε να εξετασθεί η συμπεριφορά τους συστήματος ανάλογα με τον βαθμό κορεσμού του εδάφους μιας και η υγρασία του εδάφους αποτελεί σημαντική παράμετρο της θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους και άρα της συμπεριφοράς του συστήματος.

### Βιβλιογραφία

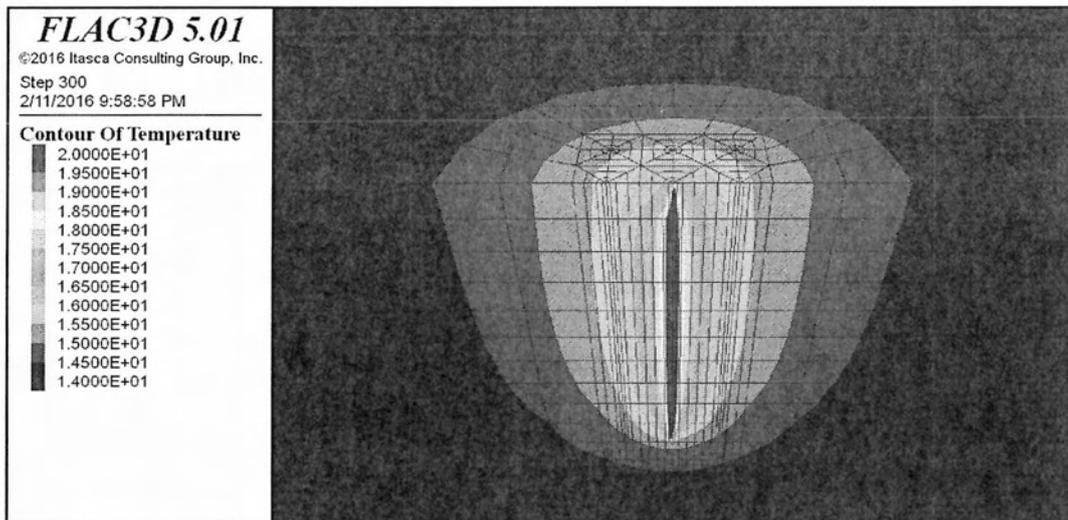
1. Lyesse Laloui and Alice Di Donna (2013) Energy geostructures: innovation in underground engineering. Εκδόσεις Wiley.
2. Carles Perez Cerveza (2013) Ground thermal modeling and analysis of energy pile foundation.
3. Maria Elizabeth Suryatriy astute (2013) Numerical study of the thermo-active piles behavior in cohesionless soils.
4. Rui Manuel Freitas Assuncao (2014) Thermal and thermo-mechanical Analysis of thermo-active pile foundations.
5. Wendell A. Duffield and John H. Sass (2003) Geothermal Energy-Clean power from the earth's heat. Εκδόσεις U.S Geological Survey, Reston, Virginia.
6. Thomas Mimouni (2014) Thermomechanical characterization of energy geostructures with emphasis on energy piles, ecole polytechnique federale de lausanne
7. GSHP association (2012) Thermal pile: installation, Design & Materials Standard. GSHP association.
8. Maria Elizabeth Suryatriy astute, H. Mroueh, S. Burlon (2013) Computer & Geotechnics: A load transfer approach for studying the cyclic behavior of thermo-active piles. Computers & Geotechnics 55 ,378-391.
9. Itasca Consulting Group Inc. FLAC 3D: Section 1: Thermal option. Minneapolis: User's manual , 2000.
10. Δημήτριος Μπόζης (2011) Ο πάσσαλος θεμελίωσης ως γεωεναλλάκτης: Διερευνήσεις για την θερμική του συμπεριφορά Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης πολυτεχνική σχολή τμήμα πολιτικών μηχανικών
11. Αποστολίδου γεωργία (2010) Συστήματα αξιοποίησης του εδάφους για θέρμανση-ψύξη κτιρίων Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης πολυτεχνική σχολή τμήμα πολιτικών μηχανικών



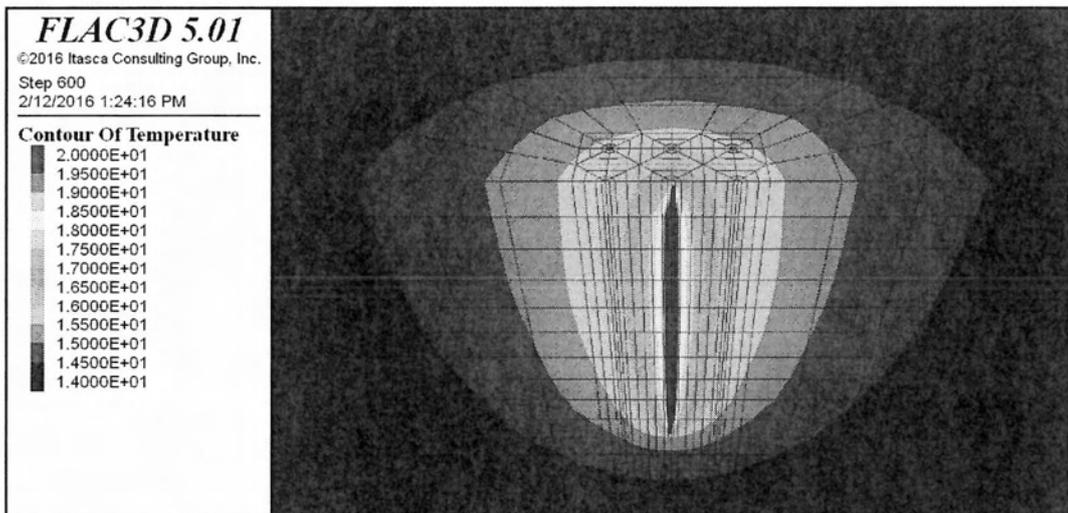
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

A

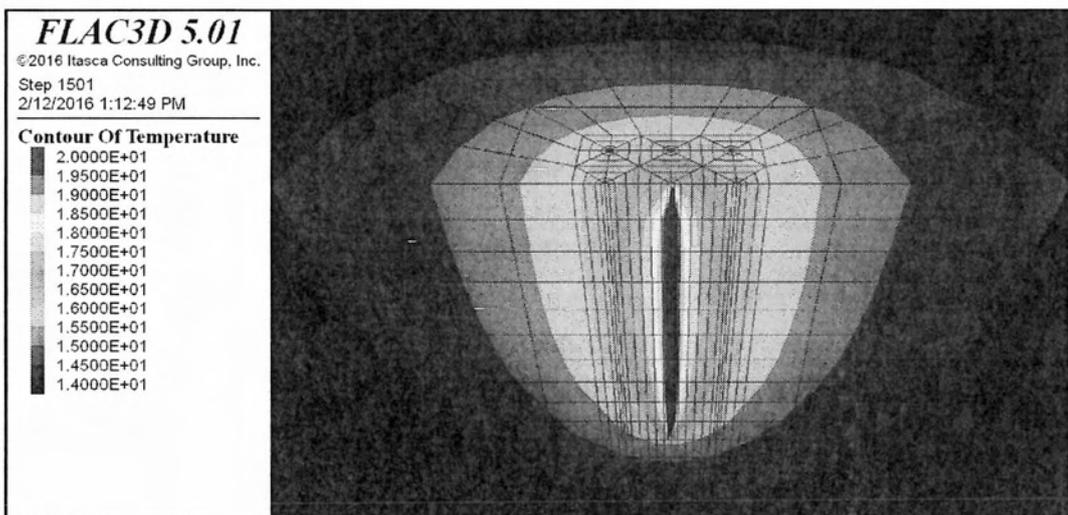
Προφίλ – διαγράμματα θερμοκρασιών μεμονωμένου πασσάλου



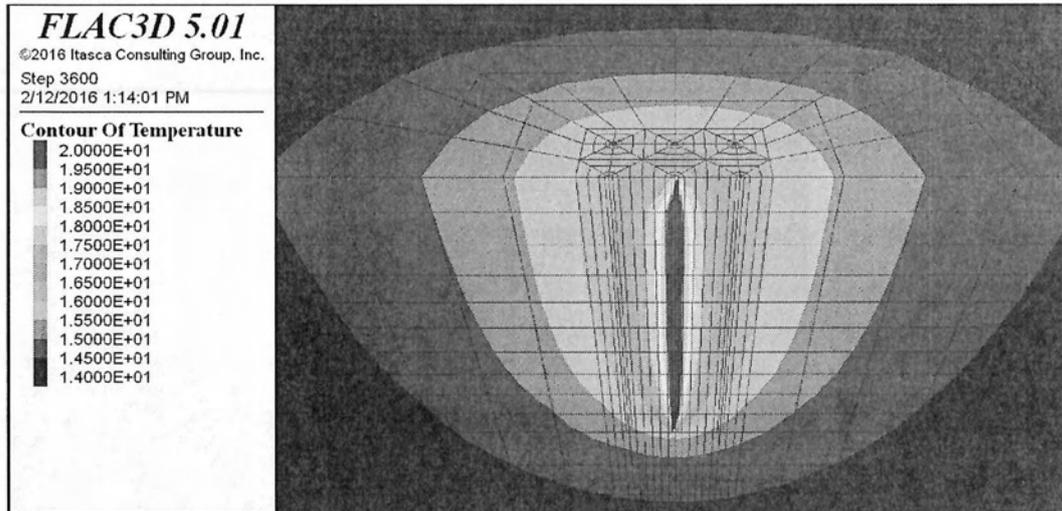
Σχήμα Α.1. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 1h



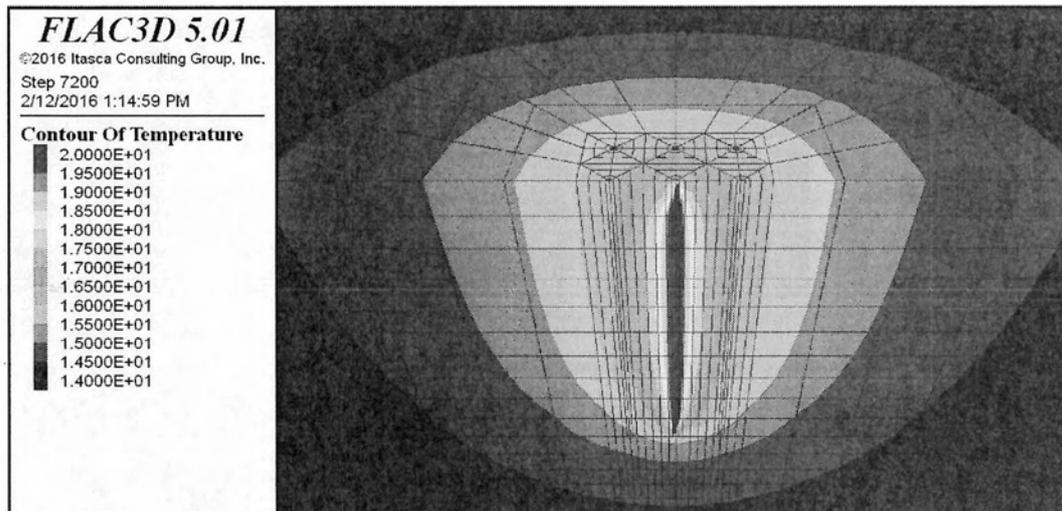
Σχήμα Α.2. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 2h



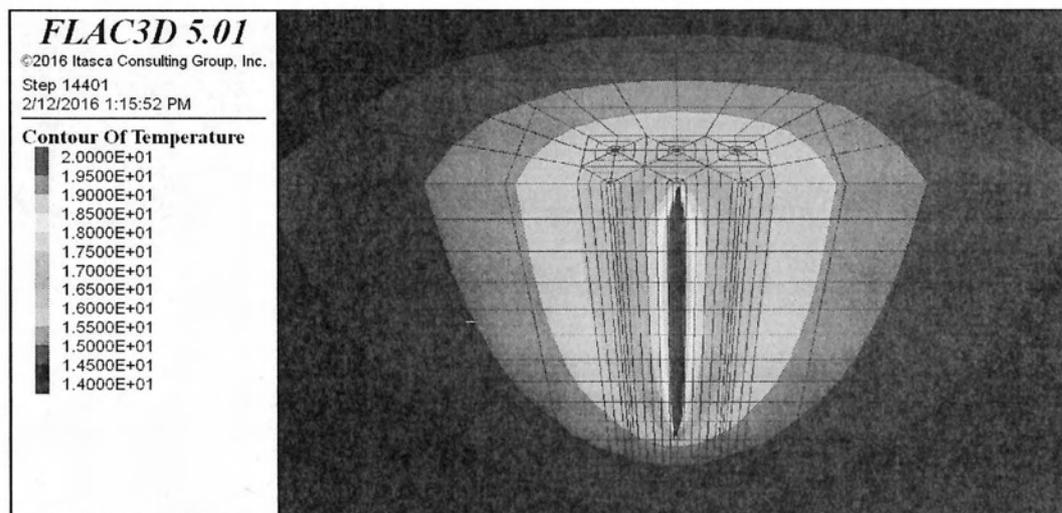
Σχήμα Α.3. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 5h



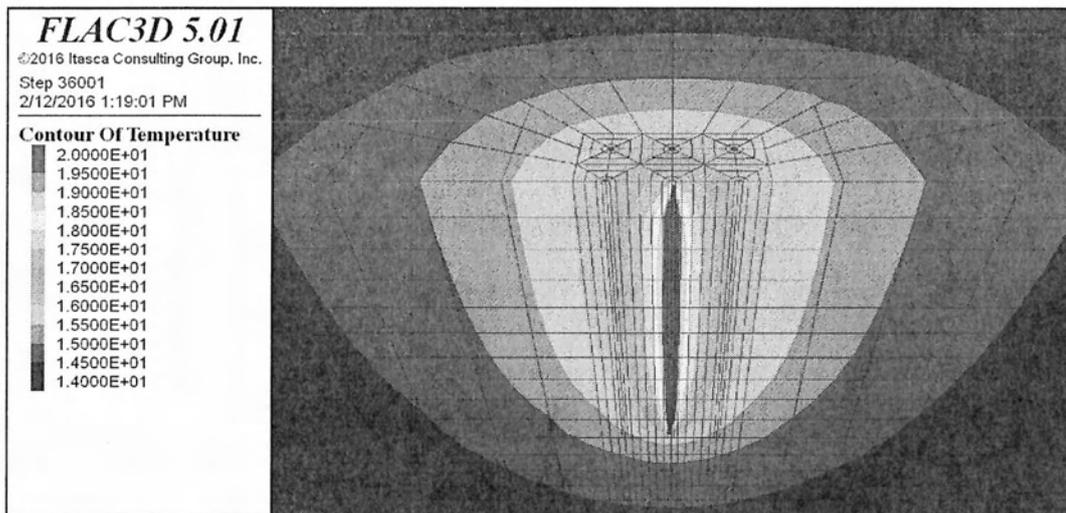
Σχήμα Α.4. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 12h



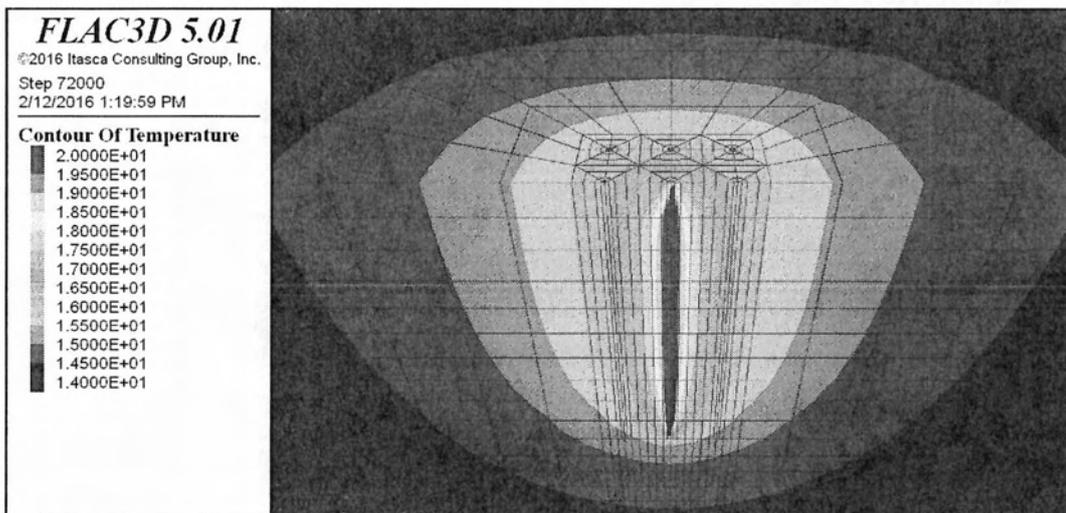
Σχήμα Α.5. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 1d



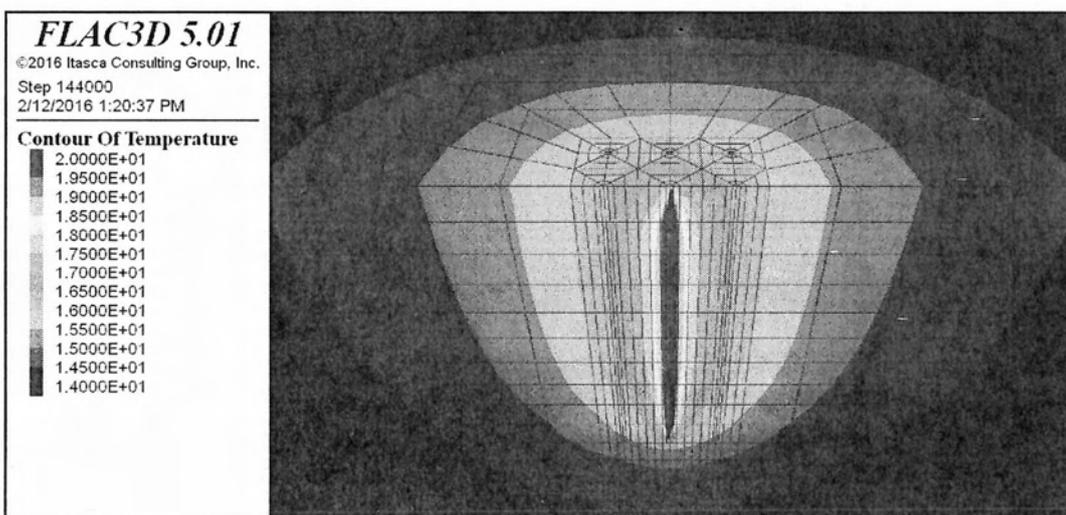
Σχήμα Α.6. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 2d



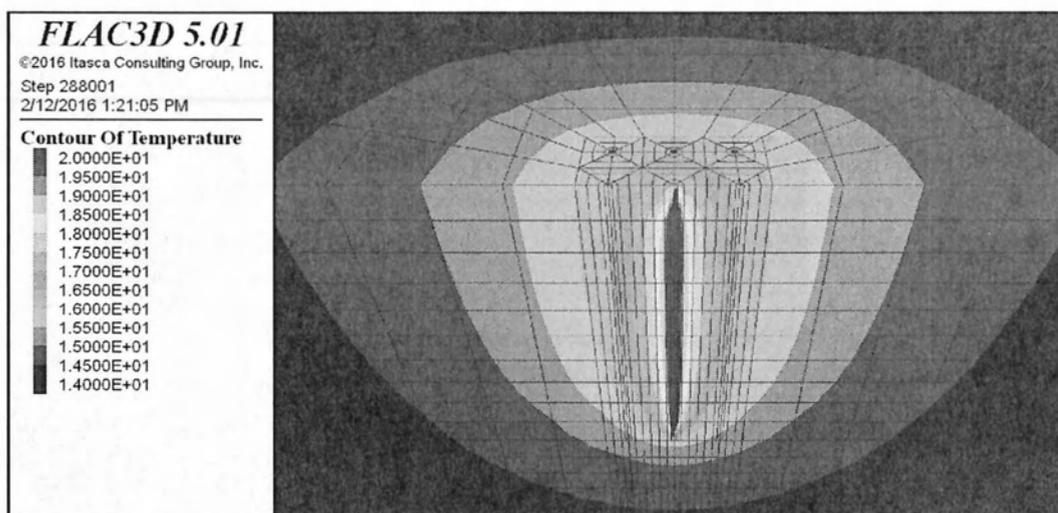
Σχήμα Α.7. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 5d



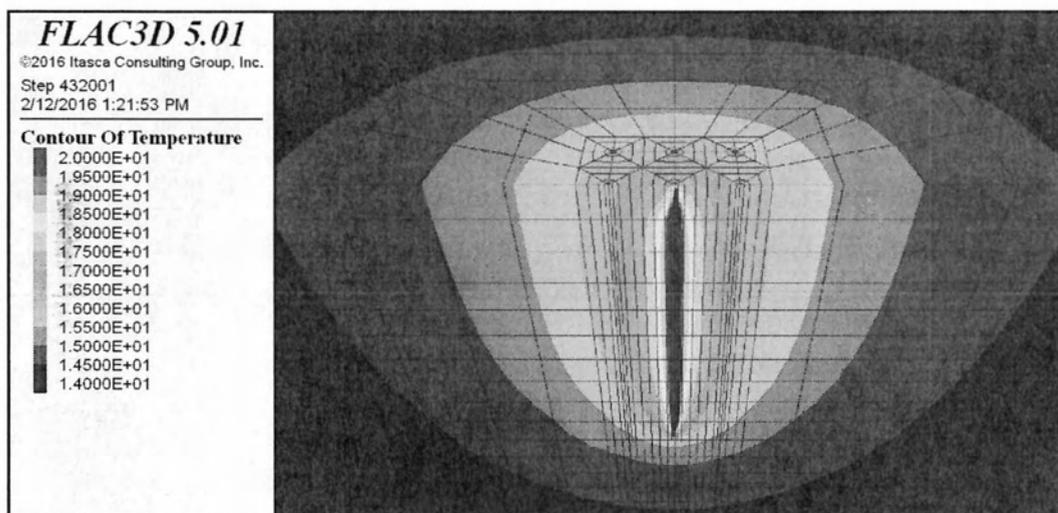
Σχήμα Α.8. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 10d



Σχήμα Α.9. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 20d

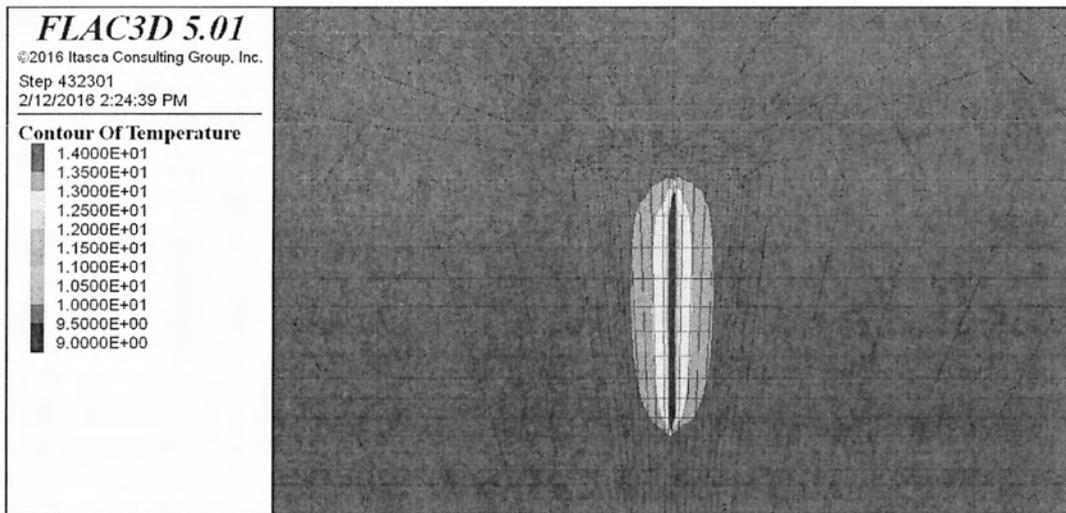


Σχήμα Α.10. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 40d

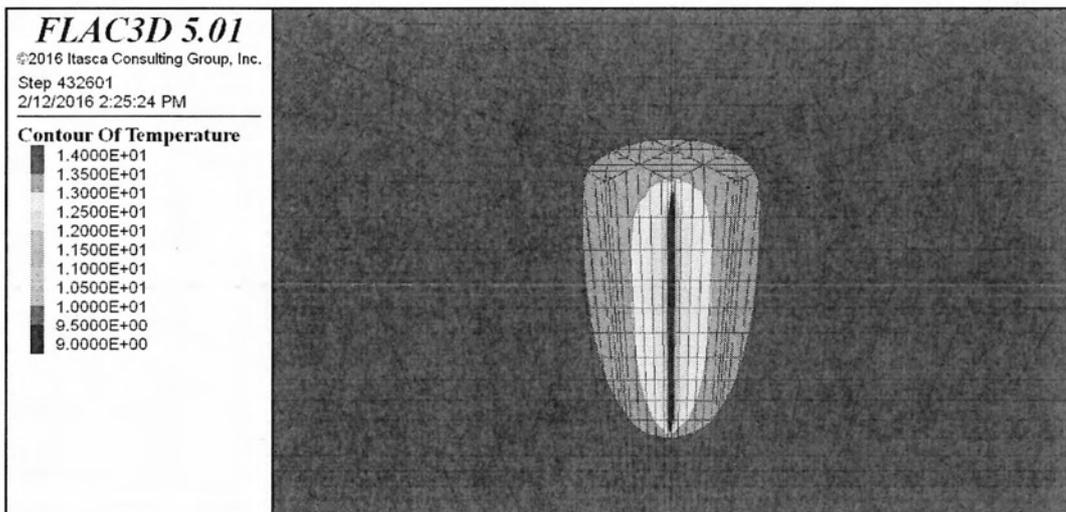


Σχήμα Α.11. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 60d

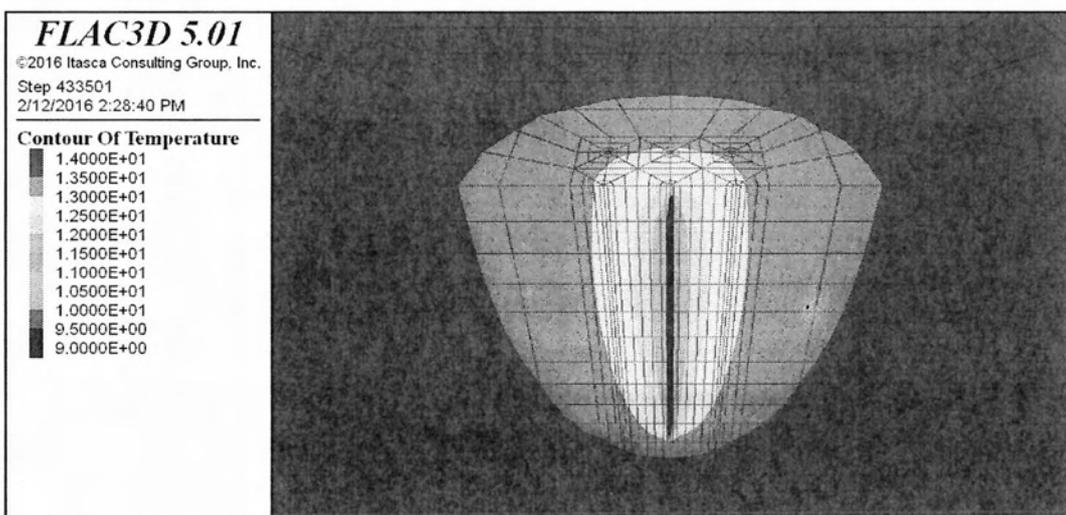




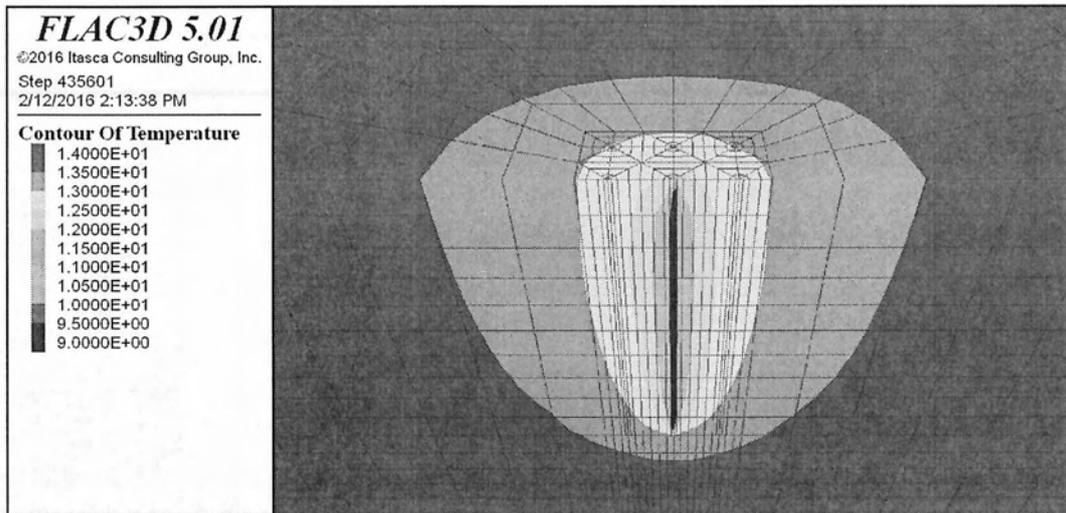
Σχήμα Α.12. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 1h



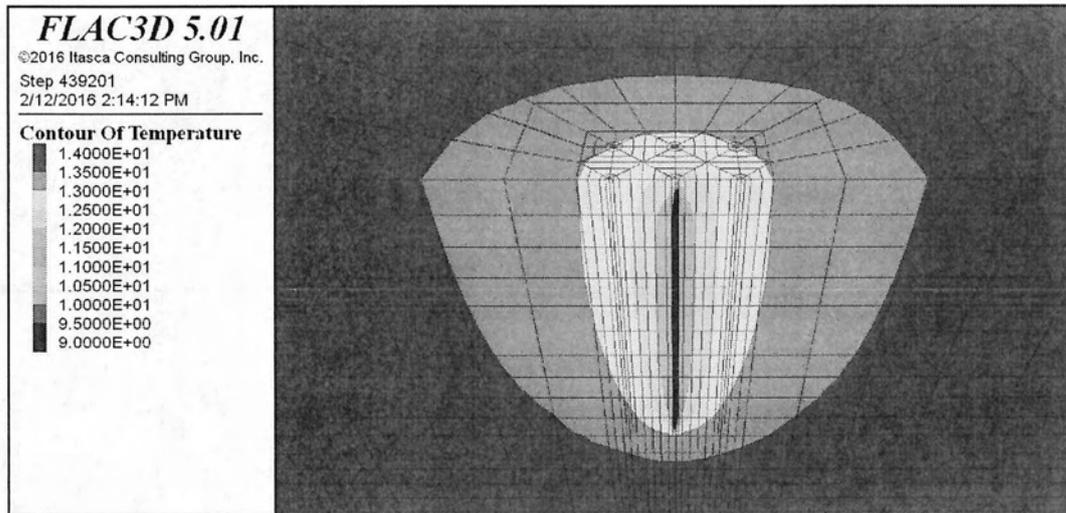
Σχήμα Α.13. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 2h



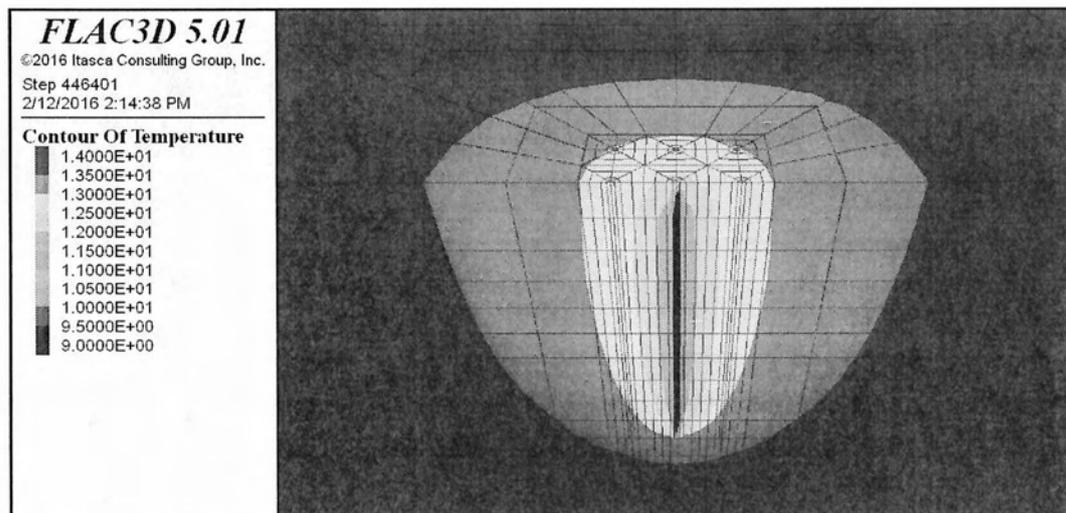
Σχήμα Α.14. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 5h



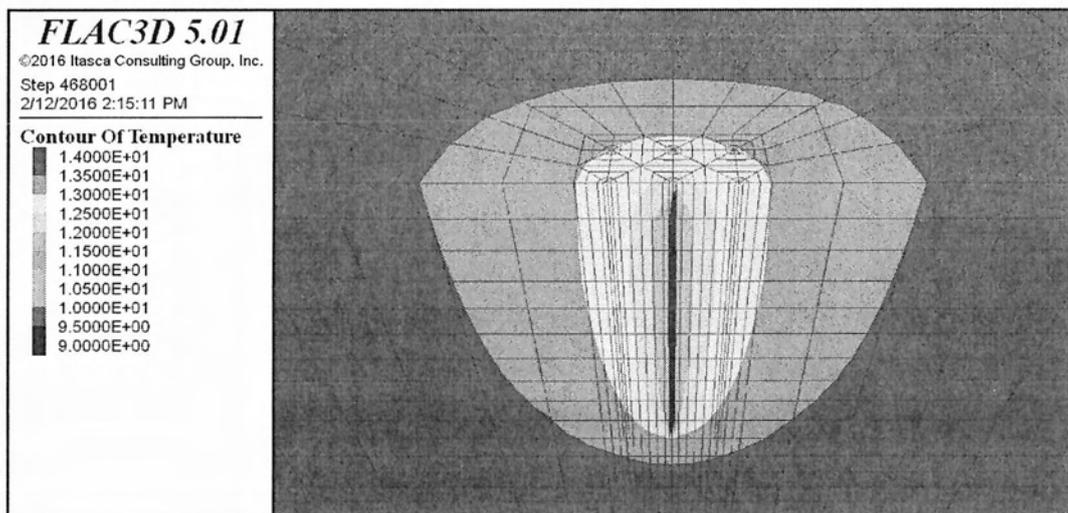
Σχήμα Α.15. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 12h



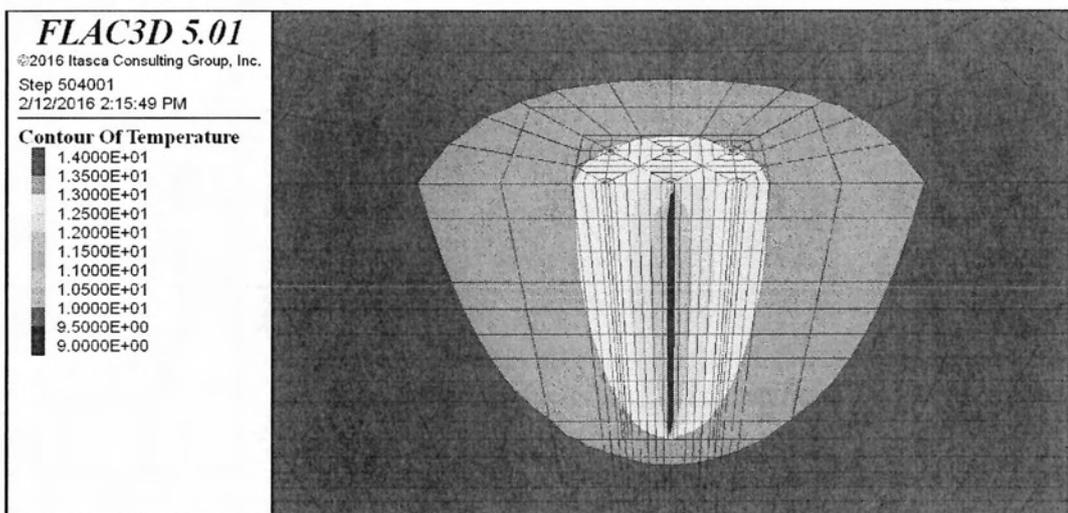
Σχήμα Α.16. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 1d



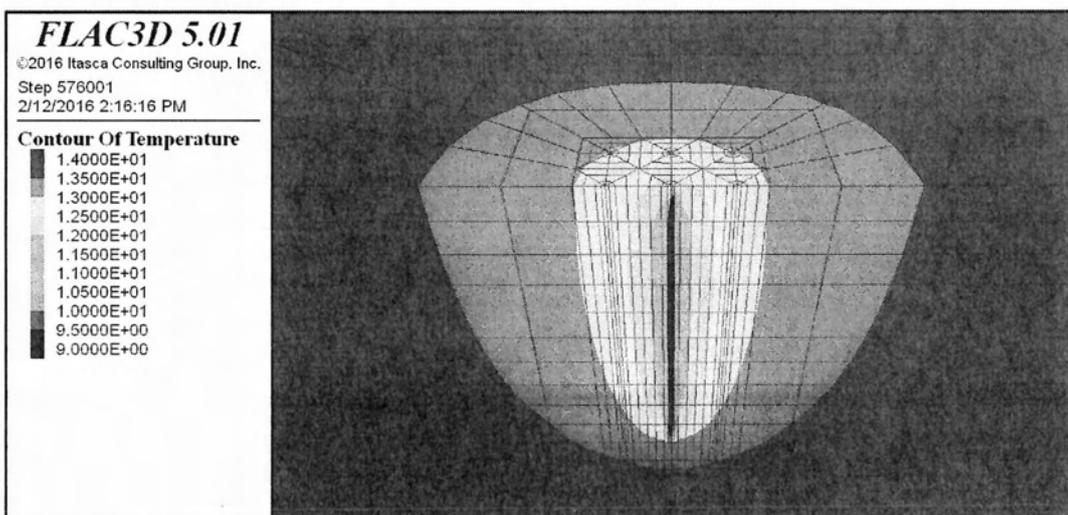
Σχήμα Α.17. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 2d



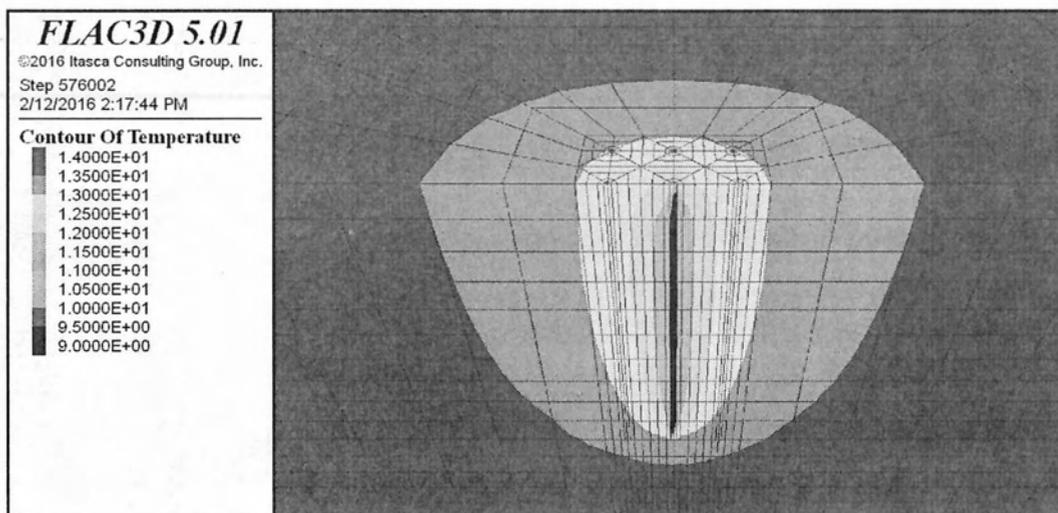
Σχήμα Α.18. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 5d



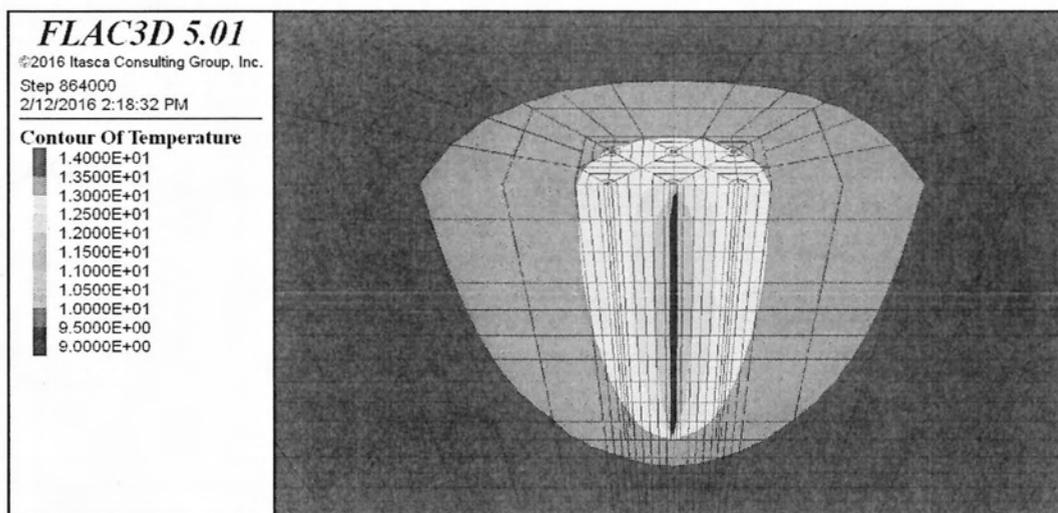
Σχήμα Α.19. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 10d



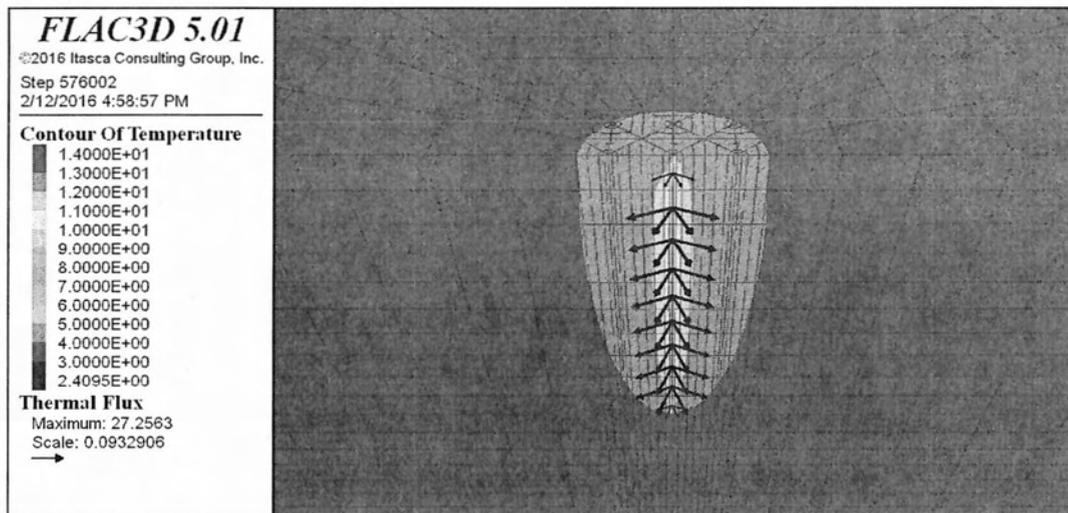
Σχήμα Α.20. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 20d



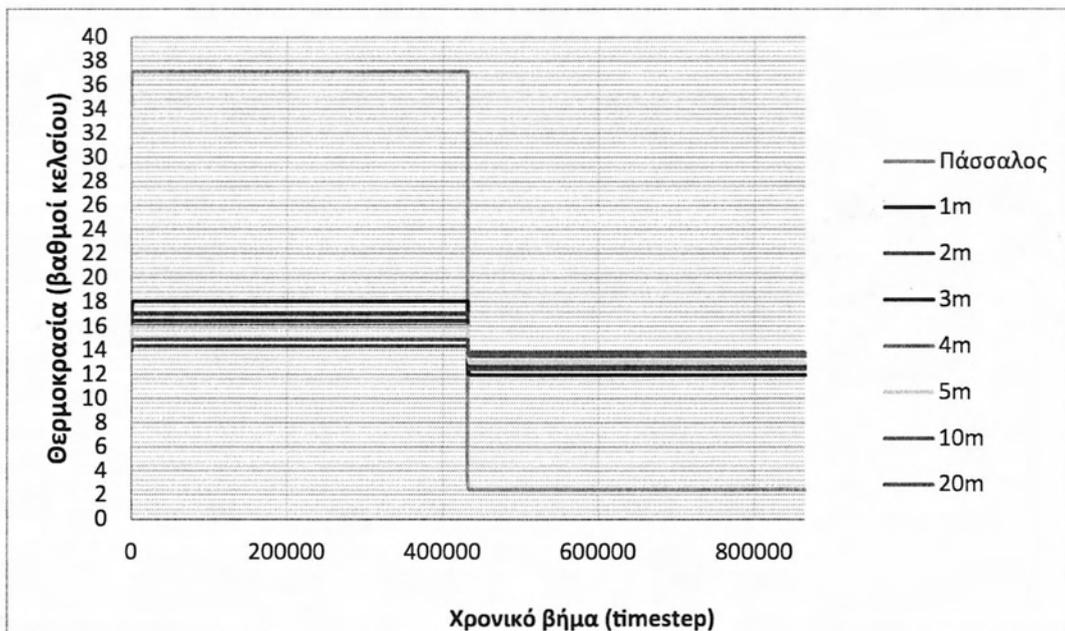
Σχήμα A.21. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 40d



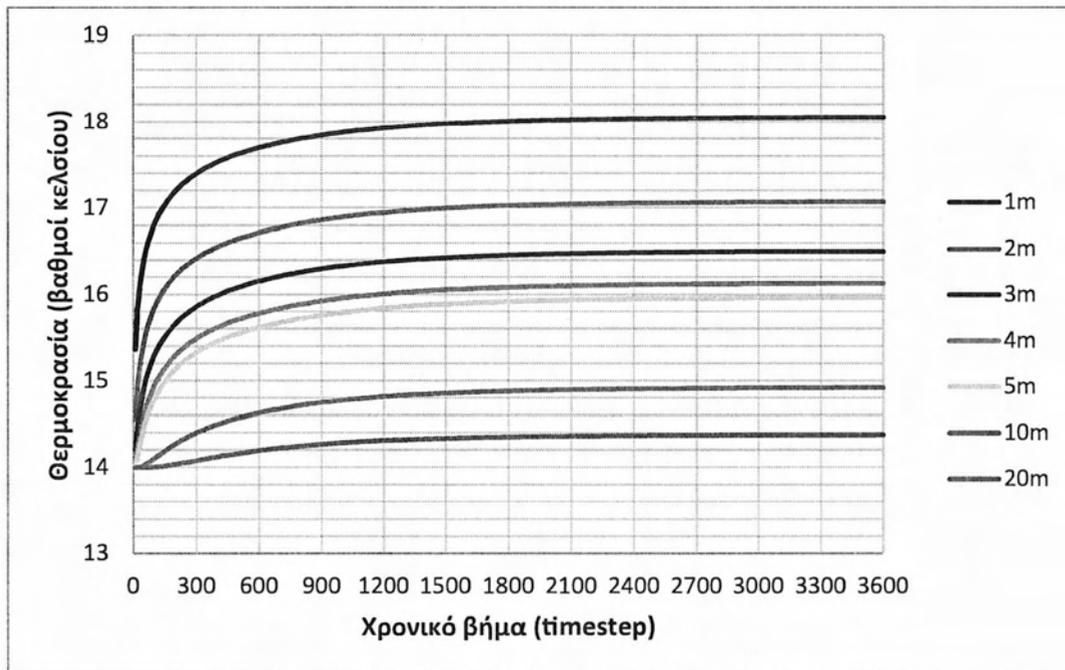
Σχήμα A.22. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 60d



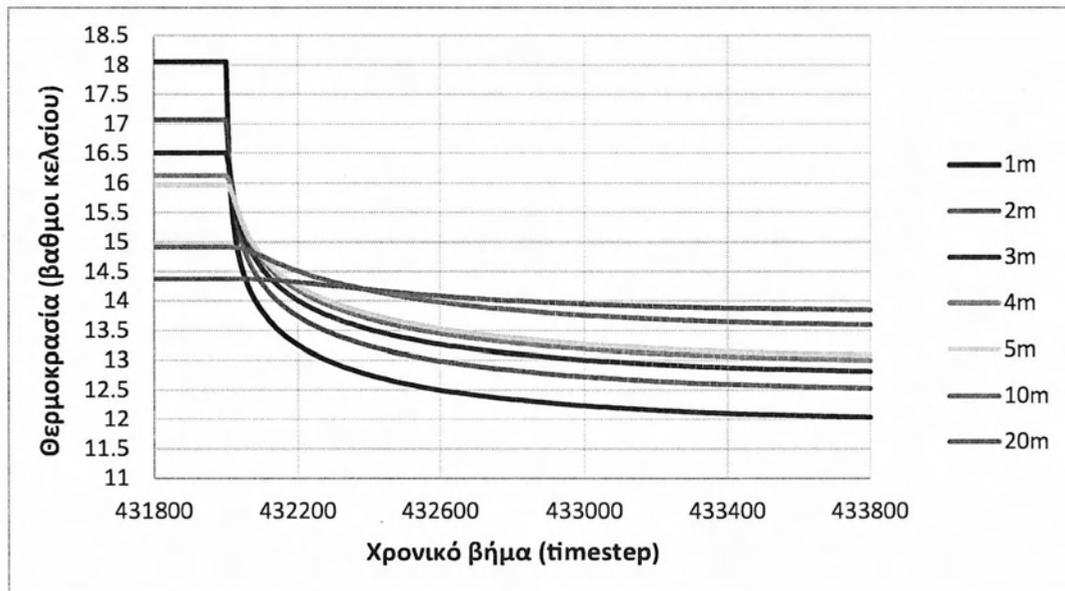
Σχήμα Α.23. Διανύσματα ροής θερμότητας κατά μήκος του πασσάλου



Σχήμα Α.24. Εξέλιξη θερμοκρασίας 8 σημείων του εδάφους για 1 έτος λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα Α.25. Εξέλιξη θερμοκρασιών σημείων του εδάφους 12h μετά την έναρξη λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα Α.26. Χρονική εξέλιξη θερμοκρασιών σημείων του εδάφους κατά την εναλλαγή του φορτίου (θέρμανση σε ψύξη).

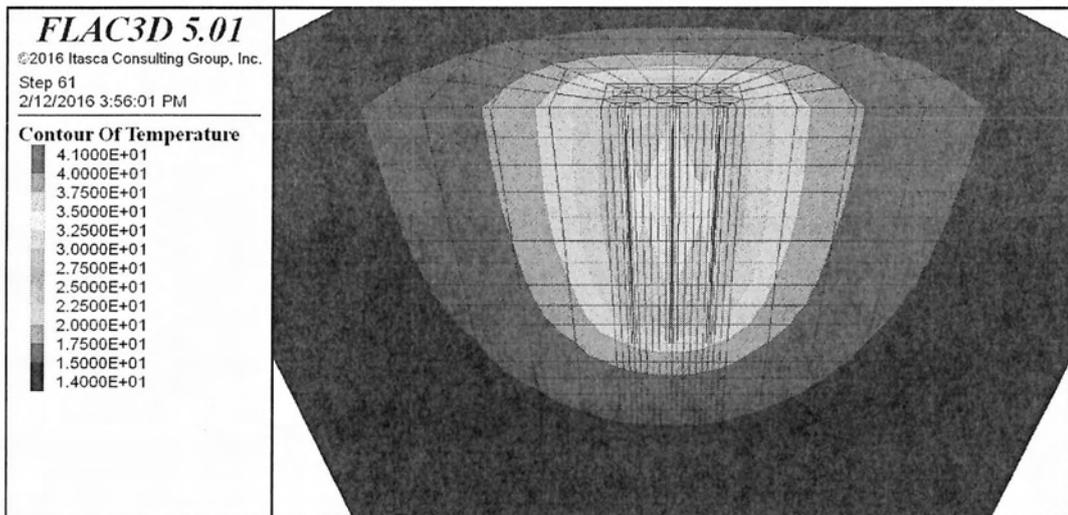


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

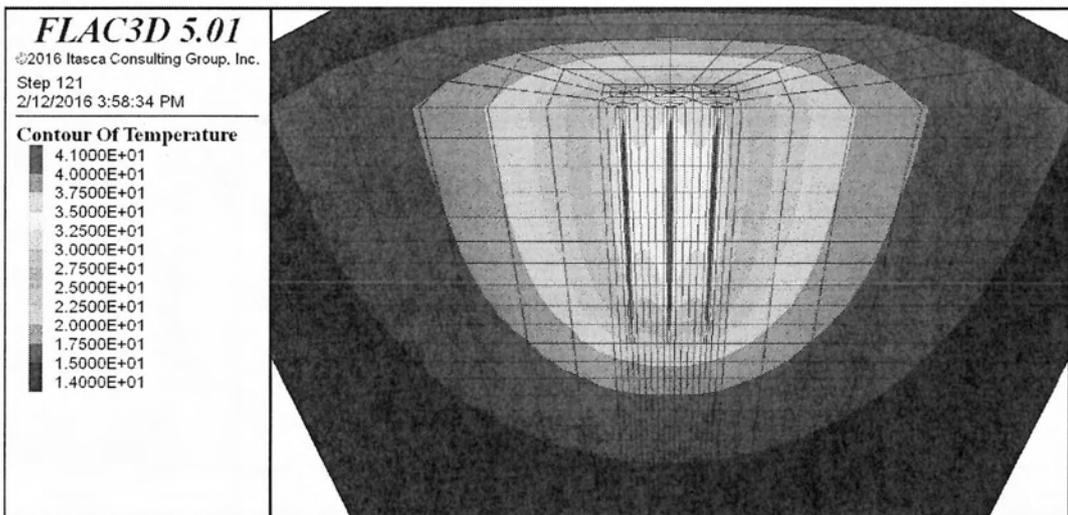
**B**

Προφίλ – διαγράμματα θερμοκρασιών ομάδας πασσάλων

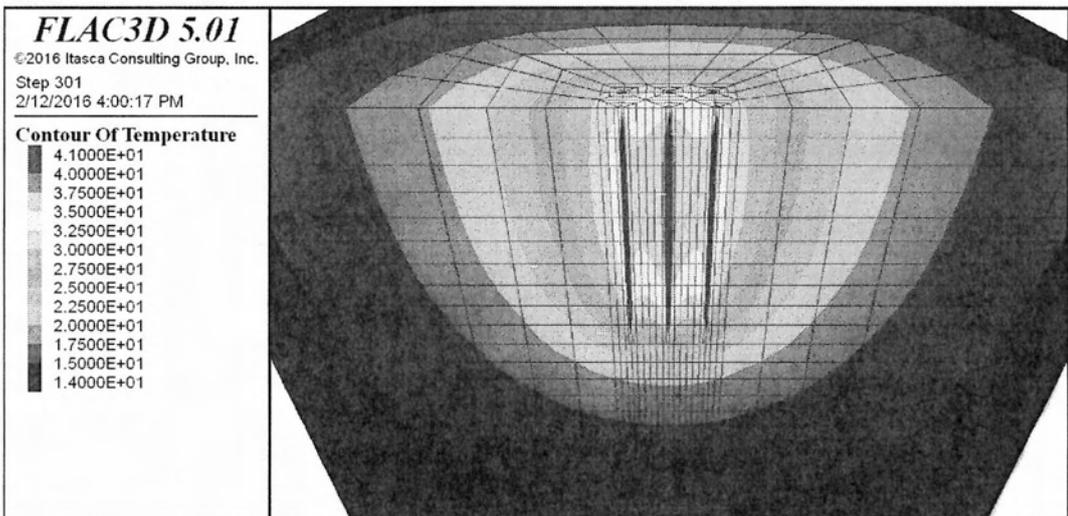




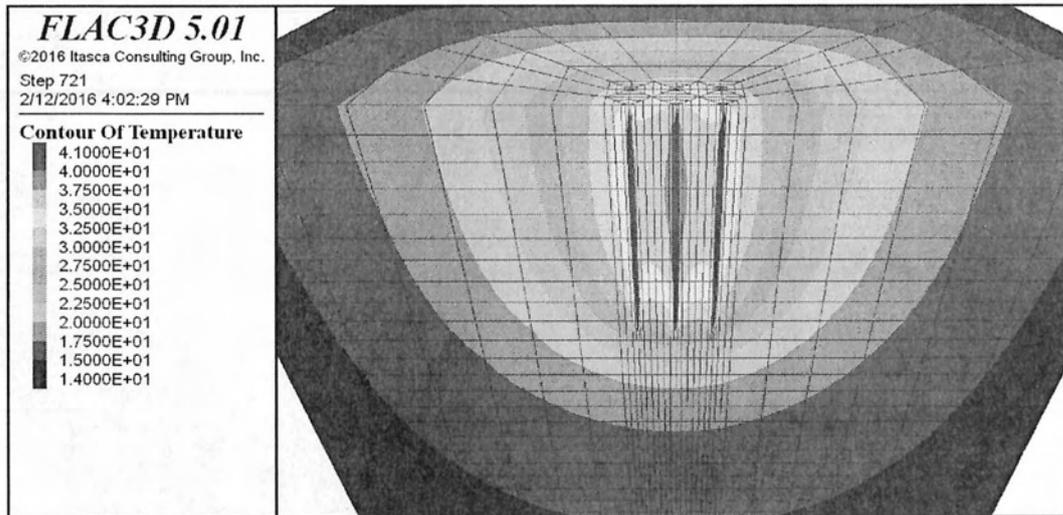
Σχήμα Β.1. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 1h



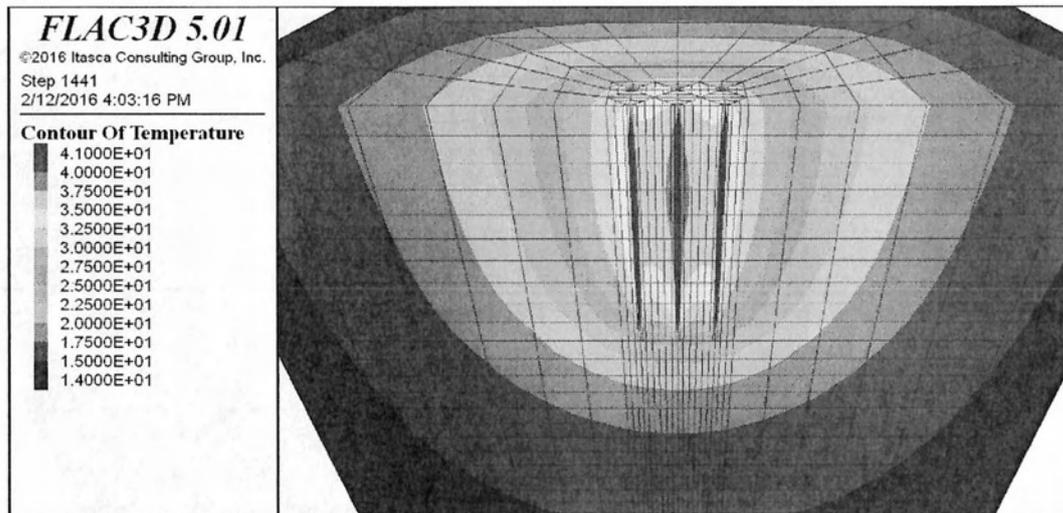
Σχήμα Β.2. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 2h



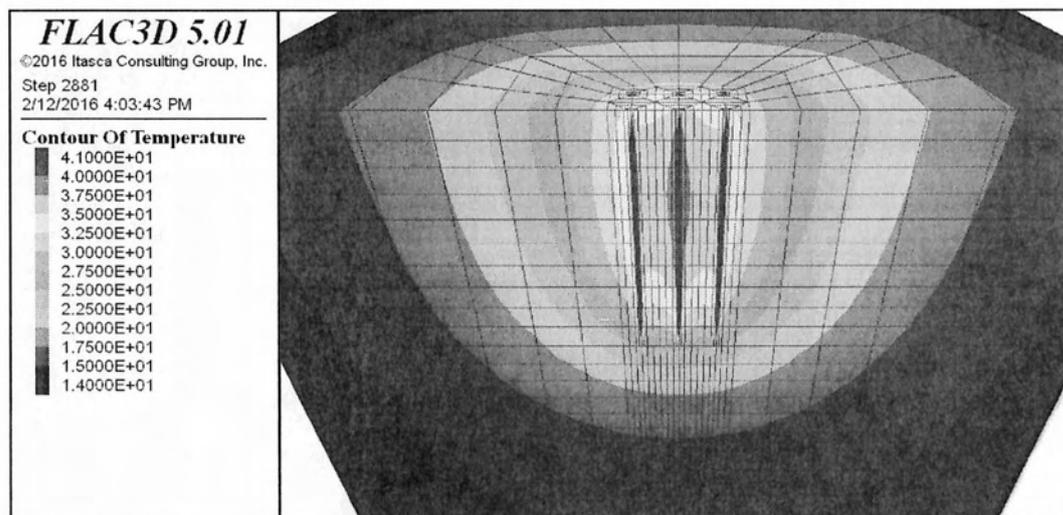
Σχήμα Β.3. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 5h



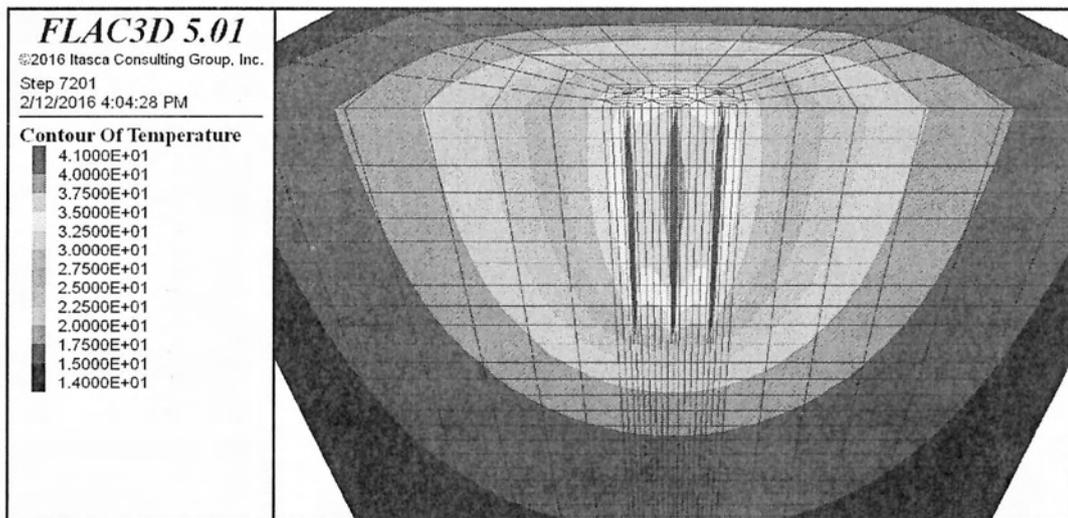
Σχήμα Β.4. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 12h



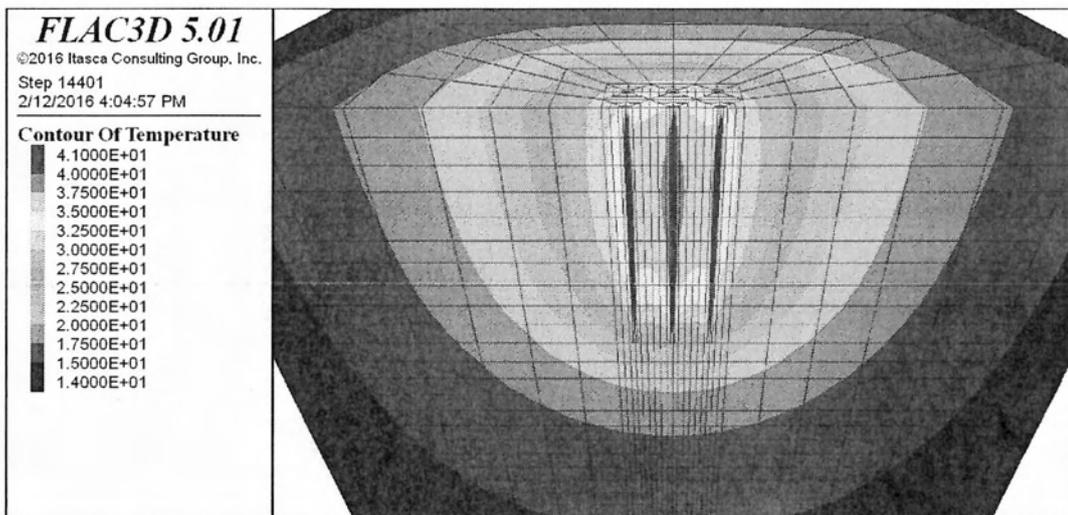
Σχήμα Β.5. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 1d



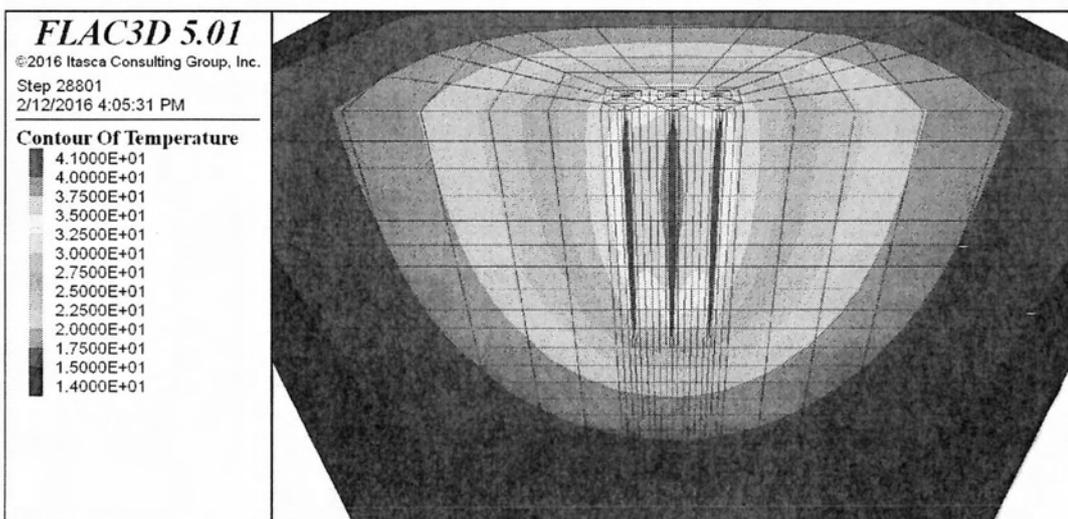
Σχήμα Β.6. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 2d



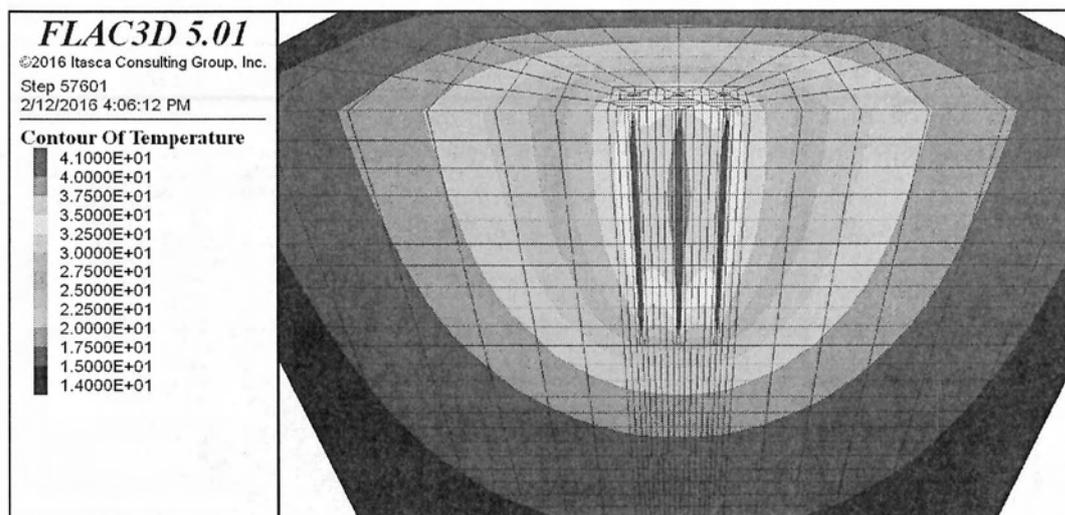
Σχήμα Β.7. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 5d



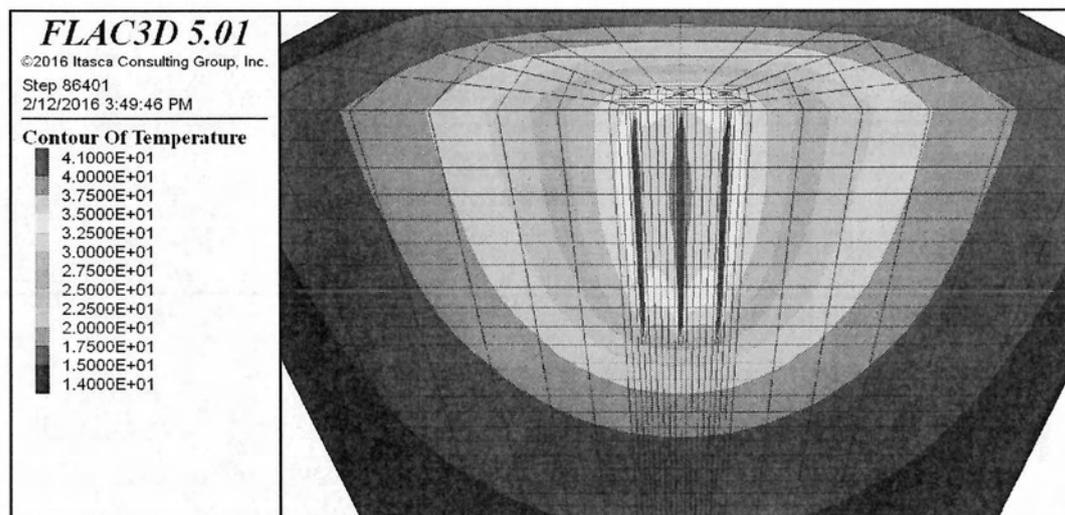
Σχήμα Β.8. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 10d



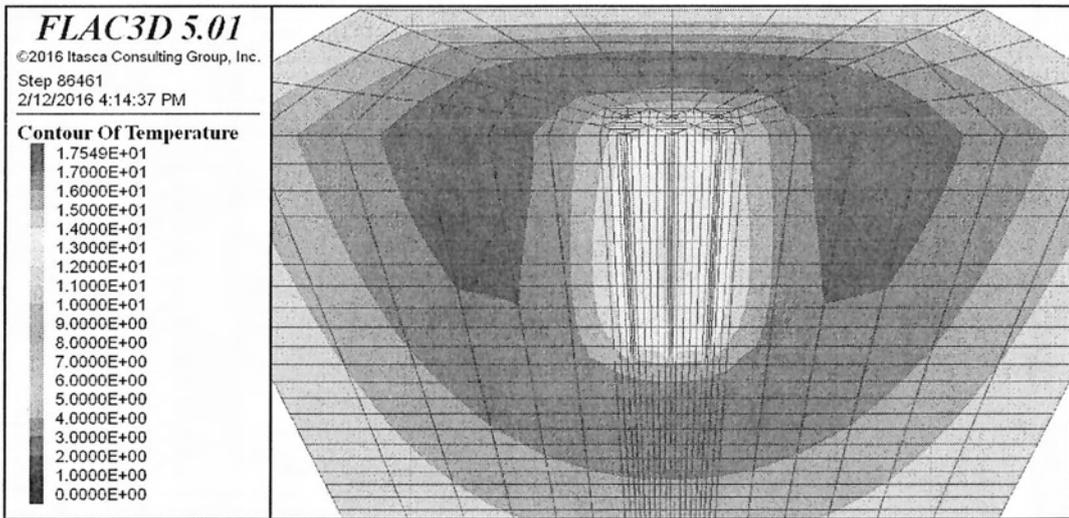
Σχήμα Β.9. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 20d



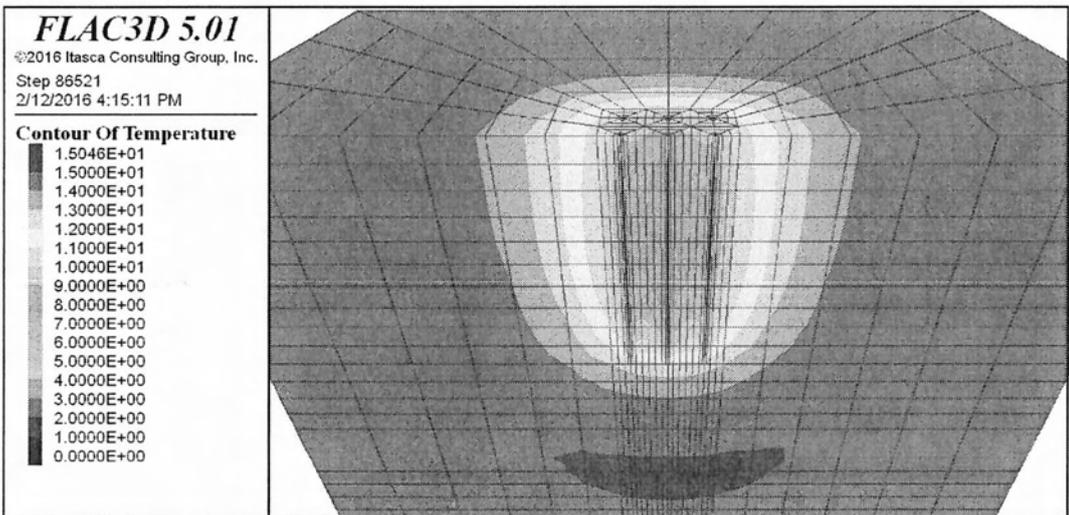
Σχήμα Β.10. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 40d



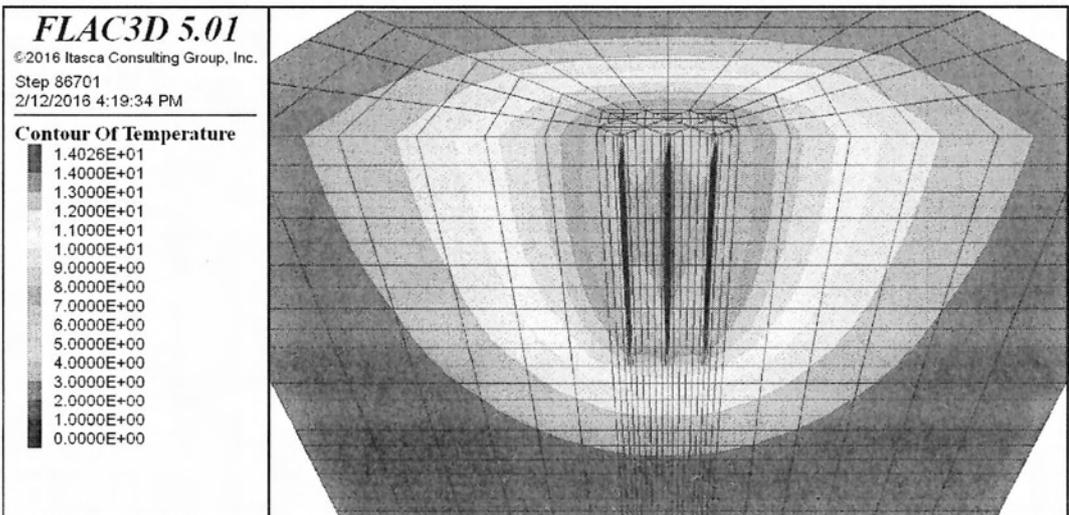
Σχήμα Β.11. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την εισαγωγή θερμότητας, μετά από 60d



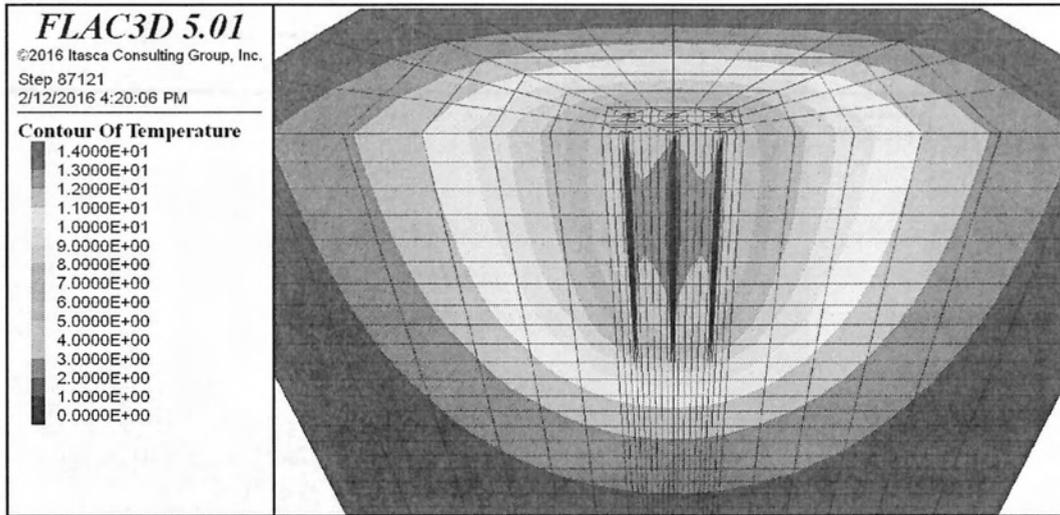
Σχήμα Β.12. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 1h



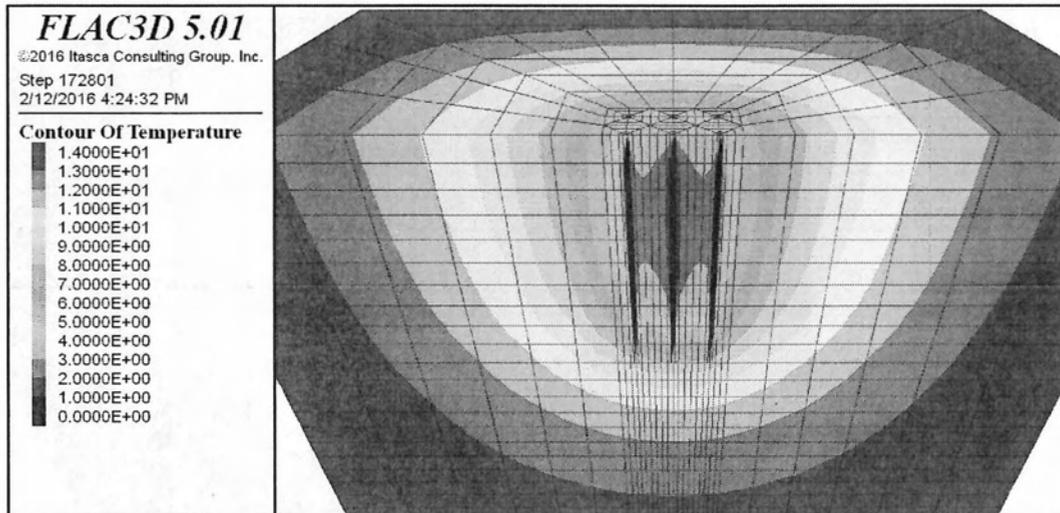
Σχήμα Β.13. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 2h



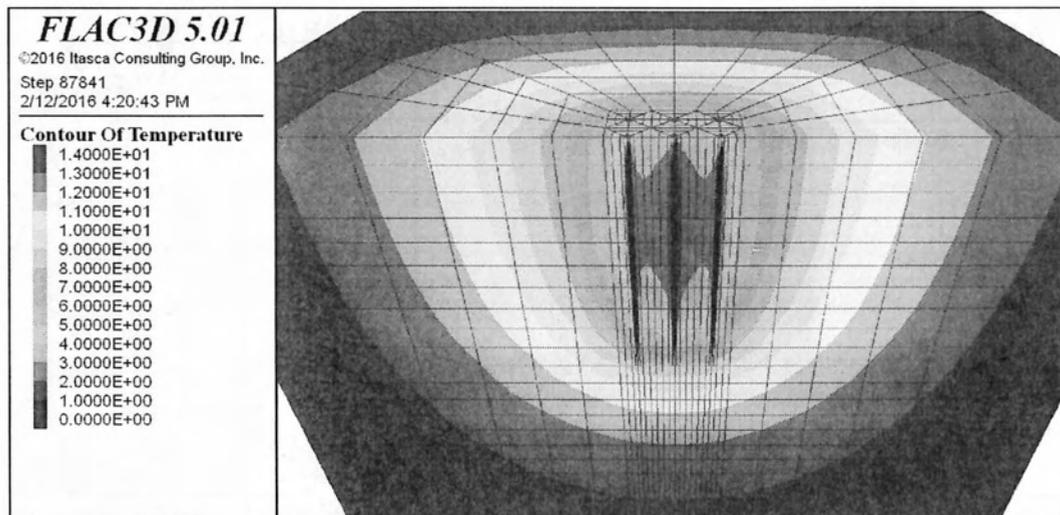
Σχήμα Β.14. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 5h



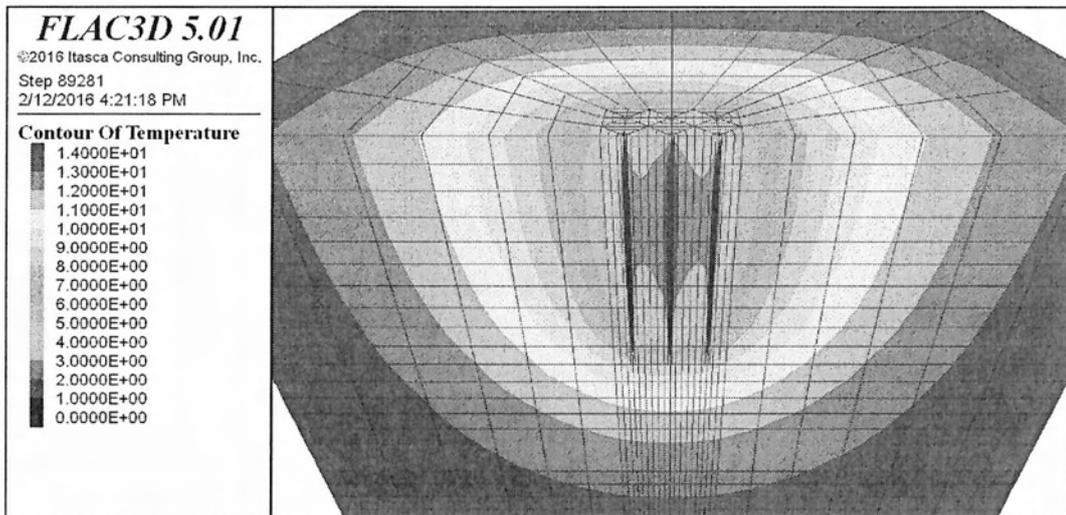
Σχήμα Β.15. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 12h



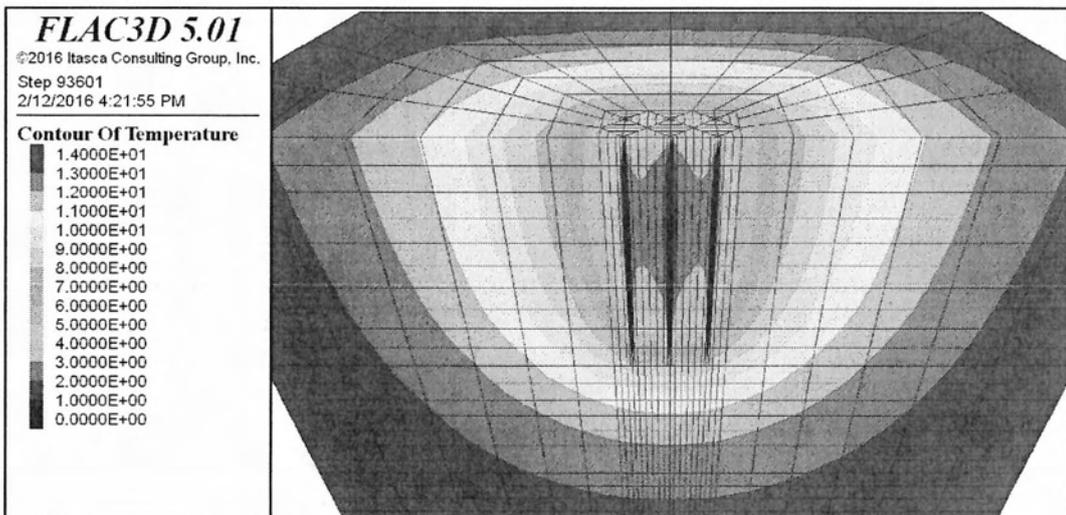
Σχήμα Β.16. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 1d



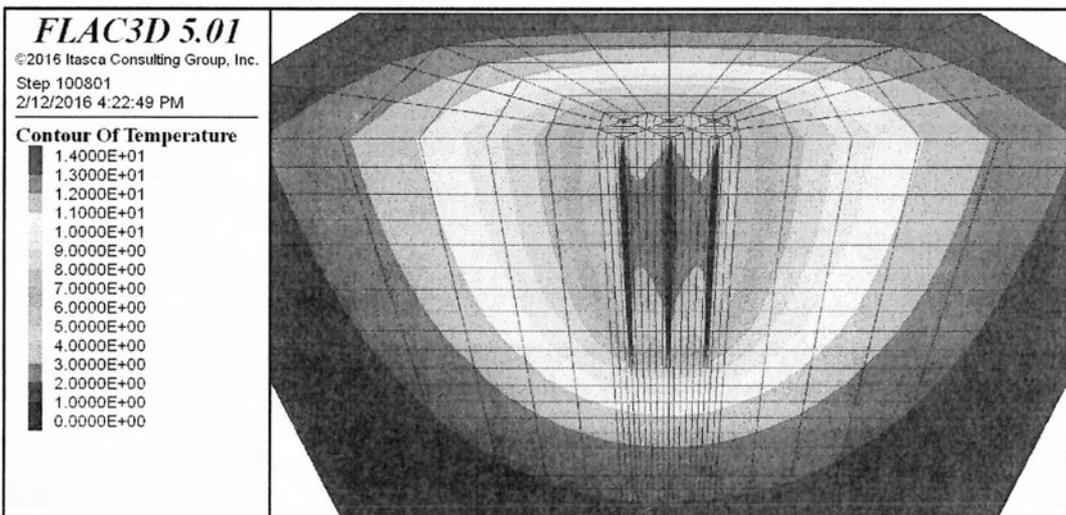
Σχήμα Β.17. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 2d



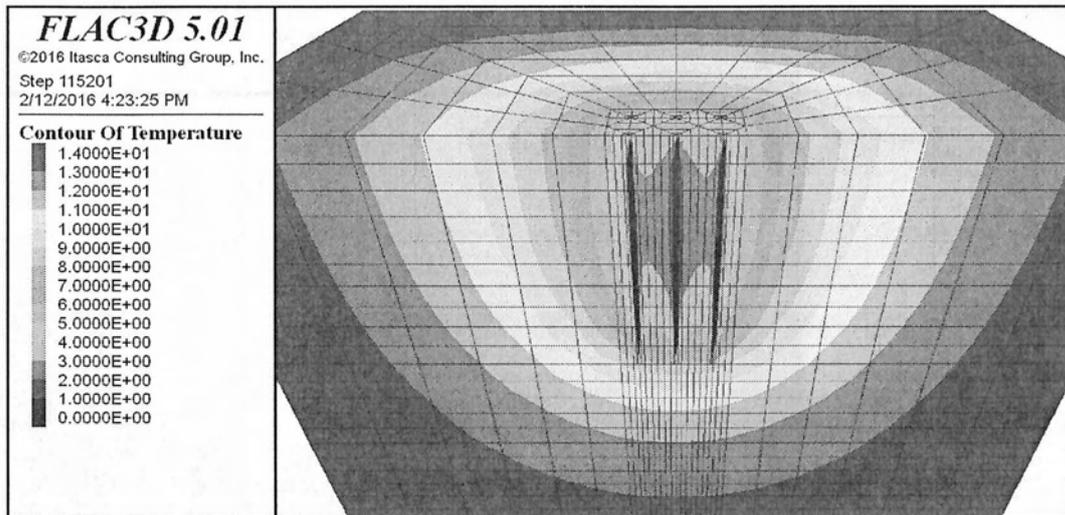
Σχήμα Β.18. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 5d



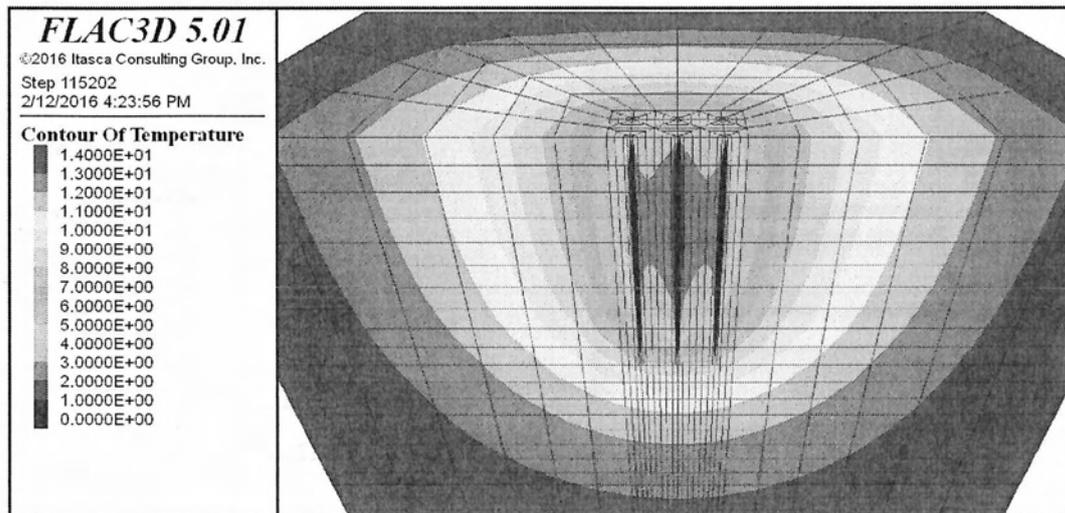
Σχήμα Β.19. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 10d



Σχήμα Β.20 Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 20d

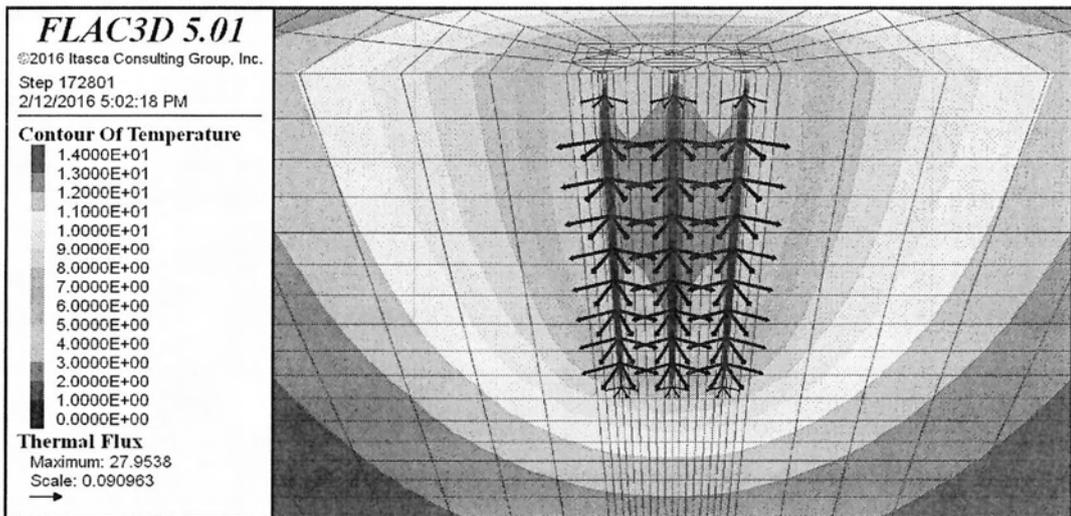


Σχήμα Β.21. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 40d

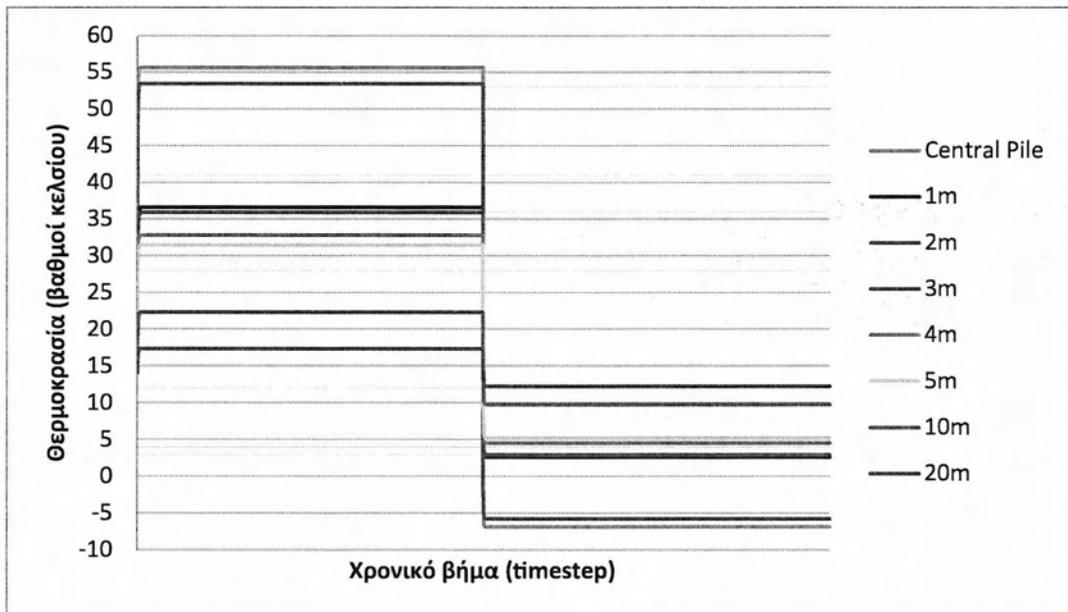


Σχήμα Β.22. Ισοτιμές θερμοκρασιών κατά την απαγωγή θερμότητας, μετά από 60d

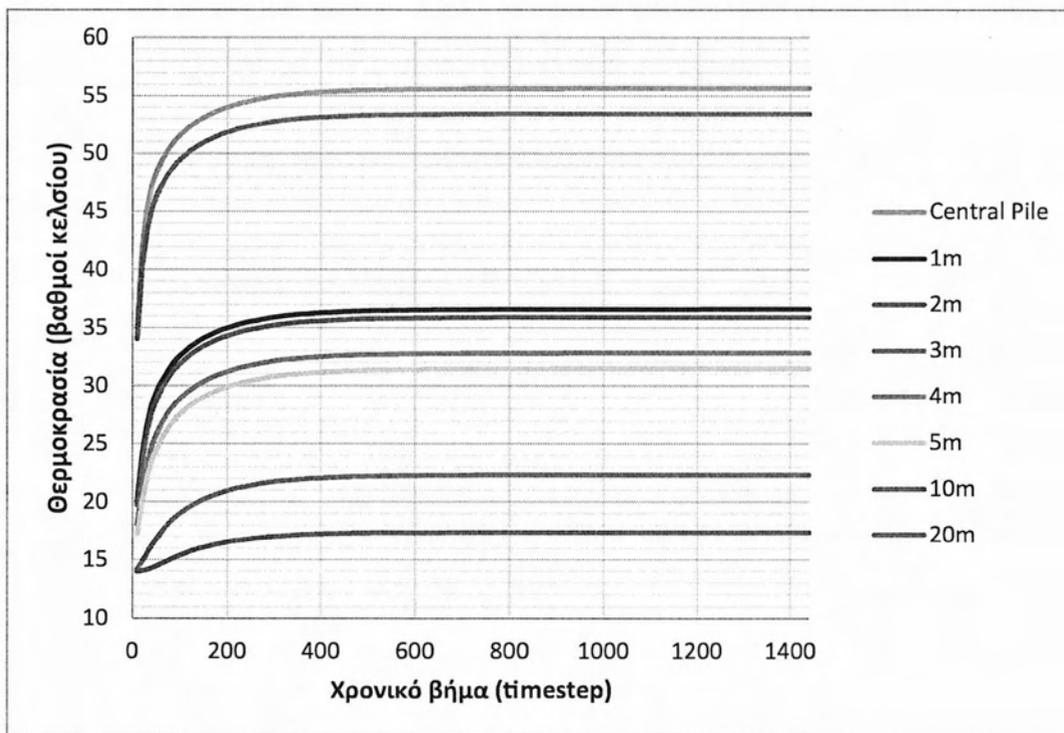




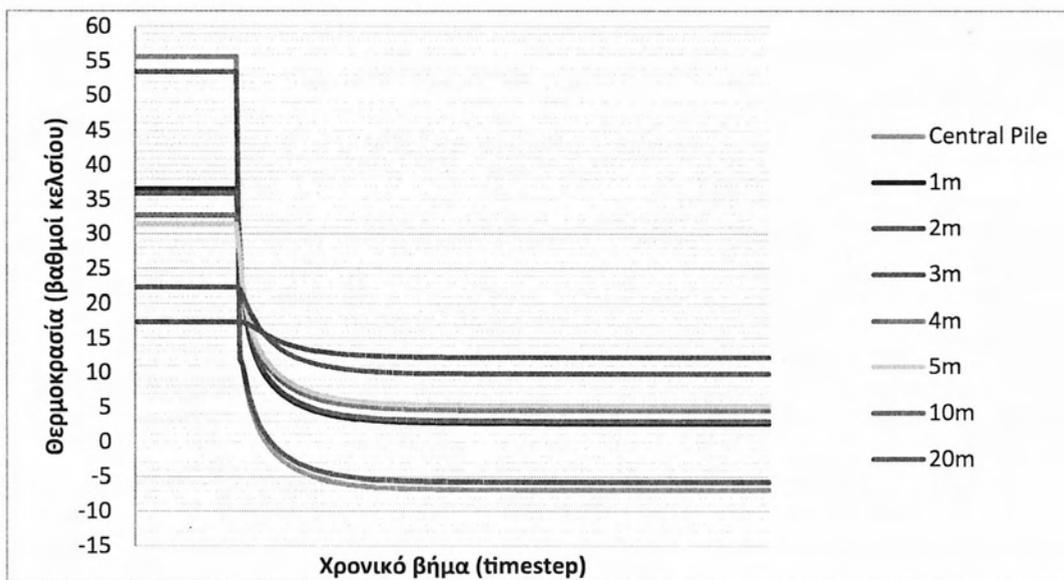
Σχήμα Β.23. Διανύσματα ροής θερμότητας κατά μήκος των πασσάλων



Σχήμα Β.24. Εξέλιξη θερμοκρασίας 8 σημείων του εδάφους για 1 έτος λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα Β.25. Εξέλιξη θερμοκρασιών σημείων του εδάφους 1d μετά την έναρξη λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα Β.26. Χρονική εξέλιξη θερμοκρασιών σημείων του εδάφους κατά την εναλλαγή του φορτίου (θέρμανση σε ψύξη).



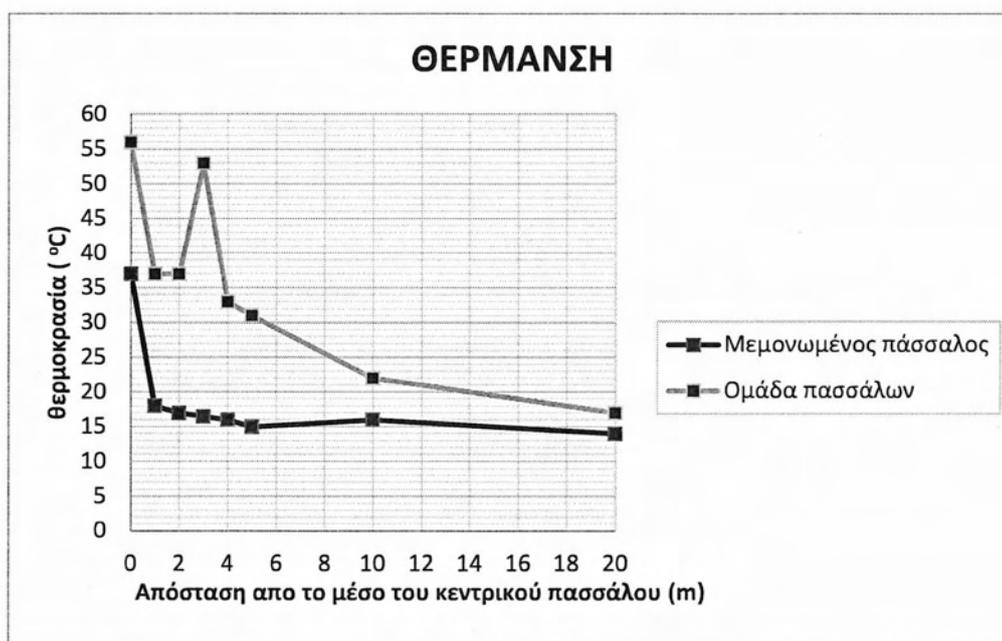
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Γ

Συγκριτικοί πίνακες- διαγράμματα & Units

Απόσταση από την αρχή των αξόνων	Μεμονωμένος πάσσαλος	Ομάδα πασσάλων
Central pile	37 °C	56 °C
1m	18 °C	37 °C
2m	17 °C	37 °C
3m	16,5 °C	53 °C
4m	16 °C	33 °C
5m	16 °C	31 °C
10m	15 °C	22 °C
20m	14 °C	17 °C

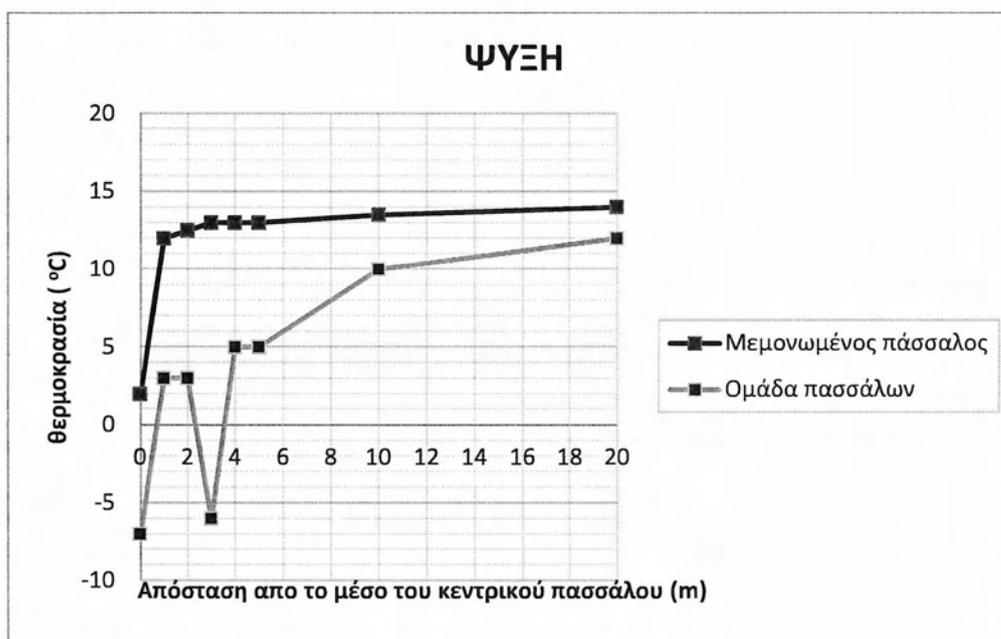
Σχήμα Γ.1. Θερμοκρασίες μεμονωμένου-ομάδας πασσάλων σε διαφορετικά σημεία του εδάφους κατά την θέρμανση μετά την ισορροπία του συστήματος.



Σχήμα Γ.2. Διάγραμμα θερμοκρασιών – εξεταζόμενων σημείων μεμονωμένου πασσάλου και ομάδας πασσάλων κατά την θέρμανση μετά την ισορροπία του συστήματος.

Απόσταση από την αρχή των αξόνων	Μεμονωμένος πάσσαλος	Ομάδα πασσάλων
Central pile	2 °C	-7
1m	12 °C	3 °C
2m	12,5 °C	3 °C
3m	13 °C	-6
4m	13 °C	5 °C
5m	13 °C	5 °C
10m	13,5 °C	10 °C
20m	14 °C	12 °C

Σχήμα Γ.3. Θερμοκρασίες μεμονωμένου-ομάδας πασσάλων σε διαφορετικά σημεία του εδάφους κατά την ψύξη μετά την ισορροπία του συστήματος.



Σχήμα Γ.4. Διάγραμμα θερμοκρασιών – εξεταζόμενων σημείων μεμονωμένου πασσάλου και ομάδας πασσάλων κατά την ψύξη μετά την ισορροπία του συστήματος.

Table 1.1 System of SI units for thermal problems

Length	m	m	m	cm
Density	kg/m <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup> kg/m <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup> g/cm <sup>3</sup>
Stress	Pa	kPa	MPa	bar
Temperature	K	K	K	K
Time	s	s	s	s
Specific Heat	J/(kg K)	10 <sup>-3</sup> J/(kg K)	10 <sup>-6</sup> J/(kg K)	10 <sup>-6</sup> cal/(g K)
Thermal Conductivity	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)	(cal/s)/cm <sup>2</sup> K <sup>-1</sup>
Convective Heat-Trans. Coefficient	W/(m <sup>2</sup> K)	(W/m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)	(cal/s)/(cm <sup>2</sup> K)
Radiative Heat-Trans. Coefficient	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	(cal/s)/cm <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
Flux Strength	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	(cal/s)/cm <sup>2</sup>
Source Strength	W/m <sup>3</sup>	W/m <sup>3</sup>	W/m <sup>3</sup>	(cal/s)/cm <sup>3</sup>
Decay Constant	s <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>

Σχήμα Γ.5. Μονάδες μέτρησης για θερμικά προβλήματα

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000125589

