

# Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα

*Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος*

## Μεταπτυχιακή Διατριβή



**Η Γεωθερμική Ενέργεια και η αξιολόγηση των γεωθερμικών  
παραμέτρων των Γεωλογικών Σχηματισμών της Κύπρου με  
τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων  
Πληροφοριών/GIS**

**Παντελίτσα Μ. Κουδουνά**

**Επιβλέπουσα Καθηγήτρια  
Σίσσυ Ευθυμιάδου**

**Μάιος 2016**

# **Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου**

**Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών**

**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα**

*Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος*

## **Μεταπτυχιακή Διατριβή**

**Η Γεωθερμική Ενέργεια και η αξιολόγηση των γεωθερμικών  
παραμέτρων των Γεωλογικών Σχηματισμών της Κύπρου με  
τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων  
Πληροφοριών/GIS**

**Παντελίτσα Μ. Κουδουνά**

**Επιβλέπουσα Καθηγήτρια**

**Σίσσυ Ευθυμιάδου**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στη Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

**Μάιος 2016**



## Περίληψη

Η ενεργειακή κρίση έχει γίνει ολοένα και περισσότερο έκδηλη σε κάθε τμήμα της καθημερινής μας ζωής, επηρεάζοντας την σε σημαντικό βαθμό. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) φαίνεται να αποτελούν τη λύση του προβλήματος καθώς βαθμιαία επεκτείνονται όλο και περισσότερο στο χώρο της ενέργειας.

Αντικείμενο της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής αποτελεί η ανάλυση του αντικειμένου της γεωθερμίας και η θέση της ανάμεσα στις υπόλοιπες μορφές ΑΠΕ. Παρουσιάζονται οι συνθήκες δημιουργίας των γεωθερμικών πεδίων, οι τρόποι αξιοποίησης της και τα πεδία εφαρμογής της. Γίνεται αναφορά στο οικονομικό κόστος καθώς και στις πιθανές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την αξιοποίηση της.

Στη συνέχεια γίνεται εξειδικευμένη αναφορά στο Γεωθερμικό δυναμικό της Κύπρου και στις προοπτικές αξιοποίησης του. Επιπλέον παρουσιάζονται οι μέχρι τώρα μελέτες που έγιναν σε τοπικό επίπεδο, όπως και ο τρόπος αξιοποίησης της αβαθούς γεωθερμίας του Νησιού.

Κύριος στόχος αποτελεί η αξιολόγηση της γεωθερμικής ενέργειας της Κύπρου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε δειγματοληψίες λιθολογιών όλων των Γεωλογικών Σχηματισμών της Κύπρου, από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης. Για την επίτευξη του στόχου αυτού έγινε χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα σε χάρτες με τη χρήση της Γεωστατικής Μεθόδου Μέγιστης Παρεμβολής.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε στους μέσους όρους των θερμικών παραμέτρων των γεωλογικών σχηματισμών του νησιού. Στους 28 χάρτες που εξήχθησαν μπορεί να διακρίνει κανείς σε ποιες θερμικές παραμέτρους οι γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν υψηλές τιμές. Τα αποτελέσματα αυτά θα βοηθήσουν στην εκτίμηση των Γεωθερμικών Ιδιοτήτων των λιθολογιών των γεωλογικών σχηματισμών της Κύπρου και το βαθμό δυνατότητας αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας του νησιού.

**Λέξεις κλειδιά:** Γεωθερμική Ενέργεια, Χρήσεις, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Κύπρος, Γεωλογία

## **Summary**

The energy crisis has become increasingly evident in every part of our daily life, affecting it significantly. Renewable Energy Sources (RES) can contribute to the solution of the problem as they gradually expand more and more in the energy sector.

The subject of this master thesis is the analysis of the geothermal field and its place among other forms of RES. The conditions generating the geothermal fields, the ways of exploitation and fields of application are presented. Reference is made to the financial cost as well as the possible negative environmental effects of its use.

Specific reference is made to the Geothermal potential of Cyprus and its exploitation prospects. In addition, the studies carried out locally up to the present as well as the way of exploitation of the shallow geothermal energy, are presented.

The main objective is to evaluate the geothermal energy of Cyprus. For this reason, data derived from laboratory testing carried out on rock samples of all geological formations in Cyprus by the Geological Survey Department were used. To achieve this goal, Geographic Information Systems were used and the results were presented in maps using the Geostationary Maximum Interpolation Method.

This method was applied to the averages of the thermal parameters of the geological formations of the island. At the 28 maps exported, one can see the thermal parameters of geological formations that present high values. The results will help assess the Geothermal Properties of the lithologies of the different geological formations of Cyprus and the degree of potential use for geothermal energy on the island.

**Keywords:** Geothermal Energy, Uses, Geographic Information Systems, Cyprus, Geology

## Ευχαριστίες

Αποτελεί προσωπική επιθυμία να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, κα Σίσσυ Ευθυμιάδου, για την εμπιστοσύνη, τη στήριξη στην προσπάθεια αυτή, την καθοδήγηση καθώς και για το απόλυτο πνεύμα συνεργασίας.

Επίσης ευχαριστώ από καρδιάς το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου για τη σύναψη συμφωνίας για την παραχώρηση των δεδομένων. Επιπλέον ένα μεγάλο ευχαριστώ στους αγαπημένους μου συνάδελφους Κλεόπα Χατζηχαραλάμπους και Νίκη Κουλέρμου (Γεωλογικοί Λειτουργοί στο Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης) για την καθοδήγηση τους και τη βοήθεια τους στην επεξεργασία των δεδομένων.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το σύζυγο μου Θοδωρή για τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την υπομονή του σε όλο το διάστημα των σπουδών μου.

Τέλος ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου Μιχάλη και Σούλα και τα αδέρφια μου Κώστα και Παναγιώτα, για όλα όσα είναι αδύνατο να περιγράψω με λόγια!

# Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή.....	1
1.1	Σκοπός-Στόχοι.....	3
1.2	Αντικείμενο-Δομή.....	4
1.3	Μεθοδολογία.....	5
1.4	Η ενεργειακή πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	6
2.	Γεωθερμική Ενέργεια.....	9
2.1	Ιστορική αναδρομή της γεωθερμικής ενέργειας.....	10
2.2	Σημερινό Καθεστώς Χρήσης της Γεωθερμίας.....	12
2.3	Γεωλογικό υπόβαθρο.....	17
2.3.1	Η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών.....	18
2.3.2	Η Θερμότητα στο Εσωτερικό της γης.....	20
2.4	Γεωθερμικά συστήματα.....	22
2.4.1	Γεωθερμικοί Πόροι.....	25
2.4.2	Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων.....	26
2.5	Γεωθερμική Έρευνα.....	31
2.6	Αξιοποίηση Γεωθερμικής Ενέργειας.....	33
2.7	Χρήσεις Γεωθερμικής Ενέργειας.....	35
2.7.1	Ηλεκτρικές χρήσεις-Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	36
2.7.2	Άμεσες Χρήσεις.....	39
2.7.3	Γεωθερμία χαμηλής ενθαλπίας.....	41
2.7.3.1	Τηλεθέρμανση.....	41
2.7.3.2	Αφαλάτωση θαλασσινού νερού.....	42
2.7.3.3	Θέρμανση θερμοκηπίων.....	43
2.7.3.4	Ιχθυοκαλλιέργειες.....	44
2.7.3.5	Αξιοποίηση χημικών συστατικών των ρευστών και άλλες χρήσεις.....	45
2.7.3.6	Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας.....	45
2.8	Κοστολόγηση ενός γεωθερμικού συστήματος.....	48

2.9	Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις .....	55
2.9.1	Πηγές ρύπανσης.....	55
2.9.2	Επιπτώσεις από μονάδες χαμηλής ενθαλπίας.....	57
2.9.3	Επιπτώσεις από μονάδες υψηλής ενθαλπίας.....	59
2.9.3.1	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις γεωτρήσεις.....	59
2.9.3.2	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εγκατάσταση του δικτύου μεταφοράς των γεωθερμικών ρευστών.....	61
2.9.3.3	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη φάση λειτουργίας της γεωθερμικής εγκατάστασης.....	61
2.9.3.4	Ατμοσφαιρική ρύπανση.....	61
2.9.3.5	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τα γεωθερμικά νερά.....	62
2.9.3.6	Καθιζήσεις στην περιοχή.....	63
2.9.3.7	Επίδραση στη σεισμικότητα της περιοχής .....	63
2.9.3.8	Θόρυβος από την εκτόνωση του ατμού.....	63
3.	Το ενεργειακό πρόβλημα της Κύπρου .....	65
3.1	Η ενεργειακή πολιτική της Κύπρου .....	66
3.2	Η γεωλογία της Κύπρου.....	67
3.3	Η αξιοποίηση της αβαθούς Γεωθερμίας στην Κύπρο.....	70
3.4	Μελέτες και αποτελέσματα μελετών για το γεωθερμικό δυναμικό της Κύπρου.....	71
3.4.1	Δοκιμή θερμικής αγωγιμότητας.....	74
3.5	Κίνητρα και σχέδια χορηγιών για αξιοποίηση αβαθούς Γεωθερμίας με εγκατάσταση Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας .....	82
3.6	Οικονομικά στοιχεία .....	83
4.	Μεθοδολογία .....	84
4.1	Εφαρμογή των ΓΣΠ στις Γεωεπιστήμες .....	85
4.2	Ερμηνεία Δεδομένων .....	87
4.3	Ψηφιακή Επεξεργασία Δεδομένων .....	91
4.4	Γεωστατική Μέθοδος Βέλτιστης Παρεμβολής ή Γεωστατική Μέθοδος χωρικής συσχέτισης –Kriging .....	100

4.5	Εργαστηριακές Μέθοδοι και παρουσία αποτελεσμάτων με τη χρήση των ΓΣΠ...	104
4.5.1	Γεωστατική Μέθοδος Παρεμβολής (Kriging)-Μέσου όρου Θερμικής Διαχυτότητας (Thermal Diffusivity $\times 10^6 \text{ m}^2/\text{sec}$ ).....	104
4.5.2	Γεωστατική Μέθοδος Παρεμβολής (Kriging)-Μέσου όρου Θερμικής Αγωγιμότητας, $\lambda$ (Thermal Conductivity W/mK).....	111
4.5.3	Γεωστατική Μέθοδος Παρεμβολής (Kriging)-Πυκνότητας, $\rho$ (Bulk Density $\text{kg}/\text{m}^3$ )	118
4.5.4	Γεωστατική Μέθοδος Παρεμβολής (Kriging)-Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας, $C_p$ .....	125
4.5.5	Σύνοψη αποτελεσμάτων .....	132
5.	Συμπεράσματα.....	134
6.	Επίλογος .....	140
7.	Βιβλιογραφία .....	141
7.1	Ελληνική .....	141
7.2	Ξενόγλωσση .....	142
7.3	Ιστοσελίδες.....	149

## ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1: Εγκατεστημένη Γεωθερμική Ισχύς σε παγκόσμια κλίμακα για τα έτη 1950-2015 και πρόβλεψη μέχρι το 2020 .....	13
Πίνακας 2: Εγκατεστημένη Γεωθερμική Ισχύς ανά ήπειρο από το 1995-2015 και πρόβλεψη για το 2020 .....	14
Πίνακας 3: Εγκατεστημένη Γεωθερμική Ισχύς ανά χώρα για τα έτη 1950-2015 και πρόβλεψη μέχρι το 2020 .....	15
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά των ραδιοϊσοτόπων που συνεισφέρουν στην παραγωγή θερμότητας της γης .....	21
Πίνακας 5: Μηχανισμοί απωλειών θερμότητας από τη γη.....	22
Πίνακας 6: Πίνακας: Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων.....	28
Πίνακας 7: Ταξινόμηση της Ενθαλπίας με Βάση τη Θερμοκρασία των Γεωθερμικών Πόρων (°C).....	30
Πίνακας 8: Ενεργειακό και επενδυτικό κόστος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.....	51
Πίνακας 9: Ενεργειακό και επενδυτικό κόστος για απευθείας χρήση θερμότητας από ανανεώσιμες πηγές.....	52
Πίνακας 10: Πάγιες δαπάνες από τη γεωθερμική εγκατάσταση .....	54
Πίνακας 11: Πιθανότητα εμφάνισης και σοβαρότητα των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων από εγκαταστάσεις άμεσης χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας, X =Χαμηλή, M =Μέτρια, Y= Υψηλή,.....	57
Πίνακας 12: Απαιτήσεις σε έκταση γης για τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (σε m <sup>2</sup> /GWh για 30 χρόνια) .....	60
Πίνακας 13: Αποτελέσματα διακύμανσης της θερμοκρασίας σε τρία διαφορετικά βάθη (20m, 50m, και 100m) για οκτώ γεωτρήσεις (Οι γεωτρήσεις στο Σαϊττά και στη Λεμεσό πραγματοποιήθηκαν σε παλαιότερη μελέτη της υπηρεσίας ενέργειας). .....	73
Πίνακας 14: Αποτελέσματα Θερμικής αγωγιμότητας από τα δείγματα που συλλέχθηκαν από τις γεωτρήσεις.....	75
Πίνακας 15: Μέσοι Όροι Θερμικών Χαρακτηριστικών των Γεωλογικών Σχηματισμών .....	92
Πίνακας 16: Μέσοι Όροι Θερμικών παραμέτρων Πλουτώνιων Πετρωμάτων και Πετρωμάτων της ακολουθίας του Μανδύα του οφειολιθικού συμπλέγματος του Τροόδου 95	
Πίνακας 17: Μέσοι Όροι Θερμικών παραμέτρων Ηφαιστειακών και Φλεβικών Πετρωμάτων του οφειολιθικού συμπλέγματος του Τροόδου .....	95
Πίνακας 18: Μέσοι Όροι Θερμικών παραμέτρων Σχηματισμού Κάθικα και Κανναβιού.....	96

Πίνακας 19: Μέσοι Όροι Θερμικών παραμέτρων Σχηματισμού Λευκάρων.....	97
Πίνακας 20: Μέσοι Όροι Θερμικών παραμέτρων Σχηματισμού Πάχνας .....	97
Πίνακας 21: Μέσοι Όροι Θερμικών παραμέτρων Σχηματισμού Καλαβασού .....	98
Πίνακας 22: Μέσοι Όροι Γεωλογικού Σχηματισμού Λευκωσίας και νεότερων ιζημάτων ....	99
Πίνακας 23: Σύνοψη αποτελεσμάτων των Θερμικών Παραμέτρων των Γεωλογικών Σχηματισμών, που εξήχθησαν από τους χάρτες .....	132
Πίνακας 24: Θερμική Αγωγιμότητα πυριγενών και ιζηματογενών πετρωμάτων και εδαφών όπως συνίσταται από το Γερμανικό VDI 4640 (τεύχος 2010) Μέρος 1, και αφορά τα συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας.....	133

## ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 1: Γραφική παράσταση των διαφόρων κατηγοριών γεωθερμικών πόρων .....	26
Διάγραμμα 2: Μορφές γεωθερμικής ενέργειας κατά σειρά ενδιαφέροντος χρήσεων σήμερα και προοπτικής στο εγγύς μέλλον, από αριστερά προς τα δεξιά .....	27
Διάγραμμα 3: Οι κυριότερες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας-Το τροποποιημένο διάγραμμα Lindal.....	34
Διάγραμμα 4: Κατανομή Τύπων Γεωθερμικών Μονάδων ανά το Παγκόσμιο το 2004.....	37
Διάγραμμα 5: Διαδοχική (κλιμακωτή) χρήση της γεωθερμικής ενέργειας .....	50
Διάγραμμα 6: Επιφάνεια εδάφους στις γεωτρήσεις για το Δεκέμβριο 2009 και Μάιο 2010 .	77
Διάγραμμα 7: Σύγκριση θερμοκρασιών γεωτρήσεων ανά περιοχή για τους μήνες Δεκέμβριο 2009 και Απρίλιο 2010 .....	78

## ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1: Larderello (Ιταλία)1904. Η πρώτη επιτυχημένη προσπάθεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με τη χρήση φυσικών ατμών που έβγαιναν με πίεση.....	12
Εικόνα 2: Παγκόσμια Εγκατεστημένη Γεωθερμική Ισχύς για το 2015 (12,6 GWe).....	14
Εικόνα 3: Η δομή της Γης.....	17
Εικόνα 4: Οι λιθσφαιρικές πλάκες και τα όρια τους.....	19
Εικόνα 5: Το όριο των λιθσφαιρικών πλακών με τη μορφή ρήγματος στην Ισλανδία. Η δεξιά πλευρά του ρήγματος βρίσκεται στη Βορειοαμερικανική τεκτονική πλάκα και η αριστερή πλευρά στην Ευρασιατική πλάκα. Στην προέκτασή του διακρίνεται το ενεργό ηφαίστειο Hergill και το γεωθερμικό πεδίο Nesjavellir, από το οποίο θερμαίνεται η πρωτεύουσα Reykjavik.....	20

Εικόνα 6:Μορφές Μετατόπισης των Λιθοσφαιρικών Πλακών.....	20
Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση ενός ιδανικού γεωθερμικού συστήματος, .....	23
Εικόνα 8: Πρότυπο-μοντέλο ενός γεωθερμικού συστήματος. Η καμπύλη (1) είναι η καμπύλη αναφοράς του σημείου ζέσεως του καθαρού νερού. Η καμπύλη (2) δείχνει τη θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος μια τυπικής διαδρομής κυκλοφορίας του ρευστού από το σημείο Α (τροφοδοσία) προς το σημείο Ε (αποφόρτιση) .....	24
Εικόνα 9: Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος με εκτόνωση Διφασικού Ρευστού και άμεση συμπύκνωση του ατμού .....	38
Εικόνα 10: Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος με χρήση δευτερεύοντος οργανικού ρευστού ....	39
Εικόνα 11: Εγκαταστάσεις Θέρμανσης Θερμοκηπίων και εδαφών με φυσική κίνηση του αέρα (φυσική συναγωγή) .....	43
Εικόνα 12: Εφαρμογή γεωθερμικών αντλιών θερμότητας σε κατοικία .....	46
Εικόνα 13: Τρόπος λειτουργίας γεωθερμικών αντλιών θερμότητας .....	47
Εικόνα 14: Στρωματογραφική ακολουθία των πετρωμάτων του Οφιολιθικού Συμπλέγματος Τροόδους και των υπερκείμενων αυτοχθόνων ιζηματογενών πετρωμάτων.....	70
Εικόνα 15: Γεωλογική περιγραφή της λιθολογίας των γεωτρήσεων στις 6 περιοχές .....	74
Εικόνα 16: Εγκατάσταση Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας σε κατοικία.....	83
Εικόνα 17: Το μοντέλο ενός ΓΣΠ,.....	86
Εικόνα 18:Γεωλογικοί Σχηματισμοί Κάθικα και Κανναβιού .....	96
Εικόνα 19: Συμπαγείς Κρητίδες στην παραθαλάσσια περιοχή του Πεντακώμου, .....	97
Εικόνα 20: Υφαλογενής ασβεστόλιθοι, Γεωλογικού Σχηματισμού Πάχνας (7-5.3 mya) .....	98
Εικόνα 21: Γύψοι Σχηματισμού Καλαβασού .....	99
Εικόνα 22: Απολιθωματοφόροι Ψαμμίτες του Σχηματισμού Λευκωσίας.....	99
Εικόνα 23:Επιφάνεια εργασίας Λογισμικού ArcGIS 10- Εφαρμογή Μεθόδου Kriging.....	101
Εικόνα 24: Σφάλμα ορίων Kriging .....	102
Εικόνα 25: Εφαρμογή εργαλείου Clip για περιορισμό των ορίων του Kriging στα όρια της ακτογραμμής.....	102

## Χάρτες

Χάρτης 1: Γεωλογικές Ζώνες της Κύπρου .....	68
Χάρτης 2: Οι γεωγραφικές θέσεις των γεωτρήσεων (μαύρα σημεία) που μελετήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης του γεωθερμικού δυναμικού της Κύπρου το 1973 από τον Paul Morgan.Τα κόκκινα σημεία δείχνουν τις γεωτρήσεις της καινούργιας μελέτης. ....	73

Χάρτης 3: Χάρτης: Γεωλογικός Χάρτης της Κύπρου με τις θέσεις των Γεωτρήσεων.....	76
Χάρτης 4: α)Πρόβλεψη Θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος 50m, β) Πρόβλεψη Θερμικής Αγωγιμότητας $\lambda$ (W/mK), Γεωθερμικός Χάρτης της Κύπρου .....	79
Χάρτης 5: Γεωθερμικός Χάρτης θερμοκρασιών εδάφους στο βάθος των 100m, Συμπεράσματα των μέχρι τώρα μελετών.....	80
Χάρτης 6:Γεωλογικός Χάρτης της Κύπρου στον οποίο διακρίνονται οι θέσεις από τις οποίες λήφθηκαν τα δείγματα .....	90
Χάρτης 7: Κατασκευή Τρισδιάστατου υψομετρικού μοντέλο της Κύπρου με τη χρήση του εργαλείου ArcScene από το λογισμικό της ArcMap, στο οποίο διακρίνεται η εξάπλωση των σημείων της δειγματοληψίας .....	90
Χάρτης 8: Γεωλογικός Χάρτης στον οποίο διακρίνονται τα Πλουτώνια Πετρώματα και τα πετρώματα της ακολουθίας του μανδύα, τα οποία δεσπόζουν κυρίως στο ψηλότερο μέρος της .....	95
Χάρτης 9: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου όρου θερμικής Διαχυτότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Πλουτώνια πετρώματα και Ακολουθία του μανδύα .....	104
Χάρτης 10: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου όρου θερμικής Διαχυτότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Ηφαιστειακά και Φλεβικά Πετρώματα.....	105
Χάρτης 11: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου όρου θερμικής Διαχυτότητας στα σημεία δειγματοληψίας από πετρώματα των Σχηματισμών Κάθικα και Κανναβιού.....	106
Χάρτης 12: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου όρου θερμικής Διαχυτότητας στα σημεία δειγματοληψίας από πετρώματα του Σχηματισμού των Λευκάρων .....	107
Χάρτης 13: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου όρου θερμικής Διαχυτότητας στα σημεία δειγματοληψίας από πετρώματα του Πάχνα-Υφαλογενής Ασβεστόλιθοι Μέλους Κορονιά και Μέλους Τέρα....	108
Χάρτης 14: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου όρου θερμικής Διαχυτότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού Καλαβασού .....	109
Χάρτης 15: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου Όρου Θερμικής Διαχυτότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού Λευκωσίας και των νεότερων ιζημάτων (5-2mya).....	110

Χάρτης 16: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου όρου Θερμικής Αγωγιμότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες των Πλουτώνιων πετρωμάτων και των Πετρωμάτων του Μανδύα.....	111
Χάρτης 17: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου Όρου Θερμικής Αγωγιμότητας στα σημεία δειγματοληψίας από τα Ηφαιστειακά και Φλεβικά Πετρώματα.....	112
Χάρτης 18: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου Όρου Θερμικής Αγωγιμότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες των Σχηματισμών Κάθικα και Κανναβιού.....	113
Χάρτης 19: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου Όρου Θερμικής Αγωγιμότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού των Λευκάρων .....	114
Χάρτης 20: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου Όρου Θερμικής Αγωγιμότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμός Πάχνα-Υφαλογενείς Ασβεστόλιθοι Μέλους Κοροριά .....	115
Χάρτης 21: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου Όρου Θερμικής Αγωγιμότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμός Καλαβασού.....	116
Χάρτης 22: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου Όρου Θερμικής Αγωγιμότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού Λευκωσίας και των νεότερων ιζημάτων.....	117
Χάρτης 23: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Πυκνότητας στα σημεία δειγματοληψίας των Πλουτώνιων πετρωμάτων και της Ακολουθίας του Μανδύα.....	118
Χάρτης 24: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Πυκνότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Ηφαιστειακά και Φλεβικά Πετρώματα.....	119
Χάρτης 25: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Πυκνότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες των Σχηματισμών Κάθικα και Κανναβιού .....	120
Χάρτης 26: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Πυκνότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού των Λευκάρων .....	121

Χάρτης 27: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Πυκνότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμός Πάχνα-Υφαλογενής Ασβεστόλιθοι Μέλους Κοροριά και Μέλους Τέρα .....	122
Χάρτης 28: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Πυκνότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού Καλαβασού .....	123
Χάρτης 29: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Πυκνότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού Λευκωσίας και Νεώτερων Ιζημάτων .....	124
Χάρτης 30: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Πλουτώνια Πετρώματα και Ακολουθία Μανδύα .....	125
Χάρτης 31: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Πλουτώνια Πετρώματα και Ακολουθία Μανδύα .....	126
Χάρτης 32: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Λιθολογίες των Σχηματισμών Κάθικα και Κανναβιού .....	127
Χάρτης 33: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Λιθολογίες των Σχηματισμών Λευκάρων .....	128
Χάρτης 34: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Λιθολογίες του Σχηματισμού Πάχνας-Υφαλογενής Ασβεστόλιθοι Μέλους Κοροριά και Μέλους Τέρα.....	129
Χάρτης 35: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Λιθολογίες του Σχηματισμού Καλαβασού .....	130
Χάρτης 36: Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Λιθολογίες του Σχηματισμός Λευκωσίας και νεότερων ιζημάτων .....	131

# Κεφάλαιο 1

## 1. Εισαγωγή

Η επιταχυνόμενη αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αποτελεί ένδειξη για μία αυξανόμενη απειλή ανεξέλεγκτης κλιματικής αλλαγής, με πιθανές καταστροφικές συνέπειες για τον άνθρωπο. Η αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.), σε συνδυασμό με την βελτίωση της αποδοτικότητας της ενέργειας τελικής χρήσης, μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη μείωση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας και στον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου με τρόπο ώστε να αποτραπεί η επικίνδυνη κλιματική αλλαγή.

Οι ενεργειακές ανάγκες για να καλυφθούν απαιτείται μια σωστή διαχείριση όλων των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων. Η οικονομική ευημερία των περισσότερων αναπτυγμένων χωρών εξαρτάται σημαντικά από την επαρκή ενεργειακή τροφοδοσία τους.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 50% των ολικών ενεργειακών αναγκών προήλθαν από εισαγόμενες πηγές ενέργειας ενώ τα επόμενα χρόνια προβλέπεται ότι η Ευρώπη θα γίνει περισσότερο εξαρτημένη από ξένες ενεργειακές πηγές. Η εξοικονόμηση ενέργειας και η αξιοποίηση των εγχώριων πηγών τροφοδοσίας μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην αντιμετώπιση του προβλήματος. Για την επίτευξη αυτού η ΕΕ (Ευρωπαϊκή Ένωση) επιδιώκει να περιορίσει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα με συνεπακόλουθο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Europra, 2016β).

Την ολοκλήρωση αυτού του στόχου παρεμποδίζουν τα εμπόδια που εξακολουθούν να υφίστανται στην πραγματική ολοκλήρωση της αγοράς, αλλά και στην έλλειψη συντονισμένων εθνικών πολιτικών καθώς και στην απουσία μιας κοινής στάσης έναντι των χωρών της ΕΕ. Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των προκλήσεων αυτών απαιτείται μια συντονισμένη λήψη μέτρων σε όλους τους τομείς πολιτικής τόσο σε Ευρωπαϊκό όσο και σε εθνικό επίπεδο (European Commission, 2015).

Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο έθεσε το πρόγραμμα δράσης για τη στρατηγική Ευρώπη 2020. Το πρόγραμμα αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την κλιματική και ενεργειακή πολιτική και έχει ως στόχο την καταπολέμηση της αλλαγής του κλίματος και την αύξηση της ενεργειακής ασφάλειας της (Varet, 2006).

Οι συχνές πετρελαϊκές κρίσεις από τη δεκαετία του εβδομήντα, αλλά και η εμφάνιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων από τη δεκαετία του ογδώντα προκάλεσαν την αναθεώρηση της ενεργειακής πολιτικής των χωρών. Συνέπεια των πιο πάνω ήταν το ενδιαφέρον να στραφεί προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Boyle et al., 2003).

Για τις περισσότερες χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν σημαντική πηγή εγχώριας ενέργειας, με μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Συνεισφέρουν σημαντικά στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας δραστικά στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό και εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού. Επιπλέον, συντελούν και στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς έχει διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο κυριότερος υπεύθυνος για τη ρύπανση του περιβάλλοντος (European Commission, 2015).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θεωρούνται ανεξάντλητες σε σχέση με τις συμβατικές (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) και περιλαμβάνουν την αιολική, την ηλιακή, τη βιομάζα, την υδροηλεκτρική και τη γεωθερμική ενέργεια. Η τεχνολογική ανάπτυξη τις καθιστά ολοένα και πιο βιώσιμες και καταβάλλεται σημαντική προσπάθεια για αντιμετώπιση του υψηλού κόστους τους σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα (Ζερβός, 2007).

Η θερμότητα είναι μια μορφή ενέργειας και για το λόγο αυτό η θερμότητα που περιέχεται στο εσωτερικό της γης καλείται γεωθερμική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή προκαλεί τη δημιουργία διαφόρων γεωλογικών φαινομένων σε παγκόσμια κλίμακα. Σήμερα ο όρος γεωθερμική ενέργεια, χρησιμοποιείται για να δηλώσει το τμήμα της γήινης θερμότητας που μπορεί να ανακτηθεί και να αξιοποιηθεί από τον άνθρωπο (Γιαννακούρας, Ζαραβέλα, Μανδρόκας, 2006). Η γεωθερμία όπως προαναφέρθηκε ανήκει στην κατηγορία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η γη διαθέτει τεράστια αποθέματα θερμικής ενέργειας, που θεωρητικά θα μπορούσε να καλύψει τις ενεργειακές της ανάγκες. Η επικράτηση των συμβατικών πηγών ενέργειας, στο διεθνή ενεργειακό σχεδιασμό για πολλά χρόνια μέχρι σήμερα είχε σαν συνέπεια την αδρανοποίηση της αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας (Βραχόπουλος και Παπαγεωργάκης, 1999).

Η γεωθερμική ενέργεια παίζει δευτερεύοντα ρόλο στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο, όμως μπορεί να διαδραματίσει πρωταγωνιστικό ρόλο σε τοπικό επίπεδο ως μια εγχώρια πηγή ενέργειας. Η χρήση της τόσο στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος όσο και στη θέρμανση χώρων είναι πλέον τεχνικά εφικτή και οικονομικά βιώσιμη. Η συμμετοχή της στο χώρο των Α.Π.Ε., αλλά και στον ενεργειακό σχεδιασμό προβλέπεται ότι θα αυξάνεται στο μέλλον.

## **1.1 Σκοπός-Στόχοι**

Σκοπός της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής αποτελεί η ανάλυση του φαινομένου της γεωθερμίας και η θέση της ανάμεσα στις υπόλοιπες μορφές Α.Π.Ε. Παρουσιάζεται το παγκόσμιο σημερινό καθεστώς χρήσης της Γεωθερμικής Ενέργειας και η κατηγοριοποίηση των χρήσεων της γεωθερμικής, οι τρόποι αξιοποίησης της και τα πεδία εφαρμογής της καθώς και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εφαρμογή της και τέλος η εξειδικευμένη αναφορά στο Γεωθερμικό δυναμικό της Κύπρου και στις προοπτικές αξιοποίησης του.

Για την αξιολόγηση της γεωθερμικής ενέργειας της Κύπρου πάρθηκαν δεδομένα από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης των γεωθερμικών παραμέτρων των λιθολογιών των Γεωλογικών Σχηματισμών της Κύπρου. Στόχος της εργασίας αυτής είναι η επεξεργασία των δεδομένων αυτών με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και η παρουσίαση θεματικών χαρτών μέσα από τους οποίους θα γίνει η αξιολόγηση των δεδομένων.

Το κίνητρο επιλογής αυτού του θέματος αποτελεί η ανάγκη και το ενδιαφέρον για μελέτη του γεωθερμικού δυναμικού της Κύπρου όπως επίσης και η προσμονή με ανυπομονησία της ανάλυσης των δεδομένων και της παρουσίασης των αποτελεσμάτων, καθώς τα δεδομένα που πάρθηκαν στα πλαίσια της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής δεν έχουν επεξεργαστεί στο παρελθόν. Τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας αναμένεται να συμβάλουν στην εξακρίβωση των λιθολογιών στις οποίες η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να ανακτηθεί και να αξιοποιηθεί.

## 1.2 Αντικείμενο-Δομή

Αρχικά το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μία εισαγωγή στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή παρουσιάζοντας το σκοπό και στόχο της εργασίας καθώς και της μεθοδολογίας που θα ακολουθηθεί. Επιπλέον στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στην ενεργειακή πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ).

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στη γεωθερμική ενέργεια, στη σχετική ορολογία, στα είδη των γεωθερμικών πεδίων και στις δυνητικές χρήσεις της. Ακολούθως παρουσιάζεται ο τρόπος κοστολόγησης μίας γεωθερμικής μονάδας. Το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με την παράθεση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων κατά την αξιοποίησή της γεωθερμίας σε διάφορες εφαρμογές.

Στη συνέχεια στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο ενεργειακό πρόβλημα της Κύπρου, καθώς και στην ενεργειακή της πολιτική. Επιπλέον γίνεται παρουσίαση της Γεωλογίας του νησιού και της αξιοποίησης της αβαθούς γεωθερμίας στο νησί. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζονται μελέτες που έγιναν για το γεωθερμικό δυναμικό της Κύπρου και αναλύονται τα αποτελέσματα τους καθώς και οι επιχορηγήσεις που παρέχονται από το κράτος για την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας.

Ακολουθεί το τέταρτο κεφάλαιο στο οποίο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή τη συμπερασμάτων. Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται επεξήγηση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και της συμβολής τους στις Γεωεπιστήμες. Επιπλέον γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών των γεωθερμικών παραμέτρων που πραγματοποιήθηκαν σε 170 δείγματα, τα οποία πάρθηκαν από πετρώματα και εδάφη όλων των Γεωλογικών Σχηματισμών της Κύπρου. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζονται οι χάρτες στους οποίους εφαρμόστηκε η Γεωστατική Μέθοδος Παρεμβολής (Kriging), στους μέσους όρους των γεωθερμικών παραμέτρων για κάθε γεωλογικό σχηματισμό ξεχωριστά.

Τα συμπεράσματα και η αξιολόγηση της εφαρμογής του τέταρτου κεφαλαίου παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο πέντε, διαπιστώνοντας ότι η εφαρμογή της μεθόδου και η αναπαράσταση χαρτών με τη χρήση των ΓΣΠ διευκολύνει τον εντοπισμό των περιοχών δυνητικού ενδιαφέροντος για την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας.

Τέλος το κεφάλαιο έξι αποτελεί τον επίλογο της μεταπτυχιακής διατριβής. Στο κεφάλαιο αυτό προτείνονται εισηγήσεις για ανάπτυξη και καλύτερη αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού της Κύπρου.

## 1.3 Μεθοδολογία

Για τη συγγραφή της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, χρησιμοποιήθηκε υλικό από τις βιβλιοθήκες του My Athens σχετικό με τη Γεωθερμική ενέργεια, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, τη Γεωστατική Μέθοδο Βέλτιστης Παρεμβολής, Μελέτες Φορέων όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση, το Υπουργείο Εμπορίου Βιομηχανίας και Τουρισμού της Κύπρου, την Υπηρεσία Ενέργειας, το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης κτλ, Πανεπιστήμια καθώς και από το διαδίκτυο.

Η Μεθοδολογική Προσέγγιση γίνεται σε τέσσερις φάσεις:

**1<sup>η</sup> Φάση:** Βιβλιογραφική αναφορά στη Γεωθερμική ενέργεια, στα Γεωθερμικά Συστήματα, στη Γεωθερμική Έρευνα, στις χρήσεις, στην Οικονομική Προσέγγιση και τέλος στις Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

**2<sup>η</sup> Φάση:** Παρουσίαση μελετών που δημοσιεύτηκαν σε επιστημονικά περιοδικά (Elsevier) και σε διεθνή συνέδρια (International Conference Athens, International Conference on SEEP)

**3<sup>η</sup> Φάση:** Χρησιμοποίηση του Λογισμικού ArcGis10-ArcMap10.2 για επεξεργασία και παρουσίαση αποτελεσμάτων εφαρμόζοντας το εργαλείο Kriging και εξαγωγή χαρτών των θερμικών παραμέτρων των λιθολογιών. Καθώς και χρησιμοποίηση του ArcScene εργαλείο του λογισμικού της ArcMap για αναπαράσταση στο τρισδιάστατου υψομετρικού μοντέλου της Κύπρου την εξάπλωση των σημείων της δειγματοληψίας.

**4<sup>η</sup> Φάση:** Αξιολόγηση των χαρτών και αποτελεσμάτων

Στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διατριβή, για την πραγματοποίηση των απαραίτητων διεργασιών και επεξεργασία δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν:

- ✓ Προσωπικός φορητός ηλεκτρονικός Υπολογιστής Μάρκας HP Pavilion
- ✓ Δεδομένα σε Sharfile που πάρθηκαν από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, από τον κλάδο Γενικής Γεωλογίας και Μηχανογράφησης

- ✓ Η πρόσφατη έκδοση του λογισμικού προγράμματος Γ.Σ.Π., ArcGIS 10.2, το οποίο παρέχει την ευχέρεια χρησιμοποίησης και ανάλυσης χωρικών πληροφοριών κάθε είδους, συμπεριλαμβανομένων και των τριών εφαρμογών του ArcMap, ArcCatalog(interpolation) και Arc Toolbox. Επίσης έγινε τρισδιάστατη απεικόνιση του ψηφιακού τοπογραφικού μοντέλου της Κύπρου μέσα τη χρήση του ArcGIS 3D Analyst-ArcScene

## 1.4 Η ενεργειακή πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Η Οδηγία **2009/28/ΕΚ** του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 23ης Απριλίου 2009, σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές δημιουργεί κοινό πλαίσιο για τη χρήση της ανανεώσιμης ενέργειας στην ΕΕ με σκοπό τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (ΑΘ) και την προώθηση καθαρότερων μεταφορών. Για την επίτευξη αυτού, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή θεσπίζει στόχους για όλες τις χώρες της ΕΕ με απώτερο στόχο οι πηγές ανανεώσιμης ενέργειας να αντιπροσωπεύουν το 20% της ενέργειας της ΕΕ και το 10% της ενέργειας στον τομέα των μεταφορών έως το 2020. Η οδηγία αποτελεί έναν από τους στόχους 20-20-20 της δέσμης μέτρων της ΕΕ για το κλίμα και την ενέργεια (Τμήμα Περιβάλλοντος, 2016).

Βασικά σημεία της Οδηγίας:

1. Κάθε χώρα της ΕΕ πρέπει να εκπονήσει εθνικό σχέδιο δράσης για το 2020, ορίζοντας μερίδια ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τον τομέα των μεταφορών, της θέρμανσης και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Για την επίτευξη των στόχων με οικονομικώς συμφέροντα τρόπο, οι χώρες της ΕΕ μπορούν να ανταλλάσσουν ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές. Επιπλέον μπορούν να λαμβάνουν ανανεώσιμη ενέργεια από χώρες εκτός της ΕΕ, προκειμένου να συνυπολογίζεται στα σχέδια δράσης τους, υπό τον όρο ότι η ενέργεια καταναλώνεται στην ΕΕ και ότι παράγεται από σύγχρονες και αποτελεσματικές εγκαταστάσεις.
3. Κάθε χώρα της ΕΕ πρέπει να μπορεί να εγγυάται την προέλευση της ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανσης και ψύξης που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
4. Οι χώρες της ΕΕ θα πρέπει να οικοδομήσουν τις αναγκαίες υποδομές για τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον τομέα των μεταφορών.
5. Τα βιοκαύσιμα και τα βιορευστά πρέπει να παρασκευάζονται με βιώσιμο τρόπο, χωρίς τη χρήση πρώτων υλών από εδάφη με υψηλή αξία βιοποικιλότητας. Στην πρόταση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για τροποποίηση της νομοθεσίας της ΕΕ

σχετικά με την ποιότητα των καυσίμων βενζίνης και ντίζελ, επιδιώκεται να περιοριστεί η συμβολή των βιοκαυσίμων στην επίτευξη των εθνικών στόχων (Europra, 2016β).

Επιπλέον το Ευρωπαϊκό κοινοβούλιο έχει θεσπίσει την Οδηγία **2010/31/ΕΕ** για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Τα κτίρια ευθύνονται για το 40 % της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ). Ο κτιριακός τομέας διευρύνεται και το ίδιο και οι ενεργειακές απαιτήσεις του. Εάν η ΕΕ τις περιορίσει, θα μειώσει την ενεργειακή εξάρτηση και τα αέρια του θερμοκηπίου της, και θα σημειώσει πρόοδο στο στόχο της να μειώσει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας κατά 20 % έως το 2020 (Paoletti, 2013).

Η νομοθεσία αποσκοπεί στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων στην ΕΕ, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες κλιματολογικές και τοπικές συνθήκες. Θεσπίζει ελάχιστες απαιτήσεις και κοινή μεθοδολογία. Καλύπτει την ενέργεια που χρησιμοποιείται για θέρμανση, ζεστό νερό, ψύξη, εξαερισμό και φωτισμό (Europra, 2016α).

Βασικά σημεία της οδηγίας:

1. Οι εθνικές αρχές πρέπει να θεσπίσουν ελάχιστες οικονομικώς συμφέρουσες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης. Αυτές θα πρέπει να αναθεωρούνται ανά 5 έτη, το αργότερο.
2. Οι εν λόγω απαιτήσεις πρέπει να καλύπτουν τα συστήματα θέρμανσης, παραγωγής ζεστού νερού, κλιματισμού και εξαερισμού μεγάλης κλίμακας.
3. Η Επιτροπή είναι υπεύθυνη για τον καθορισμό μεθοδολογίας υπολογισμού των βέλτιστων επιπέδων κόστους για τις απαιτήσεις ενεργειακών επιδόσεων.
4. Τα νέα κτίρια πρέπει να πληρούν τα ελάχιστα πρότυπα και να περιλαμβάνουν εναλλακτικά ενεργειακά συστήματα υψηλής απόδοσης. Τα κτίρια που ανήκουν σε δημόσιες αρχές και χρησιμοποιούνται από αυτές θα πρέπει να επιτυγχάνουν κατάσταση σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας έως τις 31 Δεκεμβρίου 2018 και τα υπόλοιπα νέα κτίρια έως 2 χρόνια αργότερα.
5. Όταν υποβάλλονται σε ανακαίνιση μεγάλης κλίμακας, τα υφιστάμενα κτίρια πρέπει να αναβαθμίζουν την ενεργειακή απόδοσή τους για να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις της ΕΕ.
6. Οι εθνικές αρχές θεσπίζουν σύστημα πιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης. Τα πιστοποιητικά παρέχουν πληροφορίες σε υποψήφιους αγοραστές ή ενοικιαστές για

την ενεργειακή κατάταξη του κτιρίου καθώς και συστάσεις για οικονομικώς συμφέρουσες βελτιώσεις. Οφείλουν να περιλαμβάνονται σε όλες τις εμπορικές διαφημίσεις όταν οι χώροι προσφέρονται προς πώληση ή ενοικίαση.

7. Οι εθνικές αρχές πρέπει να διασφαλίζουν ότι έχουν δημιουργηθεί μηχανισμοί για την επιθεώρηση των συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού.
8. Η Επιτροπή θα αξιολογήσει, έως την 1η Ιανουαρίου 2017, την πρόοδο που έχει συντελεστεί σε σχέση με τους στόχους ενεργειακής απόδοσης και θα υποβάλει περαιτέρω προτάσεις, εφόσον χρειάζεται (Paoletti, 2013).

# Κεφάλαιο 2

## 2. Γεωθερμική Ενέργεια

Στη διεθνή βιβλιογραφία ο όρος Γεωθερμία (Geothermics) αναφέρεται στον εφαρμοσμένο κλάδο ο οποίος περιλαμβάνει όλο το φάσμα της έρευνας, από τη μελέτη της γήινης ροής θερμότητας, τις συνθήκες κατανομής των θερμοκρασιών στο υπέδαφος, το μηχανισμό της κυκλοφορίας των υπόγειων θερμών ρευστών σε συνδυασμό με τις γεωλογικές συνθήκες, καθώς και τα φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά τους, μέχρι τον εντοπισμό και την αξιολόγηση των γεωθερμικών πεδίων με κατάλληλες παραγωγικές γεωτρήσεις (Φυτίκας και Ανδρίτσος, 2004α).

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια ήπια, καθαρή, φυσική και απεριόριστη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία προέρχεται από το εσωτερικό της γης και εμπεριέχεται σε φυσικούς, επιφανειακούς ή υπόγειους ατμούς, με ή χωρίς αέρια σε θερμά νερά ή σε μίγματα των παραπάνω, καθώς και σε θερμά-ξηρά πετρώματα όπως επίσης και σε γεωπεπιοσμένους σχηματισμούς και σε λιωμένα πετρώματα (μάγματα) ( Evans, Strezov, and Evans, 2009). Με άλλα λόγια η γεωθερμική ενέργεια βρίσκεται παντού κάτω από την επιφάνεια της γης, αν και οι ψηλότερες θερμοκρασίες οι οποίες αποτελούν τις πλέον κατάλληλες πηγές για αξιοποίηση, συγκεντρώνονται σε περιοχές ενεργών ή γεωλογικά νεαρών ηφαιστειών (Kaygusuz and Kaygusuz, 2002).

Ο όρος «γεωθερμική ενέργεια» χρησιμοποιείται σήμερα για να δηλώσει το τμήμα της γήινης θερμότητας που μπορεί να ανακτηθεί και να αξιοποιηθεί από τον άνθρωπο. Η γεωθερμική ενέργεια δεσμεύεται από το εσωτερικό της γης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανσης χώρων ή βιομηχανικού ατμού. Η εκμετάλλευσή της είναι εφικτή με την προϋπόθεση ότι οι γεωλογικές συνθήκες σε συνδυασμό με το θερμικό φορτίο, εξασφαλίζουν ένα συγκριτικό οικονομικό αποτέλεσμα (Garnish, 1978).

## 2.1 Ιστορική αναδρομή της γεωθερμικής ενέργειας

Τα ηφαίστεια και οι θερμές εκδηλώσεις ήταν γνωστά από τους προϊστορικούς χρόνους, στα οποία η μυθολογία μας αφιέρωσε ένα θεό τον Ήφαιστο. Αντίστοιχα και σε άλλους πολιτισμούς (Αφρική, Χαβάη, Ιαπωνία, Αμερική προ Κολόμβου) είναι συχνή η θεοποίηση των ηφαιστείων (Φυτίκας and Ανδρίτσος, 2004β).

Η παρουσία ηφαιστείων, θερμών πηγών και άλλων επιφανειακών εκδηλώσεων θερμότητας, οδήγησε τους προγόνους μας στο συμπέρασμα ότι το εσωτερικό της γης είναι ζεστό (Καρυδάκης, 2008).

Οι θερμές πηγές θεωρούνταν από την αρχαιότητα ως θεραπευτικές και υπερφυσικές και για το λόγο αυτό τα Ασκληπεία αλλά και άλλοι ιεροί χώροι βρίσκονταν κοντά σε θερμές πηγές. Ο ναός της Αρτέμιδας στη Λέσβο είναι κτισμένος επάνω στο χώρο όπου αναβλύζουν και σήμερα θερμές πηγές (Φυτίκας and Ανδρίτσος, 2004α).

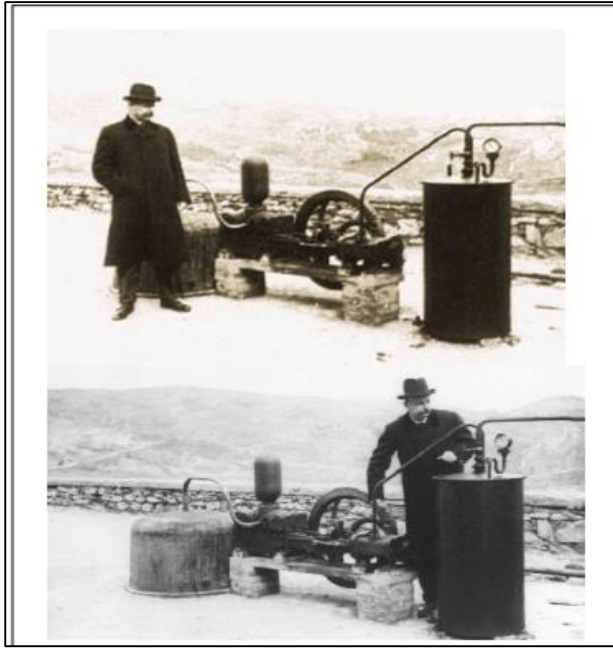
Τα φυσικά λοιπόν θερμά ρευστά χρησιμοποιήθηκαν από πολύ παλιά, κυρίως για τις θεραπευτικές τους ιδιότητες και σπάνια για τις ενεργειακές δυνατότητες τους. Οι σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις επέτρεψαν, κατά τον προηγούμενο αιώνα, την απόληψη της γεωθερμικής θερμότητας. Προηγουμένως έλειπαν οι μεγάλες ποσότητες ρευστών που μπορούν να παραχθούν με γεωτρήσεις, αφού η τεχνολογία των γεωτρήσεων αναπτύχθηκε ουσιαστικά μόλις τον προηγούμενο αιώνα (Αρβανίτης, 2008).

Από τους προηγούμενους αιώνες είναι γνωστό ότι η θερμοκρασία σε μεταλλευτικές στοές, βαθιά πηγάδια κτλ, είναι υψηλότερη της επιφανειακής και παραμένει σταθερή με το χρόνο. Η πρώτη φορά που μετρήθηκε με θερμομόετρο η θερμοκρασία στο εσωτερικό της γης ήταν το 1740, σε ένα ορυχείο κοντά στο Belfort της Γαλλίας (Jaeger, 1965). Σήμερα η μέτρηση της θερμοκρασίας της γης πραγματοποιείται κυρίως μέσα σε γεωτρήσεις και γνωρίζουμε ότι η θερμοκρασία αυξάνει με το βάθος με ρυθμό 1°C για κάθε 30m ή καλύτερα 30 °C ανά 1km. Ο ρυθμός αυτός της αύξησης της θερμοκρασίας της γης με το βάθος καλείται γεωθερμική βαθμίδα (Φυτίκας και Ανδρίτσος, 2004β).

Η χρησιμοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι νέα επινόηση. Στη σύγχρονη εποχή η πρώτη βιομηχανική αξιοποίηση της γεωθερμίας πραγματοποιήθηκε από μια ομάδα Ιταλών στην περιοχή Larderello στην πόλη Τοσκάνη

της Ιταλίας (Garnish, 1978). Στο πεδίο αυτό από τις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα λειτουργούσε μια χημική βιομηχανία όπου χρησιμοποιούσαν τον υπέρθερμο ατμό για την παραγωγή βορικού οξέος από τα βοριούχα θερμά νερά που ανέβλυζαν από φυσικές πηγές ή αντλούνταν από ρηχές γεωτρήσεις (Del Moro et al, 1982). Η παραγωγή του βορικού οξέος γινόταν με εξάτμιση των βοριούχων νερών μέσα σε σιδερένιους λέβητες, χρησιμοποιώντας ως καύσιμη ύλη ξύλα από τα κοντινά δάση. Το 1827, ο Francesco Larderel, ιδρυτής της βιομηχανίας αυτής, στην προσπάθειά του να αποτρέψει να καίγονται ξύλα από τα διαρκώς αποψιλούμενα δάση της περιοχής, ανέπτυξε ένα σύστημα για τη χρήση της θερμότητας των βοριούχων ρευστών στη διαδικασία εξάτμισης. Το 1904 στο χώρο αυτόν έγινε η πρώτη πετυχημένη προσπάθεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με τη χρήση των φυσικών ατμών που έβγαιναν με πίεση (I. Stober and K. Bucher. 2013).

Η εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του φυσικού ατμού ξεκίνησε περίπου την ίδια περίοδο. Ο γεωθερμικός ατμός χρησιμοποιήθηκε για την ανέλκυση των ρευστών, αρχικά με κάποιους πρωτόγονους αέριους ανυψωτήρες και στη συνέχεια με παλινδρομικές και φυγοκεντρικές αντλίες και βαρούλκα. κατά τη διάρκεια των ετών 1850 και 1875, οι εγκαταστάσεις του Larderello κατείχαν το μονοπώλιο παραγωγής βορικού οξέος στην Ευρώπη. Μεταξύ του 1910 και του 1940, στην περιοχή αυτή της Τοσκάνης ο χαμηλής πίεσης ατμός άρχισε να χρησιμοποιείται για τη θέρμανση βιομηχανικών κτιρίων, κατοικιών και θερμοκηπίων (Fridleifsson, 2001). Εν τω μεταξύ, ολοένα και περισσότερες χώρες άρχισαν να αναπτύσσουν τους γεωθερμικούς τους πόρους σε βιομηχανική κλίμακα. Το 1892, το πρώτο γεωθερμικό σύστημα τηλε-θέρμανσης (district heating) τέθηκε σε λειτουργία στο Boise του Άινταχο των Η.Π.Α. (Hebbsli, A. 2010).



Πηγή: Geothermal education Office και  
International Geothermal Association

**Εικόνα 1:** Larderello (Ιταλία)1904. Η πρώτη επιτυχημένη προσπάθεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με τη χρήση φυσικών ατμών που έβγαιναν με πίεση.

Η πρώτη συστηματική αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών για θέρμανση χώρων, θερμοκηπίων και κτηρίων ξεκίνησε τη δεκαετία του 1925 στην Ισλανδία. Σήμερα το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού της Ισλανδίας (και ολόκληρη η πόλη Reykjavik) θερμαίνονται με γεωθερμικά ρευστά (Kaygusuz and Kaygusuz, 2002). Ουσιαστικά όμως η εμπορική γεωθερμική ανάπτυξη ξεκίνησε το 1955 στη Νέα Ζηλανδία, όπου οι γεωθερμικοί ατμοί χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Σήμερα ο αριθμός των χωρών που έχουν εμπλακεί ουσιαστικά στη γεωθερμική έρευνα και εκμετάλλευση για θερμικούς σκοπούς ξεπερνά τις 60, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ να υπερβαίνει τα 15000MWt (Lund and Freeston, 2001).

Όσον αφορά στην Ευρώπη, υπάρχουν 28 «γεωθερμικά» ενεργές χώρες με εφαρμογές άμεσων χρήσεων και πέντε χώρες με γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή (Ιταλία, Ισλανδία, Γαλλία, Αυστρία και Πορτογαλία), με εγκατεστημένη Ισχύ 971MWe και παραγωγή 5635GWh το χρόνο ηλεκτρικής ενέργειας (Huttrer, 2001).

## 2.2 Σημερινό Καθεστώς Χρήσης της Γεωθερμίας

Με το Τέλος του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου Πολέμου, η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας έγινε ελκυστική σε πολλές χώρες, για το λόγο ότι ήταν ανταγωνιστική ως προς άλλες μορφές ενέργειας. Επιπλέον, η ενέργεια αυτή σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα δε χρειαζόταν να

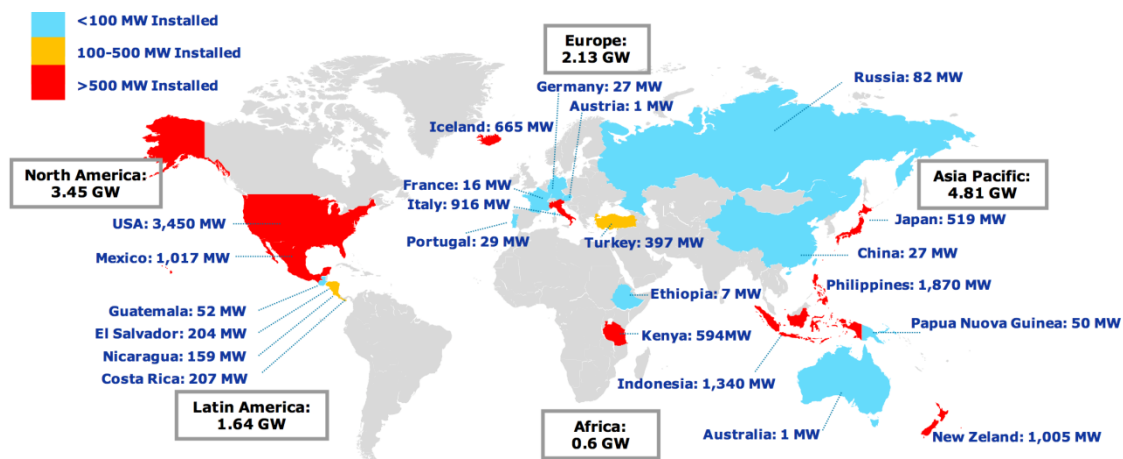
εισαχθεί από άλλες χώρες, ενώ σε πολλές περιπτώσεις αποτελούσε το μοναδικό διαθέσιμο εγχώριο ενεργειακό πόρο.

Στον πίνακα 1 φαίνεται η εγκατεστημένη γεωθερμική ηλεκτρική ισχύς για τα έτη 1950 έως 2020 σε παγκόσμια κλίμακα, σύμφωνα με μελέτη που παρουσιάστηκε στο Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April 2015 (Bertani, 2016) Όπως διαφαίνεται στον πιο κάτω πίνακα, για να επιτευχτεί ο στόχος του 2020 θα πρέπει να αυξηθεί ο ρυθμός αύξησης της εγκατεστημένης γεωθερμικής ισχύος, ενώ συμπεραίνεται, ότι με το πέρασμα των χρόνων αυξάνεται η εγκατεστημένη θερμική Ισχύς σε παγκόσμια κλίμακα.

**Πίνακας 1:** Εγκατεστημένη Γεωθερμική Ισχύς σε παγκόσμια κλίμακα για τα έτη 1950-2015 και πρόβλεψη μέχρι το 2020

Χρονολογία	Εγκατεστημένη		Παραγόμενη Ενέργεια σε GWh
	Θερμική παγκόσμια MWe	Ισχύς σε κλίμακα	
1950	200		
1955	270		
1960	386		
1965	520		
1970	720		
1975	1,180		
1980	2,110		
1985	4,764		
1990	5,834		
1995	6,832		38,035
2000	7,972		49,261
2005	8,933		55,709
2010	10,897		67,246
2015	12,635		73,549
2020	21,443		

(Πηγή: (Bertani, 2016))



(Πηγή:(Bertani, 2016)

**Εικόνα 2:** Παγκόσμια Εγκατεστημένη Γεωθερμική Ισχύς για το 2015 (12,6 GWe)

Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζεται η εγκατεστημένη γεωθερμική ηλεκτρική ισχύς σε κάθε ήπειρο καθώς και η ενέργεια που παράχθηκε από το 1995 μέχρι το 2015 ενώ στην τελευταία στήλη παρουσιάζεται μια βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη μέχρι το 2020. Είναι ξεκάθαρο ότι η Αμερική παρουσιάζει την μεγαλύτερη εγκατεστημένη γεωθερμική Ισχύ σε σχέση με τις υπόλοιπες ηπείρους ενώ ταυτόχρονα παράγει και την περισσότερη ενέργεια. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η Ευρώπη παρουσιάζει την λιγότερη εγκατεστημένη γεωθερμική Ισχύ κατά το 2015 και συνεπώς την λιγότερη παραγόμενη ενέργεια.

**Πίνακας 2:** Εγκατεστημένη Γεωθερμική Ισχύς ανά ήπειρο από το 1995-2015 και πρόβλεψη για το 2020

Εγκατεστημένη Γεωθερμική Ισχύς	1995		2000		2005		2010		2015		Πρόβλ. 2020
	Μεγ.	Ενέργεια	Μεγ.	Ενέργεια	Μεγ.	Ενέργεια	Μεγ.	Ενέργεια	Μεγ.	Ενέργεια	Μεγ.
Ευρώπη	722	3881	1019	5864	1124	7209	1643	11371	2133	14821	3385
Αφρική	45	366	52	397	136	1088	209	1440	601	2858	1601
Αμερική	3800	21303	3390	23342	3911	25717	4565	26803	5089	26353	8305
Ασία	1980	10129	3075	17390	3290	18903	3361	23127	3756	22084	6712
Ωκεανία	286	2353	437	2269	441	2792	818	4506	1056	7433	1440

Σύνολο	6832	38032	7973	49261	8903	55709	10897	67246	12635	73549	21443
--------	------	-------	------	-------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

(Πηγή:(Bertani, 2016)

**Πίνακας 3:** Εγκατεστημένη Γεωθερμική Ισχύς ανά χώρα για τα έτη 1950-2015 και πρόβλεψη μέχρι το 2020

Χώρες	Εγκατεστημένη Παραγόμενη Γεωθερμική Ενέργεια για το 2010					Εγκατεστημένη Παραγόμενη Γεωθερμική Ενέργεια για το 2015					Εγκατεστημένη Παραγόμενη Γεωθερμική Ενέργεια για το 2020								
	2010		2015		2020		2010		2015		2020		2010		2015		2020		
	Mwe	GWh	Mwe	GWh	MWe	MW	GWh	Mwe	MW	GWh	MWe	MW	GWh	Mwe	MW	GWh	Mwe	MW	Energy %
Αλγερία					1														
Αργεντινή					30														
Αρμενία					25														
Αυστραλία	0,1	0,5	1,1	0,5	20	1													
Αυστρία	1,4	3,8	1,2	2,2	6														
Βολιβία					40														
Καναδάς					20														
Χιλή					150														
Κίνα	24	150	27	150	100	3		12											
Κόστα Ρίκα	166	1331	207	1511	260	42	380	25	34										
Τσεχία						5													
Τζιμπουτί						50													
Δομινική						10													
Εκουαδόρ						40													
Ελ Σαλβαδόρ	204	1422	204	1442	300		20												
Αιθιοπία	7,3	10	7,3	10	50														
Γαλλία	16	95	16	115	40		20		21										
Γερμανία	6,6	50	27	35	60	20	-15	280	-30										
Ελλάδα					40														
Γουατεμάλα	52	289	52	237	140														
Ονδούρα					35														
Ουγγαρία					5														
Ισλανδία	575	4597	665	5245	1300	90	648	16	14										
Ινδία					10														
Ινδονησία	1197	9600	1340	9600	3500	143		12											
Ιράν					5														
Ιταλία	843	5520	916	5660	1000	74	140	9	3										
Ιαπωνία	536	3064	519	2687	570	-16	-377	-3	-12										

Κένυα	202	1430	594	2848	1500	392	1418	194	99
Λετονία					5				
Μεξικό	958	7047	1017	6071	1400	59	-976	6	-14
Μοντσερράτ					5				
Ολλανδία					5				
Νέβις					35				
Νέα									
Ζηλανδία	762	4055	1005	7000	1350	243	2945	32	73
Νιγαράουα	88	310	159	492	200	72	182	82	59
Παπούα-Νέα									
Γουινέα	56	450	50	432	70	-6	-18	-11	-4
Περού					40				
Φιλιππίνες	1904	10311	1870	9646	2500	-34	-665	-2	-6
Πολωνία					1				
Πορτογαλλία									
α	29	175	29	196	60		21		12
Ρουμανία			0,1	0,4	5	0,1	0,4		
Ρωσσία	82	441	82	441	190				
Σλοβακία					5				
Ισπανία					40				
Ελβετία					3				
Ταϊουάν			0,1		1	0,1			
Θαϊλάνδη	0,3	2	0,3	1,2	1				
Τουρκία	91	490	397	32127	600	306	2637	336	539
Αγγλία					15				
Αμερική	3098	16603	3450	16600	5600	352		11	
Σύνολο	10897	67246	12635	73549	21443				

(Πηγή:(Bertani, 2016)

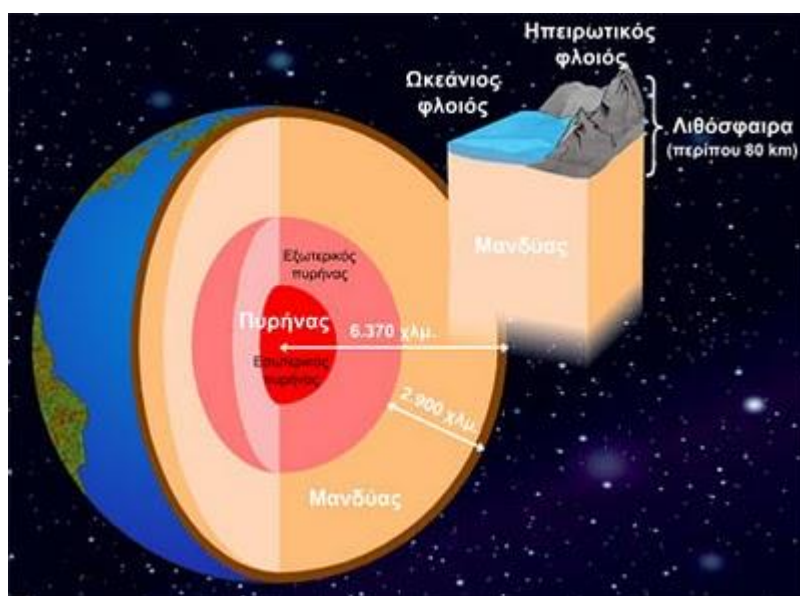
Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται τα δεδομένα από όλες τις χώρες που παράγουν σήμερα ηλεκτρική ενέργεια αξιοποιώντας το γεωθερμικό τους δυναμικό από το 2010 μέχρι το 2015. Επιπλέον παρουσιάζεται η αύξηση που παρατηρήθηκε μέχρι το 2010 σε απόλυτες τιμές και σε ποσοστά τόσο για την εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύ όσο και για την παραγόμενη ενέργεια σε κάθε χώρα. Επίσης φαίνεται και η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της εγκατεστημένης γεωθερμικής ισχύς για το 2020.

Η χρησιμοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας από τις χώρες που φαίνονται στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζει ενδιαφέρουσες τάσεις. Μεταξύ των ετών 2010 και 2015, η εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύς στις χώρες αυτές αυξήθηκε από 10897 MWe σε 12635 MWe παρουσιάζοντας ρυθμό αύξησης περίπου 116%, ενώ με την πρόβλεψη για το 2020 υπολογίστηκε ότι θα υπάρξει περαιτέρω αύξηση της τάξης του 197%.

Η Αμερική παρουσιάζει τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύ παράγοντας ενέργεια 16600 GWh ετησίως. Τα εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία βρίσκονται στην Καλιφόρνια, Νεβάδα, Γιούτα και τη Χαβάη με πρόσφατες εγκαταστάσεις σε Αλάσκα, Ιντάχο, Νέο Μεξικό, Όρεγκον, και Ουαϊόμινγκ. Κατά τα τελευταία πέντε χρόνια, περίπου 350 MWe, έχουν προστεθεί στο σύνολο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας. Παρόλο που σε σχέση με τις υπόλοιπες χώρες η Αμερική παράγει το μεγαλύτερο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας με την αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού της, εντούτοις συμβάλει σε μικρό βαθμό στις ανάγκες των Ηνωμένων πολιτειών για ηλεκτρική ενέργεια με ποσοστό της τάξης των 0,48% (Bertani, 2016).

Η γεωθερμική ενέργεια συμμετέχει σημαντικά στο ενεργειακό ισοζύγιο αρκετών περιοχών. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι κατά το 2001 η ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε από γεωθερμικούς πόρους στις Φιλιππίνες αντιστοιχούσε το 27% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας, το 12,4 % στην Κένευα, το 11,4% στην Κόστα Ρίκα και το 4,3% στο Ελ Σαλβαδόρ (Lund and Boyd, 2016).

## 2.3 Γεωλογικό υπόβαθρο



Πηγή:(Καρυδάκης, 2008)

### Εικόνα 3: Η δομή της Γης

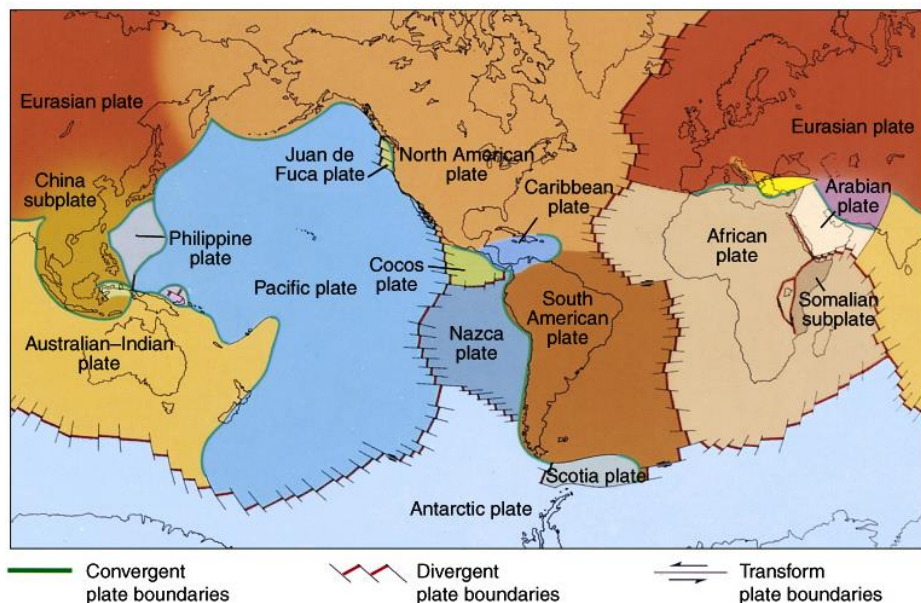
Η γήινη σφαίρα αποτελείται από τρεις κύριες στιβάδες, όπως διακρίνονται στην πιο πάνω εικόνα και πρόκειται για το φλοιό, το μανδύα, και τον πυρήνα. Το πάχος του φλοιού κυμαίνεται από 20-65 km περίπου στις ηπειρωτικές περιοχές και 5-6 km στις ωκεάνιες. Το

πάχος του μανδύα είναι κατά προσέγγιση 2.900 km και έχει θερμοκρασίες της τάξης των 1000-3000°C και τέλος ο πυρήνας με ακτίνα περίπου 3.470 km παρουσιάζει θερμοκρασίες λίγο μεγαλύτερες των 4000 °C (Εικόνα 3).(Harper, 1989).

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του φλοιού, του μανδύα και του πυρήνα διαφέρουν από την επιφάνεια προς το κέντρο της γης. Το εξωτερικό ανώτερο, στερεό περίβλημα της γης, γνωστό ως λιθόσφαιρα, αποτελείται από το φλοιό (ωκεάνιο ή ηπειρωτικό) και το ανώτερο τμήμα του μανδύα. Έχοντας μεταβαλλόμενο πάχος, από λιγότερο των 80 km στις ωκεάνιες ζώνες μέχρι πάνω από 200 km στις ηπειρωτικές, η λιθόσφαιρα συμπεριφέρεται σαν ένα συμπαγές σώμα. Κάτω από τη λιθόσφαιρα βρίσκεται η παχύρρευστη ασθενόσφαιρα, πάχους 200-300 km. Η ασθενόσφαιρα παρουσιάζει πολύ αργές και κανονικές κινήσεις τις λεγόμενες μεταφορικές κινήσεις μεταξύ της στερεάς βάσης αυτού του στρώματος και της βάσης του φλοιού, οι οποίες αποτελούν την αιτία της κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών (Pirajno, 2000).

### **2.3.1 Η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών**

Η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών διατυπώθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1960. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή η λιθόσφαιρα της γης διαιρείται σε έξι κύρια μεγάλα τμήματα ή πλάκες, τις λεγόμενες τεκτονικές πλάκες. Πρόκειται για την Ευρασιατική, την Αμερικανική, την Αφρικανική, την Ανταρκτική, την Ινδική και την Ειρηνική. Υπάρχει επίσης και πλήθος δευτερευουσών μικρών πλακών όπως είναι η μικροπλάκα του Αιγαίου και της Αδριατικής. Οι πλάκες αυτές κινούνται αργά με ταχύτητες της τάξης των μερικών εκατοστών ανά έτος (1-15 cm/έτος). Αίτια της κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών είναι τα ρεύματα μεταφοράς θερμότητας, που υπάρχουν σε πολλές περιοχές του γήινου μανδύα. Οι σεισμοί και τα ρήγματα που δημιουργούνται από την κίνηση αυτή, διευκολύνουν την κυκλοφορία του μάγματος προς τα πάνω και κυρίως των γεωθερμικών ρευστών και ακολούθως την άνοδό τους προς την επιφάνεια της γης, μεταφέροντας έτσι μεγάλες ποσότητες θερμικής ενέργειας και κάνοντας την ενέργεια αυτή περισσότερο διαθέσιμη στον άνθρωπο (Bercovici, 2003).



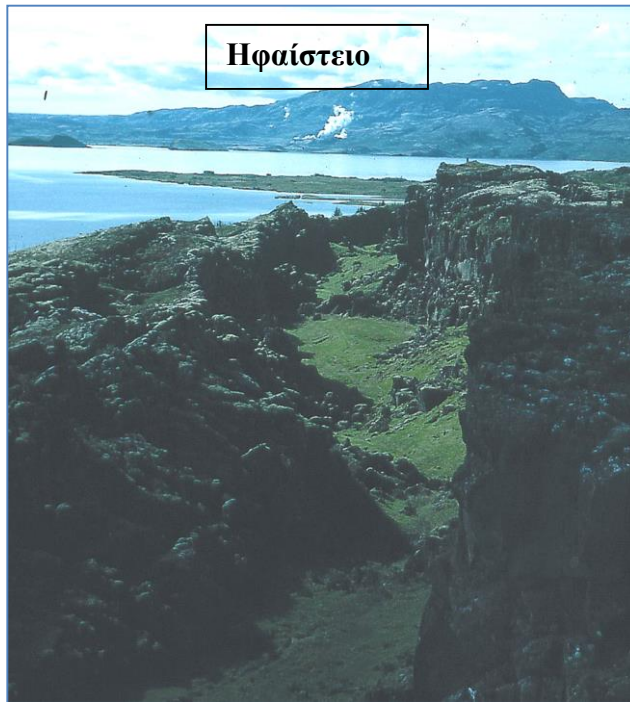
(Πηγή: Dickinson, 1974)

**Εικόνα 4:** Οι λιθοσφαιρικές πλάκες και τα όρια τους

Καθώς οι ήπειροι και οι πυθμένες των ωκεανών αποτελούν τμήματα των λιθοσφαιρικών πλακών, αυτές πραγματοποιούν σχετικές μεταξύ τους κινήσεις πάνω στην υποκείμενη πλαστική ασθενόσφαιρα. Η μετακίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών έχει προκαλέσει στο παρελθόν το σχηματισμό οροσειρών και ωκεάνιων τάφρων και είναι επίσης υπεύθυνη για την πρόκληση των τεκτονικών σεισμών (Dickinson, 1974).

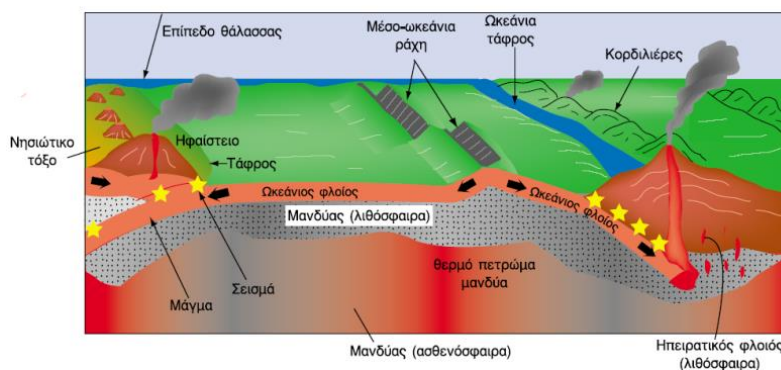
Τα όρια των τεκτονικών πλακών προσδιορίζονται από τις περιοχές της επιφάνειας της γης όπου εκδηλώνεται υψηλή σεισμικότητα και ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- i. Όρια αποκλίνουσων πλακών (π.χ. Ισλανδία και Αζόρες)
- ii. Όρια συγκλίνουσων πλακών
- iii. Όρια ολισθαίνουσων πλακών (π.χ. το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα, Καλιφόρνια) (Condie, 2013)



(Πηγή: (Gudmundsson, 1992))

**Εικόνα 5:** Το όριο των λιθοσφαιρικών πλακών με τη μορφή ρήγματος στην Ισλανδία. Η δεξιά πλευρά του ρήγματος βρίσκεται στη Βορειοαμερικανική τεκτονική πλάκα και η αριστερή πλευρά στην Ευρασιατική πλάκα. Στην προέκτασή του διακρίνεται το ενεργό ηφαίστειο Hergill και το γεωθερμικό πεδίο Nesjavellir, από το οποίο θερμαίνεται η πρωτεύουσα Reykjavik



Πηγή: (Παπαγεωργάκης, 1993)

**Εικόνα 6:**Μορφές Μετατόπισης των Λιθοσφαιρικών Πλακών

### 2.3.2 Η Θερμότητα στο Εσωτερικό της γης

Η προέλευση της θερμότητας της γης δεν είναι γνωστή με ακρίβεια. Οι κυριότεροι μηχανισμοί είναι δύο:

- Η διάσπαση ορισμένων ραδιενεργών ορυκτών της γης, τα οποία περιέχουν ραδιενεργά ισότοπα με μεγάλο χρόνο ημιζωής, όπως  $^{238}\text{U}$  και  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$ . Πιθανόν ο σημαντικότερος μηχανισμός παραγωγής θερμικής ενέργειας.
- Η θερμότητα της γης προέρχεται από τις διεργασίες που οδήγησαν στη δημιουργία της, δηλαδή έχει αστρική προέλευση. Το εσωτερικό της γης ήταν πάντα θερμό και μάλιστα πολύ θερμότερο στην αρχική του κατάσταση.(Mihalakakou et al., 1992)

**Πίνακας 4:** Χαρακτηριστικά των ραδιοϊσοτόπων που συνεισφέρουν στην παραγωγή θερμότητας της γης

Ραδιοϊσότοπο	Χρόνος Ημιζωής 10 <sup>9</sup> έτη	Συγκέντρωση, Kg/kg x10 <sup>-9</sup>	Δυναμικό παραγόμενης θερμότητας, W/kg x10 <sup>-5</sup>
$^{238}\text{U}$	4.47	25.5	9.37
$^{235}\text{U}$	0.704	0.185	56.9
$^{232}\text{Th}$	14.0	103	2.69
$^{40}\text{K}$	10.25	32.9	2.79

Πηγή:(Φυτίκας and Ανδρίτσος, 2004α)

Άλλοι μηχανισμοί οι οποίοι θεωρούνται ότι συνεισφέρουν σε μικρότερο βαθμό στη θερμότητα της γης είναι η ενέργεια λόγω της βαρύτητας και οι απώλειες κινητικής ενέργειας από τις παλίρροιες (Verhoogen, 1980)

Υπάρχουν όμως και απώλειες θερμότητας από την επιφάνεια της γης προς την ατμόσφαιρα. Η συνολική ροή θερμότητας στην επιφάνεια της γης γίνεται κυρίως μέσω της αγωγής θερμότητας (ή και της συναγωγής θερμότητας σε μικρότερο βαθμό). Υπάρχουν και άλλοι μηχανισμοί, με μικρότερη όμως συνεισφορά όπως, η θερμότητα που απελευθερώνεται από τα ηφαιστεια (μέσω της εκροής των ηφαιστειακών προϊόντων), η ενέργεια παραμόρφωσης λόγω των σεισμών, η θερμότητα που καταναλώνεται για τη μεταμόρφωση των πετρωμάτων και η δυναμική ενέργεια λόγω βαρύτητας (ανύψωση οροσειράς) (Verhoogen, 1980). Προσεγγιστικές εκτιμήσεις για τις απώλειες θερμότητας από τη γη παρουσιάζονται στον πιο κάτω πίνακα.

**Πίνακας 5:** Μηχανισμοί απωλειών θερμότητας από τη γη

Μηχανισμός απώλειας θερμότητας	Ενέργεια W
Επιφανειακή ροή θερμότητας	$3-4 \times 10^3$
Θερμότητα από ηφαίστεια	$-8 \times 10^{11}$
Ενέργεια παραμόρφωσης-σεισμοί	$3-10 \times 10^{11}$
Θερμότητα από μεταμόρφωση	$8 \times 10^{11}$
Δυναμική ενέργεια	$7 \times 10^9$

(Πηγή:(Verhoogen, 1980)

Η θερμότητα που περιέχεται μόνο στο φλοιό της γης θεωρείται ότι είναι τεράστια, της τάξης των  $5,4 \times 10^{21}$  MJ (Armstead, 1983). Ο White το 1969 υπολόγισε ότι η ολική ποσότητα θερμότητας που περιέχεται στα πρώτα 10 km της γης (βάθος που αποτελεί συνήθως το όριο των ερευνητικών γεωτρήσεων, αν και η βαθύτερη γεώτρηση που έχει γίνει προσέγγισε τα 12 km) είναι περίπου  $1,25 \times 10^{27}$  J. Το ποσό αυτό είναι 2000 φορές μεγαλύτερο από τη συνολική ποσότητα θερμικής ενέργειας, την οποία θα μπορούσαν να προσφέρουν όλα μαζί τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων της γης. Μία τέτοια τεράστια ποσότητα ενέργειας δεν είναι εκμεταλλεύσιμη παρά μόνο σε ένα πολύ μικρό ποσοστό, για το λόγο ότι δε βρίσκεται συγκεντρωμένη αλλά διάχυτη (White, 1969).

## 2.4 Γεωθερμικά συστήματα

Τα γεωθερμικά συστήματα εντοπίζονται στις περιοχές με κανονική ή λίγο μεγαλύτερη από τη μέση γήινη γεωθερμική βαθμίδα, και κυρίως στις περιοχές γύρω από τα περιθώρια των τεκτονικών πλακών, όπου η βαθμίδα μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερη της μέσης τιμής. Στην πρώτη περίπτωση, τα γεωθερμικά συστήματα χαρακτηρίζονται από χαμηλές θερμοκρασίες, που συνήθως δεν ξεπερνούν τους  $100^{\circ}\text{C}$  σε οικονομικά και προσβάσιμα βάθη. Στη δεύτερη περίπτωση, οι θερμοκρασίες μπορεί να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, από σχετικά χαμηλές τιμές μέχρι και μεγαλύτερες από  $400^{\circ}\text{C}$  (Rybach and Muffler, 1981).

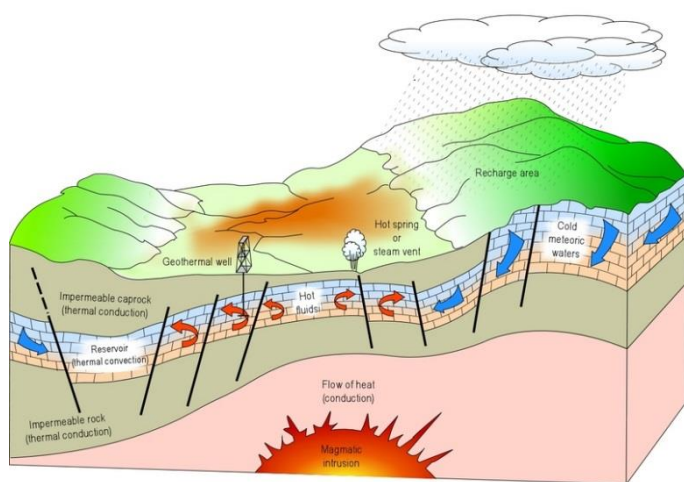
Το γεωθερμικό σύστημα σχηματικά μπορεί να περιγραφεί ως «ένα σύστημα» που βρίσκεται σε περιορισμένο χώρο στον ανώτερο φλοιό της γης και αποτελείται από «κινούμενο νερό» το οποίο μεταφέρει θερμότητα από μια «πηγή» σε μια «δεξαμενή» θερμότητας, που συνήθως πρόκειται για μία ελεύθερη επιφάνεια (Hochstein, 1990). Έτσι λοιπόν, ένα γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από τρία στοιχεία: την εστία θερμότητας, τον

ταμιευτήρα και το ρευστό, το οποίο λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας (Kagel, Bates & Gawell, 2007).

Η εστία θερμότητας βρίσκεται είτε σε σχετικά μικρά βάθη (5-10 km) στα οποία έχει φτάσει η μαγματική διείσδυση και παρουσιάζει πολύ υψηλή θερμοκρασία (>600°C) είτε στα χαμηλής θερμοκρασίας συστήματα, όπου συναντάται η κανονική θερμοκρασία των πετρωμάτων του εσωτερικού της γης, η οποία όπως αναφέρθηκε αυξάνεται με το βάθος (Smith and Shaw, 1979).

Ο ταμιευτήρας είναι ένας σχηματισμός από θερμά υδατοπερατά πετρώματα, που επιτρέπει την κυκλοφορία των ρευστών μέσα σε αυτόν και από τον οποίο τα ρευστά αντλούν θερμότητα. Πάνω από τον ταμιευτήρα βρίσκεται συνήθως ένα κάλυμμα αδιαπέρατων πετρωμάτων. Ο ταμιευτήρας πολλές φορές συνδέεται με μια επιφανειακή περιοχή τροφοδοσίας, δια μέσου της οποίας μετεωρικό ή επιφανειακό γενικά νερό κατεβαίνει και αντικαθιστά μερικώς ή ολικώς τα ρευστά που φεύγουν από τον ταμιευτήρα και εξέρχονται στην επιφάνεια με τη μορφή θερμών πηγών ή αντλούνται από γεωτρήσεις (Armstead, 1983). Το γεωθερμικό ρευστό συνήθως είναι νερό, στις περισσότερες περιπτώσεις μετεωρικής προέλευσης, το οποίο, ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στον ταμιευτήρα, βρίσκεται σε υγρή ή αέρια κατάσταση. Συχνά το ρευστό είναι εμπλουτισμένο σε χημικά στοιχεία και αέρια, όπως CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, κλπ. (Zohdy et al., 1973).

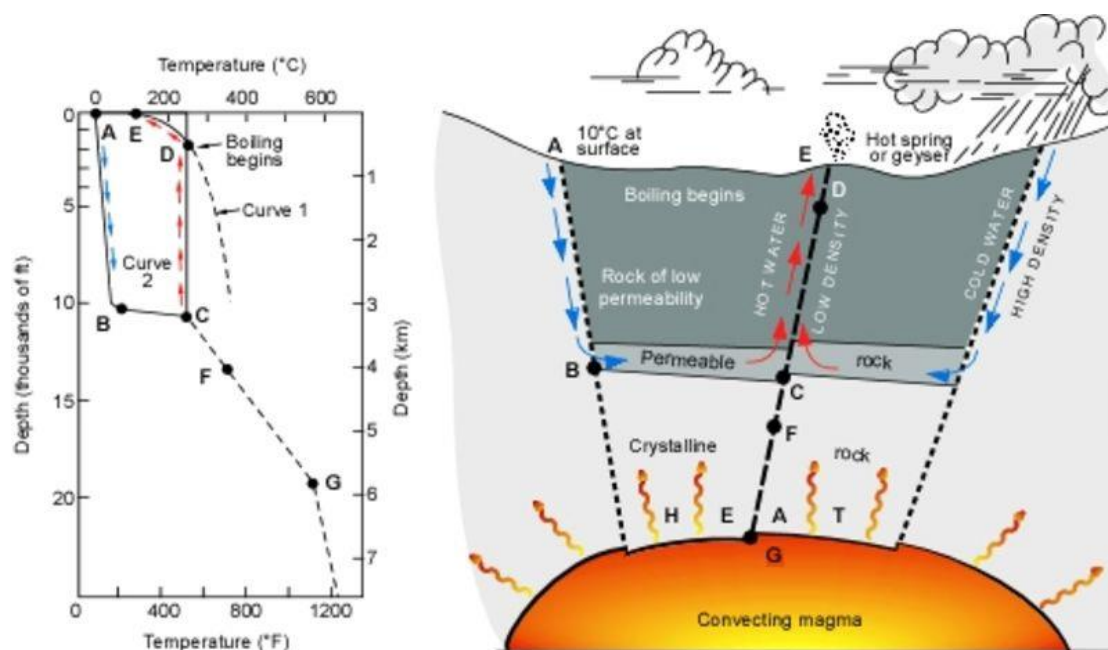
Στην εικόνα 7 αποτυπώνεται σε πολύ απλουστευμένη μορφή ένα πρότυπο γεωθερμικό σύστημα.



(Πηγή:(Association, 2014)

**Εικόνα 7:** Σχηματική απεικόνιση ενός ιδανικού γεωθερμικού συστήματος,

Ο μηχανισμός που διέπει τη λειτουργία των γεωθερμικών συστημάτων εν γένει ελέγχεται από τη μεταφορά θερμότητας μέσω της (συναγωγής/κυκλοφορίας) των ρευστών (fluid convection). Στην ακόλουθη εικόνα (εικόνα 8) παριστάνεται σχηματικά ο μηχανισμός στην περίπτωση ενός υδροθερμικού συστήματος ενδιάμεσης θερμοκρασίας. Η θερμική συναγωγή λαμβάνει χώρα λόγω της θέρμανσης και, κατ' επέκταση, της θερμικής διαστολής των ρευστών σε ένα πεδίο βαρύτητας. Η ενέργεια που προκαλεί το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι ουσιαστικά η θερμότητα που προσφέρεται από την εστία στη βάση του συστήματος κυκλοφορίας (Dickson and Fanelli, 2013). Η πυκνότητα των ρευστών που θερμαίνονται μειώνεται, όταν αυτά παρουσιάζουν τάσεις ανόδου προς μικρότερα βάθη, ενώ αντικαθίστανται στη συνέχεια από ρευστά μικρότερης θερμοκρασίας και μεγαλύτερης πυκνότητας, που προέρχονται από τα περιθώρια του γεωθερμικού συστήματος. Λόγω της θερμικής συναγωγής προκαλείται λοιπόν θερμοκρασιακή αύξηση στο ανώτερο τμήμα του γεωθερμικού συστήματος, καθώς οι θερμοκρασίες στα κατώτερα τμήματα μειώνονται (Truesdell and White, 1973).



(Πηγή: (Truesdell and White, 1973)

**Εικόνα 8:** Πρότυπο-μοντέλο ενός γεωθερμικού συστήματος. Η καμπύλη (1) είναι η καμπύλη αναφοράς του σημείου ζέσεως του καθαρού νερού. Η καμπύλη (2) δείχνει τη θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος μια τυπικής διαδρομής κυκλοφορίας του ρευστού από το σημείο A (τροφοδοσία) προς το σημείο E (αποφόρτιση)

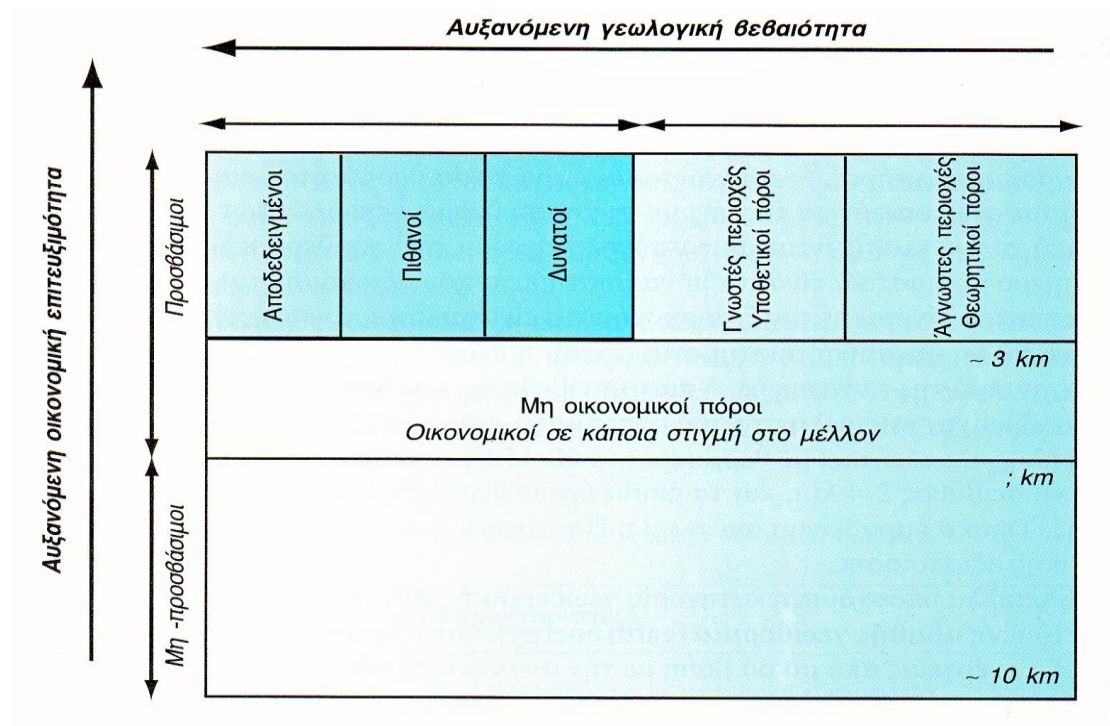
Οι διεργασίες που μόλις περιγράφηκαν πιθανώς να φαίνονται πολύ απλές, όμως η κατασκευή ενός καλού προτύπου (μοντέλου), το οποίο να αντιστοιχεί σε ένα πραγματικό γεωθερμικό σύστημα, είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί. Μια τέτοια εργασία

απαιτεί πολύπλευρες ικανότητες, ειδικές γνώσεις και μεγάλη εμπειρία, ιδιαίτερα όταν αφορά συστήματα υψηλής θερμοκρασίας. Εξάλλου, τα γεωθερμικά συστήματα εμφανίζονται στη φύση με πάρα πολλές ιδιαιτερότητες και ιδιομορφίες, οι οποίες σχετίζονται με διάφορους συνδυασμούς γεωλογικών, φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών που μπορεί να οδηγήσουν σε διάφορους τύπους συστημάτων (Dickson and Fanelli, 2013).

Από τα τρία στοιχεία ενός γεωθερμικού συστήματος, η εστία θερμότητας είναι το μόνο που απαραίτητως πρέπει να έχει φυσική προέλευση. Εάν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές, τα άλλα δύο στοιχεία μπορεί να είναι και «τεχνητά». Για παράδειγμα, τα γεωθερμικά ρευστά που αντλούνται από τον ταμιευτήρα και χρησιμοποιούνται ως η κινητήρια δύναμη ενός γεωθερμικού ατμοστρόβιλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν μετά την ενεργειακή εκμετάλλευσή τους να επανεισαχθούν στον ταμιευτήρα μέσω συγκεκριμένων γεωτρήσεων επανεισαγωγής (injection wells). Έτσι λοιπόν, η φυσική τροφοδοσία ενός ταμιευτήρα μπορεί να συνοδευθεί και να συμπληρωθεί από μια τεχνητή επανατροφοδοσία. (Nicholson, 2012)

#### **2.4.1 Γεωθερμικοί Πόροι**

Οι γεωθερμικοί πόροι είναι οι ποσότητες θερμικής ενέργειας που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης σε κάποιο προσβάσιμο βάθος και μπορεί να αξιοποιηθούν με μικρό κόστος. Το σύνολο των ατμών, των νερών και της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών, των οποίων η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από τη μέση ετήσια αντιπροσωπεύει το γεωθερμικό δυναμικό. Η εκμετάλλευση του γεωθερμικού δυναμικού είναι πολύ πιθανή σε εκείνες τις περιοχές της γης όπου μάζες ρευστών ανεβαίνουν προς την επιφάνεια. Τέτοιες περιοχές συνδέονται με γεωλογικά πολύ πρόσφατη ή και ενεργό ηφαιστειότητα όπως και με περιοχές όπου η γεωθερμική βαθμίδα είναι μεγαλύτερη των 30°C/km. Η γεωθερμική ενέργεια που βρίσκεται σε ένα γεωλογικό χώρο σχηματίζει ένα γεωθερμικό σύστημα (White, 1973).



(Πηγή:(Παπαγεωργάκης, 1993)

**Διάγραμμα 1:** Γραφική παράσταση των διαφόρων κατηγοριών γεωθερμικών πόρων

## 2.4.2 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.α

Ανάλογα με τη θερμοκρασία των ρευστών που ανέρχονται στην επιφάνεια, η γεωθερμική ενέργεια χαρακτηρίζεται ως υψηλής θερμοκρασίας (για θερμοκρασίες πάνω από 150 °C), μέσης θερμοκρασίας (για θερμοκρασίες 100-150°C) και χαμηλής θερμοκρασίας (για θερμοκρασίες μικρότερες από 150°C). Σε σχέση με το είδος των γεωθερμικών πόρων διακρίνονται πέντε κατηγορίες συστημάτων, όπως απεικονίζονται στο πιο σχήμα (Lee, 2001).



(Πηγή: (Φυτίκας and Ανδρίτσος, 2004b)

**Διάγραμμα 2:** Μορφές γεωθερμικής ενέργειας κατά σειρά ενδιαφέροντος χρήσεων σήμερα και προοπτικής στο εγγύς μέλλον, από αριστερά προς τα δεξιά

i. Τα **Υδροθερμικά συστήματα ή πόροι**, είναι υπόγεια φυσικά, θερμά ρευστά και βρίσκονται σε έναν ή περισσότερους ταμιευτήρες. Η μεταφορά της θερμότητας πραγματοποιείται με ανοδική κυκλοφορία του νερού (υγρό ή ατμός), το οποίο θερμαίνεται από μια εστία θερμότητας και συχνά εμφανίζεται στην επιφάνεια της γης με τη μορφή θερμών εκδηλώσεων. Συνήθως, τα συστήματα αυτά, ταυτίζονται με το σύνολο σχεδόν των υδροθερμικών πεδίων, αφού σήμερα είναι ουσιαστικά τα μόνα συστήματα που αξιοποιούνται. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται και συστήματα συναγωγής ή δυναμικά συστήματα, επειδή η θερμότητα μεταδίδεται κυρίως με το μηχανισμό της συναγωγής. Άλλα υδροθερμικά συστήματα μεταφοράς οφείλονται στην κυκλοφορία μετεωρικού νερού μέσω ρηγμάτων και περατών σχηματισμών, όπου, λόγω μεγάλου βάθους ή μαγματικών διεισδύσεων, θερμαίνεται και ακολουθεί ανοδική πορεία (Rybach and Muffler, 1981).

ii. Η **Αβαθής γεωθερμία**, κατά την οποία λαμβάνονται ποσότητες ενέργειας από μικρά βάθη με την ανακυκλοφορία νερού σε κλειστές υδροφόρες ή ξηρές γεωτρήσεις ή σε ρηχές επιφάνειες εδάφους/πετρωμάτων (Sanner, 2001).

iii. Τα συστήματα βαθιών **θερμών-ξηρών πετρωμάτων**, όπου η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή, όμως η έλλειψη ρωγματώσεων δεν επιτρέπει την κυκλοφορία και ύπαρξη νερού. Πρόκειται δηλαδή, για θερμά πετρώματα σε βάθος από 3 μέχρι 10km χωρίς φυσική κυκλοφορία ρευστών, από τα οποία μπορεί να ανακτηθεί ενέργεια χρησιμοποιώντας νερό που διοχετεύεται από την επιφάνεια μέσω

κατάλληλων γεωτρήσεων και ανακτάται θερμότερο με τη μορφή νερού ή ατμού μέσω άλλων γεωτρήσεων (Faust and Mercer, 1979).

iv. Τα **γεωπεπιεσμένα συστήματα**, τα οποία αποτελούνται από ρευστά που έχουν εγκλωβιστεί από μη περατά πετρώματα σε μεγάλο βάθος. Μέσα στους περατούς ιζηματογενείς σχηματισμούς υπάρχει ζεστό νερό που παγιδεύτηκε κατά την απόθεση των ιζημάτων, εγκλωβισμένο από στεγανά περιβάλλοντα πετρώματα, υπό πίεση αρκετά μεγαλύτερη της υδροστατικής που αντιστοιχεί στο βάθος. Επίσης περιέχουν και μεγάλες ποσότητες μεθανίου. Παρόλο που τεχνολογικά η εκμετάλλευση τους φαίνεται εφικτή, το μεγάλο κόστος που προκύπτει από την εκμετάλλευση σε μεγάλα βάθη και από τη χρονική διάρκειά της, καθιστούν τους γεωθερμικούς ταμειυτήρες υπό πίεση μη αξιοποιήσιμους (Rybach and Muffler, 1981).

v. Τα **μαγματικά συστήματα**, στα οποία η απώληση της θερμότητας με κατάλληλες γεωτρήσεις σε μαγματικές διεισδύσεις, που βρίσκονται σε σχετικά μικρό βάθος, γίνεται με συμβατική τεχνολογία και μικρό σχετικά κόστος (Faust and Mercer, 1979).

Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζεται η ταξινόμηση των γεωθερμικών συστημάτων που αναφέρθηκε πιο πάνω. Επίσης στον πίνακα διακρίνονται και οι τυπικές θερμοκρασίες των παραγόμενων ρευστών.

**Πίνακας 6:** Πίνακας: Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων

Τύπος Συστημάτων	Χαρακτηριστικά	Θερμοκ . °C
<b>1.Υδροθερμικά Συστήματα</b>		
1α. Συστήματα συναγωγής	Περατοί σχηματισμοί με φυσική κυκλοφορία ρευστών	Έως 240
A) Συστήματα που περιέχουν ατμό	Κλειστά κυκλώματα συναγωγής, ατμοί παγιδευμένοι από στεγανά καλύμματα,	

	T>200°C, μέχρι 1,5km.	
B) Συστήματα που περιέχουν θερμό νερό		
i.Υψηλής Θερμοκρασίας	Κλειστά ή ανοικτά κυκλώματα συναγωγής, μέχρι τα 3km	>150
ii.Μέσης θερμοκρασίας	Σχεδόν οριζόντιοι υδροφόροι με τοπική αποστράγγιση ψυχρού νερού, με μικρή ή καθόλου πίεση	90-150
iii.Χαμηλής θερμοκρασίας	Όπως το πιο πάνω, αλλά με χαμηλότερη θερμοκρασία νερού, με μικρή ή καθόλου πίεση	<90
iv.1β. Συστήματα αγωγής	Μη περατοί σχηματισμοί, με μικρή ή καθόλου πίεση και περατότητα, σε βάθος 1-3km με εγκλωβισμένα νερά	60-150
<b>2.Αβαθής Γεωθερμία</b>	Από 1m βάθος μέχρι 100m, με ή χωρίς νερό	<40
<b>3.Θερμά-Ξηρά Πετρώματα</b>		
v.Υψηλής Θερμοκρασίας	T>250°C, μέχρι 3km.	>250
vi.Μέσης θερμοκρασίας	T<250°C, μέχρι 3km.	<150
<b>3.Γεωπεπιεσμένα</b>	Έγκλειστα υδροφόρα στρώματα υπό μεγάλη πίεση, παρουσία υδρογονανθράκων	150-200
<b>4.Μαγματικά</b>	Η θερμοκρασία >500°C σε μερικά χιλιόμετρα βάθος λόγω μαγματικών διεισδύσεων	>500

(Πηγή: Armstead, 1978)

Το συνηθέστερο κριτήριο για την ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων είναι η ενθαλπία των γεωθερμικών ρευστών, τα οποία λειτουργούν ως φορέας μεταφοράς θερμότητας από

τα βαθιά και θερμά πετρώματα προς την επιφάνεια. Η ενθαλπία των ρευστών ΔΗ, θεωρείται ανάλογη της θερμοκρασίας και χρησιμοποιείται για να εκφράσει την περιεχόμενη θερμική ενέργεια των ρευστών και δίνει μια γενική εικόνα της ενεργειακής τους αξίας (Çengel et al., 2015).

Οι γεωθερμικοί πόροι διακρίνονται σε χαμηλής (<90°C), μέσης (90-150°C) και υψηλής ενθαλπίας ή θερμοκρασίας (>150 °C), σύμφωνα με το ενεργειακό τους περιεχόμενο και τις πιθανές μορφές αξιοποίησης τους. Στον πιο κάτω πίνακα αναφέρονται οι τρόποι ταξινόμησης της ενθαλπίας. Αυτή η ταξινόμηση γίνεται για το λόγο ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος δεν είναι πάντα οικονομικά αποδεκτή για θερμοκρασίες ρευστών μικρότερες από 150°C. Επίσης η ταξινόμηση των ρευστών χαμηλής ενθαλπίας μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι τα πεδία με αυτές τις θερμοκρασίες είναι πολυάριθμα και αξιοποιούνται για πολλαπλούς σκοπούς. Η πιο κάτω ταξινόμηση είναι ουσιαστικά αυθαίρετη και στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλές άλλες ταξινομήσεις (Lumb, 1981).

**Πίνακας 7:** Ταξινόμηση της Ενθαλπίας με Βάση τη Θερμοκρασία των Γεωθερμικών Πόρων (°C)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<b>Χαμηλής Ενθαλπίας</b>	<90	<125	<100	≤150	≤190
<b>Μέσης Ενθαλπίας</b>	90-150	125-225	100-200	---	---
<b>Υψηλής Ενθαλπίας</b>	>150	>225	>200	>150	>190

(1) (Muffler and Cataldi, 1978)

(2) (Hochstein, 1990)

(3) (Benderitter and Cormy, 1990)

(4) (Nicholson, 1993)

(5) (Axelsson and Gunnlaugsson, 2000)

## 2.5 Γεωθερμική Έρευνα

Τα αντικείμενα μιας γεωθερμικής έρευνας είναι:

1. Ο προσδιορισμός των γεωθερμικών φαινομένων
2. Η επιβεβαίωση της ύπαρξης ενός ωφέλιμου παραγωγικού γεωθερμικού πεδίου
3. Η εκτίμηση του μεγέθους του ενεργειακού πόρου
4. Ο καθορισμός του τύπου του γεωθερμικού πεδίου
5. Ο εντοπισμός των παραγωγικών ζωνών
6. Ο καθορισμός του θερμικού περιεχομένου των γεωθερμικών ρευστών που θα παραχθούν από το γεωθερμικό πεδίο μέσω των παραγωγικών γεωτρήσεων
7. Η συλλογή των βασικών δεδομένων, πάνω στα οποία θα βασιστούν τα αποτελέσματα της μελλοντικής παρακολούθησης του πεδίου
8. Ο καθορισμός της τιμής των ευαίσθητων περιβαλλοντικών παραμέτρων πριν από την εκμετάλλευση
9. Η συλλογή πάσης φύσεως πληροφορίας και γνώσης για κάθε χαρακτηριστικό στοιχείο που θα μπορούσε να προκαλέσει προβλήματα κατά την ανάπτυξη του πεδίου (Lumb, 1981).

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό γεωθερμικών πόρων είναι οι ακόλουθοι:

1. **Οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές μελέτες οι οποίες** αποτελούν την αφετηρία κάθε ερευνητικού προγράμματος. Μέσα από αυτές προσδιορίζεται η θέση και η έκταση των περιοχών που θα πρέπει να ερευνηθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, και υποδεικνύονται οι κατάλληλες μέθοδοι έρευνας για τις συγκεκριμένες περιοχές. Οι μελέτες αυτές παίζουν σημαντικό ρόλο σε όλες τις επόμενες φάσεις της γεωθερμικής έρευνας, ακόμη και στον καθορισμό της θέσης των ερευνητικών και παραγωγικών γεωτρήσεων. Επίσης, παρέχουν τις βασικές πληροφορίες για την εκτίμηση του δυναμικού του γεωθερμικού πόρου και την κατασκευή ενός ρεαλιστικού προτύπου (μοντέλου) γεωθερμικού συστήματος. Τα στοιχεία των μελετών αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και στη φάση παραγωγής, αναφορικά με την ορθολογική διαχείριση του γεωθερμικού ταμειυτήρα και γενικότερα του πεδίου. Η διάρκεια και το συνολικό κόστος μιας ολοκληρωμένης γεωθερμικής έρευνας μπορεί να μειωθούν σημαντικά αν ο προγραμματισμός της γίνει με σωστό σχεδιασμό και αποδοτικό συντονισμό (Williams et al., 2008).

2. **Οι γεωχημικές έρευνες** (συμπεριλαμβανομένης της γεωχημείας ισοτόπων), αποτελούν αξιόλογα εργαλεία για τον καθορισμό της φύσης του γεωθερμικού συστήματος (υγρό ή ατμός), την εκτίμηση της ελάχιστης αναμενόμενης θερμοκρασίας στο βάθος και της ομοιογένειας στην παροχή των ρευστών, την έμμεση εκτίμηση των χημικών χαρακτηριστικών των ρευστών που βρίσκονται στο βάθος καθώς και για τον προσδιορισμό της πηγής τροφοδοσίας του ταμιευτήρα. Επιπλέον, παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για το είδος των προβλημάτων που ενδέχεται να προκύψουν κατά την επανεισαγωγή των ρευστών στον ταμιευτήρα και κατά την παραγωγική διαδικασία (π.χ. αλλαγές στη σύσταση των ρευστών, διάβρωση ή επικαθήσεις στις σωληνώσεις και τις εγκαταστάσεις, περιβαλλοντικές επιπτώσεις), καθώς και για τον τρόπο αντιμετώπισης ή αποφυγής τους. Η γεωχημική έρευνα συνίσταται σε δειγματοληψίες, χημικές και/ή ισοτοπικές αναλύσεις του νερού και των αερίων των γεωθερμικών επιφανειακών εκδηλώσεων (θερμές πηγές, ατμίδες, κλπ.) ή των γεωτρήσεων στην υπό μελέτη περιοχή (Muffler and Cataldi, 1978).

3. **Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις** οι οποίες αποσκοπούν στην έμμεση απόκτηση γνώσης, από την επιφάνεια ή κοντά σε αυτήν, για τις φυσικές παραμέτρους των γεωλογικών σχηματισμών που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη. Προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για το σχήμα, το μέγεθος, το βάθος και άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά βαθιών γεωλογικών δομών, οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελούν ένα γεωθερμικό ταμιευτήρα. Συνήθως οι γεωφυσικές διασκοπήσεις εφαρμόζονται στα τελευταία στάδια του γεωθερμικού ερευνητικού προγράμματος, πριν ακριβώς τον καθορισμό της θέσης των ερευνητικών γεωτρήσεων. Όλες γενικά οι μέθοδοι γεωφυσικών διασκοπήσεων έχουν μεγάλο κόστος, κάποιες μάλιστα ιδιαίτερα υψηλό. Για το λόγο αυτό, δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αδιακρίτως και υπό οποιεσδήποτε καταστάσεις και συνθήκες, διότι μια μέθοδος που πιθανώς παρέχει θαυμάσια αποτελέσματα σε ένα συγκεκριμένο γεωλογικό περιβάλλον μπορεί να μην έχει καθόλου ικανοποιητική απόδοση σε κάποιο άλλο. Άρα, η εκ των προτέρων προσεκτική επιλογή της γεωφυσικής μεθόδου είναι πολύ σημαντική όσον αφορά τον καθορισμό του κόστους, και θα πρέπει να γίνεται από κατάλληλους και ειδικούς γεωφυσικούς επιστήμονες που με τη σειρά τους θα βρίσκονται σε συνεχή και στενή συνεργασία με τους γεωλόγους (Meidav, 1998).

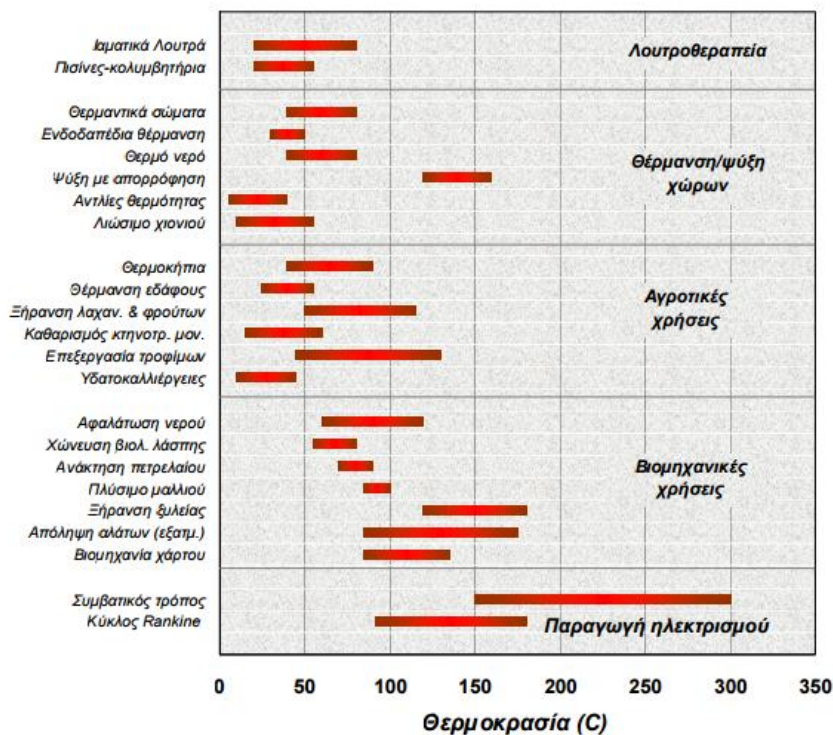
4. **Η διάνοιξη ερευνητικών γεωτρήσεων** σηματοδοτεί το τελικό στάδιο ενός ερευνητικού γεωθερμικού προγράμματος και αποτελεί το μόνο μέσο για τον

προσδιορισμό των πραγματικών χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα και την εκτίμηση του δυναμικού του (Dickson and Fanelli, 2013). Τα στοιχεία που προκύπτουν από τις ερευνητικές γεωτρήσεις θα πρέπει λογικά να είναι τέτοια, ώστε να επαληθεύουν όλες τις αρχικές υποθέσεις και τα μοντέλα που είχαν αναπτυχθεί κατά τα προηγούμενα στάδια της έρευνας, καθώς και να επιβεβαιώνουν ότι ο ταμιευτήρας είναι πράγματι παραγωγικός και περιέχει αρκετή ποσότητα ρευστών, με χαρακτηριστικά κατάλληλα για τη χρήση που προορίζονται (Combs and Muffler, 1973).

Καθίσταται λοιπόν φανερό πως η επιλογή της σωστής θέσης των ερευνητικών γεωτρήσεων είναι ένα κρίσιμο και δύσκολο εγχείρημα, το οποίο προϋποθέτει μεγάλη εμπειρία, γνώσεις και λεπτούς χειρισμούς.

## 2.6 Αξιοποίηση Γεωθερμικής Ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η πιο σημαντική μορφή αξιοποίησης των γεωθερμικών πόρων υψηλής θερμοκρασίας (>150°C). Οι μέσης και χαμηλής θερμοκρασίας πόροι (<150°C) είναι κατάλληλοι για πολλούς διαφορετικούς τύπους εφαρμογών. Το κλασικό διάγραμμα του Lindal (Lindal, 1973), δείχνει τις πιθανές χρήσεις των γεωθερμικών ρευστών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους (Διάγραμμα 3)



**Διάγραμμα 3:** Οι κυριότερες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας-Το τροποποιημένο διάγραμμα Lindal

Η δυνατότητα οικονομικής εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικού πεδίου εξαρτάται από το βάθος, τη θερμοκρασία και την ποσότητα-ποιότητα των αντλούμενων ρευστών στη διάρκεια του χρόνου. Οι χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας χωρίζονται σε ηλεκτρικές και άμεσες χρήσεις. Στις άμεσες χρήσεις γίνεται εκμετάλλευση της θερμότητας των ρευστών χωρίς να παραχθεί ενδιάμεσα ηλεκτρική ενέργεια (Barbier, 1997).

Τα γεωθερμικά πεδία που αξιοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από τη γεωγραφική τους θέση, σε αντίθεση με τα πεδία για παραγωγή θερμικής ενέργειας, όπου η άμεση χρήση είναι τοπική και σε μικρή έκταση (Lindal, 1973).

Η δυνατότητα αναπλήρωσης των αντλούμενων γεωθερμικών ρευστών και της θερμότητας του ταμιευτήρα από τη θερμική εστία είναι συνεχής με συνέπεια την απεριόριστη διάρκεια ζωής των πεδίων. Στην πραγματικότητα όμως ένα μικρό ποσοστό των αντλούμενων ρευστών προλαβαίνει να αναπληρωθεί και ούτε είναι εφικτή η έγκαιρη αναθέρμανση των γεωλογικών σχηματισμών του ταμιευτήρα που επηρεάζεται από το ρυθμό άντλησης των ρευστών (Dickson and Fanelli, 2013).

Η ποσότητα των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων θερμότητας, που υπάρχει στα γεωθερμικά ρευστά και στα πετρώματα του ταμιευτήρα, καθορίζει τη χρονική διάρκεια εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικού πεδίου. Συνεπώς ο ρυθμός άντλησης της θερμικής ενέργειας θα καθορίσει τη διάρκεια ζωής του πεδίου (Faust and Mercer, 1979).

Η τεχνική εκτέλεσης των γεωθερμικών γεωτρήσεων εξαρτάται από το βάθος, τη θερμοκρασία και την ποιότητα των γεωθερμικών ρευστών. Οι γεωτρήσεις μεγάλου βάθους ακολουθούν την τεχνική των γεωτρήσεων πετρελαίου λαμβάνοντας υπόψη τις υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, τη διαβρωτικότητα και τις επικαθίσεις αλάτων των γεωθερμικών ρευστών. Επομένως η επένδυση των γεωτρήσεων απαιτεί σωληνώσεις με τσιμέντωση υψηλής αντοχής στην τριβή και διάβρωση. Το υψηλό κόστος των βαθιών γεωτρήσεων επιβάλλει τη μείωση του ποσοστού αποτυχίας (Barbier, 1997).

Το δίκτυο μεταφοράς των γεωθερμικών ρευστών από τη γεώτρηση μέχρι τη μονάδα ανάκτησης της θερμότητας αποτελείται από σωληνώσεις τις οποίες καταπονούν οι υψηλές θερμοκρασίες, οι πιέσεις και ο χημισμός. Η θερμομόνωση τους είναι απαραίτητη για τη

μείωση των απωλειών θερμότητας, που είναι συνάρτηση της απόστασης και της ταχύτητας ροής των γεωθερμικών ρευστών (Bloomquist, 2003).

Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας για τα πεδία μέσης και υψηλής ενθαλπίας εστιάζεται κυρίως στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ακολούθως στις θερμικές χρήσεις, ενώ για τα πεδία χαμηλής ενθαλπίας στις άμεσες θερμικές χρήσεις (θέρμανση χώρων, ξήρανση αγροτικών προϊόντων, ιχθυοκαλλιέργειες, κλπ) (Lund et al., 2011).

Μετά την ολοκλήρωση του ερευνητικού προγράμματος ακολουθεί ο σχεδιασμός της εκμετάλλευσης-αξιοποίησης που περιλαμβάνει:

- ❖ Την επιλογή των θέσεων και την εκμετάλλευση γεωτρήσεων παραγωγής και επανεισαγωγής με βάση τον προγραμματισθέντα ρυθμό άντλησης και τη διάρκεια ζωής του.
- ❖ Το είδος αξιοποίησης των γεωθερμικών ρευστών και
- ❖ Τα είδη των δυνατών επενδυτικών μονάδων και του εξοπλισμού που θα χρησιμοποιηθεί (Suárez-Arriaga et al., 2014)

Για να σχεδιαστεί σωστά μια γεωθερμική επένδυση θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα πιο κάτω:

- ✓ Ο εκτιμώμενος ρυθμός ωφέλιμης άντλησης (ανάκτησης) της θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας του ταμιευτήρα ( $MW/Km^2$ ) στη διάρκεια συγκεκριμένου χρόνου ζωής της μονάδας. Προσδιορίζεται από τον βαθμό αξιοπιστίας της έρευνας αποτίμησης του γεωθερμικού δυναμικού του πεδίου.
- ✓ Ο προσδιορισμός του κόστους της μονάδας, που εκφράζεται σε Euro/KW εγκατεστημένης ισχύος (προσθέτοντας και το κόστος απόσβεσης) ή σε Euro/KWh παραγόμενης ενέργειας
- ✓ Ο συντελεστής χρονικής διαθεσιμότητας της γεωθερμικής ενέργειας, το ποσοστό (%) του χρόνου λειτουργίας της μονάδας
- ✓ Ο συντελεστής αξιοποίησης, το ποσοστό (%) αξιοποίησης επί της συνολικής προσφερόμενης γεωθερμικής ενέργειας
- ✓ Η μίσθωση γης, οι γεωτρήσεις παραγωγής και επανεισαγωγής, τα δίκτυα μεταφοράς και οι εναλλάκτες θερμότητας των ρευστών, η κατασκευή της μονάδας κλπ (Blair et al., 1982).

## 2.7 Χρήσεις Γεωθερμικής Ενέργειας

Η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο αριθμό δραστηριοτήτων και εφαρμογών ανάλογα με τη θερμοκρασία και την ποιότητα των ρευστών, οι οποίες όπως προαναφέρθηκε διακρίνονται σε ηλεκτρικές και άμεσες χρήσεις.

Στις ηλεκτρικές χρήσεις περιλαμβάνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών. Στη δεύτερη κατηγορία δηλαδή στις άμεσες χρήσεις γίνεται εκμετάλλευση της θερμότητας των ρευστών χωρίς να παραχθεί ενδιάμεσα ηλεκτρική ενέργεια. Οι πιο συνηθισμένες εφαρμογές είναι η θέρμανση χώρων, οι ιχθυοκαλλιέργειες, η ξήρανση αγροτικών προϊόντων και η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Ρευστά με θερμοκρασία μεγαλύτερη των 150°C χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, ενώ οι άμεσες χρήσεις καλύπτουν όλη την κλίμακα θερμοκρασιών (Lund and Freeston, 2001).

### **2.7.1 Ηλεκτρικές χρήσεις-Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Η καλύτερη αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας είναι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που είναι εφικτή σε γεωθερμικά πεδία μέσης και υψηλής ενθαλπίας. Η ηλεκτρική αυτή ενέργεια μπορεί να προσφέρει θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό και είναι από τις πιο καθαρές για το περιβάλλον μορφές ενέργειας (Budd, 1984).

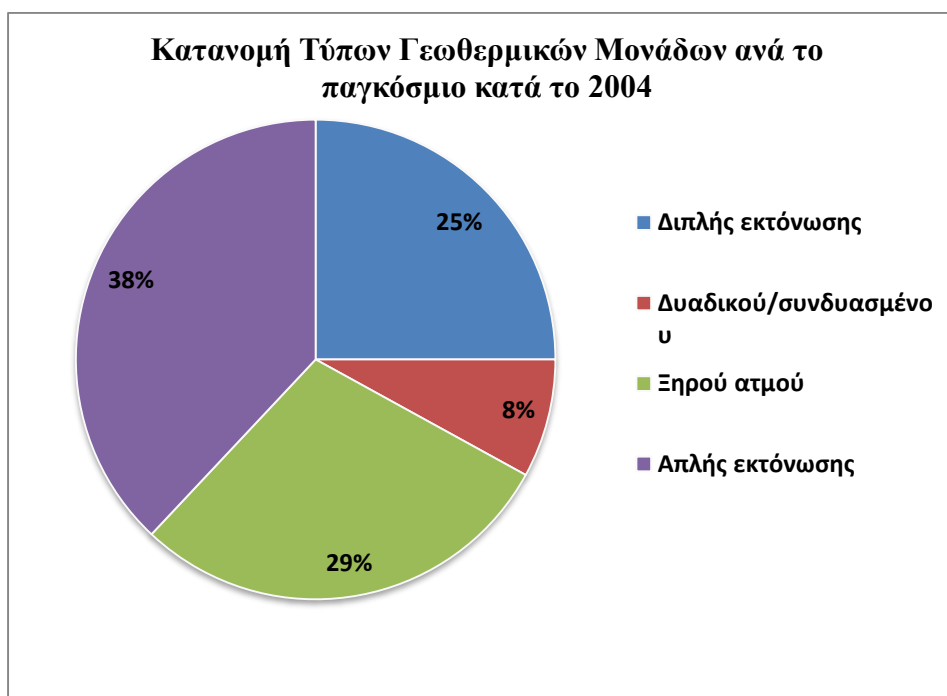
Στα υδροθερμικά αυτά συστήματα η μεταφορά της θερμότητας γίνεται με την ανοδική κυκλοφορία του φυσικά εμφανιζόμενου νερού (υγρός ή ατμός), που βρίσκεται πάνω από στερεοποιημένες μαγματικές διεισδύσεις (600°C-1000°C). Υπάρχουν όμως και τα υδροθερμικά συστήματα μεταφοράς που οφείλονται στην κυκλοφορία μετεωρικού νερού μέσω ρηγμάτων και ρωγματώσεων σε μεγάλα βάθη, όπου υπάρχει υψηλή θερμοκρασία λόγω βάθους ή μαγματικών διεισδύσεων. Στην περίπτωση αυτή το νερό αφού θερμανθεί ακολουθεί ανοδική πορεία (Fridleifsson, 2003).

Διακρίνονται οι ακόλουθες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας:

- ✓ χρήση ξηρού ατμού
- ✓ χρήση ακαριαίου ατμού
- ✓ δυαδικός κύκλος ή κύκλος Rankine (Hettiarachchi et al., 2007)

Ο τύπος (κύκλος) της μονάδας ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της γεωθερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική καθορίζεται συνήθως από το είδος του πεδίου (ξηρός ατμός, διφασικό ρευστό), από τη θερμοκρασία και την πίεση των ρευστών (π.χ. ποσοστό μη-συμπιεσμένων αερίων, παρουσία αλάτων), από τη δυναμικότητα της μονάδας και από την τάση των ρευστών για δημιουργία επικαθίσεων και διάβρωσης των μεταλλικών επιφανειών (Fridleifsson, 2003).

Οι κυριότεροι τύποι μονάδων που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι το 2004 είναι ο κύκλος ξηρού ατμού, ο κύκλος (απλής & διπλής) εκτόνωσης διφασικού ρευστού, ο δυαδικός κύκλος και ο κύκλος συνολικής ροής (συνδυασμένος). Η ποσοστιαία κατανομή τους ανά τον κόσμο φαίνεται στο πιο κάτω διάγραμμα (DiPirro, 1991).



(Πηγή: Bertani, 2016)

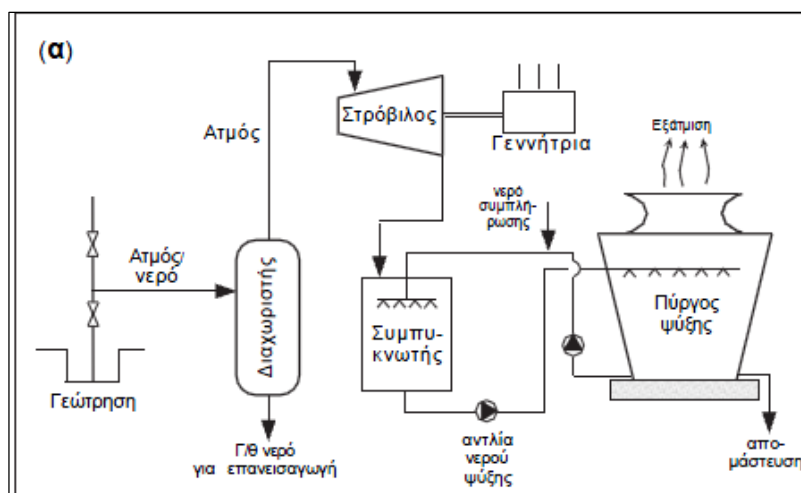
**Διάγραμμα 4:** Κατανομή Τύπων Γεωθερμικών Μονάδων ανά το Παγκόσμιο το 2004

Οι κυριότεροι τύποι μονάδων που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα είναι:

**α) Απευθείας Χρησιμοποίηση Ατμού.** Αποτελεί τον απλούστερο τύπο γεωθερμικής μονάδας και ο τύπος που απαιτεί το μικρότερο κόστος κεφαλαίου. Εφαρμόζεται συνήθως με σχετικά καθαρό γεωθερμικό ατμό. Συνοπτικά η διαδικασία γίνεται ως εξής, ατμός από μία ή περισσότερες γεωτρήσεις οδηγείται κατευθείαν σε ένα στρόβιλο χωρίς καμία επεξεργασία. Η μονάδα μπορεί να έχει συμπυκνωτή ή όχι, ανάλογα με την περιεκτικότητα του ατμού σε μη συμπυκνωμένα αέρια. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο τύπος χωρίς

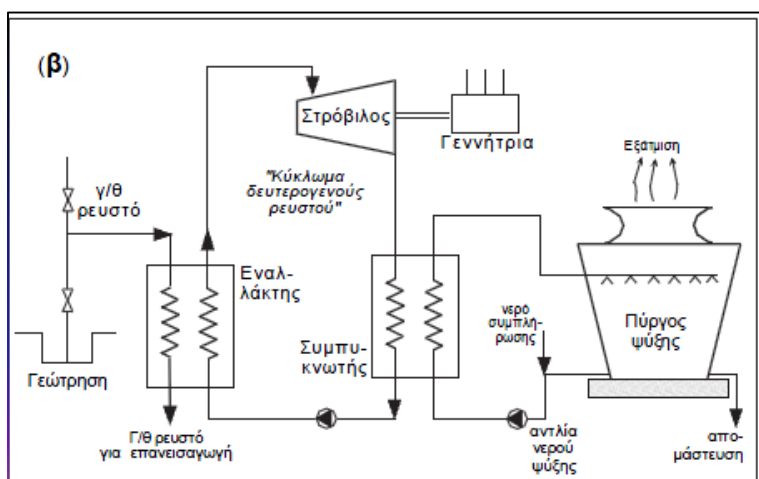
συμπυκνωτή παρουσιάζει χαμηλό κόστος και ταυτόχρονα, αισθητά χαμηλότερη απόδοση από ότι ο τύπος με συμπυκνωτή (Fridleifsson, 2003).

**β) Εκτόνωση διφασικού Ρευστού.** Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου υπάρχει νερό σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Στον τύπο αυτόν, το γεωθερμικό ρευστό εκτονώνεται σε πίεση χαμηλότερη από την πίεση που επικρατεί στην κεφαλή της γεώτρησης. Έτσι παράγεται διφασικό μίγμα, που διαχωρίζεται ενώ ο ατμός οδηγείται στο στρόβιλο. Αν η θερμοκρασία και η πίεση του γεωθερμικού υγρού το επιτρέπουν, τότε το υγρό μπορεί να εκτονωθεί για δεύτερη φορά ή και περισσότερες φορές ώστε να παραχθεί επιπλέον ατμός, που θα αυξήσει σημαντικά την απόδοση της μονάδας. Σημειώνεται επίσης ότι για γεωθερμικά ρευστά υψηλής αλατότητας ψεκάζεται ο ατμός με νερό πριν από το στρόβιλο για να απομακρυνθούν οι ποσότητες των αλάτων που συμπαρασύρονται με τον ατμό (Φυτίκας and Ανδρίτσος, 2008).



Πηγή: (Φυτίκας and Ανδρίτσος, 2008)

**Εικόνα 9:** Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος με εκτόνωση Διφασικού Ρευστού και άμεση συμπύκνωση του ατμού



(Πηγή: Φυτίκας and Ανδρίτσος, 2008)

**Εικόνα 10:** Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος με χρήση δευτερεύοντος οργανικού ρευστού

**γ) Χρησιμοποίηση Δευτερεύοντος Ρευστού.** Ονομάζεται και κύκλος Rankie. Συνοπτικά, το γεωθερμικό ρευστό χρησιμοποιείται για τη θέρμανση και εξάτμιση μιας οργανικής ουσίας (ισοβουτάνιο, υδροφθοράνθρακας), η οποία εν συνεχεία ως ατμός οδηγείται στο στρόβιλο, συμπυκνώνεται και επανεισάγεται πάλι στον εναλλάκτη. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι τα γεωθερμικά νερά μέσης ενθαλπίας μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, αλλά και το ότι δύναται η ανάκτηση μεγαλύτερης ποσότητας θερμότητας με την απόρριψη των ρευστών σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Σημαντικό μειονέκτημα της μονάδας αυτής είναι ότι είναι απαραίτητη η χρήση του εναλλάκτη, ο οποίος είναι γενικά μια δαπανηρή συσκευή που συνήθως παρουσιάζει έντονα προβλήματα επικαθίσεων (Φυτίκας και Ανδρίτσος, 2004α).

**δ) Εκτόνωση της συνολικής Ροής.** Στις μονάδες εκτόνωσης του διφασικού ρευστού, αξιοποιείται μόνο ένα μέρος από τη θερμότητα των ρευστών (ατμός). Στον τύπο της μονάδας εκτόνωσης της συνολικής ροής γίνεται εκτόνωση όλου του ρευστού με τη βοήθεια κατάλληλων συσκευών. Αν και η αρχή λειτουργίας των μονάδων αυτών είναι απλή, η κατασκευή τέτοιων μονάδων βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο (Φυτίκας και Ανδρίτσος, 2004α).

## 2.7.2 Άμεσες Χρήσεις

Οι άμεσες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας καλύπτουν ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών. Η εγκατεστημένη ισχύς σε παγκόσμια κλίμακα της γεωθερμικής ενέργειας ως θερμικής υπερβαίνει κατά πολύ την αντίστοιχη της ως ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κυριότερες άμεσες εφαρμογές της γεωθερμίας, μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- ❖ θέρμανση χώρων,
- ❖ αγροτικές χρήσεις,
- ❖ υδατοκαλλιέργειες,
- ❖ βιομηχανικές χρήσεις,
- ❖ λουτροθεραπεία (και πισίνες) και
- ❖ αντλίες θερμότητας (Dickson and Fanelli, 2013)

Πιο αναλυτικά οι δυνατές άμεσες-θερμικές χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας σύμφωνα με το διάγραμμα Lindal είναι:

- ✓ 180°C: Εξάτμιση συμπυκνωμένων διαλυμάτων. Ψύξη με απορρόφηση. Κατεργασία χαρτομάζας.
- ✓ 170°C: Παραγωγή βαρέως ύδατος. Ξήρανση γης διατομών.
- ✓ 160°C: Ξήρανση ψαριών. Ξήρανση ξυλείας.
- ✓ 150°C: Παραγωγή αλουμίνας με τη μέθοδο Bayer.
- ✓ 140°C: Ξήρανση αγροτικών προϊόντων. Κονσερβοποίηση.
- ✓ 130°C: Εξάτμιση για την παραγωγή ζάχαρης. Ανάκτηση αλάτων με εξάτμιση και κρυστάλλωση.
- ✓ 120°C: Παραγωγή γλυκού νερού με απόσταξη.
- ✓ 110°C: Ξήρανση τσιμεντόλιθων.
- ✓ 100°C: Ξήρανση οργανικών ουσιών, φυκιών, οσπρίων κλπ. Πλύσιμο και ξήρανση μαλλιού.
- ✓ 90°C: Ξήρανση ψαριών.
- ✓ 80°C: Θέρμανση οικισμών, Θέρμανση θερμοκηπίων.
- ✓ 40°C: Θέρμανση εδάφους. Θέρμανση οικισμών (κατώτερο όριο).
- ✓ 30°C: Πισίνες, ζύμωση. Θέρμανση θερμοκηπίων με ακτινωτό δίκτυο αγωγών.
- ✓ 20°C: Υδατοκαλλιέργειες (Lindal, 1973).

Οι θερμοκρασίες που αναφέρονται πιο πάνω δεν έχουν περιοριστικό χαρακτήρα αφού με αντλίες θερμότητας είναι εφικτή η ανύψωση της θερμοκρασίας ή η μείωση της κατόπιν ανάμειξης της με ψυχρότερα νερά (Lindal, 1973).

Οι Lund et al παρουσίασαν στο συνέδριο που πραγματοποιήθηκε από τη Διεθνή Γεωθερμική Ένωση (International Geothermal Association) και την Τουρκική Γεωθερμική Ένωση, το 2005 στην Αιτάλεια της Τουρκίας, μια ανασκόπηση των γεωθερμικών εφαρμογών. Σύμφωνα με την παρουσίαση αυτή η κατανομή των διαφόρων χρήσεων αναφορικά με τη θερμική ενέργεια που λαμβάνεται κατά το 2005 από τις άμεσες χρήσεις είναι: αντλίες θερμότητας (32%), θέρμανση χώρων (20%, από το οποίο το 83% αντιστοιχεί στη τηλεθέρμανση), λουτροθεραπεία και πισίνες (26,2%) θερμοκήπια (7,5%), υδατοκαλλιέργειες (4%), βιομηχανικές χρήσεις (4%) και μικρότερα ποσοστά για άλλες χρήσεις (Lund et al., 2005).

Τα γεωθερμικά νερά υψηλής και μέσης ενθαλπίας που χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μετά την έξοδό τους από τη μονάδα μπορούν να αξιοποιηθούν, όπως και τα ρευστά χαμηλής ενθαλπίας, για θερμικές χρήσεις (Lund et al., 2005).

Μια γεωθερμική μονάδα παραγωγής θερμικής ενέργειας αποτελείται από:

- ✓ Τις γεωτρήσεις παραγωγής.
- ✓ Τα αντλητικά συγκροτήματα και τους διαχωριστές διαφασικών ρευστών όπου είναι αναγκαία.
- ✓ Τα δίκτυα μεταφοράς (σωληνώσεις, αντλίες, κλπ) των γεωθερμικών ρευστών από τις γεωτρήσεις στις εγκαταστάσεις αξιοποίησής τους.
- ✓ Τη μονάδα παραγωγής και διανομής της θερμικής ενέργειας από τα γεωθερμικά ρευστά (εναλλάκτες θερμότητας, κυκλοφορητές, δίκτυα διανομής, θερμαντικά σώματα, κλπ)
- ✓ Το δίκτυο απομάκρυνσης του γεωθερμικού νερού με τις (συνήθεις) γεωτρήσεις επανεισαγωγής (Kanoglu, 2002).

### **2.7.3 Γεωθερμία χαμηλής ενθαλπίας**

Οι πλέον συνήθεις και τεχνικοοικονομικά συμφέρουσες χρήσεις που εφαρμόζονται κατά την αξιοποίηση γεωθερμικών ρευστών ενθαλπίας είναι:

#### **2.7.3.1 Τηλεθέρμανση**

Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια η θέρμανση χώρων αναφέρεται περισσότερο σε έργα τηλεθέρμανσης παρά σε μεμονωμένες οικίες ή κτήρια. Με την εφαρμογή τηλεθέρμανσης με γεωθερμική ενέργεια μπορούν να δημιουργηθούν ιδιαίτερα ευνοϊκές συνθήκες εκμετάλλευσης διότι η παραγωγή θερμικής ενέργειας εξασφαλίζεται από εγκαταστάσεις χαμηλού κόστους κατασκευής, συντηρήσεως και κυρίως λειτουργίας (Chandrasekharam and Bundschuh, 2008). Σύμφωνα με τους Lund et al. η εγκατεστημένη ισχύς των άμεσων χρήσεων για θέρμανση χώρων ανέρχεται στα 4366 MWt και η χρήση ενέργειας στα 55.256 TJ/έτος. Όπως έχει λεχθεί προηγουμένως, περίπου 83% της ετήσιας ενεργειακής χρήσης και 84% της εγκατεστημένης ισχύος για θέρμανση χώρων

αναφέρονται στην τηλεθέρμανση. Οι χώρες που αποτελούν τους κυριότερους παίκτες στον τομέα αυτόν είναι η Ισλανδία, η Τουρκία, η Γαλλία και η Κίνα (Lund et al., 2005).

Οι θερμικές απαιτήσεις εξαρτώνται από τις κλιματολογικές συνθήκες, ενώ οι θερμοκρασίες σχεδιασμού από τη χρήση (κατοικίες 18-20°C, γραφεία 17-18°C κλπ.). Για να γίνει συνδυασμός τηλεθέρμανσης και κάλυψης αναγκών σε ζεστό νερό πρέπει η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού να είναι τουλάχιστον 65°C. Για να είναι οικονομικά συμφέρουσα μια εκμετάλλευση τηλεθέρμανσης με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας πρέπει το κόστος της γεωθερμικής ενέργειας να αντιστοιχεί στο 50-60% του κόστους πετρελαίου (Chandrasekharam and Bundschuh, 2008).

### **2.7.3.2 Αφαλάτωση θαλασσινού νερού**

Για την παραγωγή πόσιμου νερού εφαρμόζεται συχνά για την αντιμετώπιση αναγκών σε ειδικές περιοχές (όπως στα νησιά) και συνθήκες (όπως στα πλοία). Το ενεργειακό κόστος σε μια μονάδα αφαλάτωσης νερού συμμετέχει σε υψηλά ποσοστά στο συνολικό κόστος παραγωγής του. Η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας στις μονάδες αυτές χαρακτηρίζεται ως μια από τις πιο αξιόλογες εφαρμογές. Η μέθοδος που εφαρμόζεται χωρίς την άμεση χρήση γεωθερμικών ρευστών είναι συνήθως της αντίστροφης ώσμωσης (χρήση ηλεκτρικής ενέργειας) (Goosen et al., 2010).

Οι τρόποι με άμεση χρήση γεωθερμικών ρευστών για την αφαλάτωση του νερού είναι:

- ✓ Στα γεωθερμικά πεδία μέσης και υψηλής ενθαλπίας με συμπύκνωση του γεωθερμικού ατμού.
- ✓ Στα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας (60-100°C) με χρήση του γεωθερμικού νερού για αφαλάτωση του θαλασσινού νερού σε συνθήκες κενού (Φυτίκας and Ανδρίτσος, 2004α)
- ✓

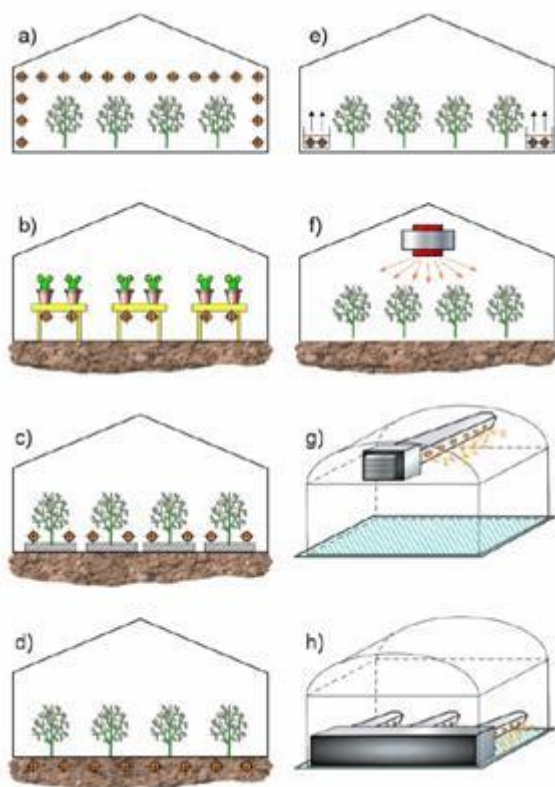
Οι μέθοδοι με χρήση θερμικής ενέργειας που εφαρμόζονται είναι

- ✓ Πολυβάθμια εκτόνωση/εξάτμιση νερού-MSF(Multi Stage Flash) συνίσταται για μεγάλες μονάδες
- ✓ Εξάτμιση σε συνθήκες κενού του νερού με απαιτούμενες θερμοκρασίες γεωθερμικών ρευστών 60-100°C. στη μέθοδο αυτή απαιτούνται μικρότερες επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας και η λειτουργία της μονάδας γίνεται σε μικρότερη θερμοκρασία χωρίς να δημιουργούνται ιδιαίτερα προβλήματα επικαθήσεων (Axelsson and Gunnlaugsson, 2000).

### 2.7.3.3 Θέρμανση θερμοκηπίων

Οι χρήσεις και το μέγεθος των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων εξαρτάται από τη διαθέσιμη γεωθερμική ενέργεια, από τις κλιματολογικές συνθήκες, από τα υλικά κατασκευής των θερμοκηπίων και από το είδος της καλλιέργειας (Marinakis,2016).

Οι απαιτούμενες ποσότητες ενέργειας είναι μεγάλες, με αποτέλεσμα η γεωθερμία να αποτελεί την ιδανική μορφή ενέργειας για αγροτικές εφαρμογές, λόγω του μικρού κόστους της. Τα θερμοκήπια και η θέρμανση εδαφών απαιτούν την παρουσία γεωθερμικών ρευστών σε θερμοκρασία που υπερβαίνει τους 30 °C. Ο χώρος του θερμοκηπίου μπορεί να θερμανθεί, ανάλογα με τη θερμοκρασία και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του γεωθερμικού ρευστού (von ZABELTITZ, 1986). Στο πιο κάτω σχήμα απεικονίζονται οι εγκαταστάσεις θέρμανσης με φυσική κίνηση του αέρα (φυσική συναγωγή)



(Πηγή:(von ZABELTITZ, 1986)

**Εικόνα 11:** Εγκαταστάσεις Θέρμανσης Θερμοκηπίων και εδαφών με φυσική κίνηση του αέρα (φυσική συναγωγή)

a) Εναέριοι σωλήνες θέρμανσης

b) Θέρμανση πάγκων

- c) Σωλήνες θέρμανσης που είναι τοποθετημένοι χαμηλά
- d) Θέρμανση εδάφους-Εγκαταστάσεις θερμάνσεις με εξαναγκασμένη κίνηση του αέρα (εξαναγκασμένη συναγωγή)
- e) Πλευρική τοποθέτηση σωλήνων
- f) Εναέρια αερόθερμα
- g) Αγωγοί τοποθετημένοι ψηλά
- h) Αγωγοί τοποθετημένοι χαμηλά (von ZABELTITZ, 1986).

Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας για σκοπούς θέρμανσης θερμοκηπίων μπορεί να μειώσει σημαντικά το λειτουργικό τους κόστος (περίπου κατά 30-35%) (Antics and Sanner, 2007).

#### **2.7.3.4 Ιχθυοκαλλιέργειες**

Η απαραίτητη θερμοκρασία στο νερό της δεξαμενής της ιχθυοκαλλιέργειας κυμαίνεται από 14 έως 30 °C, ανάλογα με το είδος της. Η ιχθυοκαλλιέργεια μπορεί να γίνει είτε μεμονωμένα με γεωθερμικά ρευστά σαν θερμαντικό μέσο, θερμοκρασίας 25 έως 35 °C, είτε από το απορριπτόμενο νερό από τη θέρμανση θερμοκηπίων. Οι Boyd και Lund το 2006 υπολόγισαν ότι για τη περίπτωση από τα απορριπτόμενα νερά 5 στρεμμάτων γυάλινου θερμοκηπίου με τριαντάφυλλα, δύναται να θερμανθεί δεξαμενή χελοτροφείου όγκου 500m<sup>3</sup>.

Η γεωθερμία συμβάλλει με οικονομικό τρόπο στη θέρμανση του νερού σε ιχθυοκαλλιέργειες ψαριών, θαλάσσιων μαλακίστρακων και ερπετών με εμπορική αξία όπως είναι οι αλιγάτορες (Hayes and Johnson, 1980).

Η θέρμανση πραγματοποιείται είτε άμεσα, με την απευθείας εισαγωγή του γεωθερμικού νερού στις δεξαμενές ή λιμνούλες ανάπτυξης, είτε έμμεσα ύστερα από θέρμανση γλυκού η θαλασσινού νερού. Για την άμεση χρήση του γεωθερμικού νερού απαιτείται να μην υπάρχουν τοξικά συστατικά στο νερό (π.χ. βαρέα μέταλλα, υδρόθειο, αρσενικό κλπ). Οι υδατοκαλλιέργειες απαιτούν την παρουσία γεωθερμικού ρευστού σε θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 200 °C (Hayes and Johnson, 1980).

### 2.7.3.5 Αξιοποίηση χημικών συστατικών των ρευστών και άλλες χρήσεις

Τα γεωθερμικά ρευστά δεν περιέχουν μόνο θερμότητα, αλλά αρκετές φορές περιέχουν και αξιοποιήσιμες διαλυμένες ουσίες, στερεές ή αέριες. Τα στοιχεία που θεωρητικά θα μπορούσαν να ανακτηθούν είναι ο χρυσός, ο λευκόχρυσος, το μαγνήσιο, το αντιμόνιο, το βόριο, το στρόντιο κλπ. Από τα αέρια που βρίσκονται στα γεωθερμικά ρευστά το μόνο που μπορεί να τύχει εκμετάλλευσης είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) (Halmann and Steinberg, 1998).

Το  $\text{CO}_2$ , που υπάρχει σε πολλά γεωθερμικά πεδία μπορεί να δεσμευτεί στις επιφανειακές εγκαταστάσεις και να αξιοποιηθεί ως εμπορικό παραπροϊόν. Στο Kizildere της Τουρκίας, παράλληλα με την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ανακτώνται και μεγάλες ποσότητες του αερίου αυτού για τις ανάγκες της βιομηχανίας αναψυκτικών, ενώ η Ισλανδία καλύπτει όλες τις ανάγκες της σε  $\text{CO}_2$  από γεωθερμικά ρευστά. Μικρές ή μεγαλύτερες μονάδες ανάκτησης του  $\text{CO}_2$  υπάρχουν επίσης στην Κένυα, τις Η.Π.Α., τη Ν.Ζηλανδία και τη Ταϊβάν (Holloway, 1997).

Το  $\text{CO}_2$  χρησιμοποιείται ως πυροσβεστικό μέσο, στη συντήρηση τροφών, ως πρώτη ύλη στη χημική βιομηχανία, ως μέσο για τη δευτερογενή εξόρυξη πετρελαίου και αλλού. Όμως οι παραπάνω χρήσεις προϋποθέτουν μεγάλες ποσότητες αερίου, οι οποίες μπορούν να ανακτηθούν ύστερα από συστηματική εκμετάλλευση γεωθερμικών πεδίων και αξιοποίηση δικτύου γεωτρήσεων. Σε τοπική κλίμακα, η ανάκτηση μικρών ποσοτήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία εμφιάλωσης ανθρακούχων ποτών ή ως πρόσθετο της ατμόσφαιρας θερμοκηπίων (Halmann and Steinberg, 1998).

### 2.7.3.6 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας

Για την εκμετάλλευση των γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας χρησιμοποιούνται πολλές φορές και οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας. Πρόκειται για συσκευές που έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν θερμότητα από ένα μέσο με χαμηλή θερμοκρασία σε ένα άλλο μέσο με υψηλότερη θερμοκρασία. Αυτό πραγματοποιείται με απορρόφηση θερμότητας από μια πηγή χαμηλής σχετικά θερμοκρασίας (όπως είναι το υπόγειο ή επιφανειακό νερό, ο εξωτερικός αέρας και το υπέδαφος) προμηθεύοντας τη θερμότητα αυτή σε ένα θερμότερο μέσο, όπως είναι για παράδειγμα ένα σπίτι (Phetteplace, 2007).

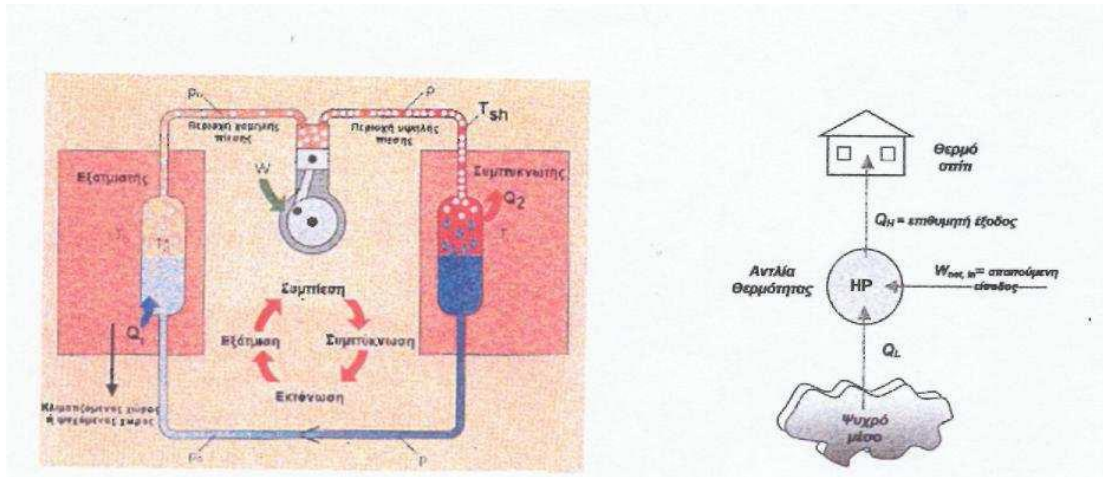
Τα βασικά εξαρτήματα μίας αντλίας θερμότητας είναι τα ίδια με τα κοινά κλιματιστικά και περιλαμβάνουν το συμπιεστή, το συμπυκνωτή, τον εξατμιστήρα, τη βαλβίδα εκτόνωσης και βέβαια μια πηγή ενέργειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις η αντλία θερμότητας είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να αντιστρέφει την ψυκτική και θερμαντική λειτουργία, επιτρέποντας τη χρήση της ίδιας συσκευής για ψύξη και θέρμανση. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η αρχή λειτουργίας της αντλίας θερμότητας (Φυτίκας και Ανδρίτσος, 2004α).



(Πηγή: (Φυτίκας and Ανδρίτσος, 2004α)

**Εικόνα 12:** Εφαρμογή γεωθερμικών αντλιών θερμότητας σε κατοικία

Η πιο συνηθισμένη πηγή ενέργειας για τις αντλίες θερμότητας είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας, με σοβαρό μειονέκτημα το γεγονός ότι δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά σε θερμοκρασίες μικρότερες των 5 °C. Οι αντλίες θερμότητας που χρησιμοποιούν το έδαφος και το νερό για πηγή θερμότητας, βρίσκουν τα τελευταία 30 χρόνια όλο και περισσότερες εφαρμογές και ονομάζονται γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (Γ.Α.Θ.). Η μορφή της ενέργειας αυτής λέγεται αβαθής γεωθερμία. Οι Γ.Α.Θ. δεν παρουσιάζουν πρόβλημα, ακόμη και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, όπως συμβαίνει με τις αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα. Τα υπόγεια νερά και το έδαφος, ως πηγές θερμότητας, υπερτερούν σημαντικά σε σχέση με τον αέρα, επειδή έχουν σε όλη σχεδόν τη διάρκεια του έτους σταθερή θερμοκρασία (Lund, 1990).



(Πηγή: Lund, 1990)

**Εικόνα 13:** Τρόπος λειτουργίας γεωθερμικών αντλιών θερμότητας

Μειονέκτημα των νερών είναι ότι η διαθεσιμότητα της είναι συνήθως περιορισμένη. Οι αντλίες θερμότητας γνωρίζουν πραγματική άνθηση τα τελευταία χρόνια, σημειώνοντας ετήσια αύξηση σχεδόν μεγαλύτερη του 10%. Η μεγαλύτερη αύξηση των Γ.Α.Θ. σημειώθηκε στις Η.Π.Α. και τη Δυτική Ευρώπη (Γερμανία, Ελβετία, Σουηδία), στην οποία έχουν ήδη εγκατασταθεί περισσότερες από 360.000 μονάδες με συνολική εγκατεστημένη θερμική ισχύ 3280MWt (Sanner et al., 2003).

Τα κύρια σχήματα με τα οποία λειτουργούν οι Γ.Α.Θ. είναι οι αντλίες που λειτουργούν με υπόγεια νερά, σχετικά ψυχρά (10-15 °C) ή και κάπως θερμότερα (20-35 °C), οι αντλίες που λειτουργούν με επιφανειακά νερά και οι αντλίες που είναι συνδεδεμένες με το υπέδαφος (Phetteplace, 2007).

Η επιλογή του ψυκτικού μέσου στις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, εξαρτάται από τη θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας της συσκευής. Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του ψυκτικού μέσου είναι:

- ✓ να μην είναι τοξικό, διαβρωτικό ή εύφλεκτο υγρό
- ✓ να είναι σταθερό στις θερμοκρασίες εφαρμογής
- ✓ να διατίθεται σε χαμηλό κόστος (Phetteplace, 2007)

Οι χλωροφθοράνθρακες πληρούσαν ιδανικά τα χαρακτηριστικά αυτά, των οποίων η χρήση έχει απαγορευτεί από το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ. Τα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι R17a, R134a, R407c, R410 κ.α. (Lund, 1990).

Η διείσδυση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας τα τελευταία χρόνια είναι εντυπωσιακή ιδιαίτερα σε ορισμένες χώρες της Κεντρικής και της Βόρειας Ευρώπης, καθώς και στον Καναδά και τις Η.Π.Α. Σύμφωνα με το Lund et al., οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ενεργειακή χρήση και τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ από όλες τις άμεσες χρήσεις. Ο ισοδύναμος αριθμός εγκατεστημένων μονάδων των 12 kWt (που αποτελεί τη χαρακτηριστική μέση ισχύ των συστημάτων σε Η.Π.Α. και Ευρώπη) είναι περίπου 1,3 εκατομμύρια, σχεδόν διπλάσιος αριθμός από τις μονάδες που αναφέρονται για το 2000. Βεβαίως η ισχύς των μονάδων κυμαίνεται από 5,5 kW για τα μικρότερα σπίτια μέχρι και περισσότερο από 150 kW για μεγάλες μονάδες με εμπορικό και οικονομικό ενδιαφέρον (Lund et al., 2004).

Μία καινοτόμος ιδέα που παρουσιάστηκε στο συνέδριο της Αττάλειας και υποστηρίχθηκε από τον Καθηγητή L. Rybach είναι το «Σύστημα Μοναδικής Γεώτρησης». Το σύστημα αυτό συνίσταται από γεώτρηση βάθους 70-80 m και διαμέτρου 0,5 m. Νερό με θερμοκρασία 12-15°C αντλείται από το πυθμένα με παροχή 100 m<sup>3</sup>/h και διέρχεται μέσα από τον εναλλάκτη της αντλίας θερμότητας, ψύχεται κατά 3-5°C και επανεισάγεται στον ταμιευτήρα σε μικρότερο βάθος. Η μέση θερμική ισχύς κάθε τέτοιας γεώτρησης είναι περίπου 0,6 MWt, ενώ κατά τους καλοκαιρινούς μήνες προσφέρεται «άμεσος δροσισμός» μέσω εναλλάκτη θερμότητας (Rybach, 2003).

Για τις μεσογειακές χώρες, τα συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας αποδεικνύεται ότι είναι περισσότερο οικονομικά στον κύκλο της ψύξης, με βελτίωση κατά 40-60% σε σχέση με τις συμβατικές αντλίες αέρα-αέρα ή αέρα-νερού (Παπαγεωργάκης, 1993).

## **2.8 Κοστολόγηση ενός γεωθερμικού συστήματος**

Η εγκατάσταση και εκμετάλλευση ενός συστήματος Α.Π.Ε. αποτελεί μια επένδυση. Σε κάθε επένδυση δεσμεύονται οικονομικοί πόροι με την προσδοκία κάποιων ωφελειών στο μέλλον. Οι πλείστες επενδύσεις σε Α.Π.Ε. χαρακτηρίζονται από σημαντικό αρχικό κόστος επένδυσης και σχετικά χαμηλό κόστος λειτουργίας, ενώ τα οφέλη προκύπτουν από την παραγωγή ή την εξοικονόμηση ενέργειας (Wiggs et al., 1998). Παρόλα αυτά η οικονομικότητα μιας τεχνολογίας δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας υιοθέτησής της, δεδομένου ότι υπεισέρχονται και άλλες σημαντικές συνιστώσες, όπως εθνικές, αναπτυξιακές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές οι οποίες θα μπορούσαν να αντιστρέψουν μία απόφαση βασισμένη σε αυστηρά οικονομικά κριτήρια.

Τα στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη κάθε φορά που γίνεται εκτίμηση του κόστους της εγκατάστασης ή της λειτουργίας μιας γεωθερμικής μονάδας, και της αξίας των «προϊόντων» της γεωθερμικής ενέργειας, είναι πολύ περισσότερα και πιο σύνθετα σε σχέση με τις άλλες μορφές ενέργειας. Συνεπώς, θα πρέπει όλα αυτά τα στοιχεία να αξιολογούνται πολύ προσεκτικά πριν την εκπόνηση ενός γεωθερμικού προγράμματος (Lund et al., 2005).

Μία μονάδα εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας αποτελείται από:

1. τις γεωθερμικές γεωτρήσεις
2. το δίκτυο μεταφοράς των ρευστών
3. τη μονάδα παραγωγής ή χρήσης
4. και συχνά το σύστημα επανεισαγωγής.

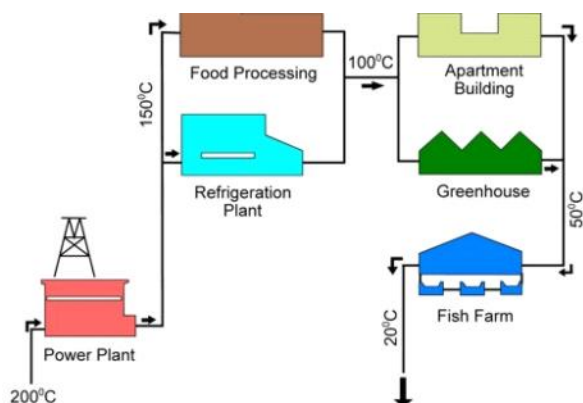
Η αλληλεπίδραση όλων αυτών των στοιχείων αναλύεται προσεκτικά διότι επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το κόστος της αρχικής επένδυσης. Συνεπώς παρόλο που οι γεωτρήσεις έχουν σημαντικό κόστος, η γεωθερμική μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού που λειτουργεί με συμπίκνωση αποδεικνύεται τελικά η πλέον οικονομική επιλογή, παρόλο που τελικά τις περισσότερες φορές επιλέγεται για λόγους ανεξάρτητους του κόστους (Wiggs et al., 1998).

Τα γεωθερμικά ρευστά μπορούν να μεταφερθούν σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις μέσα σε θερμικά μονωμένους σωλήνες. Υπό ιδανικές συνθήκες το μήκος των σωληνώσεων μπορεί να φτάσει ακόμη και τα 60 km. Όμως, το κόστος των σωληνώσεων, του απαιτούμενου βοηθητικού εξοπλισμού (αντλίες, βαλβίδες, κλπ) και της συντήρησής τους, επιβαρύνουν αρκετά τον προϋπολογισμό και μπορεί να ανεβάσουν σημαντικά το συνολικό λειτουργικό κόστος επένδυσης και λειτουργίας της εγκατάστασης. Οπότε, η απόσταση μεταξύ του πόρου (γεωτρήσεις) και της εφαρμογής (εγκαταστάσεις) θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη (Dickson and Fanelli, 2013).

Το αρχικό κόστος επένδυσης μιας γεωθερμικής μονάδας εφαρμογής είναι συνήθως μεγαλύτερο, και σε κάποιες περιπτώσεις πολύ ανώτερο, από αυτό που απαιτείται για τη λειτουργία μιας αντίστοιχης μονάδας συμβατικών καυσίμων. Αντίθετα, η ενέργεια που καταναλώνεται σε μια γεωθερμική εγκατάσταση κοστίζει πολύ λιγότερο από τα συμβατικά καύσιμα και αντιστοιχεί συνήθως στο κόστος συντήρησης των διαφόρων επιμέρους τμημάτων της (σωληνώσεις, βαλβίδες, αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας κλπ.) (Sanyal, 2005).

Επομένως, οι υψηλότερες αρχικές δαπάνες αντισταθμίζονται από την εξοικονόμηση που γίνεται στην κατανάλωση ενέργειας. Ως εκ τούτου, το συνολικό σύστημα γεωθερμικού πόρου και εγκαταστάσεων θα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, καθώς και να είναι εφικτή η απόσβεση της αρχικής επένδυσης.

Αξιοσημείωτα οικονομικά οφέλη μπορούν να προκύψουν από τη χρήση συνδυαστικών και ολοκληρωμένων συστημάτων που παρέχουν μεγαλύτερους συντελεστές απόδοσης (για παράδειγμα, συστήματα που συνδυάζουν ψύξη και θέρμανση χώρων) ή συστήματα διαδοχικής (κλιμακωτής) εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας, στα οποία οι εφαρμογές είναι συνδεδεμένες σε σειρά και η κάθε μια χρησιμοποιεί τα ρευστά που απορρίπτονται από την προηγούμενη (για παράδειγμα, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανση θερμοκηπίων, κτηνοτροφία κ.τ.λ) (Zwarycz, 2002).



(Πηγή: Zwarycz, 2002)

#### **Διάγραμμα 5:** Διαδοχική (κλιμακωτή) χρήση της γεωθερμικής ενέργειας

Για τη μείωση του κόστους συντήρησης και της πιθανότητας διακοπής της λειτουργίας της, η τεχνική πολυπλοκότητα μιας γεωθερμικής μονάδας δε θα πρέπει να ξεπερνά το βαθμό που αυτή θα είναι προσβάσιμη από το τοπικό τεχνικό προσωπικό και τους εύκολα διαθέσιμους ειδικούς. Οι πολύ εξειδικευμένοι τεχνικοί ή οι κατασκευαστές θα πρέπει να είναι απαραίτητοι μόνο για τις μεγάλης κλίμακας εργασίες συντήρησης ή στην περίπτωση εκτεταμένων ζημιών της μονάδας (Sanyal, 2005).

Τέλος, εάν η γεωθερμική εφαρμογή αφορά στην παραγωγή καταναλωτικών αγαθών, θα πρέπει να προηγηθεί μια προσεκτική και εμπειριστατωμένη έρευνα αγοράς, ώστε να εξασφαλιστεί η διάθεση αυτών των προϊόντων. Επίσης, θα πρέπει υποχρεωτικά να

προϋπάρχουν ή να συμπεριληφθούν στον αρχικό προϋπολογισμό οι απαραίτητες υποδομές για την οικονομικά συμφέρουσα μεταφορά των προϊόντων από το σημείο παραγωγής στον καταναλωτή.

Το πεδίο εφαρμογής των παραπάνω παρατηρήσεων καλύπτει όλες τις μορφές αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας και οποιεσδήποτε τοπικές συνθήκες, και για το λόγο αυτό έχει καθαρά ποιοτικό χαρακτήρα.

Στους πιο κάτω πίνακες παρατίθενται τα στοιχεία της μελέτης που δημοσιεύθηκε το 2000 από το World Energy Assessment Report, (που συντάχθηκε από το UNDP, το UN-DESA και το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας) και αφορούν στον αντικειμενικό υπολογισμό του ύψους της επένδυσης και του κόστους. Επιπλέον γίνεται σύγκριση ανάμεσα στη γεωθερμική ενέργεια και άλλες ανανεώσιμες πηγές (Fridleifsson, 2001).

**Πίνακας 8:** Ενεργειακό και επενδυτικό κόστος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	Τρέχον κόστος ενέργειας €/kWh	Πιθανό μελλοντικό κόστος ενέργειας €/kWh	Τελικό κόστος επένδυσης €/kW
Βιομάζα	5 - 15	4 - 10	900 - 3000
<b>Γεωθερμία</b>	<b>2 - 10</b>	<b>1 - 8</b>	<b>800 - 3000</b>
Αιολική ενέργεια	5 - 13	3 - 10	1100 - 1700
Ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά)	25 - 125	5 - 25	5000 - 10000
Ηλιακή ενέργεια (θερμική ηλεκτρική ενέργειας)	12 - 18	4 - 10	3000 - 4000
Παλίρροια	8 - 15	8 - 15	1700 -

			2500
--	--	--	------

(Πηγή: (Fridleifsson, 2001)

**Πίνακας 9:** Ενεργειακό και επενδυτικό κόστος για απευθείας χρήση θερμότητας από ανανεώσιμες πηγές

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	Τρέχον κόστος ενέργειας €/kWh	Πιθανό μελλοντικό κόστος ενέργειας €/kWh	Τελικό κόστος επένδυσης€/kW
Βιομάζα (συμπεριλαμβανομένου της αιθανόλης)	1 - 5	1 - 5	250 - 750
<b>Γεωθερμία</b>	<b>0.5 - 5</b>	<b>0.5 - 5</b>	<b>200 - 2000</b>
Αιολική ενέργεια	5 - 13	3 - 10	1100 - 1700
Ηλιακή θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας	3 - 20	2 - 10	500 - 1700

(Πηγή: (Fridleifsson, 2001)

Το κόστος ενός ενεργειακού σχεδίου μπορεί να εκφραστεί είτε ως η τιμή της παραγόμενης ενέργειας ανά κιλοβατώρα παραγόμενης θερμικής ή ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh) είτε ως το κόστος σε Ευρώ ανά kW εγκατεστημένης ισχύος και η περίοδος αποπληρωμής (payback period), δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για την απόσβεση της αρχικής επένδυσης (όπως παρουσιάζεται στους πιο πάνω πίνακες) (Fridleifsson, 2001).

Πολλές ενεργειακές επενδύσεις θεωρούν την περίοδο αποπληρωμής ως το σημαντικότερο κριτήριο στο οποίο μπορεί να βασιστεί μία οικονομική απόφαση. Αν όμως η περίοδος αποπληρωμής είναι μεγάλη (όπως συμβαίνει συχνά με τις ΑΠΕ) ή η κατανομή των χρηματοροών με το χρόνο δεν είναι σταθερή, τότε το κριτήριο της περιόδου αποπληρωμής δεν είναι αποδεκτό (Milora and Tester, 1976).

Υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ κόστους και τιμής της ενέργειας. Για να θεωρηθεί μία επένδυση ως επικερδής το κόστος θα πρέπει να αναφέρεται στην ελάχιστη χρέωση της

ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι στο κόστος συμπεριλαμβάνεται και ένα αποδεκτό από τον επενδυτή επίπεδο κέρδους. Από την άλλη πλευρά, η χρέωση της ενέργειας ρυθμίζεται και εξαρτάται από τις τάσεις της αγοράς (Sanyal, 2005). Για να είναι τα κέρδη σημαντικά και αποδεκτά θα πρέπει η τιμή πώλησης να είναι μεγαλύτερη από το κόστος. Ενώ όταν η τιμή πώλησης είναι μικρότερη από το κόστος, τότε η επένδυση θα έχει χαμηλότερα κέρδη και θα θεωρείται μη επικερδής (Pehnt, 2006).

Για την κατανόηση της έννοιας της ενεργειακής χρέωσης μιας γεωθερμικής μονάδας, δίδεται παράδειγμα εγκατάστασης γεωθερμικής μονάδας ισχύος 200kW για την παραγωγή θερμικής ενέργειας για σκοπούς θέρμανσης θερμοκηπίου, η οποία λειτουργεί έξι μήνες ανά έτος και ο χρόνος ζωής της είναι 10 χρόνια. Αν θεωρήσουμε ότι το συνολικό κόστος (δηλ. το κόστος για την άδεια εκμετάλλευσης και έρευνας, τη γεώτρηση, τη μεταφορά των ρευστών, την εναλλαγή θερμότητας, τη διάθεση ρευστών κ.α) για τη μονάδα ανέρχεται σε €150000, το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης της μονάδας είναι €3000, τότε το κόστος της θερμικής κιλοβατώρας μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως (Brower, 1992).

$$\begin{aligned} \text{Ετήσιο κόστος} &= [\text{πάγιο κόστος/έτος}] + [\text{κόστος λειτουργίας \& συντήρησης}] \\ &= 150.000/10 + 3000 = 18.000 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\text{Παραγόμενη ενέργεια} = 200 \text{ kW} \times (6 \times 30 \times 24) \text{ h} = 864.000 \text{ kWh}$$

$$\text{Κόστος ανά παραγόμενη κιλοβατώρα} = 18.000 \text{ €} / 864.000 \text{ kWh} = 2,1 \text{ λεπτά/kWh}$$

Στους παραπάνω υπολογισμούς υπάρχει ένα «πρόβλημα» γιατί αφενός η παραγόμενη ενέργεια είναι σταθερή με το χρόνο, αφετέρου το ετήσιο κόστος δεν είναι, γιατί η αξία του χρήματος δε μένει σταθερή με το χρόνο. Αυτό οφείλεται στη δυνατότητα να δανείσουμε τα χρήματα της επένδυσης με ορισμένο επιτόκιο αλλά και στην επίδραση του πληθωρισμού, η οποία ρίχνει την αξία του χρήματος (Brower, 1992).

Η μετατροπή της πάγιας επένδυσης σε ετήσιες πάγιες αξίες, οι τιμές των οποίων εξαρτώνται από το εσωτερικό επιτόκιο και τον οικονομικό χρόνο ζωής ενός εγχειρήματος αποτελεί ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στην εκτίμηση του ενεργειακού κόστους, το οποίο μπορεί να δοθεί από τη σχέση (Boyle et al., 2003).

$$\text{Κόστος ενέργειας} = \frac{\text{Ετήσια πάγια αξία} + \text{Μέσο ετήσιο λειτουργικό κόστος}}{\text{Μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια}}$$

Η σχέση αυτή δεν ισχύει όταν τα ετήσια κόστη διαφέρουν. Στο πιο πάνω παράδειγμα χρησιμοποιήθηκαν μόνο δύο κατηγορίες κόστους, οι πάγιες δαπάνες και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Στην πραγματικότητα όμως υπάρχουν περισσότερες δαπάνες οι οποίες παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα. Στον πίνακα παρουσιάζονται τρεις ομάδες δαπανών. Η πρώτη ομάδα αφορά τις πάγιες δαπάνες (οι δαπάνες στην έναρξη του εγχειρήματος) η δεύτερη ομάδα τις τρέχουσες δαπάνες (οι δαπάνες που επαναλαμβάνονται σε όλη τη διάρκεια ζωής της μονάδας) και τέλος η τρίτη ομάδα σχετίζεται με τον παροπλισμό της μονάδας. Κάθε δαπάνη στον Πίνακα γίνεται συνήθως σε διαφορετική χρονική στιγμή (Boyle, 1996).

**Πίνακας 10:** Πάγιες δαπάνες από τη γεωθερμική εγκατάσταση

<b>Πάγιες δαπάνες (Capital costs)</b>	
Προετοιμασία	<ul style="list-style-type: none"> <li>• γεωθερμική έρευνα</li> <li>• ανάπτυξη και προγραμματισμός</li> <li>• σχεδιασμός της μονάδας</li> <li>• αμοιβή για την τεχνογνωσία κ.α</li> </ul>
Κατασκευή-οικοδομικά	<ul style="list-style-type: none"> <li>• προετοιμασία της έκτασης γης</li> <li>• κατασκευή γεωτρήσεων</li> <li>• κατασκευή μονάδας παραγωγής</li> <li>• κατασκευή μονάδων διάθεσης ρευστών</li> </ul>
Ολοκλήρωση	<ul style="list-style-type: none"> <li>• εγκατάσταση μονάδας</li> <li>• εργασίες παράδοσης ολοκληρωμένου έργου σε λειτουργία</li> <li>• σύνδεση με το δίκτυο κτλ</li> </ul>
Κεφάλαιο υποστήριξης	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εφεδρικό κεφάλαιο</li> </ul>
Διαχείριση εγχειρήματος	<ul style="list-style-type: none"> <li>• επίβλεψη</li> <li>• έλεγχος ποιότητας</li> <li>• άλλα</li> </ul>
Απρόοπτα	
<b>Τρέχουσες δαπάνες (current costs)</b>	

Λειτουργία	<ul style="list-style-type: none"> <li>• κόστος καυσίμων και ηλεκτρισμού</li> <li>• κόστος προσωπικού</li> <li>• ενοίκια, τέλη κτλ</li> <li>• γενικής χρήσης (τηλεφωνία κτλ)</li> <li>• ασφάλιση</li> </ul>
Συντήρηση	<ul style="list-style-type: none"> <li>• επιθεώρηση-καταγραφή</li> <li>• εργασίες συντήρησης μονάδας και γεωτρήσεων</li> <li>• επισκευές</li> </ul> <p>χρήση ανταλλακτικών</p>
Γενικά έξοδα	
<b>Δαπάνες διάθεσης-μεταβίβασης (disposal costs)</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• θέση εκτός λειτουργίας</li> <li>• πώληση</li> </ul>

(Πηγή: (Boyle, 1996)

## 2.9 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Η γεωθερμική ενέργεια θεωρείται «καθαρή», σε σύγκριση με την ενέργεια από την καύση ορυκτών καυσίμων. Η περαιτέρω διεύρυνση της χρήσης της γεωθερμίας, καθώς και των άλλων πηγών ενέργειας, θα συμβάλει σε σημαντικό βαθμό στη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου όπως και των άλλων περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την καύση των ορυκτών καυσίμων. Στην πραγματικότητα όμως ο τρόπος παραγωγής ενέργειας ή μετατροπής της από μια μορφή σε άλλη για να χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο, προκαλεί κάποιες άμεσες ή έμμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ακόμη και η παλαιότερη και πιο απλούστερη μορφή παραγωγής θερμικής ενέργειας, δηλαδή η καύση του ξύλου, έχει καταστρεπτικές συνέπειες (Rybach, 2003).

### 2.9.1 Πηγές ρύπανσης

Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο βαθμός που μια γεωθερμική εκμετάλλευση επηρεάζει το περιβάλλον είναι ανάλογος με το μέγεθος και την κλίμακα της εκμετάλλευσης (Lunis and Breckenridge, 1991).

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις οφείλονται σε ουσίες που εμπεριέχονται στα γεωθερμικά ρευστά και συνεπώς, τα προβλήματα που δημιουργούνται έχουν άμεση σχέση με τη φύση των επιβαρυντικών ουσιών. Η έκταση και η σοβαρότητα των προβλημάτων εξαρτάται από:

1. τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα
2. τον τύπο του εξαγόμενου ρευστού
3. τον τύπο της εφαρμογής
4. το μέγεθος των εγκαταστάσεων
5. την έκταση στην οποία αναπτύσσεται το έργο (Καρυδάκης, 2008).

Η υψηλότερη περιεκτικότητα των γεωθερμικών ρευστών υψηλής ενθαλπίας σε διαλυμένα άλατα και αέρια σε σχέση με τα ρευστά χαμηλής ενθαλπίας, επιβάλλουν το διαχωρισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τα προβλήματα από τη διάθεση των θερμών νερών που χρησιμοποιούνται για άμεσες χρήσεις είναι σαφώς ηπιότερα από ότι των ρευστών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικά καύσιμα (Μενδρινός και Καρύτσας, 2005).

Σε ότι αφορά στη χρήση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας για θέρμανση και ψύξη χώρων, δεν υπάρχει καμία επίπτωση στο περιβάλλον, δεδομένου ότι τα συστήματα αυτά είναι κλειστά (Μενδρινός και Καρύτσας, 2005).

Ως βέλτιστη πρακτική για την αντιμετώπιση των πιθανών επιπτώσεων από την εκμετάλλευση της γεωθερμίας (τόσο της υψηλής όσο και της χαμηλής θερμοκρασίας) είναι η ολική επανεισαγωγή των γεωθερμικών ρευστών στον ταμιευτήρα (Αρβανίτης, 2008).

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται συνοπτικά η πιθανότητα και η σχετική σοβαρότητα των επιπτώσεων στο περιβάλλον από τη δημιουργία και λειτουργία μιας εγκατάστασης για άμεση χρήση της γεωθερμίας.

**Πίνακας 11:** Πιθανότητα εμφάνισης και σοβαρότητα των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων από εγκαταστάσεις άμεσης χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας, X =Χαμηλή, M =Μέτρια, Y= Υψηλή,

Επιπτώσεις	Πιθανότητα να συμβεί	Σοβαρότητα των συνεπειών
Ποιότητα αέρα	X	M
Ρύπανση Επιφανειακών Υδάτων	M	M
Ρύπανση Υπόγειων υδάτων	X	M
Καθίζηση Εδάφους	X	X έως M
Υψηλά Επίπεδα Θορύβου	Y	X έως M
Πιθανότητα έκρηξης	X	X έως M
Αλλοιώσεις σε πολιτιστικά και αρχαιολογικά χαρακτηριστικά	X έως M	M έως Y
Κοινωνικοοικονομικά προβλήματα	X	
Χημική ή θερμική ρύπανση	X	M έως Y
Διάθεση στερεών αποβλήτων	M	M έως Y

(Lunis and Breckenridge, 1991)

## 2.9.2 Επιπτώσεις από μονάδες χαμηλής ενθαλπίας

Η επιβάρυνση του περιβάλλοντος από την αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών χαμηλής ενθαλπίας είναι ηπιότερη σε σχέση την επιβάρυνση από τα ρευστά υψηλής ενθαλπίας. Αρχικά η θερμική επιβάρυνση είναι σημαντικά μικρότερη, εφόσον τα νερά μετά τη χρήση τους έχουν θερμοκρασία μικρότερη των 30-35°C. Επιπλέον, η περιεκτικότητα των νερών σε τοξικά και επιβλαβή συστατικά όπως As, H<sub>2</sub>S, B, βαρέα μέταλλα κ.α είναι κατά κανόνα πολύ μικρή έως αμελητέα, με ελάχιστες εξαιρέσεις (Brower, 1992).

Τα γεωθερμικά ρευστά μέσης έως χαμηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες εφαρμογές άμεσων χρήσεων περιέχουν γενικά πολύ χαμηλές ποσότητες χημικών στοιχείων, οπότε η διάθεσή τους πολύ σπάνια συνιστά κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα. Κάποια από αυτά μάλιστα, μπορούν συχνά, αφού υποστούν μια σχετική ψύξη, να διατεθούν ακόμη και σε κάποιον επιφανειακό υδάτινο υδροφόρο. Η ψύξη των ρευστών μπορεί να γίνει μέσα σε ειδικές δεξαμενές ή τεχνητές λίμνες, ώστε να αποφεύγονται οι τυχόν μεταβολές στο οικοσύστημα των υδάτινων αποδεκτών (ποτάμια, λίμνες, ή και θάλασσα). (Lunis and Breckenridge, 1991).

Η περιεκτικότητα σε μη συμπυκνωμένα αέρια είναι γενικά περιορισμένη, εκτός από μερικές περιπτώσεις όπου υπάρχουν κάποιες ποσότητες CO<sub>2</sub>. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι δεν έχουν καταγραφεί ποτέ προβλήματα καθιζήσεων ή δημιουργίες μικροσεισμικότητας σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας (Brower, 1992).

Το κυριότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα από τα ρευστά χαμηλής ενθαλπίας παρουσιάζεται στη διάθεση των νερών μετά την απόληψη της θερμότητάς τους. Η απευθείας επιφανειακή διάθεσή τους σε θάλασσες, ποταμούς, χείμαρρους ή λίμνες αποτελεί την οικονομικότερη μέθοδο. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει τρία προβλήματα:

1. αυξημένη θερμοκρασία των νερών (θερμική ρύπανση)
2. σχετικά υψηλή περιεκτικότητα των νερών σε διάφορα συστατικά (μερικά από αυτά ίσως να είναι επιβλαβή)
3. «εξάντληση» του πεδίου με το χρόνο (Καρυδάκης, 2008).

Η διάθεση σε λίμνες, ποτάμια και χείμαρρους λόγω της ευαισθησίας που παρουσιάζουν αυτά τα οικοσυστήματα, συνίσταται να μη γίνεται αλόγιστα και χωρίς μέτρο και ύστερα από μελέτη και οπωσδήποτε με την προϋπόθεση ότι πληρούνται οι όροι διάθεσης των νερών σε αυτά τα οικοσυστήματα (Μενδρινός και Καρύτσας, 2008).

Όσον αφορά τις τεχνητές λίμνες, αυτές απαιτούν στεγανοποίηση και διάθεση των στερεοποιημένων αλάτων. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται μόνο κατά τη φάση των γεωτρήσεων και των δοκιμών (Boyle, 1996).

Παρόλα αυτά η καλύτερη μέθοδος διάθεσης των νερών είναι η επανεισαγωγή τους στον ταμειυτήρα. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η αποφυγή οποιασδήποτε θερμικής και χημικής ρύπανσης των αποδεκτών και η επαναφόρτιση του ταμειυτήρα, ο

οποίος με τον τρόπο αυτό διατηρείται πάντα υπό πίεση. Τα σημαντικά μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι το κόστος κατασκευής της γεώτρησης επανεισαγωγής και το κόστος λειτουργίας (αντλία επανεισαγωγής), καθώς και η πιθανότητα απόφραξης των πετρωμάτων γύρω από τα φίλτρα της γεώτρησης με άλατα, οπότε πρέπει να γίνει επέμβαση με χημικά μέσα ή αντικατάσταση της γεώτρησης με άλλη (DiPirro, 2012).

### **2.9.3 Επιπτώσεις από μονάδες υψηλής ενθαλπίας**

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την αξιοποίηση ρευστών υψηλής ενθαλπίας διαφέρουν από πεδίο σε πεδίο. Οι επιπτώσεις από μονάδες υψηλής ενθαλπίας παρουσιάζονται πιο κάτω.

#### **2.9.3.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις γεωτρήσεις**

Η πρώτη περιβαλλοντική επίπτωση ενός γεωθερμικού έργου, προέρχεται από τις γεωτρήσεις, ανεξάρτητα αν αυτές φτάνουν σε μικρά βάθη και αποσκοπούν στη μέτρηση της γεωθερμικής βαθμίδας κατά το στάδιο έρευνας, ή αν είναι γεωτρήσεις έρευνας-παραγωγής (οι εργασίες οφείλουν που πραγματοποιούνται οφείλουν να τηρούν τον «Κανονισμό Γεωθερμικών Εργασιών») (Rybach, 2003).

Οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις έχουν το σημαντικό πλεονέκτημα ότι καταλαμβάνουν μικρή έκταση γης σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη μορφή παραγωγής ενέργειας. Η εγκατάσταση ενός γεωτρητικού συγκροτήματος, πολλές φορές απαιτεί τη διάνοιξη-επισκευή δρόμων για την πρόσβαση στο σημείο των γεωτρήσεων καθώς και την κατασκευή μιας γεωτρητικής εξέδρας και πλατείας. Η εξέδρα καλύπτει μια επιφάνεια από 300-500 m<sup>2</sup>, όταν το γεωτρύπανο είναι μικρό και αυτοκινούμενο (μέγιστο βάθος γεωτρήσεων 300-700 m), και μέχρι 1200-1500 m<sup>2</sup> όταν είναι μέτριο έως μεγάλο (μέγιστο βάθος 2000 m). Οι εργασίες για την εγκατάσταση των γεωτρυπάνων και την κατασκευή των γεωτρήσεων τροποποιούν ελαφρά την επιφανειακή μορφολογία της περιοχής ενώ δεν αποκλείεται η πιθανότητα πρόκλησης μικρών ζημιών στη χλωρίδα και την πανίδα της περιοχής (DiPirro, 2012). Το γεγονός ότι η παραγωγή ενέργειας πρέπει να γίνεται κοντά

στο γεωθερμικό πεδίο είναι ένας ενισχυτικός παράγοντας για μείωση της έκτασης του σταθμού.

**Πίνακας 12:** Απαιτήσεις σε έκταση γης για τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (σε m<sup>2</sup>/GWh για 30 χρόνια)

Μορφή ενέργειας	Απαιτούμενη έκταση γης για τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (σε m <sup>2</sup> /GWh για 30 χρόνια)
Άνθρακας (περιλαμβάνει και την εξόρυξη καυσίμων)	3640
Βιοαέριο	3600
Ηλιακά-θερμικά	3560
Φωτοβολταϊκά	3237
Αιολική	1335
<b>Γεωθερμία</b>	<b>404</b>

(Πηγή: DiPippo, 2012)

Οι απότομες έξοδοι ρευστών μπορεί να προκαλέσουν ρύπανση των επιφανειακών υδάτων, γι' αυτό, εάν αναμένονται υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, θα πρέπει να προβλεφθεί η εγκατάσταση συστήματος «αντιεκρηκτικού» μηχανισμού ασφάλειας ρευστών (blow-up preventers). Επίσης, κατά τη διάρκεια κατασκευής των γεωτρήσεων ή των δοκιμών παραγωγής, υπάρχει κίνδυνος διαφυγής στην ατμόσφαιρα κάποιων ανεπιθύμητων αερίων (Lunis and Breckenridge, 1991). Σε κάθε περίπτωση, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται από τις γεωτρητικές εργασίες σταματούν με το πέρας αυτών.

### **2.9.3.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εγκατάσταση του δικτύου μεταφοράς των γεωθερμικών ρευστών**

Κατά το επόμενο στάδιο, η εγκατάσταση του δικτύου μεταφοράς των γεωθερμικών ρευστών και η κατασκευή των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης, επηρεάζει επίσης την πανίδα, τη χλωρίδα και την επιφανειακή μορφολογία της περιοχής. Το τοπίο της περιοχής μπορεί να αλλάξει ελαφρώς, παρόλο που σε κάποιες περιπτώσεις, όπως στο Larderello, το δίκτυο των σωληνώσεων που διαπερνά την περιοχή και οι πύργοι ψύξης των εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν γίνει αναπόσπαστα τμήματα του τοπίου και αποτελούν πια ένα διάσημο τουριστικό αξιοθέατο της περιοχής (Lunis and Breckenridge, 1991).

### **2.9.3.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη φάση λειτουργίας της γεωθερμικής εγκατάστασης**

Κατά τη φάση λειτουργίας μιας γεωθερμικής εγκατάστασης, τα γεωθερμικά ρευστά (ατμός ή ζεστό νερό) συνήθως περιέχουν αέρια, όπως διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), υδρόθειο ( $\text{H}_2\text{S}$ ), αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ), μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) και ίχνη από άλλα αέρια, καθώς και διαλυμένες χημικές ενώσεις, των οποίων η συγκέντρωση συνήθως αυξάνει με τη θερμοκρασία. Για παράδειγμα, το χλωριούχο νάτριο ( $\text{NaCl}$ ), το βόριο (B), το αρσενικό (As) και ο υδράργυρος (Hg) αποτελούν πηγές ρύπανσης αν διατεθούν στο επιφανειακό περιβάλλον. Κάποια γεωθερμικά ρευστά, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση οικισμών στην Ισλανδία, μπορεί να είναι καθαρά νερά, όμως κάτι τέτοιο αποτελεί μια σπάνια περίπτωση. Επίσης, όταν τα νερά απορρίπτονται από τις γεωθερμικές εγκαταστάσεις έχοντας υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με το περιβάλλον, τότε συνιστούν μια πιθανή πηγή θερμικής ρύπανσης. (Rybach, 2003)

### **2.9.3.4 Ατμοσφαιρική ρύπανση**

Η ατμοσφαιρική ρύπανση παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από όλες τις επιπτώσεις που προέρχονται από την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας υψηλής ενθαλπίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μη συμπεκνωμένα αέρια αποτελούν ποσοστό μικρότερο του 5% κ.β. των γεωθερμικών ρευστών. Τα αέρια που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα από το γεωθερμικό ατμό είναι κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και το

υδρόθειο (H<sub>2</sub>S). Σε κάποιες περιπτώσεις τα ρευστά περιέχουν αμμωνία (NH<sub>3</sub>), υδρογόνο (H<sub>2</sub>), άζωτο (N<sub>2</sub>), μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), και ραδόνιο (Rn), όπως επίσης και πτητικά σωματίδια αρσενικού (As), βορίου (B) και υδραργύρου (Hg) (Weres, 1984).

Η εκπομπή υδρόθειου αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή μόλυνσης. Παρόλα αυτά, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μείωση των εκπομπών του αερίου αυτού, οπότε οι επιπτώσεις του συγκεκριμένου προβλήματος μπορούν να ελεγχθούν σχετικά εύκολα (Weres, 1984).

Στα ρευστά που χρησιμοποιούνται σε ένα εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί επίσης να βρεθεί διοξείδιο του άνθρακα, όμως, συγκριτικά με τις εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικά καύσιμα, η απελευθέρωση CO<sub>2</sub> είναι κατά πολύ μικρότερη της τάξης των 13 έως 380 gr για κάθε kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από μια γεωθερμική εγκατάσταση αντιστοιχεί σε 1.042 gr/kWh που εκπέμπεται από τις εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν λιγνίτη, 906 gr/kWh από αυτές που χρησιμοποιούν πετρέλαιο και 453 gr/kWh από τις μονάδες φυσικού αερίου (Fridleifsson, 2001).

Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με δυαδικά συστήματα και οι εγκαταστάσεις τηλεθέρμανσης οικισμών μπορούν πιθανώς να δημιουργήσουν κάποια μικρότερα προβλήματα, τα οποία όμως μπορούν να ξεπεραστούν με απλό τρόπο, χρησιμοποιώντας κλειστά συστήματα που προλαμβάνουν οποιαδήποτε εκπομπή αερίων. Πρέπει να τονισθεί ότι τα γεωθερμικά ρευστά δεν παράγουν αιωρούμενα σωματίδια, ούτε τέφρα, ούτε καπνό (Weres, 1984).

#### **2.9.3.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τα γεωθερμικά νερά**

Όλα τα προβλήματα έχουν άμεση σχέση με τη χημική σύσταση των περισσότερων γεωθερμικών ρευστών. Τα γεωθερμικά ρευστά, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και της μακράς παραμονής τους σε επαφή με διάφορα πετρώματα, περιέχουν κατά κανόνα σημαντικές ποσότητες διαλυμένων αλάτων και αερίων. Η αλλαγή των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών των ρευστών στο στάδιο της εκμετάλλευσης μπορεί να δημιουργήσει ευνοϊκές συνθήκες για την απόθεση ορισμένων διαλυμένων ή αιωρούμενων στερεών και την απελευθέρωση στο περιβάλλον επιβλαβών ουσιών. Για το λόγο αυτό, τα γεωθερμικά ρευστά με σχετικά μεγάλη περιεκτικότητα σε χημικά στοιχεία όπως βόριο, φθόριο,

αρσενικό, θα πρέπει να υφίστανται κάποιου είδους επεξεργασία ή να επανεισάγονται στον ταμιευτήρα ή και τα δύο (DiPirro, 2012).

### **2.9.3.6 Καθιζήσεις στην περιοχή**

Υπάρχει η πιθανότητα η άντληση μεγάλων ποσοτήτων νερού ή ατμού όταν οι γεωθερμικοί ταμιευτήρες αποτελούνται από πορώδεις σχηματισμούς, να προκαλέσει φαινόμενα καθίζησης, δηλαδή σταδιακής βύθισης της επιφάνειας του εδάφους από λίγα εκατοστά μέχρι μερικά μέτρα. Πρόκειται για ένα μη αναστρέψιμο φαινόμενο, αλλά σε καμία περίπτωση δεν είναι καταστροφικό, καθώς πρόκειται για μια αργή διαδικασία που συνήθως επηρεάζει και «κατανέμεται» σε μεγάλες επιφάνειες. Με το πέρασμα των χρόνων, η καθίζηση μπορεί να φτάσει σε μετρήσιμα επίπεδα, σε κάποιες περιπτώσεις ακόμη και σε κάποιες δεκάδες εκατοστών ή και μέτρων, οπότε θα πρέπει να παρακολουθείται συστηματικά, καθώς τότε υπάρχει η πιθανότητα να επηρεάσει τη σταθερότητα όχι μόνο των κτιριακών εγκαταστάσεων των γεωθερμικών μονάδων αλλά και όλων των άλλων κτιρίων στην περιοχή. Οι καθιζήσεις δύναται να αποτραπούν, ή να μειωθούν σημαντικά, με την επανεισαγωγή των χρησιμοποιηθέντων γεωθερμικών ρευστών στον ταμιευτήρα από τον οποίο προέρχονται (Narasimhan and Goyal, 1984).

### **2.9.3.7 Επίδραση στη σεισμικότητα της περιοχής**

Η απόληψη ή και η επανεισαγωγή των γεωθερμικών ρευστών προκαλεί αστάθεια στην περιοχή και είναι πιθανό να προκαλέσει ή να αυξήσει τη συχνότητα των σεισμικών φαινομένων σε κάποιες περιοχές. Όμως, πρόκειται για μικροσεισμικά γεγονότα, που μπορούν να γίνουν αντιληπτά μόνο από λεπτομερή καταγραφικά όργανα. Η εκμετάλλευση των γεωθερμικών πόρων είναι απίθανο να προκαλέσει μεγάλα σεισμικά συμβάντα, γεγονός που δεν έχει παρουσιαστεί σε κάποιο γεωθερμικό πεδίο (Majer et al., 2007).

### **2.9.3.8 Θόρυβος από την εκτόνωση του ατμού**

Ο θόρυβος που συνδέεται με τη λειτουργία των γεωθερμικών εγκαταστάσεων, θα μπορούσε να αποτελέσει πρόβλημα μόνο στις εγκαταστάσεις που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Στις γεωθερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ο θόρυβος δεν είναι μεγαλύτερος από αυτόν που προκαλείται σε συμβατικές μονάδες. Κατά τη φάση

παραγωγής, πρόκειται για το θόρυβο που προκαλείται από τη μεταφορά του ατμού μέσα από τους σωλήνες και στην περιστασιακή απόρριψη του στο περιβάλλον. Όμως τα συγκεκριμένα επίπεδα θορύβου είναι συνήθως αποδεκτά. Στην εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής, η κύρια πηγή θορύβου προέρχεται από τους ανεμιστήρες του πύργου ψύξης, τον εκτοξευτή ατμού και το βόμβο των αμοστροβίλων (Brown, 2003). Ο θόρυβος που προκαλείται από τις εφαρμογές άμεσης χρήσης της γεωθεμίας είναι συνήθως αμελητέος. Κατά τη φάση λειτουργίας της μονάδας, τα επίπεδα θορύβου ελέγχονται από μόνιμες εγκαταστάσεις σιγαστήρων ή άλλων συσκευών μείωσης θορύβου (Φυτίκας και Ανδρίτσος, 2004α).

# Κεφάλαιο 3

## 3. Το ενεργειακό πρόβλημα της Κύπρου

Η Κύπρος όπως και τα περισσότερα νησιά παρουσιάζει σημαντικά ενεργειακά προβλήματα. Οι κύριοι λόγοι δημιουργίας του ενεργειακού προβλήματος είναι κυρίως η υψηλή εξάρτηση του νησιού από τις εισαγόμενες πηγές ενέργειας, σε συνδυασμό με την συνεχιζόμενη αύξηση της τιμής των πετρελαιοειδών και της ζήτησης σε ενέργεια (Υπηρεσία Ενέργειας Κύπρου, 2015).

Συγκεκριμένα κατά την περίοδο 2000 έως 2010 παρατηρήθηκε μέση ετήσια αύξηση της ζήτησης σε ενέργεια της τάξης του 6,1%. Το 2010 οι εισαγωγές πετρελαιοειδών αποτελούσαν το 19,7% των συνολικών εισαγωγών, κοστίζοντας στην Κυπριακή Δημοκρατία 1,3 δις. ευρώ ενώ κατά την ίδια περίοδο η πρωτογενής κατανάλωση προϊόντων για την παραγωγή ενέργειας προερχόταν κατά 95,6% από πετρελαιοειδή (Υπηρεσία Ενέργειας Κύπρου, 2015).

Επιπλέον η Κύπρος λόγω της γεωγραφικής της θέσης δεν έχει οποιαδήποτε ενεργειακή σύνδεση με άλλες χώρες. Το ενεργειακό της σύστημα χαρακτηρίζεται απομονωμένο, εφόσον δεν είναι διασυνδεδεμένο με αγωγούς πετρελαίου, φυσικού αερίου ή δικτύων μεταφοράς ενέργειας όπως συμβαίνει με τις πλείστες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ενεργειακό Γραφείο Κύπριων Πολιτών, 2010).

Η αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως για σκοπούς ψύξης με τη χρήση των κλιματιστικών κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, συχνά φέρνει στο όριο του το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Λόγω αυτής της υπερβολικής ζήτησης σε συνδυασμό με την άσκοπη και αχρεία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, οδηγούν σε συχνή διακοπή του ηλεκτρικού ρεύματος (blackout) (Ενεργειακό Γραφείο Κύπριων Πολιτών, 2010).

Όσα αναφέρθηκαν πιο πάνω σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η οικονομία της Κύπρου δεν έχει ακόμη ορθοποδήσει, επιβάλλουν την άμεση επίλυση του ενεργειακού προβλήματος του νησιού. Η Κυπριακή Δημοκρατία οφείλει να βρει λύσεις και να χαράξει μια σωστή πολιτική για επίλυση του ενεργειακού προβλήματος της Κύπρου, ούτως ώστε να δημιουργηθεί ένα ενεργειακό σύστημα το οποίο να είναι σε μεγάλο βαθμό βασισμένο στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στην εκμετάλλευση των πλούσιων φυσικών πόρων του νησιού μας.

### **3.1 Η ενεργειακή πολιτική της Κύπρου**

Η Κύπρος όπως προαναφέρθηκε αποτελεί μια από τις περισσότερο ενεργειακά εξαρτημένες χώρες της Ε.Ε καθώς ο τομέας της ενέργειας εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από εισαγόμενες πηγές ενέργειας ενώ το πετρέλαιο κυριαρχεί έντονα στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας.

Η ενεργειακή πολιτική της Κύπρου διαμορφώνεται από το Υπουργείο Εμπορίου Βιομηχανίας και Τουρισμού σε συνεργασία με όλους τους εμπλεκόμενους φορείς και εγκρίνεται από το Υπουργικό Συμβούλιο. Το Υπουργείο Εμπορίου Βιομηχανίας και Τουρισμού εξετάζει και κρίνει τις ενεργειακές ανάγκες της χώρας, λαμβάνοντας υπόψη τις υποχρεώσεις που απορρέουν από τις διεθνείς συνθήκες και συμβάσεις και καθορίζει τους βασικούς άξονες, που προσδιορίζουν τους στόχους που πρέπει να υλοποιηθούν. Παράλληλα το ενεργειακό μοντέλο που εφαρμόζεται στην Κύπρο προσδίδει ιδιαίτερη έμφαση στην κοινωνική διάσταση της ενεργειακής οικονομίας. Οι κύριοι πυλώνες στους οποίους εδράζεται η εθνική ενεργειακή πολιτική είναι: (Υπουργείο Εμπορίου, 2010)

1. Η ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού
2. Η ανταγωνιστικότητα
3. Η προστασία του περιβάλλοντος

Ορισμένες από τις επιδιώξεις της εθνικής ενεργειακής στρατηγικής έχουν ήδη μετατραπεί, κατ' ακολουθία της ενεργειακής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης, σε συγκεκριμένους ποσοτικούς και δεσμευτικούς για τη χώρα μας στόχους, με χρονικό ορόσημο το 2020, οι στόχοι αυτοί προνοούν τα ακόλουθα:

1. Συμμετοχή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε) στην τελική χρήση ενέργειας κατά 13%

2. Συμμετοχή των Α.Π.Ε στην ενεργειακή κατανάλωση των οδικών μεταφορών κατά 10%
3. Εξοικονόμηση ενέργειας (ΕΞ.Ε) 10% στην τελική κατανάλωση ενέργειας μέχρι το 2016 (ενδεικτικός στόχος)
4. Εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας σε ποσοστό 14,3% μέχρι το 2020 (ενδεικτικός στόχος)
5. Ετήσια ενεργειακή αναβάθμιση του 3% του εμβαδού των υφιστάμενων δημοσίων κτιρίων τα έτη 2014-2020 (υποχρεωτικός στόχος)
6. Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας κατά την τελική χρήση την περίοδο 2014-2020, ίσου με το 1,5% του μέσου όρου πωλήσεων των εταιρειών διανομής και λιανικής πώλησης ενέργειας κατά τα έτη 2010-2012 (υποχρεωτικός στόχος )
7. Όλα τα νέα κτίρια, μέχρι τις 31 Δεκεμβρίου 2020, πρέπει να αποτελούν κτίρια με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας (Υπουργείο Εσωτερικών, 2016).

### **3.2 Η γεωλογία της Κύπρου**

Η γεωλογία παίζει το σημαντικότερο παράγοντα στο γεωθερμικό δυναμικό μίας περιοχής, καθώς η γεωθερμική ενέργεια εγκλωβίζεται μέσα στους διάφορους σχηματισμούς, έτσι και η Κύπρος οφείλει το γεωθερμικό της δυναμικό στο γεωλογικό της υπόβαθρο. Όπως διακρίνεται στον ακόλουθο χάρτη το νησί διαιρείται σε τέσσερις γεωλογικές ζώνες: (α) Ζώνη Πενταδακτύλου ή Κερύνειας, (β) Ζώνη ή Οφιόλιθος Τροόδους, (γ) Ζώνη ή Σύμπλεγμα Μαμωνιών, και (δ) Ζώνη των Αυτοχθόνων



(Πηγή: Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, 2016)

#### **Χάρτης 1:** Γεωλογικές Ζώνες της Κύπρου

**Η Ζώνη Πενταδακτύλου** είναι η βορειότερη γεωλογική ζώνη της Κύπρου. Η βάση της ζώνης αυτής αποτελείται κυρίως από μια ακολουθία αλλόχθονων (ή ετερόχθονων) συμπαγών και ανακρυσταλλομένων ασβεστολίθων, δολομιτών και μαρμάρων. Αυτά ακολουθούνται στρωματογραφικά από νεότερα αυτόχθονα ιζηματογενή πετρώματα, στα οποία οι παλαιότεροι αλλόχθονοι σχηματισμοί έχουν επωθηθεί νότια (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, 2016).

**Η Ζώνη ή ο Οφιόλιθος Τροόδους** κυριαρχεί στο κεντρικό μέρος του νησιού, αποτελεί τον γεωλογικό πυρήνα της Κύπρου και έχει μια χαρακτηριστική επιμήκη θολοειδή δομή. Θεωρείται ως ο πιο πλήρης και μελετημένος οφιόλιθος στον κόσμο. Αποτελεί κομμάτι ενός πλήρως αναπτυγμένου ωκεάνιου φλοιού, αποτελούμενο από:

- πλουτώνια πετρώματα (χαρτζβουργίτης, δουνίτης, βερλίτης, πυροξενίτης, γάββρος και πλαγιογρανίτης),
- φλεβικά πετρώματα (διαβάσης), ηφαιστειακά πετρώματα (προσκεφαλοειδείς λάβες) και
- χημικά ιζήματα (φαιόχωμα) (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, 2016).

Η στρωματογραφική του πληρότητα τον κάνει μοναδικό. Σχηματίστηκε κατά τη διάρκεια της πολύπλοκης διαδικασίας διεύρυνσης του ωκεανού και σχηματισμού ωκεάνιου φλοιού. Αναδύθηκε και τοποθετήθηκε στη σημερινή του θέση μέσω πολύπλοκων τεκτονικών διαδικασιών που σχετίζονται με την σύγκρουση της Ευρασιατικής Πλάκας (βόρεια) με την Αφρικανική πλάκα (νότια) (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, 2016).

**Η Ζώνη ή το Σύμπλεγμα των Μαμωνιών** εμφανίζεται κυρίως στην περιοχή της Πάφου, στα νοτιοδυτικά του νησιού. Αποτελείται από μια ακολουθία πυριγενών, ιζηματογενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Αυτά τα πετρώματα, τα οποία είναι αλλόχθονα τοποθετήθηκαν πάνω και δίπλα από τον οφιόλιθο Τροόδους.

**Η Ζώνη των Αυτοχθόνων Ιζηματογενών Πετρωμάτων** καλύπτει την περιοχή μεταξύ των Ζωνών Πενταδακτύλου και Τροόδους (κοιλάδα Μεσαορίας) καθώς επίσης και το νότιο μέρος του νησιού. Η ιζηματογένεση αρχίζει με την απόθεση του **Σχηματισμού Καναβιού** (μπεντονιτικές άργιλοι, ηφαιστειοκλαστικά), ακολουθούμενη από τη απόθεση των **Σχηματισμών Μονής και Κάθηκα**. Ανθρακική ιζηματογένεση αρχίζει με την απόθεση του **Σχηματισμού Λευκάρων**, ο οποίος περιλαμβάνει πελαγικές μάργες και κρητίδες με ένα χαρακτηριστικό λευκό χρώμα, με ή χωρίς την παρουσία κερατολίθων. Η κλασική ανάπτυξη του Σχηματισμού αντιπροσωπεύεται από τέσσερα Μέλη: Κατώτερες Μάργες, Κρητίδες με στρώσεις κερατολίθων, συμπαγείς κρητίδες και Ανώτερες Μάργες. Τον Σχηματισμό Λευκάρων ακολουθεί ο **Σχηματισμός Πάχνας**, ο οποίος αποτελείται κυρίως από κιτρινωπές μάργες και κρητίδες. Το χρώμα των πετρωμάτων, η παρουσία στρώσεων ασβεστολιθικού ψαμμίτη και η περιστασιακή ανάπτυξη κροκαλοπαγών είναι χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τον Σχηματισμό Πάχνας από τον Σχηματισμό Λευκάρων. Η ιζηματογένεση στον Σχηματισμό Πάχνας άρχισε και τελείωσε σε περιβάλλον αβαθούς θάλασσας με την ανάπτυξη υφαλογενούς ασβεστολίθου (Μέλος Τέρα στη βάση και Μέλος Κορωνιά στην κορυφή του Σχηματισμού). Ακολούθησε η απόθεση των εβαποριτών του **Σχηματισμού Καλαβασού**, ως αποτέλεσμα του κλεισίματος και αποκοπής της Μεσογείου Θάλασσας από τον Ατλαντικό Ωκεανό και της εξάτμισης του νερού της. Ο Σχηματισμός αποτελείται από γύψο (Φωτ. 9) και γυψούχες μάργες οι οποίες καλύπτουν εκτενείς περιοχές. Με τη επανένωση της Μεσογείου Θάλασσας με τον Ατλαντικό Ωκεανό (με το άνοιγμα των Στενών του Γιβραλτάρ), άρχισε ένας νέος κύκλος ιζηματογένεσης. Ο **Σχηματισμός Λευκωσίας** αποτέθηκε πρώτα, ο οποίος περιλαμβάνει ιλυόλιθους (γκρίζους και κιτρινωπούς) και στρώσεις ασβεστολιθικών ψαμμιτών και μαργών. Αυτός ακολουθείται από τον **Σχηματισμό Αθαλάσσας** αποτελούμενο από



Σύμφωνα με στοιχεία της Υπηρεσίας Ενέργειας, την περίοδο 2006-2009, κατά την οποία ήταν σε ισχύ τα προηγούμενα και τα νέα σχέδια Χορηγιών για ΑΠΕ και ΕΞΕ (Εξοικονόμησης Ενέργειας), επιχορηγήθηκαν 59 αιτήσεις για εγκατάσταση αντλιών θερμότητας με γεωεναλλάκτη. Παρόλα αυτά, ο αριθμός κατοικιών που έχουν εγκατεστημένο σύστημα ΓΑΘ εκτιμάται ότι είναι αρκετά μεγαλύτερος αφού κατά το 2010 έχει εκδηλωθεί μεγάλο ενδιαφέρον με σημαντικό αριθμό αιτήσεων. Υπάρχουν εγκαταστάσεις γεωθερμικών αντλιών θερμότητας σε κατοικίες σε ολόκληρη την Κύπρο, αλλά και σε εγκαταστάσεις όπως το Αμερικάνικο Καρδιολογικό Ινστιτούτο και η Αμερικάνικη Ακαδημία Λάρνακας. Μεγάλη εγκατάσταση αξιοποίησης αβαθούς γεωθερμίας είχε εγκατασταθεί στους χώρους του Ολυμπιακού κολυμβητηρίου Δήμου Γεροσκήπου στα πλαίσια του προγράμματος το οποίο συγχρηματοδοτήθηκε από το Interreg IIIA Ελλάδα-Κύπρος, για τη θέρμανση του νερού της πισίνας του κολυμβητηρίου (Υπηρεσία Ενέργειας, 2015).

Από τις αξιολογήσεις των εγκατεστημένων γεωθερμικών συστημάτων στην Κύπρο παρατηρείται ότι σε σύγκριση με τη χρήση των συμβατικών καυσίμων για θέρμανση και ψύξη, η χρήση των γεωθερμικών συστημάτων μπορεί να προσφέρει εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης των 40-75% ανάλογα με το μέγεθος του κτιρίου και του αντίστοιχου κοινού συστήματος (Partasides et al.). Εκτιμάται ότι τα επόμενα χρόνια θα αυξηθούν σημαντικά οι κατοικίες που θα καλύπτουν τις ανάγκες τους σε θέρμανση και ψύξη με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας.

### **3.4 Μελέτες και αποτελέσματα μελετών για το γεωθερμικό δυναμικό της Κύπρου**

Το γεωθερμικό δυναμικό της Κύπρου έχει μελετηθεί αρχικά το 1970 από τον Paul Morgan με γεωτρήσεις στην περιοχή Αθαλάσσης στη Λευκωσία και σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, η θερμοκρασία του υπεδάφους σε βάθος 5 - 100 m είναι σχεδόν σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και κυμαίνεται από 18 έως 22°C (Morgan, 1973).

Με τη συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας οι θερμικές πληροφορίες που αφορούν τις ιδιότητες του εδάφους είναι απαραίτητες για το σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση του εξοπλισμού σε διάφορα είδη έργων, κυρίως σε εφαρμογές γεωθερμικών εναλλακτών για αύξηση της απόδοσης των αντλιών θερμότητας.

Οι διαθέσιμες πληροφορίες για τους μηχανικούς που ασχολούνται με τον συγκεκριμένο τομέα, είναι αποτέλεσμα ενός Ερευνητικού Προγράμματος Γεωθερμίας (Geothermarcy) το οποίο υλοποιήθηκε κατά την περίοδο 2008 έως 2010. Το πρόγραμμα αυτό χρηματοδοτήθηκε στο πλαίσιο της Δέσμης για Έρευνα, Τεχνολογική Ανάπτυξη και καινοτομία 2008 του ιδρύματος προώθησης Έρευνας της Κύπρου. Το έργο διεξήχθη με συνεργασία του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου (ΤΕ.ΠΑ.Κ.), του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης και της Υπηρεσίας Ενέργειας του Υπουργείου Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού (Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου κ.α, 2010).

Στα πλαίσια του προγράμματος αυτού καταγράφηκαν θερμοκρασίες σε έξι τοποθεσίες στην Κύπρο με θερμομέτρα που εισέρχονται στη γεώτρηση σε βάθη από 0 μέχρι 120 μέτρα. Οι τοποθεσίες είχαν επιλεγεί με γεωλογικά κριτήρια. Έγινε δηλαδή προσπάθεια να χαρακτηριστούν οι διάφορες γεωλογικές ζώνες που φιλοξενούν αστικά κέντρα. Με την τοποθέτηση γεωθερμικού εναλλάκτη μελετήθηκε επίσης πώς οι γεωθερμικές παράμετροι μεταβάλλονται σε σχέση με την τοπογραφία, τη γεωλογία, το χρόνο, το βάθος και την εποχή.

Το πρόγραμμα επικεντρώθηκε στη συλλογή στοιχείων για το σχεδιασμό θερμικών συστημάτων ενέργειας με την κυκλοφορία νερού μέσα σε γεωτρήσεις. Οι αντλίες θερμότητας στέλλουν νερό από ένα επιφανειακό σύστημα στη γεώτρηση για να το θερμάνουν ή να το δροσίσουν, αναλόγως των συνθηκών. Το υπέδαφος αποτελεί ένα ευνοϊκό περιβάλλον για αυτά τα συστήματα επειδή κατά την καλοκαιρινή περίοδο η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από εκείνη της ατμόσφαιρας και το χειμώνα υψηλότερη. Το νερό απορρίπτει θερμότητα στο πιο κρύο υπόγειο περιβάλλον κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και απορροφά θερμότητα από το πιο θερμό υπόγειο περιβάλλον κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Οι αντλίες θερμότητας κυκλοφορούν συνεχώς το νερό από το οικιακό περιβάλλον μέσα σε γεωτρήσεις και μέχρι το βάθος όπου η θερμοκρασία είναι γύρω στους 20° C. Η θερμοκρασία του υπεδάφους επηρεάζεται και μεταβάλλεται ανάλογα με την ατμοσφαιρική θερμοκρασία μόνο στα πρώτα 10-15 μέτρα. Στον πιο κάτω πίνακα φαίνεται η διακύμανση της θερμοκρασίας σε τρία διαφορετικά βάθη για οκτώ γεωτρήσεις (Kalogirou et al., 2012).

**Πίνακας 13:** Αποτελέσματα διακύμανσης της θερμοκρασίας σε τρία διαφορετικά βάθη (20m, 50m, και 100m) για οκτώ γεωτρήσεις (Οι γεωτρήσεις στο Σαϊττά και στη Λεμεσό πραγματοποιήθηκαν σε παλαιότερη μελέτη της υπηρεσίας ενέργειας).

Τοποθεσία	Βάθος (20m, 50m, και 100m)		
	Θερμοκρασία στα 20 m σε °C	Θερμοκρασία στα 50 m σε °C	Θερμοκρασία στα 100 m σε °C
Αγία Νάπα	23,17 - 23,45	23,07 - 23,56	23,52 - 23,91
Μενεού	22,56 - 22,76	22,36 - 22,94	23,02 - 23,46
Λακατάμεια	21,86 - 22,71	21,91 - 22,56	22,93 - 23,46
Κιβίδες	18,59 - 18,68	18,39 - 18,50	18,59 - 18,84
Γεροσκήπου	22,04 - 22,34	22,27 - 22,78	22,89 - 23,00
Προδρόμι	20,75 - 21,08	21,29 - 21,39	21,77 - 21,91
Σαϊττάς	17,04 - 17,06	17,47 - 17,48	18,72 - 18,73
Λεμεσός	21,98 - 22,06	21,7 - 21,81	22,43 - 22,57

(Πηγή:(Partasides et al.)

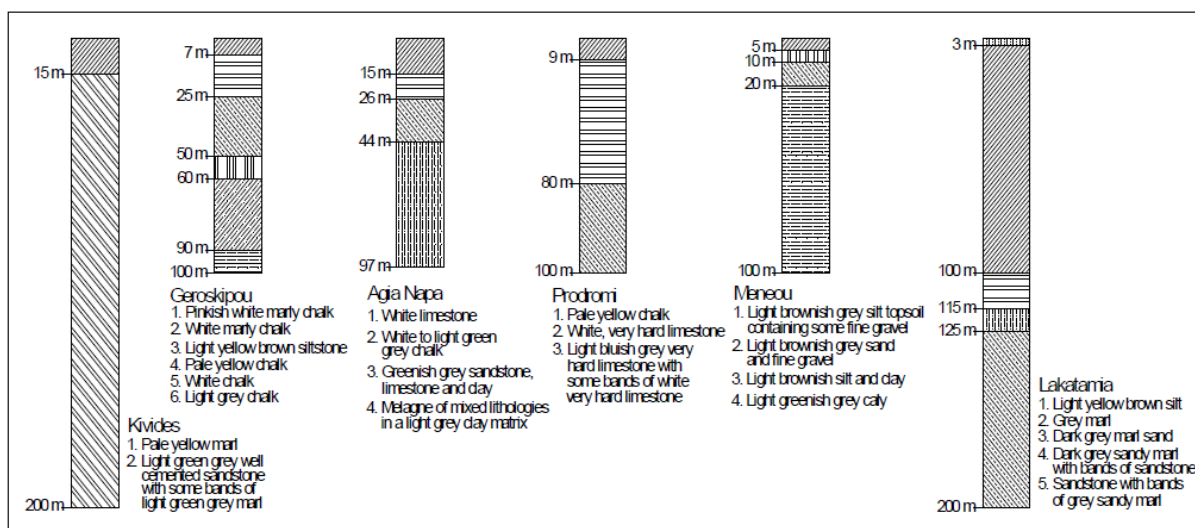


(Πηγή:(Partasides et al.)

**Χάρτης 2:** Οι γεωγραφικές θέσεις των γεωτρήσεων (μαύρα σημεία) που μελετήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης του γεωθερμικού δυναμικού της Κύπρου το 1973 από τον Paul Morgan. Τα κόκκινα σημεία δείχνουν τις γεωτρήσεις της καινούργιας μελέτης.

### 3.4.1 Δοκιμή θερμικής αγωγιμότητας

Από τις διάφορες λιθολογίες των γεωτρήσεων λήφθηκαν δείγματα πετρωμάτων για τη διεκπεραίωση εργαστηριακών δοκιμών. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης (Τ.Γ.Ε) της Κύπρου. Οι λιθολογίες των γεωτρήσεων αποτελούνται κυρίως από αμμώδη μάργες, κρητίδες, ασβεστόλιθους και ψαμίτες. Το πιο κάτω σχήμα απεικονίζει τη γεωλογική περιγραφή των γεωτρήσεων όπως περιγράφηκαν από το Τ.Γ.Ε.. Επιπρόσθετα, τα δείγματα που αντιπροσωπεύουν το σχηματισμό των γεωτρήσεων, συλλέχθηκαν από γειτονικές περιοχές για ανάλυση. Για κάθε δείγμα, έγιναν μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας με τη χρήση του θερμικού αισθητήρα της συσκευής Hukseflux (Florides et al., 2011).



(Πηγή: Florides et al., 2011)

**Εικόνα 15:** Γεωλογική περιγραφή της λιθολογίας των γεωτρήσεων στις 6 περιοχές

Για κάθε γεώτρηση πραγματοποιήθηκε ένας αριθμός δοκιμών με σκοπό να καθοριστεί η θερμική αγωγιμότητα ( $\lambda$ ) και η μέση θερμοκρασία του εδάφους. Για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε ένας μη-σταθερός ανιχνευτής (θερμό σύρμα, βελόνα) (Florides et al., 2011).

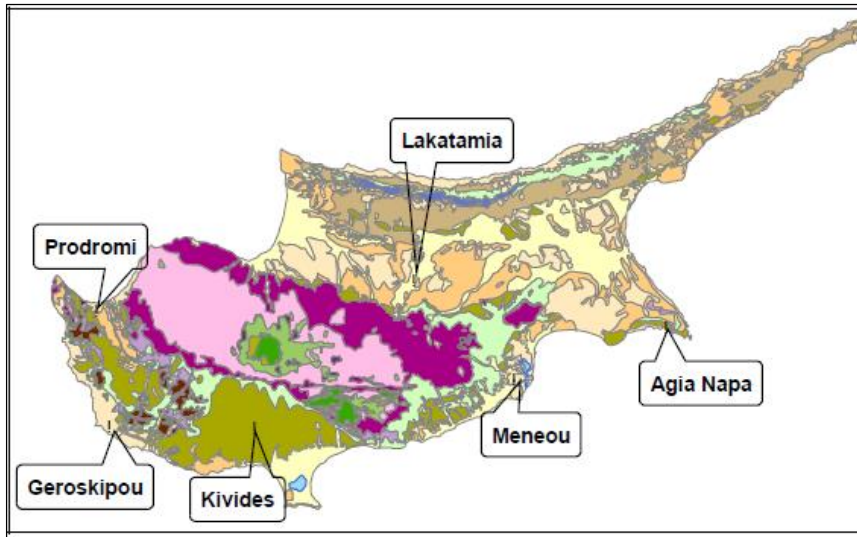
Η θερμική αγωγιμότητα προσδιορίστηκε από την με έγχυση μιας σταθερής θερμικής ισχύος μέσα σε μια γεώτρηση η οποία είχε γνωστό βάθος και διάμετρο. Με το πέρασμα του χρόνου, η άνοδος της θερμοκρασίας κοντά στο θερμαντήρα εξαρτάται μόνο από την θερμική αγωγιμότητα του περιβάλλοντος μέσου, και όχι από τη θερμοχωρητικότητα.

Γενικά, αυτή η μέθοδος αποφεύγει την επίτευξη μιας πραγματικής θερμικής ισορροπίας με σταθερές θερμοκρασίες και ως εκ τούτου η μέθοδος είναι κατάλληλη για γρήγορα πειράματα όπως και για επιτόπια χρήση στο ύπαιθρο. Η εξίσωση που διέπει αυτούς τους ανιχνευτές καθορίζεται από τη θερμοκρασία του πεδίου γύρω από ένα σύρμα θέρμανσης που ενεργοποιείται σε  $t = 0$  παρέχοντας σταθερή ισχύ, ώστε οι αισθητήρες μέτρησης του ανιχνευτή να καταγράφουν μετρήσεις με την αύξηση της θερμοκρασίας του ίδιου του θερμοαντήρα (Pertasides et al., 2011).

Ο πίνακας που ακολουθεί παραθέτει τις μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητας των δειγμάτων. Όπως φαίνεται, η θερμική αγωγιμότητα του κάθε δείγματος δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δείγματα των πετρωμάτων που συλλέχθηκαν είχαν διαφορετικό ειδικό βάρος. Τα επιφανειακά δείγματα παρουσιάζουν μικρότερη πυκνότητα από εκείνα που συλλέχθηκαν σε βαθύτερα στρώματα. Επίσης, το ποσοστό κορεσμού στο νερό για κάθε δείγμα αποτελεί επιπρόσθετο παράγοντα ο οποίος επηρεάζει τη θερμική αγωγιμότητα. Ως εκ τούτου, η εκτίμηση της θερμικής αγωγιμότητας της γεώτρησης από μεμονωμένες τιμές που μετρώνται από τα δείγματα δεν δίνει ένα ακριβές αποτέλεσμα. Επίσης είναι αναγκαία η επιτόπια μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας της γεώτρησης. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση της δοκιμής θερμικής απόκρισης.

**Πίνακας 14:** Αποτελέσματα Θερμικής αγωγιμότητας από τα δείγματα που συλλέχθηκαν από τις γεωτρήσεις

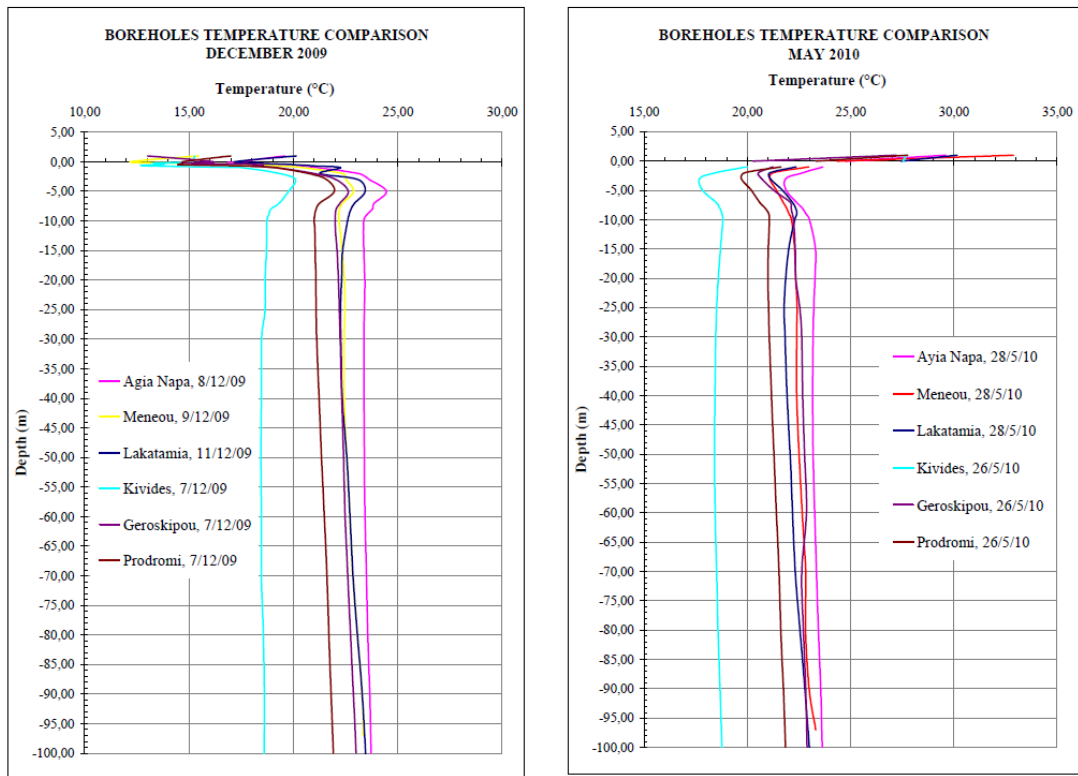
Δείγμα	Κατάσταση Δείγματος	Θερμική Αγωγιμότητα λ-Value (W/mK)	Ειδικό Βάρος (gr/cm <sup>3</sup> )
Μπετονιτική άργιλος	Ξηρή	0,6-0,78	1,2
	Κορεσμένη	1,1-1,16	1,55
Μπετονιτική άργιλος +Τσιμέντο	Ξηρή	0,63-0,68	1,2
	Κορεσμένη	0,90-0,94	1,55
Μάργα	Ξηρή	-	1,78-2,13
	Κορεσμένη	2,01-2,14	1,72-1,85
Κρητίδα	Ξηρή	1,36-1,38	2,13
	Κορεσμένη	-	2,27



(Πηγή: Florides et al., 2011)

**Χάρτης 3:** Χάρτης: Γεωλογικός Χάρτης της Κύπρου με τις θέσεις των Γεωτρήσεων

Στα πιο κάτω διαγράμματα διακρίνονται οι τρεις ζώνες . Η πρώτη είναι η επιφανειακή η οποία φθάνει σε βάθος 0,5m και επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα. Η δεύτερη ζώνη είναι η ρηχή ζώνη η οποία φθάνει σε βάθος μέχρι 8m, και ακολουθεί την ίδια τάση με την επιφανειακή ζώνη, αλλά σε αυτή την περίπτωση η διακύμανση της θερμοκρασίας είναι εποχική και δεν επηρεάζεται από τις ημερήσιες μεταβολές του ατμοσφαιρικού αέρα. Τέλος η τρίτη ζώνη είναι η βαθιά ζώνη η οποία ακολουθεί τη ρηχή ζώνη. Στη βαθιά ζώνη η θερμοκρασία κατά τους θερμούς μήνες είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία που παρουσιάζεται στη ρηχή ζώνη. Αντίθετα στους χειμερινούς μήνες οι θερμοκρασίες στη ρηχή ζώνη είναι υψηλότερες από τις θερμοκρασίες στη βαθιά ζώνη. Η μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους στη ρηχή ζώνη σε σχέση με την μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα του περιβάλλοντος παρουσιάζεται με μια χρονική καθυστέρηση που στο βάθος των 3m ξεπερνά τους 2,5 μήνες.



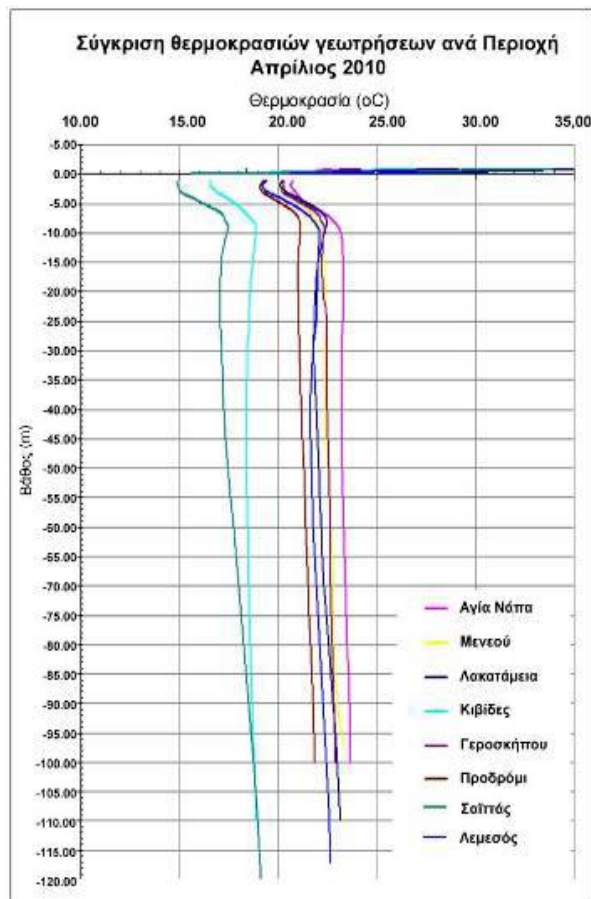
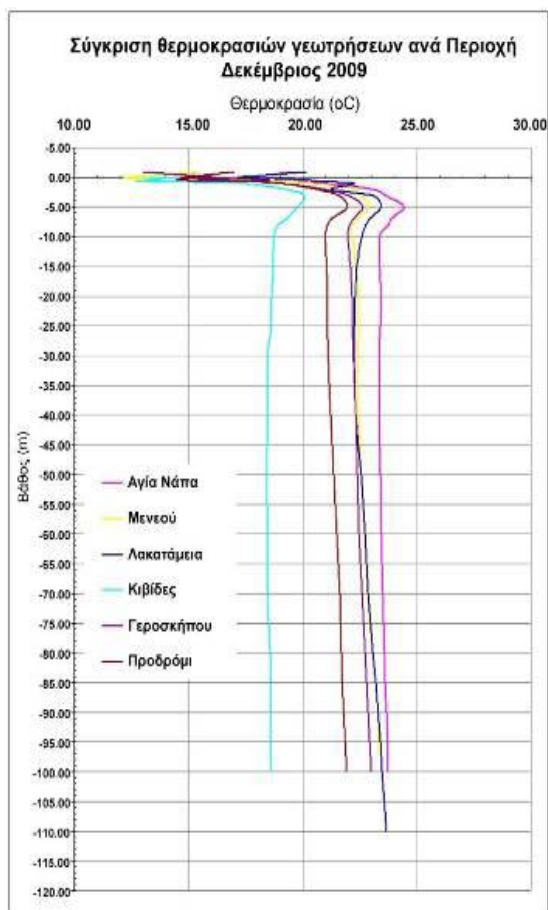
(Πηγή: Florides et al., 2011)

**Διάγραμμα 6:** Επιφάνεια εδάφους στις γεωτρήσεις για το Δεκέμβριο 2009 και Μάιο 2010

Στα ακόλουθα διαγράμματα απεικονίζεται η κατανομή της θερμοκρασίας του εδάφους στις περιοχές των γεωτρήσεων για τους μήνες Δεκέμβριο του 2009 και Μάιο του 2010, αντίστοιχα. Το εύρος της θερμοκρασίας του εδάφους της ρηχής ζώνης σε βάθος 3μ κατά την περίοδο Δεκέμβριος 2009 - Μάιος 2010 κυμαίνεται από 15,5 °C έως και 23,6 °C. Η βαθιά ζώνη που ξεκινά από 8μ δεν επηρεάζεται από τις κλιματικές διακυμάνσεις και η θερμοκρασία είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους, με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 18,4 °C και 23,9 °C.

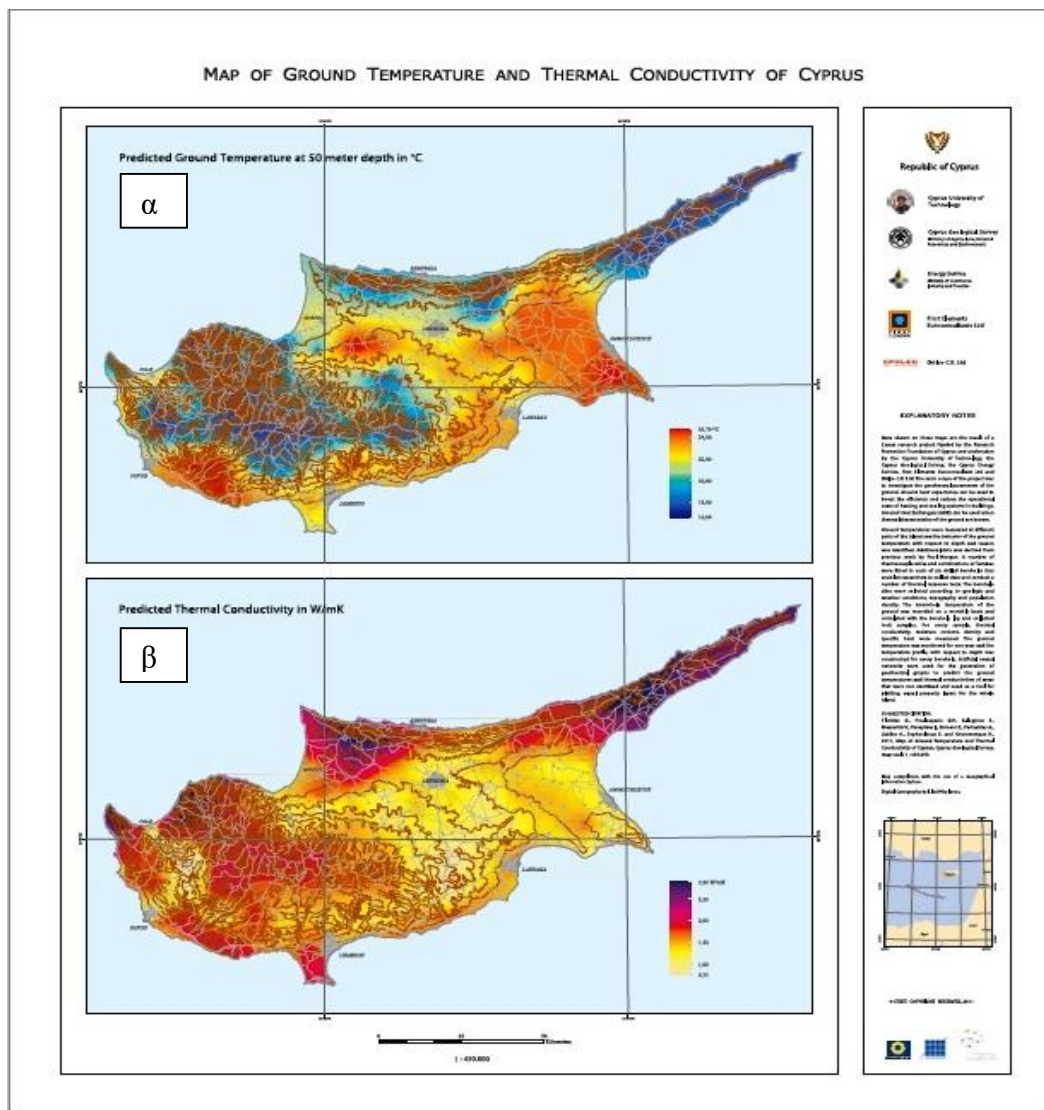
Η υψηλότερη θερμοκρασία του εδάφους στη βαθιά ζώνη μετρήθηκε στην Αγία Νάπα και είναι 22 °C-23 °C, ενώ η χαμηλότερη μετρήθηκε στις Κυβίδες και είναι 18 °C-19 °C. Η γεώτρηση στην Αγία Νάπα αντιπροσωπεύει μια παραθαλάσσια τοποθεσία, ενώ η γεώτρηση στις Κυβίδες αντιπροσωπεύει μια ημιορεινή περιοχή. Συνήθως η μέση θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα στις παράλιες περιοχές είναι χαμηλότερη από εκείνη της ενδοχώρας κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου και ελαφρώς υψηλότερη κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου. Ανεξάρτητα από αυτό, η θερμοκρασία του εδάφους στη Λακατάμια, που αντιπροσωπεύει την ενδοχώρα με μεγαλύτερο υψόμετρο από τις παραθαλάσσιες τοποθεσίες, πλησιάζει τις τιμές που μετρήθηκαν στην Αγία Νάπα. Η

θερμοκρασία στη βαθιά ζώνη του νησιού αποδεικνύει ότι η λιθολογία της γης είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα γεωθερμικά χαρακτηριστικά της και όχι η τοποθεσία (κοντά στη θάλασσα ή στην ενδοχώρα). Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί από τα πιο κάτω σχήματα σχήματα ότι η γεωθερμική βαθμίδα των γεωτρήσεων είναι περίπου 1 °C έως 1,5 °C ανά 100m.



**Διάγραμμα 7:** Σύγκριση θερμοκρασιών γεωτρήσεων ανά περιοχή για τους μήνες Δεκέμβριο 2009 και Απρίλιο 2010

Στα πλαίσια της μελέτης αυτής εκπονήθηκαν οι χάρτες της θερμοκρασίας του εδάφους σε βάθος των 50m και της πρόβλεψης της θερμικής αγωγιμότητας οι οποίοι διακρίνονται ακολούθως



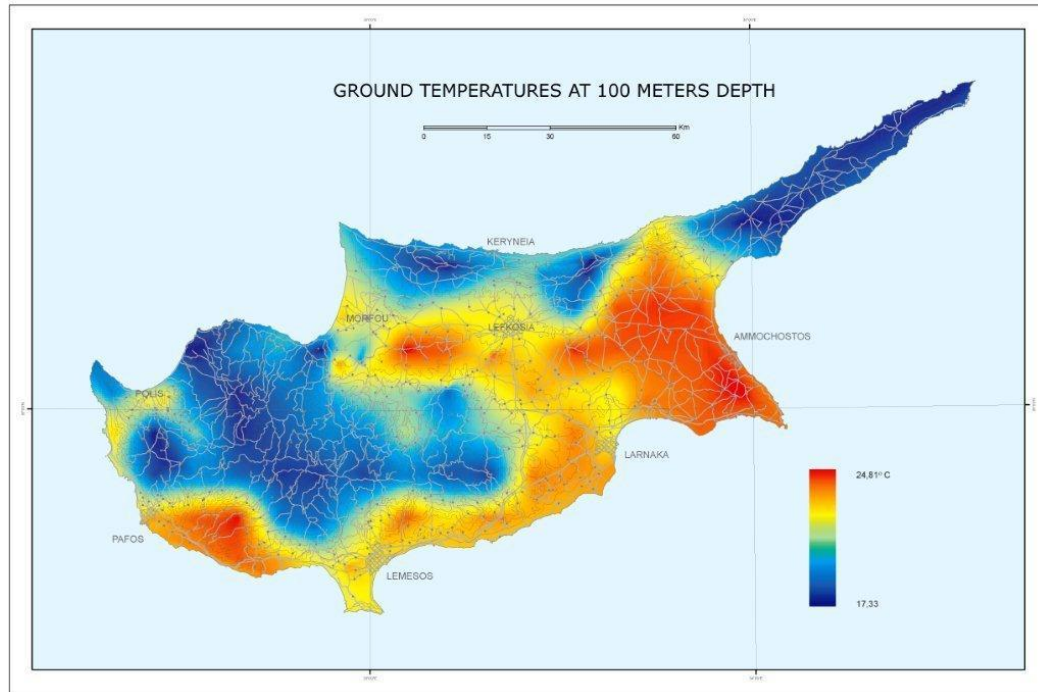
(Πηγή: Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, 2016)

**Χάρτης 4:** α) Πρόβλεψη Θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος 50m, β) Πρόβλεψη Θερμικής Αγωγιμότητας  $\lambda$  (W/mK), Γεωθερμικός Χάρτης της Κύπρου

Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις των πιο πάνω γεωτρήσεων και σε συνδυασμό με τις παλαιότερες μετρήσεις του Paul Morgan (Morgan, 1973), καθώς και με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων, γνωρίζοντας τις Γεωλογικές Συνθήκες της Κύπρου δημιουργήθηκε ένας προκαταρκτικός γεωθερμικός χάρτης (**Χάρτης 5**) που απεικονίζει θερμοκρασίες εδάφους στα 50 μέτρα βάθους. Η Βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση του χάρτη δημιουργήθηκε από το Τ.Γ.Ε. και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

1. η x και y συντεταγμένες για κάθε γεώτρηση, μετρούμενο από κάποιο σημείο αναφοράς,

2. το υψόμετρο της περιοχής της γεώτρησης
3. η μέση ετήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος του τόπου
4. τον τύπο του εδάφους στην περιοχή του χώρου και
5. η θερμοκρασία του εδάφους σε 20m, 50m και 100m βάθος. (Partasides et al.)



(Πηγή: Partasides et al.)

**Χάρτης 5:** Γεωθερμικός Χάρτης θερμοκρασιών εδάφους στο βάθος των 100m, Συμπεράσματα των μέχρι τώρα μελετών

Τα αποτελέσματα που πάρθηκαν από τις γεωτρήσεις των έξι περιοχών δείχνουν ότι η θερμοκρασία του εδάφους στην Κύπρο είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους και είναι εντός του εύρους των 18.4 °C έως 23.9 °C. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ο μηχανικός ο οποίος θα διαστασιολογήσει μια ενεργειακή διάταξη παραγωγής θερμότητας χώρου, μπορεί να θέσει ως δεδομένο, την παρουσία στο σύστημα ενός τεράστιου εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος μπορεί σε σταθερή βάση να παρέχει ρευστό στους 21 °C.

Επίσης, υπολογίστηκε ότι η θερμική αγωγιμότητα στην περιοχή της Γεροσκήπου είναι μεταξύ 1,42 έως 1,97 W/mK, της Λακατάμιας 1,68 W/mK, της Αγίας Νάπας 1,58 W/mK, του Μενεού 1,4 έως 1,72 W/mK και τέλος στο Προδρόμι 1,87 W/mK. Το γενικό σύνολο των αποτελεσμάτων της θερμικής αγωγιμότητας της μελέτης έδειξε ότι η μέση θερμική αγωγιμότητα του εδάφους ( $\lambda$ ) 1,69 W/mK. Η θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους είναι βασική παράμετρος στο σχεδιασμό έργων, όπου λαμβάνουν χώρα φαινόμενα μετάδοσης

θερμότητας, όπως είναι τα συστήματα γεωεναλλακτών. Η θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους επιδρά σημαντικά στην απόδοση και τη λειτουργία ενός συστήματος Γεωθερμικής Αντλίας Θερμότητας (ΓΑΘ) (Αρβανίτης, 2008)/

Από τα αποτελέσματα αυτά και από το διάγραμμα του Lindal που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο δύο συμπεραίνεται ότι λόγω των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών των γεωθερμικών πόρων των πετρωμάτων της Κύπρου τα γεωθερμικά ρευστά μπορούν να αξιοποιηθούν μόνο με την εφαρμογή των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας για θέρμανση και ψύξη χώρων. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας εκμεταλλεύονται την σχεδόν σταθερή θερμοκρασία που συναντάται μόλις μερικά μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, η οποία συνήθως είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του αέρα κατά τη χειμερινή περίοδο και μικρότερη από τη θερμοκρασία του αέρα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα των πιο πάνω μελετών. Στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμα υπόγεια ύδατα μπορούν να συνδυαστούν με γεωθερμικούς εναλλάκτες θερμότητας.

Όταν η θερμική αγωγιμότητα σε μια γεώτρηση είναι χαμηλή, τότε η χρήση πρότυπων γεωθερμικών εναλλακτών θα μπορούσε να οδηγήσει σε μεγάλα μήκη γεωτρήσεων. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να διερευνηθεί η δυνατότητα χρησιμοποίησης γεωθερμικών εναλλακτών που θα ελαχιστοποιήσει την αντίσταση της θερμικής ροής μεταξύ του εδάφους και του ρευστού φορέα θερμότητας δηλαδή του υγρού που θα μεταφέρει τη θερμότητα.

Επίσης, τα πετρώματα που συλλέχθηκαν από μία περιοχή, και τα οποία έχουν παρόμοια λιθολογία με τα πετρώματα της γεώτρησης, δεν αποτελούν αντιπροσωπευτικά δείγματα των επιτόπου γεωλογικών στρωμάτων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αγωγιμότητες των πετρωμάτων αυξάνονται με την πίεση και δύναται να αλλάζουν ανάλογα με το πορώδες, το μέγεθος των κόκκων και τον κορεσμό τους στο νερό κ.λπ. Για τους λόγους αυτούς η επιτόπια μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας με γεωθερμικό εναλλάκτη θερμότητας αποτελεί τη μόνη αξιόπιστη δοκιμή (Florides et al., 2011).

Η γνώση της θερμικής συμπεριφοράς του εδάφους σε διάφορα σημεία και βάθη είναι πολύτιμη για τη βελτίωση του σχεδιασμού των γεωθερμικών εφαρμογών στη Κύπρο και ιδιαίτερα για την αποτελεσματικότητα των αντλιών θερμότητας εδάφους που χρησιμοποιείται για τον κλιματισμό των κτιρίων. Τα στοιχεία που έχουν συγκεντρωθεί μέχρι τώρα σαφώς δείχνουν ότι υπάρχει δυνατότητα για την αποτελεσματική χρήση των

γεωθερμικών αντλιών θερμότητας στην Κύπρο οδηγώντας σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Με τη διερεύνηση της δομής του εδάφους και το καθορισμό των γεωθερμικών παραμέτρων των στρωμάτων μπορεί να επιτευχθεί αποδοτικότερος σχεδιασμός των γεωθερμικών συστημάτων για τον κλιματισμό των κτιρίων και θέρμανσης νερού και να μελετηθούν συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στο έδαφος.

### **3.5 Κίνητρα και σχέδια χορηγιών για αξιοποίηση αβαθούς Γεωθερμίας με εγκατάσταση Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας**

Οι γεωθερμικές αντλίες επιχορηγούνται με βάση το «Σχέδιο Προώθησης της Ενεργειακής Αναβάθμισης και χρήσης ΑΠΕ 2014-2020», του Υπουργείου Εμπορίου Βιομηχανίας και Τουρισμού (Υπηρεσία Ενέργειας, 2015).

Για φυσικά πρόσωπα και φορείς που δεν ασκούν οικονομική δραστηριότητα, δίνεται επιχορήγηση ύψους 55% επί του επιλέξιμου προϋπολογισμού με μέγιστο ποσό χορηγίας τα 20.000 ευρώ ανά αίτηση. Ενώ σε επιχειρήσεις και άτομα που ασκούν οικονομική δραστηριότητα, δίνεται επιχορήγηση ύψους 40% με μέγιστο ποσό 100.000 ευρώ ανά αίτηση (Partasides et al.).

Επιλέξιμες δαπάνες είναι όλα τα αναγκαία μέρη ή εξοπλισμός του συστήματος που χρειάζονται για τη μετατροπή της Γεωθερμικής Ενέργειας στην αναγκαία μορφή, έτσι ώστε να μπορεί να αντικαταστήσει τη συμβατική πηγή ενέργειας. Στις επιλέξιμες δαπάνες του συστήματος συμπεριλαμβάνεται εκτός από τον απαραίτητο εξοπλισμό και το κόστος της τεχνοοικονομικής μελέτης, η οποία είναι απαραίτητο να υποβληθεί μαζί με την αίτηση. Ενδεικτικά περιλαμβάνονται:

- ❖ το κόστος της αντλίας θερμότητας
- ❖ το κόστος των γεωτρήσεων, της θωράκισης και του γεμίσματος τους
- ❖ το κόστος των διασωληνώσεων, του γεωεναλλάκτη, των αντλιών, των οργάνων ελέγχου από το έδαφος μέχρι και την αντλία θερμότητας
- ❖ το εργατικό κόστος για εγκατάσταση των πιο πάνω, και το κόστος της ενεργειακής- τεχνοοικονομικής μελέτης (Partasides et al.)

### 3.6 Οικονομικά στοιχεία

Το κόστος αγοράς και εγκατάστασης ενός τυπικού συστήματος αντλίας θερμότητας με γεωεναλλάκτη για σκοπούς ψύξης και θέρμανσης κατοικίας 220-250m<sup>2</sup> κυμαίνεται στα 25.000 ευρώ. Ένα τέτοιο σύστημα έχει απόδοση περίπου 30% σε ψύξη και 70% σε θερμότητα (Ενεργειακό Γραφείο Κύπριων Πολιτών, 2014).

Για παράδειγμα, μια κατοικία 250 m<sup>2</sup> στη Λευκωσία με ικανοποιητική θερμομόνωση εκτιμάται ότι χρειάζεται ενέργεια περίπου 25.000 kWh για θέρμανση και 5.000 kWh για ψύξη, το χρόνο. Η μέση τιμή του ηλεκτρικού για τα επόμενα 10 χρόνια λαμβάνεται ίση με 0,12 €/kWh και η μέση τιμή του πετρελαίου θέρμανσης 0,80 €/L (Πολιτών, 2014).

#### Σενάριο 1. Θέρμανση-ψύξη με συμβατικό σύστημα

Για την απαιτούμενη ενέργεια θέρμανσης από ένα συμβατικό σύστημα κεντρικής θέρμανσης με πετρέλαιο με τυπική απόδοση λέβητα χρειάζονται περίπου 3.600 L πετρελαίου το χρόνο. Επομένως το ετήσιο κόστος για πετρέλαιο θέρμανσης είναι 2.880 ευρώ, ενώ το κόστος ψύξης με χρήση κλιματιστικού είναι 600 ευρώ (Ενεργειακό Γραφείο Κύπριων Πολιτών, 2014).

#### Σενάριο 2. Θέρμανση - ψύξη με γεωθερμική αντλία

Με τη χρήση ΓΑΘ επιτυγχάνεται εξοικονόμηση 70% της απαιτούμενης ενέργειας θέρμανσης και 40% της ενέργειας ψύξης. Έτσι το ετήσιο κόστος από την κατανάλωση ηλεκτρισμού είναι

$$900 \text{ €} (25.000-70\% = 7.500 \text{ kWh} * 0,12 \text{ €/kWh} = 900 \text{ €}),$$

ενώ το ετήσιο κόστος για ψύξη της οικίας υπολογίζεται σε

$$360 \text{ €} (5.000-40\% = 3.000 \text{ kWh} * 0,12 \text{ €/kWh} = 360 \text{ €}).$$

Στο παραπάνω παράδειγμα, η εξοικονόμηση κόστους που επιτυγχάνεται από τη χρήση ΓΑΘ για τη θέρμανση – ψύξη της συγκεκριμένης κατοικίας είναι **2.220 ευρώ** το χρόνο (Ενεργειακό Γραφείο Κύπριων Πολιτών, 2014).



(Πηγή: Phetteplace, 2007)

**Εικόνα 16:** Εγκατάσταση Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας σε κατοικία

# Κεφάλαιο 4

## 4. Μεθοδολογία

Η επεξεργασία των δεδομένων στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή θα γίνει με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ-GIS). Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ-GIS) αποτελούν την πιο αποτελεσματική τεχνολογία για την επεξεργασία χωρικών δεδομένων και πληροφοριών. Συγκεκριμένα πρόκειται για ένα σύστημα το οποίο συλλέγει, διαχειρίζεται, αναλύει και απεικονίζει τόσο χωρικά όσο και μη χωρικά δεδομένα. Γεωγραφική πληροφορία θεωρείται οποιαδήποτε πληροφορία ή και το σύνολο δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών και των δραστηριοτήτων που συμβαίνουν στην επιφάνεια της γης (Maguire, 1991).

Ουσιαστικά τα συστήματα ΓΣΠ αποτελούν μεθόδους οι οποίες βασίζονται σε έναν υπολογιστή για την επίλυση πραγματικών προβλημάτων. Τα δεδομένα σχετικά με τα αντικείμενα του πραγματικού κόσμου είναι αποθηκευμένα σε μια βάση δεδομένων και συνδέονται δυναμικά με έναν χάρτη σε οθόνη υπολογιστή, ο οποίος εμφανίζει γραφικά που αντιπροσωπεύουν αντικείμενα που υπάρχουν στον πραγματικό κόσμο (Chrisman, 1999).

Ένα Γ.Σ.Π αποτελείται από πέντε βασικές συνιστώσες:

1. Τους ανθρώπους οι οποίοι έχουν εκπαιδευτεί στα Γ.Σ.Π.
2. Τα δεδομένα από τα οποία προκύπτουν οι πληροφορίες
3. Το φυσικό εξοπλισμό του συστήματος επεξεργασίας δεδομένων (hardware) για την απόκτηση δεδομένων, την επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων, την οπτική απεικόνιση των πληροφοριών και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων
4. Το λογισμικό, δηλαδή ειδικά προγράμματα υπολογιστή για την επεξεργασία των δεδομένων και την εκτέλεση χωρικών αναλύσεων που είναι σημαντικές στην επίλυση των προβλημάτων

5. Τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή, ταξινόμηση, ανάλυση των δεδομένων, την άντληση πληροφοριών και τη διάδοση της γνώσης για την επίλυση χρήσιμων προβλημάτων (Κουτσόπουλος, 2002).

## 4.1 Εφαρμογή των ΓΣΠ στις Γεωεπιστήμες

Η Τεχνολογία των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών αντιπροσωπεύει την πιο σύγχρονη μέθοδο από αυτές που βασίζονται στις πληροφορίες μιας θέσης. Για το λόγο αυτό τα ΓΣΠ εφαρμόζονται στις γεωεπιστήμες από τις βασικές δραστηριότητες έως τις πιο πολύπλοκες, όπως είναι η μοντελοποίηση των γεωλογικών και γεωγραφικών διεργασιών (Martin et al., 1994).

Τα Γ.Σ.Π. είναι ιδανικά για Γεωλογική χαρτογράφηση, ιδίως όσον αφορά στην ενσωμάτωση των εξ αποστάσεως δεδομένων, με τα δεδομένα που συλλέγονται επιτόπου, για τη γεωργία, τον πολεοδομικό σχεδιασμό, τον περιβαλλοντικό σχεδιασμό και έλεγχο κλπ. Η ικανότητα δημιουργίας χωρικών βάσεων δεδομένων (βάσεις γεω-δεδομένων) από πλευράς των μοντέλων, που αντιπροσωπεύουν τις πληροφορίες, αποτελεί μια πολύ σημαντική πτυχή στη διαχείριση των δεδομένων στη γεωλογία, καθώς τα περισσότερα από τα δεδομένα απαρτίζονται από τα χαρακτηριστικά και τις διεργασίες της Γης, που έχουν συγκεκριμένες συσχετίσεις (Κουτσόπουλος, 2002).

Μια άλλη σημαντική πτυχή των Γ.Σ.Π. είναι η ικανότητα τους να εκτελούν γεωεπεξεργασία, δηλαδή μέσα από τα εργαλεία που προσφέρει το λογισμικό πρόγραμμα μεταβιβάζουν πληροφορίες για την άντληση νέων συνόλων δεδομένων από υπάρχουσες σειρές δεδομένων. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση αναλυτικών συναρτήσεων, όπως οι στατιστικές αναλύσεις κ.α. Η Γεω-οπτικοποίηση είναι μία άλλη πολύ σημαντική λειτουργία των ΓΣΠ, η οποία αναφέρεται στο σύνολο των εργαλείων και τεχνικών απεικόνισης των γεωγραφικών πληροφοριών και των πληροφοριών με γεωγραφική αναφορά, καθώς και υποστήριξης των διαδικασιών χωρικής ανάλυσης (Visvalingam, 1989).

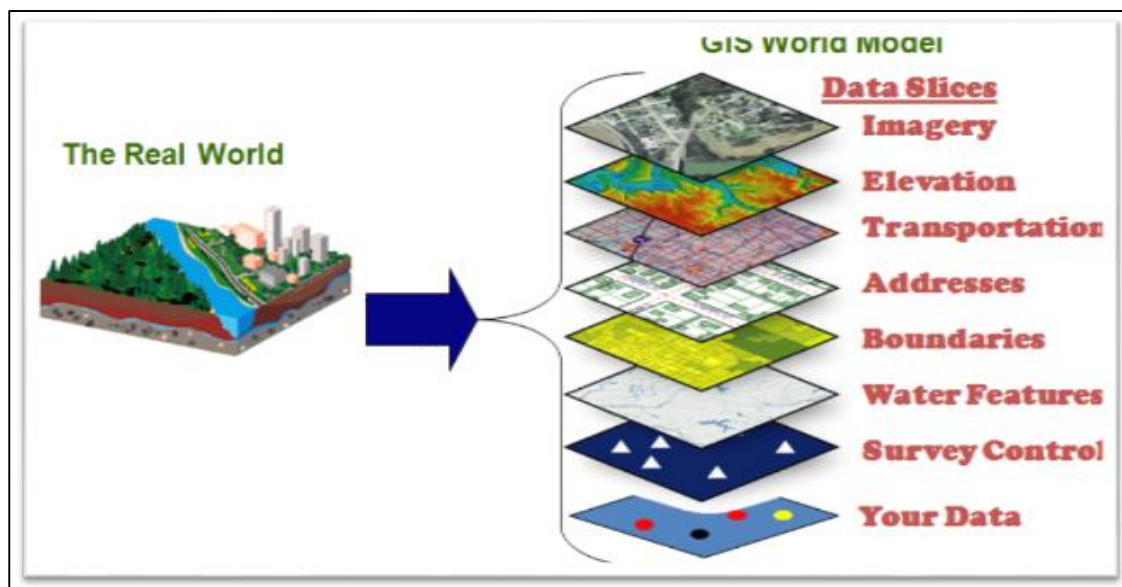
Κάθε γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών είναι σε θέση να εκτελεί έξι θεμελιώδεις λειτουργίες χρήσιμες για την εξεύρεση λύσεων σε προβλήματα του πραγματικού κόσμου. Συνεπώς ένα ΓΣΠ θα πρέπει να είναι ικανό να:

- ✓ Λαμβάνει δεδομένα

- ✓ Αποθηκεύει δεδομένα
- ✓ Αναζητά δεδομένα
- ✓ Αναλύει δεδομένα
- ✓ Εμφανίζει δεδομένα
- ✓ Εξάγει δεδομένα (Κάβουρας, 1998)

Στην έρευνα και την ανάπτυξη των γεωθερμικών πόρων, συνήθως διατίθεται ένας τεράστιος όγκος δεδομένων από πολλές πηγές. Σε όλες τις φάσεις ανάπτυξης των γεωθερμικών πόρων, στη διερεύνηση, την αξιολόγηση του πόρου, στις γεωτρήσεις, την αξιοποίηση και διαχείριση των πεδίων όπου υπάρχει ατμός/ζεστό νερό, τα περισσότερα από τα στοιχεία του πόρου έχουν σχέση με την τοποθεσία δηλαδή αποτελούν γεωγραφικά δεδομένα, ως εκ τούτου τα ΓΣΠ είναι η καλύτερη επιλογή για το χειρισμό της τεχνολογίας αυτής. (Prol-Ledesma, 2000)

Συγκεντρώνοντας διάφορα επίπεδα πληροφοριών που σχετίζονται με την περιοχή ενδιαφέροντος, τα ΓΣΠ επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών που κάθε φορά ενδιαφέρουν ή των βασικών παραγόντων που τις χαρακτηρίζουν. Ο αριθμός των επιπέδων και της ποιότητας των πληροφοριών που χρησιμοποιούνται είναι ουσιαστικά ατελείωτος και κατά βάση εξαρτάται από τον επιδιωκόμενο στόχο. Κύριο στοιχείο ενός Γ.Σ.Π είναι η ικανότητά του για γεωαναφορά των δεδομένων και στη συνέχεια η αντιστοίχιση των πραγματικών του συντεταγμένων στο χώρο (Κάβουρας, 1998).



(Πηγή: Prol-Ledesma, 2000)

**Εικόνα 17:** Το μοντέλο ενός ΓΣΠ,

Οι συντεταγμένες ενός αντικειμένου δεν αποθηκεύονται σε σχέση με ένα αυθαίρετο σύστημα ή με ένα σύστημα αναφοράς, αλλά αποθηκεύονται στο σύστημα συντεταγμένων στο οποίο πραγματικά εντοπίζεται, σε πραγματικό μέγεθος και όχι υπό κλίμακα. Η χρήση κλίμακας εισάγεται μόνο ως μία παράμετρος για τον καθορισμό του βαθμού ακρίβειας και την επίλυση των γραφικών πληροφοριών. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες παραμένουν πάντα το πιο σημαντικό στοιχείο ενός μοντέλου δεδομένων ενός Γ.Σ.Π. Στην πραγματικότητα, ο κύριος στόχος ενός ΓΣΠ είναι η ανάλυση των δεδομένων ώστε να καταστεί ένα εργαλείο στη λήψη αποφάσεων (Κουτσόπουλος, 2002). Η αναπαράσταση χαρτών με τη χρήση των ΓΣΠ διευκολύνει τον εντοπισμό των περιοχών δυνητικού ενδιαφέροντος για την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας.

## 4.2 Ερμηνεία Δεδομένων

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής αυτής διατριβής χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το πρόγραμμα «Διερεύνηση και καθορισμός γεωθερμικών παραμέτρων του εδάφους της Κύπρου, για την δημιουργία του Γεωθερμικού χάρτη του νησιού» που πραγματοποιήθηκε την περίοδο 2012 έως 2016 και συγχρηματοδοτήθηκε από την Κυπριακή Δημοκρατία και το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΠΤΑ). Το πρόγραμμα αποτέλεσε δίκτυο συνεργασίας του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου, με το Πανεπιστήμιο Brunel του Δυτικού Λονδίνου, το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης της Κύπρου, την Υπηρεσία Ενέργειας του Υπουργείου Εμπορίου Βιομηχανίας και Τουρισμού και του Ιδρύματος Ενέργειας Κύπρου (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, 2016).

Κατά τη διάρκεια του προγράμματος πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία πετρωμάτων από 170 σημεία και διεξήχθησαν υπαίθριες μετρήσεις σε αργιλώδη λιθολογίες. Στο εργαστήριο του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης έγινε κοπή και λείανση δειγμάτων καθώς και μετρήσεις θερμικών παραμέτρων σε ξηρό δείγμα σε τρεις πλευρές και προσδιορισμός της πυκνότητας σε ξηρό και κορεσμένο δείγμα όπως επίσης και μετρήσεις θερμικών παραμέτρων σε κορεσμένο δείγμα.

Για την εγκατάσταση ενεργειακών συστημάτων θέρμανσης ή θερινού κλιματισμού (και ψύξης) χώρων μέσω της εκμετάλλευσης της θερμότητας και των θερμικών ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματιστών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται από γεωθερμικό δυναμικό, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των θερμικών χαρακτηριστικών τους (Haehnlein et al., 2010).

Η επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους και η θερμοκρασία κοντά στην επιφάνεια προσδιορίζεται από μία ισορροπία ανάμεσα στην ηλιακή ακτινοβολία, στη γεωθερμική θερμική ροή και στη θερμική αδράνεια των υλικών που απαρτίζουν το υπέδαφος και επηρεάζονται από αυτούς τους δύο παράγοντες. Στην περίπτωση των ΓΑΘ, είναι επιθυμητό το έδαφος να έχει υψηλή ικανότητα μεταφοράς θερμότητας, γιατί έτσι η απαιτούμενη θερμότητα φθάνει στις γεωτρήσεις και στους γεωεναλλάκτες εύκολα ή μπορεί να απομακρυνθεί εύκολα από το υπέδαφος. Οι γεωλογικοί παράμετροι και οι θερμικές ιδιότητες που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό των θερμικών χαρακτηριστικών εδαφών και πετρωμάτων περιλαμβάνουν τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών και των πετρωμάτων τους (Axelsson and Gunnlaugsson, 2000) όπως:

- ✓ την πυκνότητα ή το ειδικό βάρος κάθε υλικού,
- ✓ τη φαινόμενη πυκνότητα ή το βάρος ανά μονάδα όγκου,
- ✓ το πορώδες του εδάφους,
- ✓ την υγρασία του εδάφους και την ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό,
- ✓ την ειδική θερμοχωρητικότητα,
- ✓ την ειδική θερμική αγωγιμότητα
- ✓ την ειδική θερμική διαχυτότητα

Οι θερμικές ιδιότητες που εξετάστηκαν στα πλαίσια του προγράμματος είναι οι ακόλουθες:

- **Θερμική Διαχυτότητα (Thermal Diffusivity)**

Η θερμική διαχυτότητα εκφράζει την ταχύτητα με την οποία διαχέεται η θερμότητα διαμέσου ενός υλικού. Ορίζεται ως το πηλίκο της αγόμενης θερμότητας προς την αποθηκευμένη θερμότητα, σύμφωνα με τη σχέση (Fraseri, 1994):

$$a = \frac{\kappa}{\rho c} = \frac{\kappa}{C}$$

όπου:

$a$ : ο παράγοντας θερμικής διάχυσης ( $m^2/s$ ) του εδάφους ή του πετρώματος

$\kappa$ : η θερμική αγωγιμότητα ( $W/mK$ ) του εδαφικού σχηματισμού

$C = \rho c$ : η θερμοχωρητικότητα εδάφους ή του πετρώματος (η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας στη μονάδα του όγκου) ( $J/m^3 /kgK$ )

- **Θερμική Αγωγιμότητα,  $\kappa$  (Thermal Conductivity )**

Η θερμική αγωγιμότητα  $k$  (W/mK) εκφράζει την ικανότητα του υλικού (έδαφος/πέτρωμα) να μεταφέρει θερμότητα με αγωγή. Η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας των υλικών μεταβάλλεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ορίζεται ως η ποσότητα της θερμότητας  $Q$ (W), που μεταδίδεται μέσω πλάκας πάχους  $L$ (m) και εμβαδού  $A$ (m<sup>2</sup>) σε χρόνο  $t$  (sec), λόγω διαφοράς θερμοκρασίας  $\Delta T$  (K) (Αρβανίτης, 2008).

Προσδιορίζεται από την εξίσωση (Frasheri, 1994)

$$k = \frac{Q}{t} \times \frac{L}{A \times \Delta T}$$

- **Πυκνότητα (Bulk Density, kg/m<sup>3</sup>)**

Ορίζεται ως το βάρος ανά μονάδα όγκου των στερεών συστατικών του εδάφους και αναφέρεται μόνο στα στερεά κοκκία του πετρώματος. Η πυκνότητα αυτή δεν επηρεάζεται από τη μηχανική σύσταση, τη δομή και το πορώδες του εδάφους. Συνήθως λαμβάνεται η μέση τιμή 2,605 kg/m<sup>3</sup>· αν και παρουσιάζει μία διακύμανση από 2,400 kg/m<sup>3</sup> έως 3,000 kg/m<sup>3</sup>, ανάλογα με την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ύλη και βαρέα ορυκτά (Duffie, 2006). Τα φυσικά και θερμικά χαρακτηριστικά που υπολογίζονται δε μπορεί να θεωρηθεί ότι περιγράφουν το σύνολο της μάζας του πετρώματος λόγω της μεγάλης ανισοτροπίας στο σύνολο του πετρώματος και στα εδάφη γενικότερα.

- **Θερμική Χωρητικότητα ή θερμοχωρητικότητα,  $C_p$  (Specific Heat Capacity (dry) x 103 J/K·kg)**

Η θερμοχωρητικότητα αντιπροσωπεύει την ικανότητα συγκεκριμένου όγκου υλικού του εδάφους και μαλακού πετρώματος να αποθηκεύει εσωτερική ενέργεια. Μπορεί να αποδοθεί ως το άθροισμα των θερμοχωρητικοτήτων των συστατικών από τα οποία αποτελείται το έδαφος. Αν  $m_s$ ,  $m_w$ ,  $m_a$  και  $m_0$  είναι οι μάζες (kg) των στερεών συστατικών του εδάφους, του εδαφικού νερού, του αέρα που περιέχεται στο έδαφος και της οργανικής ύλης αντίστοιχα τότε ισχύει (Bergman et al., 2011):

$$C = m_s \times C_s + m_w \times C_w + m_a \times C_a + m_0 \times C_0$$

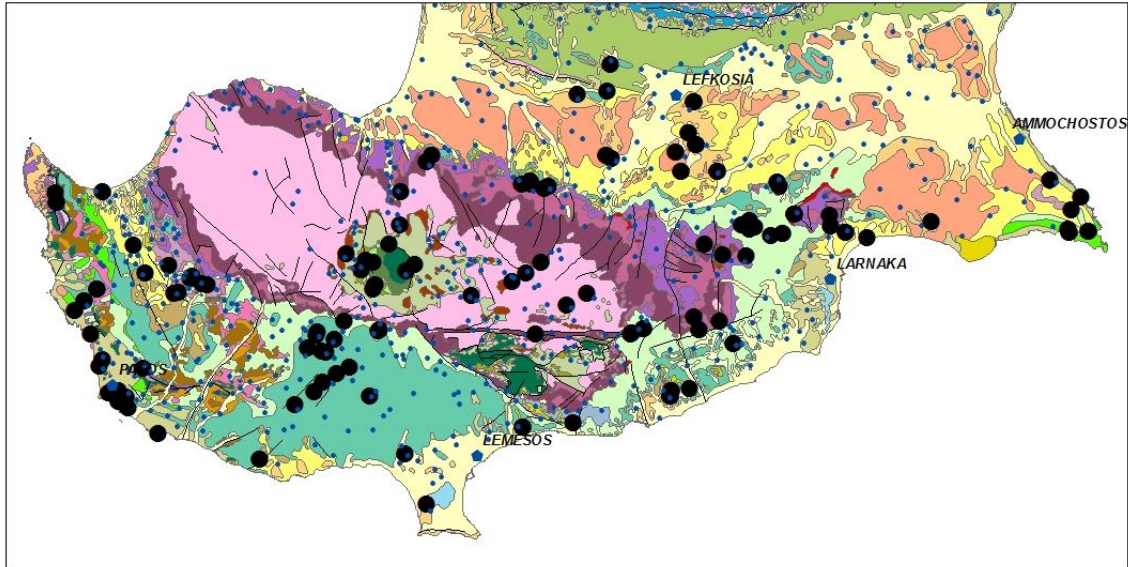
όπου:

$c_s$  : η ειδική θερμότητα (J/kgK) του στεγνού εδάφους

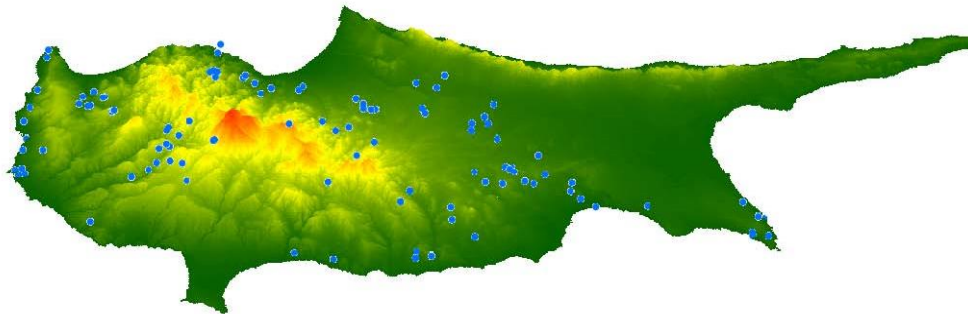
$c_w$ : η ειδική θερμότητα (J/kgK) του νερού που περιέχεται στους πόρους του εδάφους

$c_a$  : η ειδική θερμότητα (J/kgK) του αέρα που υπάρχει στους πόρους

$c_0$ : η ειδική θερμότητα (J/kgK) της οργανικής ύλης του εδάφους



**Χάρτης 6:**Γεωλογικός Χάρτης της Κύπρου στον οποίο διακρίνονται οι θέσεις από τις οποίες λήφθηκαν τα δείγματα



**Χάρτης 7:** Κατασκευή Τρισδιάστατου υψομετρικού μοντέλο της Κύπρου με τη χρήση του εργαλείου ArcScene από το λογισμικό της ArcMap, στο οποίο διακρίνεται η εξάπλωση των σημείων της δειγματοληψίας

Τα δεδομένα πάρθηκαν σε ψηφιακή μορφή από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης της Κύπρου. Τα δεδομένα όπως και οι χάρτες στην παρούσα εργασία επεξεργάστηκαν και εκπονήθηκαν αντίστοιχα με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS, ArcGis10, Arcmap 10.2).

### 4.3 Ψηφιακή Επεξεργασία Δεδομένων

Τα δεδομένα που πάρθηκαν από το Τ.Γ.Ε της Κύπρου αποτελούν τις θερμικές παραμέτρους των 170 σημείων δειγματοληψίας. Προκειμένου να είναι εφικτή η επεξεργασία τους με τα Σ.Γ.Π τα δεδομένα λήφθηκαν σε μορφή shapefile. Πρόκειται για διανυσματικά δεδομένα (Vector- σημειακά διανυσματικά δεδομένα) αλλά και ψηφιδωτά (raster-ψηφιδωτά δεδομένα) όπως είναι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

Το προβολικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι το παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα του 1984, γνωστό ως WGS84 (World Geodetic System 1984).

Αρχικά δημιουργήθηκε ένα νέο αρχείο "Geothermical Data" και μέσω των ιδιοτήτων των επιπέδων "Layers" → "Properties" ορίστηκε ως σύστημα αναφοράς το WGS84.

Ακολούθως τα δεδομένα φορτώθηκαν σαν shapefile στο ArcGIS. Επίσης από το Add Layer προστέθηκε η ακτογραμμή της Κύπρου και οι επαρχίες της Κύπρου σαν Διανυσματικά δεδομένα (πολύγωνα).

Στη συνέχεια έγινε ταξινόμηση σε ξεχωριστά Shape files των σημείων δειγματοληψίας ανάλογα με τους γεωλογικούς σχηματισμούς ως ακολούθως :

1. Σημεία δειγματοληψίας από Πλουτώνια πετρώματα και Ακολουθία του μανδύα (shapefile)
2. Σημεία δειγματοληψίας από Ηφαιστειακά και Φλεβικά πετρώματα (shapefile)
3. Σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες των Σχηματισμών Κάθικα και Κανναβιού (shapefile)
4. Σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού των Λευκάρων (shapefile)
5. Σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού της Πάχνας- Υφαλογενείς ασβεστόλιθοι Μέλους Κορονιάς και Μέλος Τέρα (shapefile)
6. Σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού της Καλαβασού (shapefile)
7. Σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού της Λευκωσίας και των Νεώτερων Ιζημάτων (shapefile)

Το κάθε shaperefile αποτελείται από ένα πίνακα ιδιοτήτων (attribute table) στο οποίο περιέχονται όλες οι πληροφορίες των σημείων δειγματοληψίας αλλά και τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών των γεωθερμικών τους παραμέτρων όπως φαίνεται στο παράδειγμα του πιο κάτω πίνακα.

**Πίνακας 15:** Επιφάνεια Εργασίας Λογισμικού ArcGIS 10-Παράδειγμα Πίνακα ιδιοτήτων Attribute Table

PTS	Shape	OB/ECTID	Code	Date	SampledBy	CODE 1	Lithology	F1Dry_Dens	F1Water_Sa	F1Bulk_De	F1Absorpti	F2Dry_Den	F2Bulk_D	F2Moist
50	Point	8	GEOTH_26oct2012et17	26/08/2012	ET	GEOTH_26oct2012et17	Calcarene	1,820	2,010	2,240	10,160	---	---	---
64	Point	51	GEOTH_EG200803_00.5	0.00.00	Arch*	GEOTH_EG200803_00.5	Calcarene	2,240	2,320	2,440	3,620	---	---	---
65	Point	65	GEOTH_L09	0.00.00	Arch*	GEOTH_L09	Calcarene	1,490	1,790	2,010	21,560	---	---	---
66	Point	66	GEOTH_L09	0.00.00	Arch*	GEOTH_L09	Calcarene	1,910	2,090	2,320	9,260	---	---	---
66	Point	67	GEOTH_EG200803_13.5	0.00.00	Arch*	GEOTH_EG200803_13.5	Sandy Marl	---	---	---	---	1,480	1,500	2,840
70	Point	71	GEOTH_EG200804_04.0	0.00.00	Arch*	GEOTH_EG200804_04.0	Brecco Reef Limestone	1,790	2,090	2,370	17,630	---	---	---
73	Point	74	GEOTH_EG200803_09.0	0.00.00	Arch*	GEOTH_EG200803_09.0	Calcarene	1,870	2,090	2,320	10,440	---	---	---
76	Point	77	GEOTH_EG200803_04.0	0.00.00	Arch*	GEOTH_EG200803_04.0	Calcarene	2,270	2,390	2,570	5,120	---	---	---
77	Point	78	GEOTH_MP6_05.5	0.00.00	Arch*	GEOTH_MP6_05.5	Calcarene	1,600	1,930	2,370	20,200	---	---	---
79	Point	79	GEOTH_MP6_12.0	0.00.00	Arch*	GEOTH_MP6_12.0	Calcarene	2,200	2,300	2,500	5,480	---	---	---
79	Point	80	GEOTH_MP11_0	0.00.00	Arch*	GEOTH_MP11_0	Calcarene	1,860	2,070	2,370	11,630	---	---	---
80	Point	81	GEOTH_MP6_04.0	0.00.00	Arch*	GEOTH_MP6_04.0	Calcarene	1,930	2,130	2,490	10,080	---	---	---
86	Point	87	GEOTH_20Jan2014g01	20/Nov/2014	GF	GEOTH_20Jan2014g01	Sandy Marl	---	---	---	---	1,510	1,590	5,480
87	Point	88	GEOTH_20Jan2014g03	20/Nov/2014	GF	GEOTH_20Jan2014g03	Sandstone	2,190	2,340	2,590	6,990	2,150	2,200	2,490
88	Point	89	GEOTH_20Jan2014g04	20/Nov/2014	GF	GEOTH_20Jan2014g04	Brown Silty Sand	---	---	---	---	1,550	1,620	4,430
89	Point	90	GEOTH_20Jan2014g05	20/Nov/2014	GF	GEOTH_20Jan2014g05	Sandstone	---	---	---	---	1,540	1,600	4,260
90	Point	91	GEOTH_20Jan2014g02	20/Nov/2014	GF	GEOTH_20Jan2014g02	Sandstone	---	---	---	---	1,580	1,640	3,490
91	Point	92	GEOTH_01Dec2013g01	01/Dec/2013	GF	GEOTH_01Dec2013g01	Calcarene	2,400	2,460	2,560	2,570	1,830	1,850	0,710
96	Point	99	GEOTH_01Nov2013g09	01/Nov/2013	GF	GEOTH_01Nov2013g09	Sandy Marl	---	---	---	---	---	---	---
96	Point	100	GEOTH_01Nov2013g10	01/Nov/2013	GF	GEOTH_01Nov2013g10	Calcarene	1,820	2,050	2,360	12,470	1,750	1,760	0,330
100	Point	101	GEOTH_01Nov2013g13	01/Nov/2013	GF	GEOTH_01Nov2013g13	Reddish brown sandy clay with gravel	---	---	---	---	1,490	1,750	17,570
102	Point	103	GEOTH_01Nov2013g16	01/Nov/2013	GF	GEOTH_01Nov2013g16	Brownish clayey sand	---	---	---	---	---	---	---
103	Point	104	GEOTH_01Nov2013g17	01/Nov/2013	GF	GEOTH_01Nov2013g17	Calcarene	2,130	2,290	2,530	7,490	2,030	2,050	0,650
106	Point	107	GEOTH_01Nov2013g22	01/Nov/2013	GF	GEOTH_01Nov2013g22	Fossiliferous Sandy Marl	---	---	---	---	---	---	---
107	Point	108	GEOTH_01Nov2013g23	01/Nov/2013	GF	GEOTH_01Nov2013g23	Gray sandy sil	---	---	---	---	---	---	---
109	Point	113	GEOTH_02Nov2013g05	02/Nov/2013	GF	GEOTH_02Nov2013g05	Brownish clay with gravels	---	---	---	---	---	---	---
110	Point	114	GEOTH_02Nov2013g06	02/Nov/2013	GF	GEOTH_02Nov2013g06	Secondary limestone	2,140	2,280	2,500	6,860	---	---	---
119	Point	124	GEOTH_01Nov2013g01	01/Nov/2013	GF	GEOTH_01Nov2013g01	Calcarene	2,270	2,390	2,590	5,490	---	---	---
124	Point	129	GEOTH_01Dec2013g12	01/Dec/2013	GF	GEOTH_01Dec2013g12	Calcarene	---	---	---	---	1,610	1,610	0,050
126	Point	130	GEOTH_20Jan2014g10	20/Nov/2014	GF	GEOTH_20Jan2014g10	Sandstone	2,360	2,480	2,680	5,120	2,340	2,380	1,770
126	Point	131	GEOTH_20Jan2014g11	20/Nov/2014	GF	GEOTH_20Jan2014g11	Litic sand	---	---	---	---	1,600	1,670	4,550
127	Point	132	GEOTH_20Jan2014g12	20/Nov/2014	GF	GEOTH_20Jan2014g12	Many Sandstone	2,380	2,490	2,670	4,500	2,360	2,360	2,550
128	Point	133	GEOTH_20Jan2014g13	20/Nov/2014	GF	GEOTH_20Jan2014g13	Calcarene	1,750	2,010	2,350	14,520	1,740	1,750	0,570
129	Point	134	GEOTH_20Jan2014g14	20/Nov/2014	GF	GEOTH_20Jan2014g14	Reddish silty sand	---	---	---	---	1,630	1,680	2,570
130	Point	135	GEOTH_20Jan2014g15	20/Nov/2014	GF	GEOTH_20Jan2014g15	Yellowish silty sand	---	---	---	---	1,530	1,590	3,900
135	Point	141	GEOTH_02Nov2013g12	02/Nov/2013	GF	GEOTH_02Nov2013g12	Fossiliferous Marl	---	---	---	---	---	---	---
136	Point	142	GEOTH_02Nov2013g13	02/Nov/2013	GF	GEOTH_02Nov2013g13	Calcarene	---	---	---	---	2,850	3,350	---
136	Point	144	GEOTH_02Nov2013g14	02/Nov/2013	GF	GEOTH_02Nov2013g14	Fossiliferous Sandy Marl	---	---	---	---	---	---	---
140	Point	147	GEOTH_01Dec2013g13	01/Dec/2013	GF	GEOTH_01Dec2013g13	Sandy Marl	---	---	---	---	1,310	1,350	2,810
141	Point	148	GEOTH_01Dec2013g14	01/Dec/2013	GF	GEOTH_01Dec2013g14	Calcarene	1,440	1,740	2,050	20,580	1,420	1,420	0,330
143	Point	151	GEOTH_01Nov2013g04	01/Nov/2013	GF	GEOTH_01Nov2013g04	Marl	---	---	---	---	---	---	---

Στον πίνακα ιδιοτήτων που ακολουθεί (attribute table) παρουσιάζονται οι Μέσοι Όροι των Θερμικών Χαρακτηριστικών των 170 δειγμάτων που λήφθηκαν από όλες τις λιθολογίες των Γεωλογικών Σχηματισμών.

**Πίνακας 15:** Μέσοι Όροι Θερμικών Χαρακτηριστικών των Γεωλογικών Σχηματισμών

Μέσοι όροι θερμικών Χαρακτηριστικών							
Γεωλογικοί Σχηματισμοί	Αρ.Δει	Θερμική Διαχυτότητα (ξηρή) $10^6 \text{ m}^2/\text{sec}$	Θερμική Αγωγιμότητα (ξηρή) $\text{W/mK}$	Ειδική θερμοχωρητικότητα (ξηρή) $\times 10^3 \text{ J/Kkg}$	Θερμική Διαχυτότητα (κορεσμένη) $\times 10^6 \text{ m}^2/\text{sec}$	Θερμική Αγωγιμότητα (κορεσμένη) $\text{W/mK}$	Ειδική θερμοχωρητικότητα (κορεσμένη) $\times 10^3 \text{ J/Kkg}$

<b>Kafkala</b>	1	1,215	1,820	0,600	1,220	2,215	0,796
<b>Fluvial deposits</b>	4	0,474	0,645	0,858	0,659	1,196	1,164
<b>Aeolian deposits</b>	3	0,521	0,792	0,637	0,741	1,248	0,804
<b>Marine Terrace</b>	6	0,675	1,050	0,683	0,805	1,506	0,905
<b>Apalos - Athalassa - Kakkaristra</b>	3	0,418	0,596	0,850	0,547	0,968	1,125
<b>Nicosia</b>	24	0,618	0,904	0,816	0,798	1,329	0,961
<b>Kalavaso</b>	6	0,710	1,234	0,691	0,531	0,911	0,770
<b>Pachna - Koronia Member</b>	7	0,836	1,348	0,629	0,874	1,654	0,814
<b>Pachna</b>	30	0,727	1,245	0,747	0,838	1,655	0,949
<b>Pachna - Tera Member</b>	6	1,150	1,926	0,645	1,140	2,214	0,807
<b>Lefkara</b>	14	0,798	1,440	0,728	0,874	1,693	0,895
<b>Kathikas</b>	1	0,616	1,250	1,172			
<b>Kannaviou</b>	3	0,351	0,570	0,575	0,610	1,090	0,913
<b>Upper Pillow Lavas</b>	2	0,631	1,095	0,686	0,642	1,275	0,851
<b>Lower Pillow Lavas</b>	7	0,742	1,252	0,646	0,750	1,385	0,773
<b>Basal Group basalts</b>	4	1,069	2,113	0,727	1,057	2,174	0,777
<b>Arakapas Sequence basalts</b>	1	1,014	2,075	0,756	0,936	1,945	0,779



**Χάρτης 8:** Γεωλογικός Χάρτης στον οποίο διακρίνονται τα Πλουτόνια Πετρώματα και τα πετρώματα της ακολουθίας του μανδύα, τα οποία δεσπόζουν κυρίως στο ψηλότερο μέρος της

**Πίνακας 16:** Μέσοι Όροι Θερμικών παραμέτρων Πλουτόνιων Πετρωμάτων και Πετρωμάτων της ακολουθίας του Μανδύα του οφειολιθικού συμπλέγματος του Τροόδους

Γεωλογικοί Σχηματισμοί	Αρ. Δειγμάτων	Θερμική Διαχυτότητα (ξηρή) $\times 10^6$ m <sup>2</sup> /sec	Θερμική Αγωγιμότητα (ξηρή) W/mK	Ειδική θερμοχωρητικότητα (ξηρή) $\times 10^3$ J/Kkg	Θερμική Διαχυτότητα (κορεσμένη) $\times 10^6$ m <sup>2</sup> /sec	Θερμική Αγωγιμότητα (κορεσμένη) W/mK	Ειδική θερμοχωρητικότητα (κορεσμένη) $\times 10^3$ J/Kkg
Plagiogranite	1	1,613	3,417	0,767	1,535	3,600	0,859
Gabbro	3	1,352	2,238	0,606	1,342	2,825	0,775
Pyroxenite	1	1,820	4,170	0,718	1,905	4,525	0,764
Wehrlite	2	1,299	2,938	0,822	1,288	2,878	0,820
Dunite	1	1,100	2,365	0,799	1,180	2,330	0,749
Harzburgite	3	0,868	1,711	0,751	0,808	1,768	0,808
Serpentinite	2	0,983	2,003	0,780	1,119	2,305	0,850

## ii. Ηφαιστειακά και Φλεβικά Πετρώματα

**Πίνακας 17:** Μέσοι Όροι Θερμικών παραμέτρων Ηφαιστειακών και Φλεβικών Πετρωμάτων του οφειολιθικού συμπλέγματος του Τροόδους

Γεωλ. Σχηματισμοί	Αρ. Δειγμ.	Θερμική Διαχυτότητα (ξηρή) $\times 10^6$ m <sup>2</sup> /sec	Θερμική Αγωγιμότητα (ξηρή) W/mK	Ειδική θερμοχωρητικότητα (ξηρή) $\times 10^3$ J/Kkg	Θερμική Διαχυτότητα (κορεσμένη) $\times 10^6$ m <sup>2</sup> /sec	Θερμική Αγωγιμότητα (κορεσμένη) W/mK	Ειδική θερμοχωρητικότητα (κορεσμένη) $\times 10^3$ J/Kkg
Upper Pillow	2	0,631	1,095	0,686	0,642	1,275	0,851

<b>Lavas</b>							
<b>Lower Pillow Lavas</b>	7	0,742	1,252	0,646	0,750	1,385	0,773
<b>Basal Group basalts</b>	4	1,069	2,113	0,727	1,057	2,174	0,777
<b>Arakapas Sequence basalts</b>	1	1,014	2,075	0,756	0,936	1,945	0,779
<b>Sheeted Dykes (Diabase)</b>	7	1,035	2,002	0,699	0,986	2,036	0,751

### iii. Γεωλογικοί Σχηματισμοί Κάθικα και Κανναβιού



Πηγή: Φωτογραφικό Υλικό Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου

**Εικόνα 18:** Γεωλογικοί Σχηματισμοί Κάθικα και Κανναβιού

**Πίνακας 18:** Μέσοι Όροι Θερμικών παραμέτρων Σχηματισμού Κάθικα και Κανναβιού

Γεωλογικοί Σχηματ.	Αρ. Δει.	Θερμική Διαχυτότητα (ξηρή) $\times 10^6 \text{ m}^2/\text{sec}$	Θερμική Αγωγιμότητα (ξηρή)	Ειδική θερμοχωρητικότητα (ξηρή) $10^3 \text{ J/Kkg}$	Θερμική Διαχυτότητα (κορεσμένη)	Θερμική Αγωγιμότητα (κορεσμένη)	Ειδική θερμοχωρητικότητα (κορεσμένη) $\times$
--------------------	----------	---	----------------------------	--	---------------------------------	---------------------------------	---

			W/mK		$\eta) \times 10^6$ m <sup>2</sup> /sec	$\eta)$ W/mK	10 <sup>3</sup> J/Kkg
Kathikas	1	0,616	1,250	1,172			
Kannaviou	3	0,351	0,570	0,575	0,610	1,090	0,913

#### iv. Γεωλογικός Σχηματισμός Λευκάρων



(Πηγή: Προσωπική συλλογή Vsevolod Khasanov)

**Εικόνα 19:** Συμπαγείς Κρητίδες στην παραθαλάσσια περιοχή του Πεντακώμου,

**Πίνακας 19:** Μέσοι Όροι Θερμικών παραμέτρων Σχηματισμού Λευκάρων

Γεωλογικοί Σχηματ.	Αρ. Δειγμ.	Θερμική Διαχυτότητα (ξηρή) x 10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /sec	Θερμική Αγωγιμότητα (ξηρή) W/mK	Ειδική θερμοχωρητικότητα (ξηρή) x 10 <sup>3</sup> J/Kkg	Θερμική Διαχυτότητα (κορεσμένη) x 10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /sec	Θερμική Αγωγιμότητα (κορεσμένη) W/mK
14	0,798	1,440	0,728	0,874	1,693	0,895

#### v. Σχηματισμός Πάχνας-Μέλος Κοροσιά (7 mya) και Μέλος Τέρα (22 mya)

**Πίνακας 20:** Μέσοι Όροι Θερμικών παραμέτρων Σχηματισμού Πάχνας

Γεωλογικοί Σχηματ.	Αρ. Δειγμάτων	Θερμική Διαχυτότητα (ξηρή) x 10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /sec	Θερμική Αγωγιμότητα (ξηρή) W/mK	Ειδική θερμοχωρητικότητα (ξηρή) x 10 <sup>3</sup> J/Kkg	Θερμική Διαχυτότητα (κορεσμένη)	Θερμική Αγωγιμότητα (κορεσμένη)	Ειδική θερμοχωρητικότητα (κορεσμένη)

					$\eta) \times 10^6$ m <sup>2</sup> /sec	$\eta) \text{ W/mK}$	$\eta) \times 10^3$ J/Kkg
<b>Pachna - Koronia Member</b>	7	0,836	1,348	0,629	0,874	1,654	0,814
<b>Pachna</b>	30	0,727	1,245	0,747	0,838	1,655	0,949
<b>Pachna - Tera Member</b>	6	1,150	1,926	0,645	1,140	2,214	0,807



**Εικόνα 20:** Υφαλογενής ασβεστόλιθοι, Γεωλογικού Σχηματισμού Πάχνας (7-5.3 mya)

**vi. Σχηματισμός Καλαβασού-γύψοι και γυψούχες μάργες, 150 m**

**Πίνακας 21:** Μέσοι Όροι Θερμικών παραμέτρων Σχηματισμού Καλαβασού

Γεωλογικό ί Σχηματισμ οί	Αρ.Δειγμ ά.	Θερμική Διαχυτότητα(ξηρ ή) $\times 10^6$ m <sup>2</sup> /sec	Θερμική Αγωγιμότητ α (ξηρή) W/mK	Ειδική θερμοχωρητικότη τα (ξηρή) $\times 10^3$ J/Kkg	Θερμική Διαχυτότη τα (κορεσμέν η) $\times 10^6$ m <sup>2</sup> /sec	Θερμική Αγωγιμότητ α (κορεσμένη) W/mK	Ειδική θερμοχωρητ ικότητα (κορεσμένη) $\times 10^3$ J/Kkg
<b>Kalavastos</b>	6	0,710	1,234	0,691	0,531	0,911	0,770



(Πηγή: Φωτογραφικό Υλικό Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου)

**Εικόνα 21:** Γύψοι Σχηματισμού Καλαβασού

**vii. Γεωλογικός Σχηματισμός Λευκωσίας και Νεότερα Ιζήματα (5 – 2 mya)**



(Πηγή: Φωτογραφικό Υλικό Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου)

**Εικόνα 22:** Απολιθωματοφόροι Ψαμμίτες του Σχηματισμού Λευκωσίας

**Πίνακας 22:** Μέσοι Όροι Γεωλογικού Σχηματισμού Λευκωσίας και νεότερων ιζημάτων

Γεωλ.Σχημ ατισμοί	Αρ.Δειγ	Θερμική Διαχυτότητα (ξηρή) x 10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /sec	Θερμική Αγωγιμότη (ξηρή) W/mK	Ειδική θερμοχωρητικότ ητα (ξηρή) x 10 <sup>3</sup> J/Kkg	Θερμική Διαχυτότη (κορεσμέν η) x 10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /sec	Θερμική Αγωγιμότη (κορεσμένη) W/mK	Ειδική θερμοχωρητι κότητα (κορεσμένη) x 10 <sup>3</sup> J/Kkg
Kafkala	1	1,215	1,820	0,600	1,220	2,215	0,796
Fluvial deposits	4	0,474	0,645	0,858	0,659	1,196	1,164
Aeolian deposits	3	0,521	0,792	0,637	0,741	1,248	0,804
Marine	6	0,675	1,050	0,683	0,805	1,506	0,905

<b>Terrace</b>							
<b>Apalos</b>	-						
<b>Athalassa</b>	-						
<b>Kakkaristra</b>	3	0,418	0,596	0,850	0,547	0,968	1,125
<b>Nicosia</b>	24	0,618	0,904	0,816	0,798	1,329	0,961

#### **4.4 Γεωστατική Μέθοδος Βέλτιστης Παρεμβολής ή Γεωστατική Μέθοδος χωρικής συσχέτισης –Kriging**

Για την εκπόνηση των χαρτών στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Kriging. Το όνομα της μεθόδου δόθηκε από τον προς τιμή του νοτιοαφρικανού μεταλλειολόγου μηχανικού D.G. Krige, ο οποίος είναι πρωτοπόρος στην εφαρμογή στατιστικών μεθόδων στη διερεύνηση των κοιτασμάτων ορυκτών.

Η μέθοδος αυτή αποτελεί την πιο διαδεδομένη γεωστατική μέθοδο χωρικής συσχέτισης, που εφαρμόζεται στα περισσότερα λογισμικά πακέτα GIS. Ουσιαστικά πρόκειται για περιοχοποίηση της πληροφορίας (Johnston et al., 2001).

Η έννοια της περιοχοποιημένης μεταβλητής δηλώνει την ιδιότητα της μεταβλητής να έχει χαρακτήρα ενδιάμεσο, ανάμεσα στην πραγματικά τυχαία μεταβλητή και την τελείως προσδιοριστική μεταβλητή. Αυτή η περίπτωση παρουσιάζεται σε πολλά φαινόμενα που εξελίσσονται στο χώρο και η γραφική απεικόνιση της χαρακτηριστικής μεταβλητής αποτελεί μια συνεχή επιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή τα κοντινά σημεία παρουσιάζουν συσχέτιση, αφού η μεταβλητή περιγράφει μια συνεχή επιφάνεια, αλλά απομακρυσμένα μεταξύ τους σημεία δεν έχουν καμία απολύτως συσχέτιση. Η μέθοδος αυτή μας επιτρέπει να διακρίνουμε τοπικά χαρακτηριστικά της μεταβλητής επιτρέποντάς μας τον προσδιορισμό της κατά περιοχές.

Ο βαθμός της χωρικής συνέχειας μιας περιοχοποιημένης μεταβλητής μπορεί να παρασταθεί από ένα διάγραμμα τύπου X-Y όπου στον άξονα των x είναι η απόσταση και στον άξονα των y είναι το ήμισυ της διασποράς της περιοχοποιημένης μεταβλητής για απόσταση των σημείων του πεδίου ίση με x. Η συνάρτηση αυτή και η γραφική της παράσταση καλείται "ήμιμεταβλητόγραμμα".

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας η εκπόνηση των χαρτών πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή Kriging σε σημεία δηλαδή σε συγκεκριμένες τιμές. Έγινε προσπάθεια

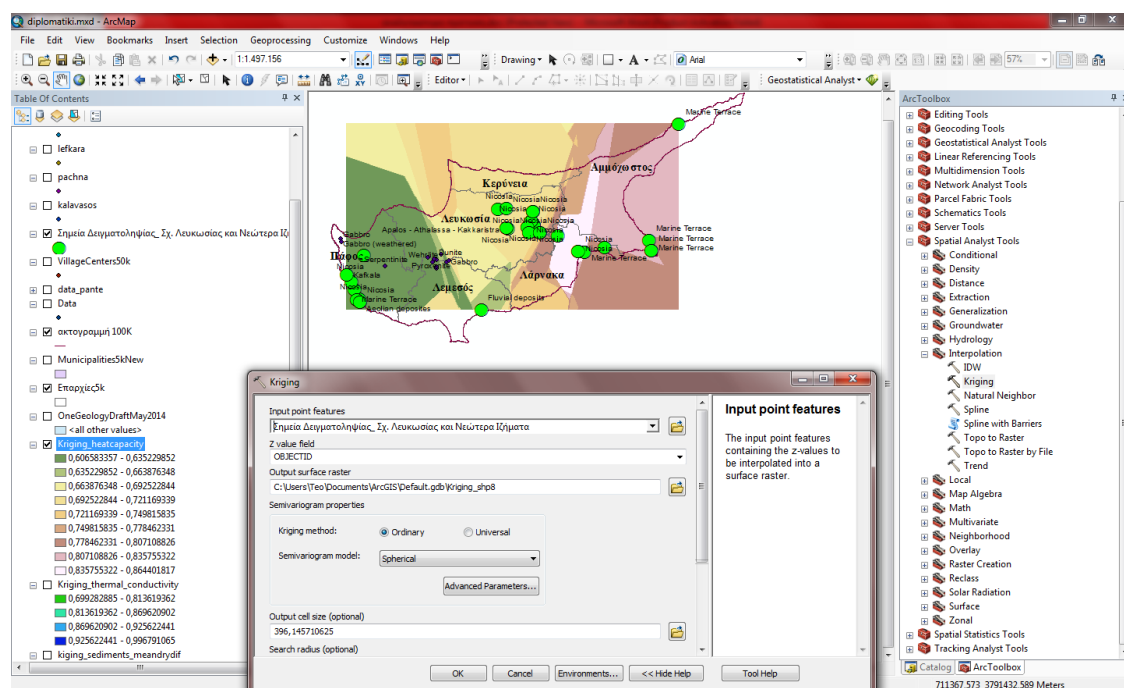
εκτίμηση της τιμής ενός χαρακτηριστικού σε μια συγκεκριμένη θέση, με βάση στοιχεία τα οποία προέρχονται από σημεία που βρίσκονται στην άμεση γειτονική περιοχή του.

Για τη διαδικασία αυτή ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

1. Ορισμός της τοπικής περιοχής εκτίμησης ή την αποδεκτή «γειτονία» γύρω από το υπό εκτίμηση σημείο.
2. Εύρεση του αριθμού των σημείων που οι τιμές τους θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για την εκτίμηση.
3. Επιλογή των σημείων αυτών από το σύνολο των σημείων της περιοχής μελέτης.
4. Επιλογή της μαθηματικής συνάρτησης που αντιπροσωπεύει τη διαφοροποίηση της τιμής του χαρακτηριστικού, δηλαδή τη διαδικασία εκτίμησης

Η μέθοδος Kriging στο ArcGIS10 είναι δυνατή μέσα από το ArcToolbox → Spatial Analyst Tools → Interpolation → Kriging

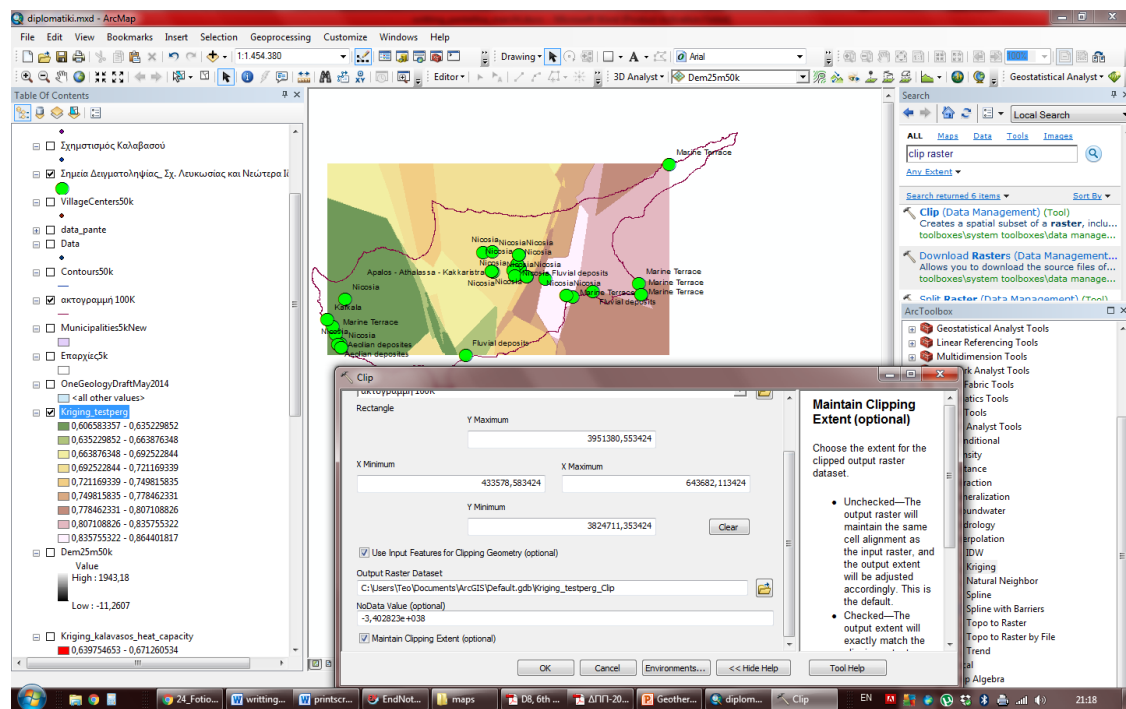
Τα βήματα και το αποτέλεσμα της Γεωστατικής Μεθόδου φαίνονται στην πιο κάτω εικόνα



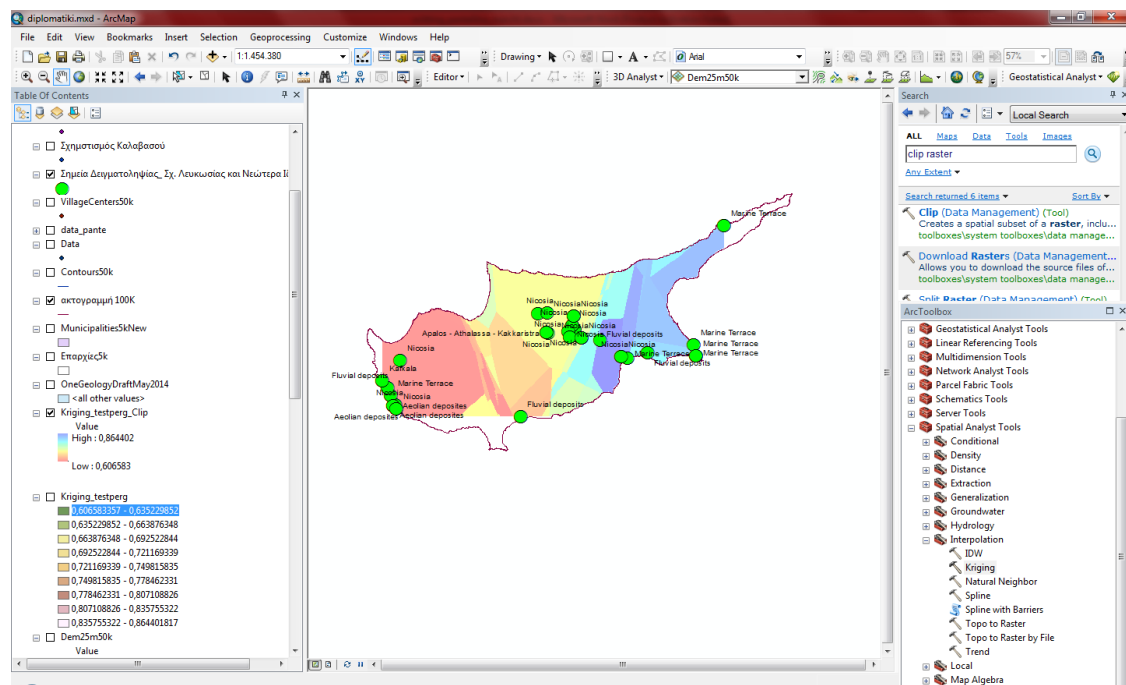
**Εικόνα 23:**Επιφάνεια εργασίας Λογισμικού ArcGIS 10- Εφαρμογή Μεθόδου Kriging

Το αποτέλεσμα της Γεωστατικής Μεθόδου Χωρικής Συσχέτισης –Kriging φαίνεται στην πιο πάνω εικόνα και όπως αναφέρθηκε πιο πάνω η μέθοδος αυτή ουσιαστικά παρουσιάζει τη διασπορά μίας περιοχοποιημένης μεταβλητής.

Ένα σφάλμα που παρουσιάστηκε με την εφαρμογή της μεθόδου αυτής είναι ότι τα όρια του Kriging ήταν εκτός των ορίων της ακτογραμμής του νησιού. Για την επίλυση του προβλήματος εφαρμόστηκε το εργαλείο "Clip" για να περιοριστεί το αποτέλεσμα της μεθόδου στα όρια της ακτογραμμής όπως φαίνεται στην πιο κάτω εικόνα.



Εικόνα 24: Σφάλμα ορίων Kriging



Εικόνα 25: Εφαρμογή εργαλείου Clip για περιορισμό των ορίων του Kriging στα όρια της ακτογραμμής

Για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων των γεωθερμικών παραμέτρων των λιθολογιών σε αρκετές περιπτώσεις πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις. Αφού έγινε ο υπολογισμός των μέσων όρων των τριών αυτών μετρήσεων κάθε δείγματος εφαρμόστηκε στα ξηρά δείγματα η μέθοδος Kriging για τη Θερμικής Διαχυτότητας, της Θερμικής Αγωγιμότητας, της Πυκνότητας και τέλος της Ειδική Θερμοχωρητικότητα. Θεωρήθηκε προτιμότερη η επιλογή και επεξεργασία των θερμικών παραμέτρων ξηρής μάζας, καθώς στην αβαθή γεωθερμία δεν υφίσταται κορεσμός σε υγρασία. Συνεπώς, τα εργαστηριακά αποτελέσματα σε αυτά τα δείγματα δίνουν τις χαμηλότερες τιμές θερμικών παραμέτρων σε σχέση με τα κορεσμένα δείγματα.

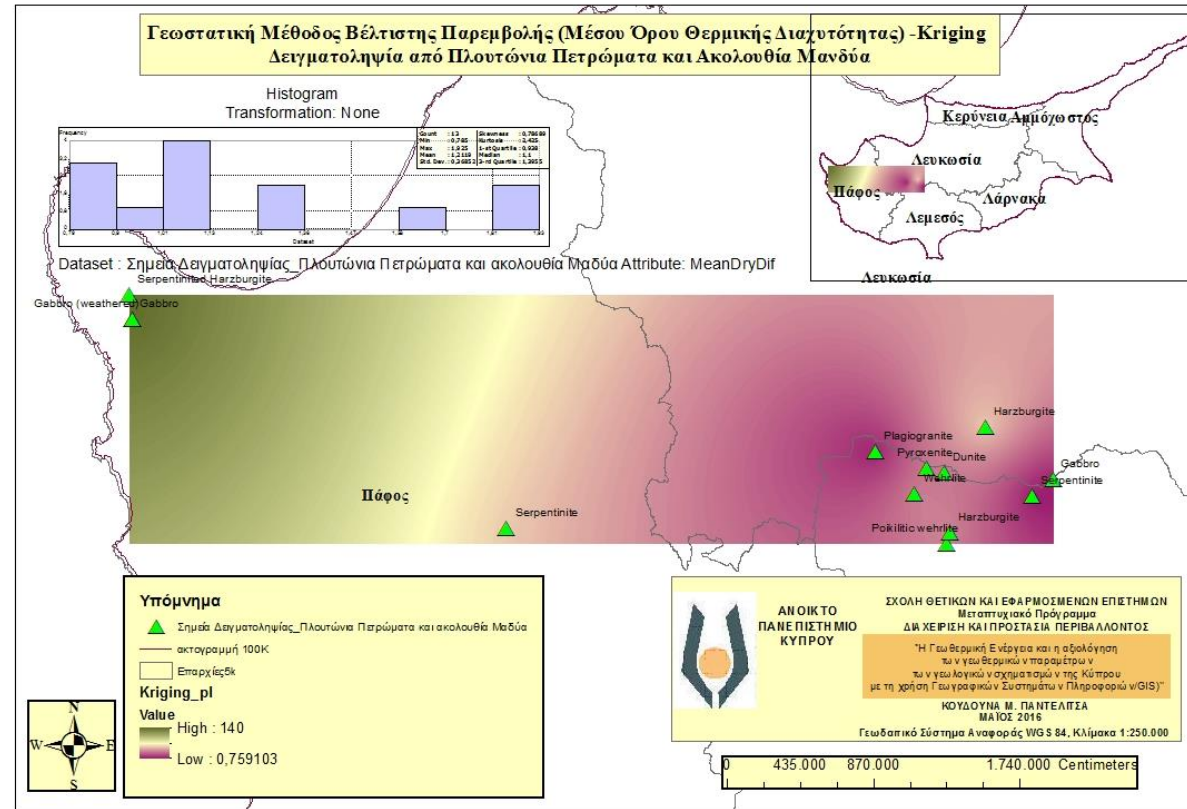
Ακολούθως παρουσιάζονται οι χάρτες στους οποίους εφαρμόστηκε η Γεωστατική Μέθοδος Βέλτιστης Παρεμβολής ή Γεωστατική Μέθοδος χωρικής συσχέτισης –Kriging.

## 4.5 Εργαστηριακές Μέθοδοι και παρουσία αποτελεσμάτων με τη χρήση των ΓΣΠ

### 4.5.1 Γεωστατική Μέθοδος Παρεμβολής (Kriging)-Μέσου όρου Θερμικής Διαχυτότητας (Thermal Diffusivity $\times 10^6 \text{ m}^2/\text{sec}$ )

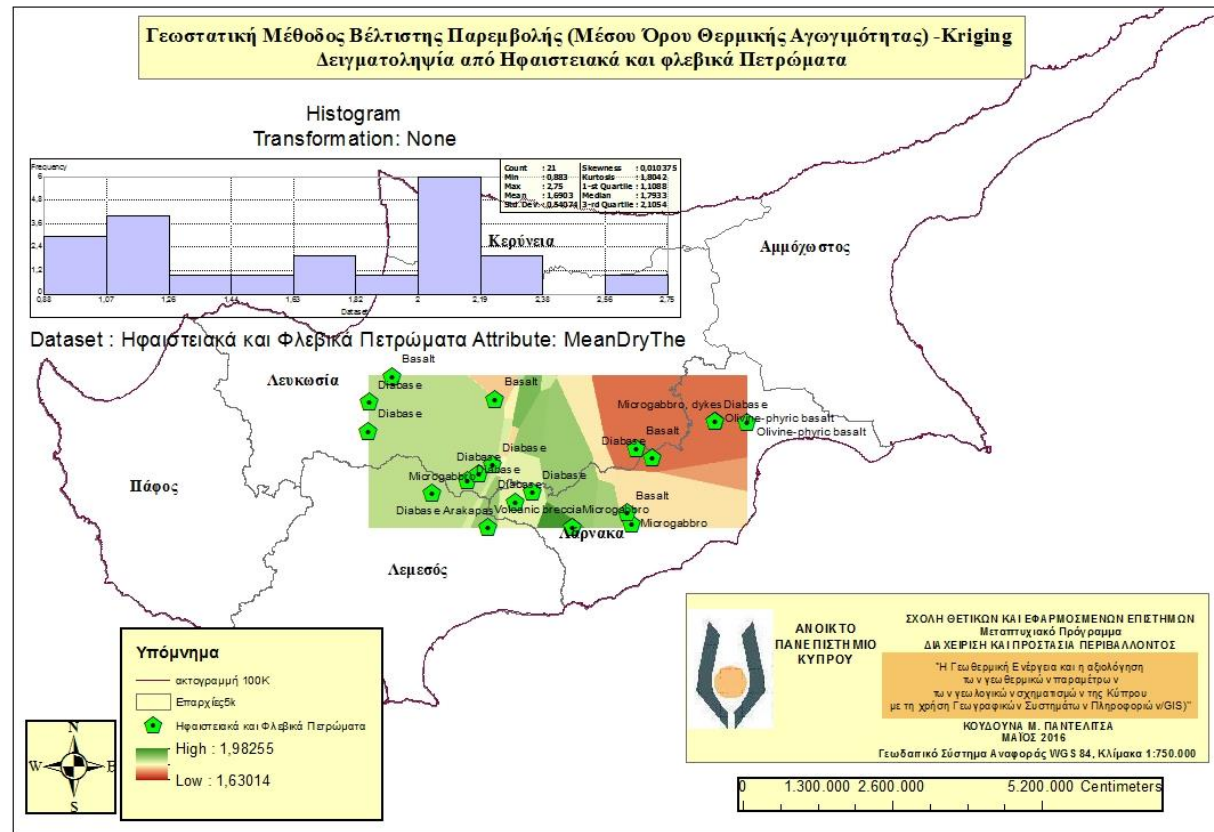
i.

#### Πλουτώνια Πετρώματα και Ακολουθία του Μανδύα



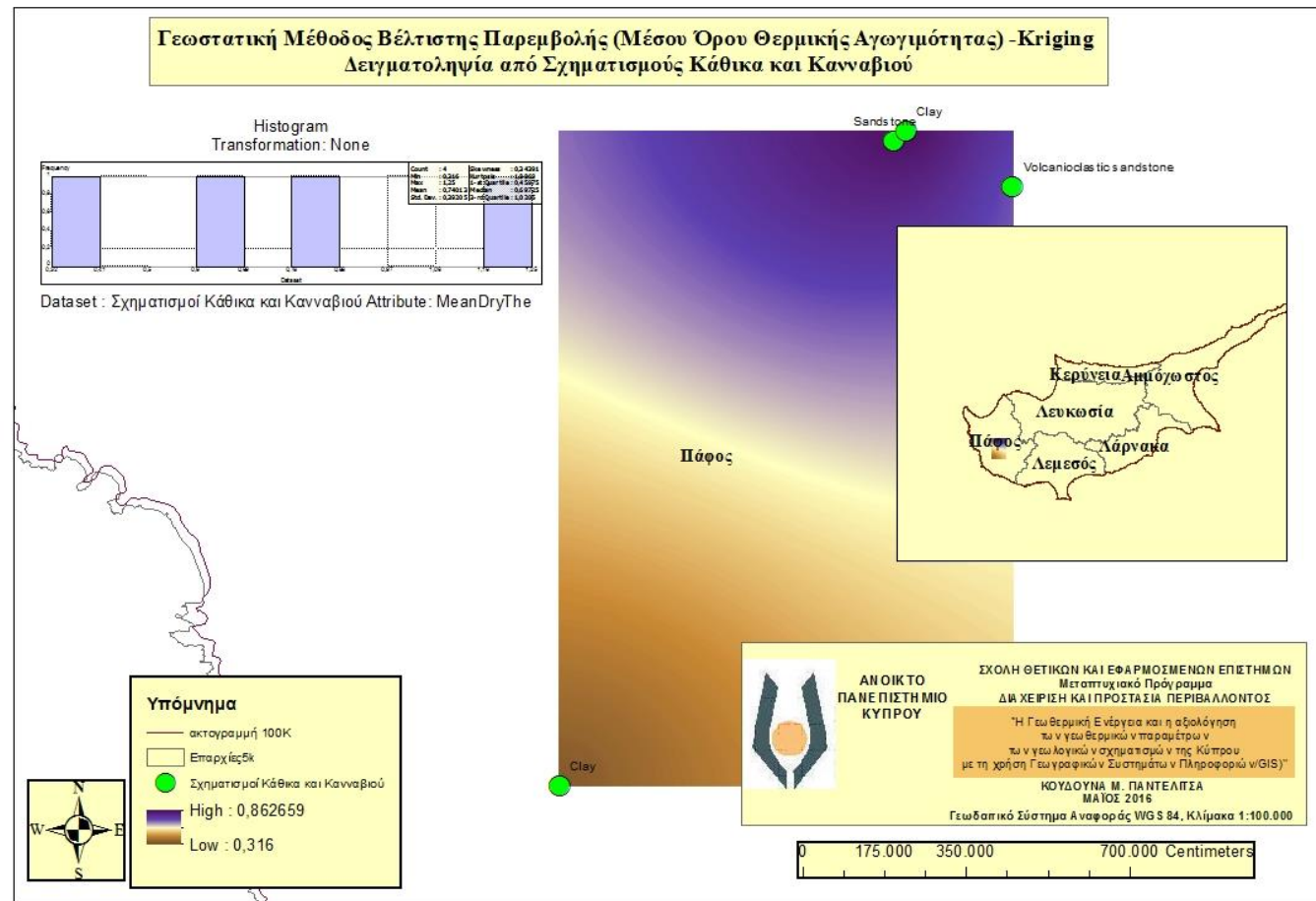
**Χάρτης 9:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου όρου θερμικής Διαχυτότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Πλουτώνια πετρώματα και Ακολουθία του μανδύα

## ii. Ηφαιστειακά και Φλεβικά Πετρώματα



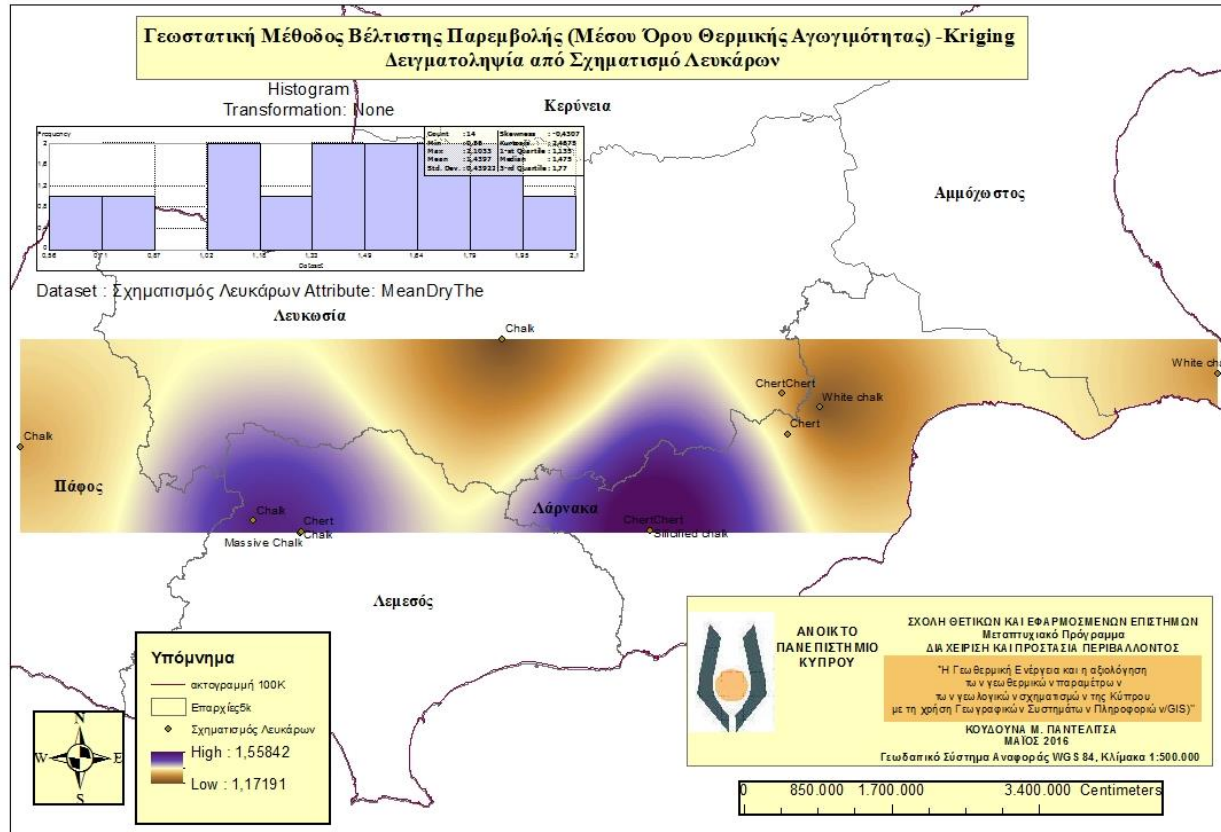
**Χάρτης 10:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου όρου θερμικής Διαχυτότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Ηφαιστειακά και Φλεβικά Πετρώματα

### iii. Σχηματισμοί Κάθικα και Κανναβιού



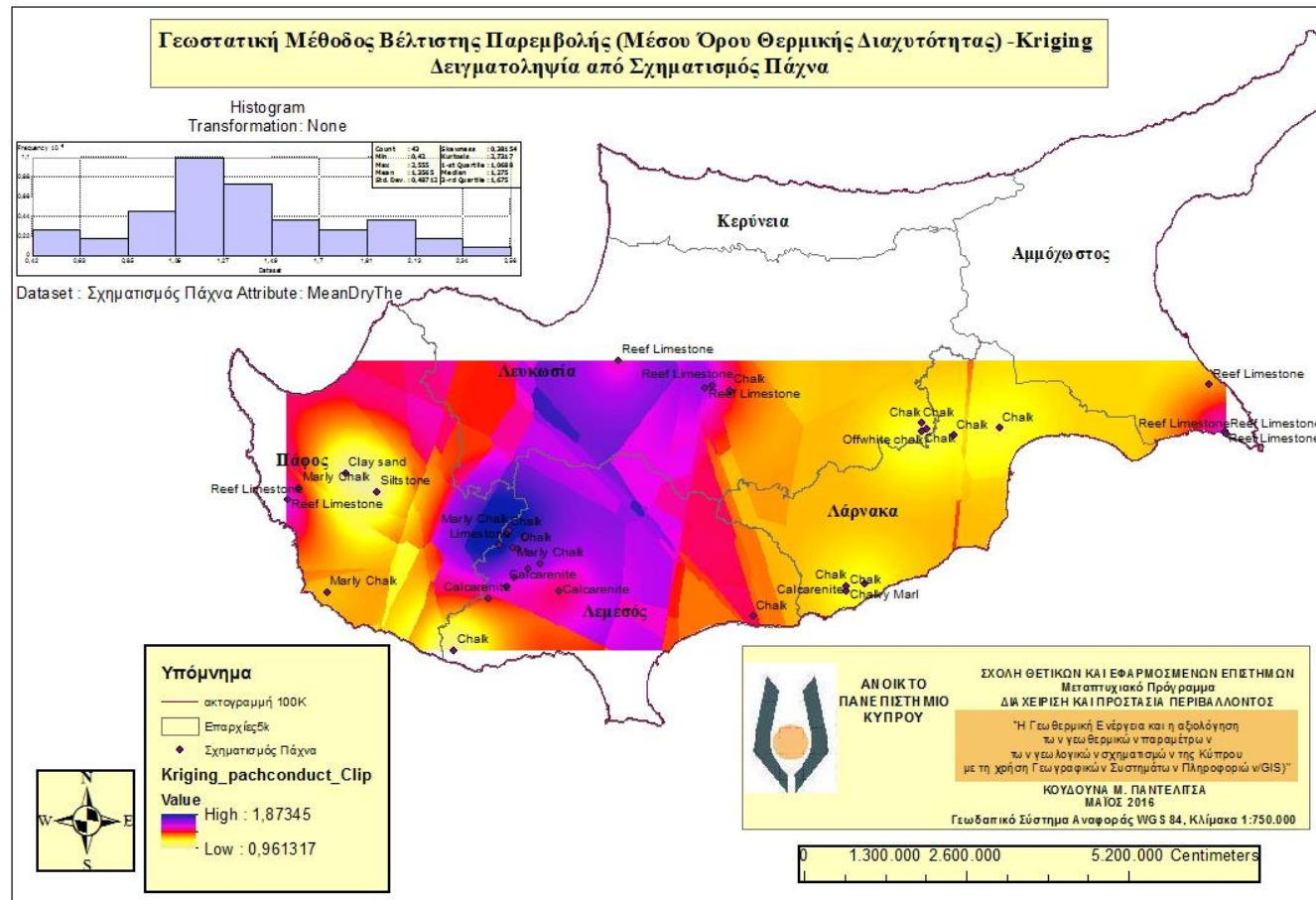
**Χάρτης 11:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου όρου θερμικής Διαχυτότητας στα σημεία δειγματοληψίας από πετρώματα των Σχηματισμών Κάθικα και Κανναβιού

#### iv. Σχηματισμός Λευκάρων



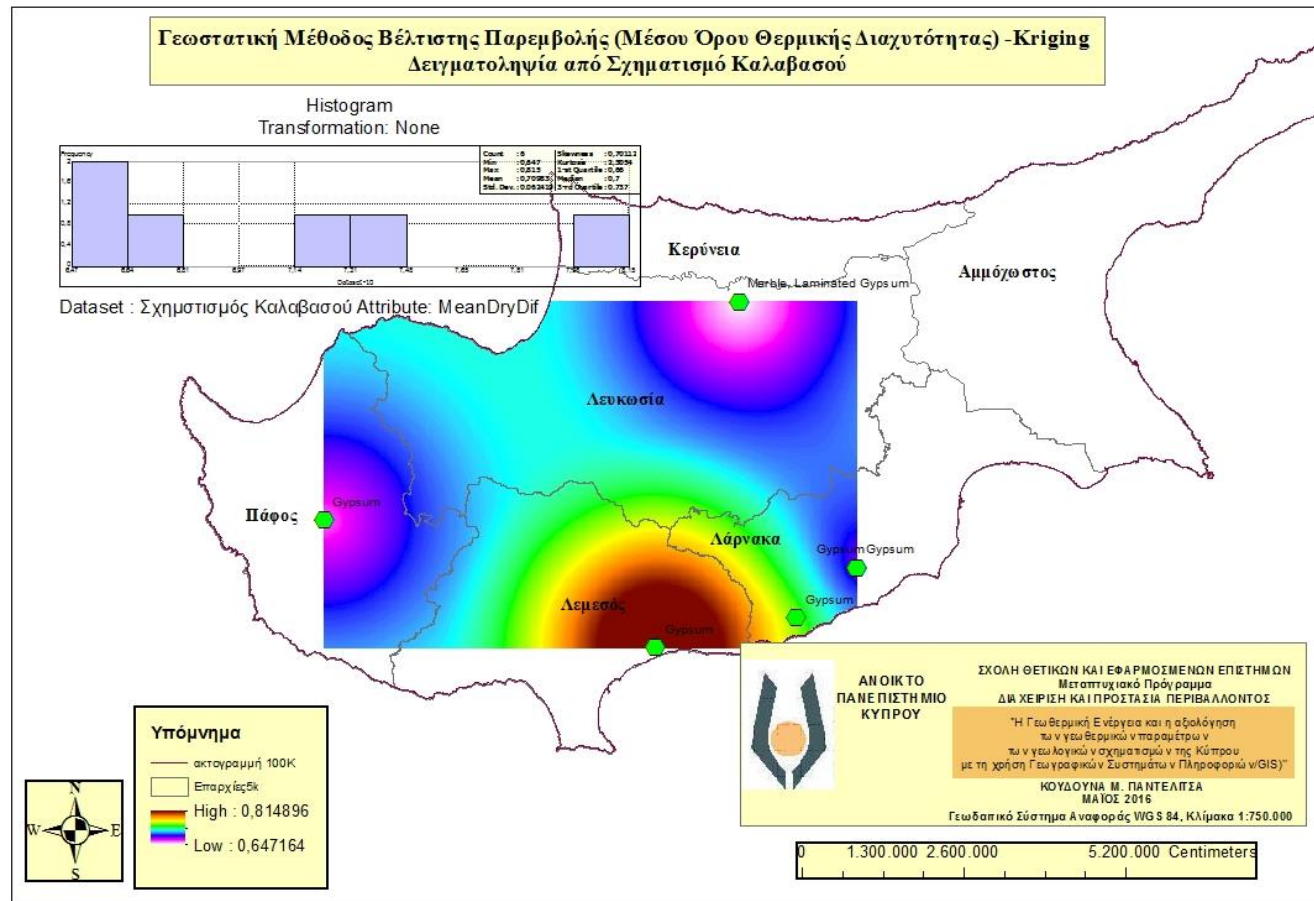
**Χάρτης 12:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου όρου θερμικής Διαχυτότητας στα σημεία δειγματοληψίας από πετρώματα του Σχηματισμού των Λευκάρων

ν. Σχηματισμός Πάχνα-Υφαλογενής Ασβεστόλιθοι Μέλους Κορονιά (ηλικίας 7mya) και Μέλους Τέρα (22mya)



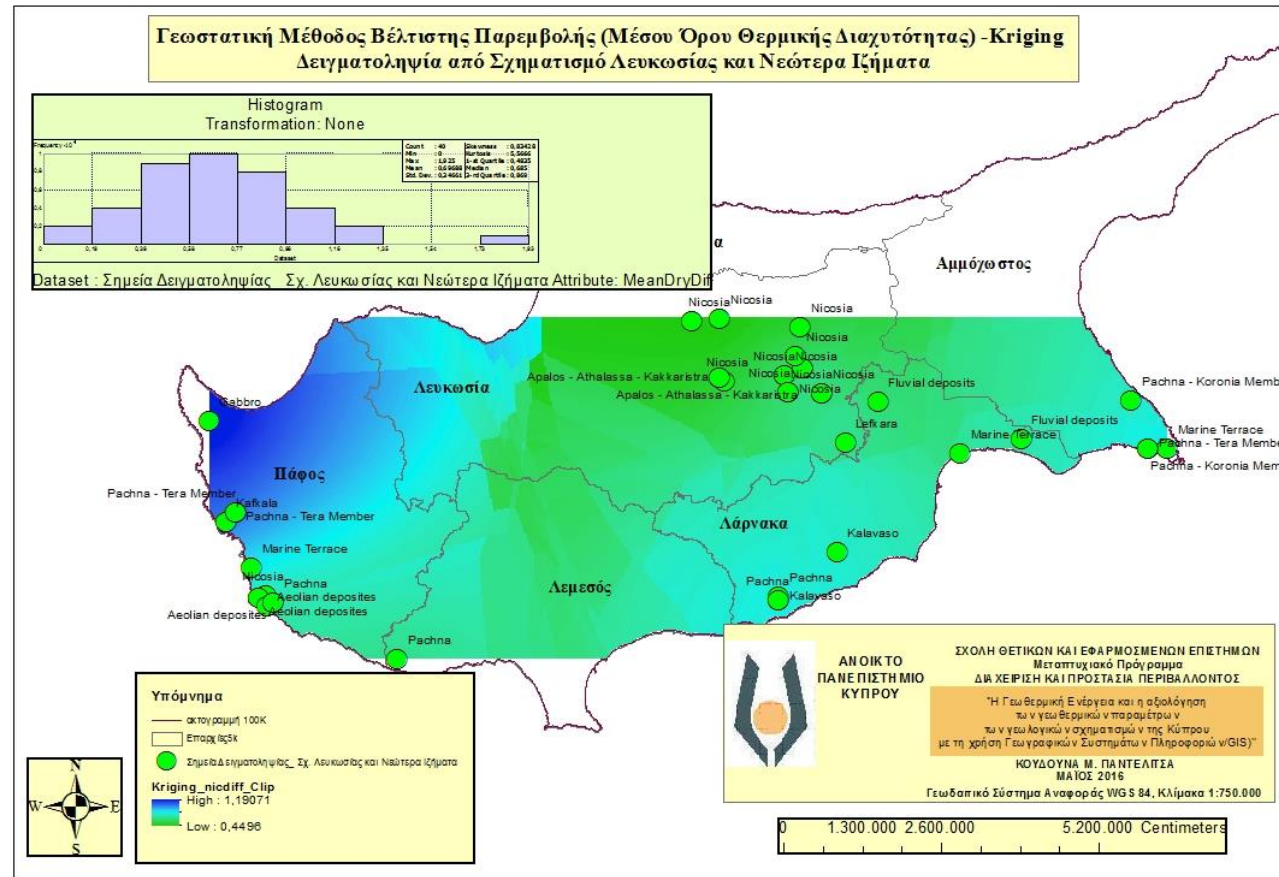
**Χάρτης 13:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου όρου θερμικής Διαχυτότητας στα σημεία δειγματοληψίας από πετρώματα του Πάχνα-Υφαλογενής Ασβεστόλιθοι Μέλους Κορονιά και Μέλους Τέρα

vi. Σχηματισμός Καλαβασού (7-5,3mya)



**Χάρτης 14:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου όρου θερμικής Διαχυτότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού Καλαβασού

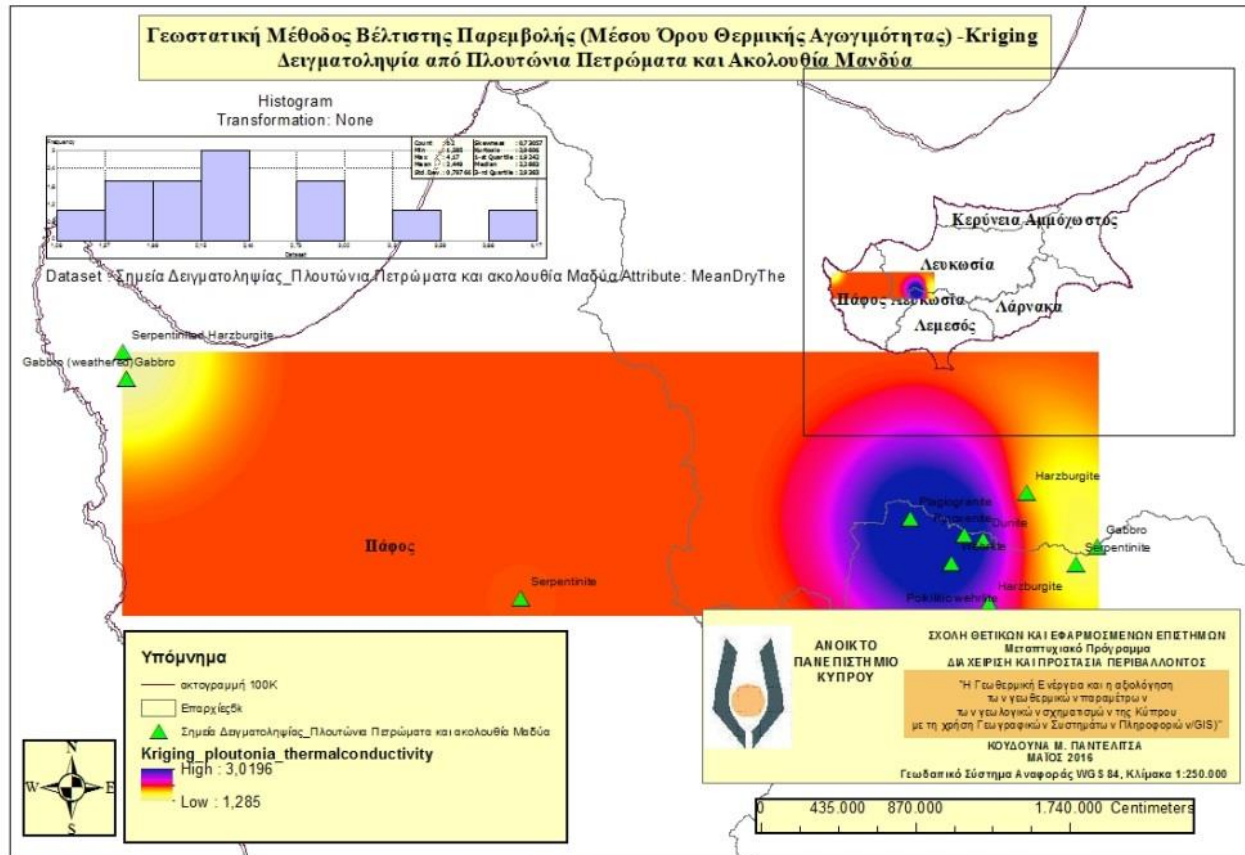
vii. Σχηματισμός Λευκωσίας και νεότερα ιζήματα (5-2mya)



**Χάρτης 15:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου Όρου Θερμικής Διαχυτότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού Λευκωσίας και των νεότερων ιζημάτων (5-2mya)

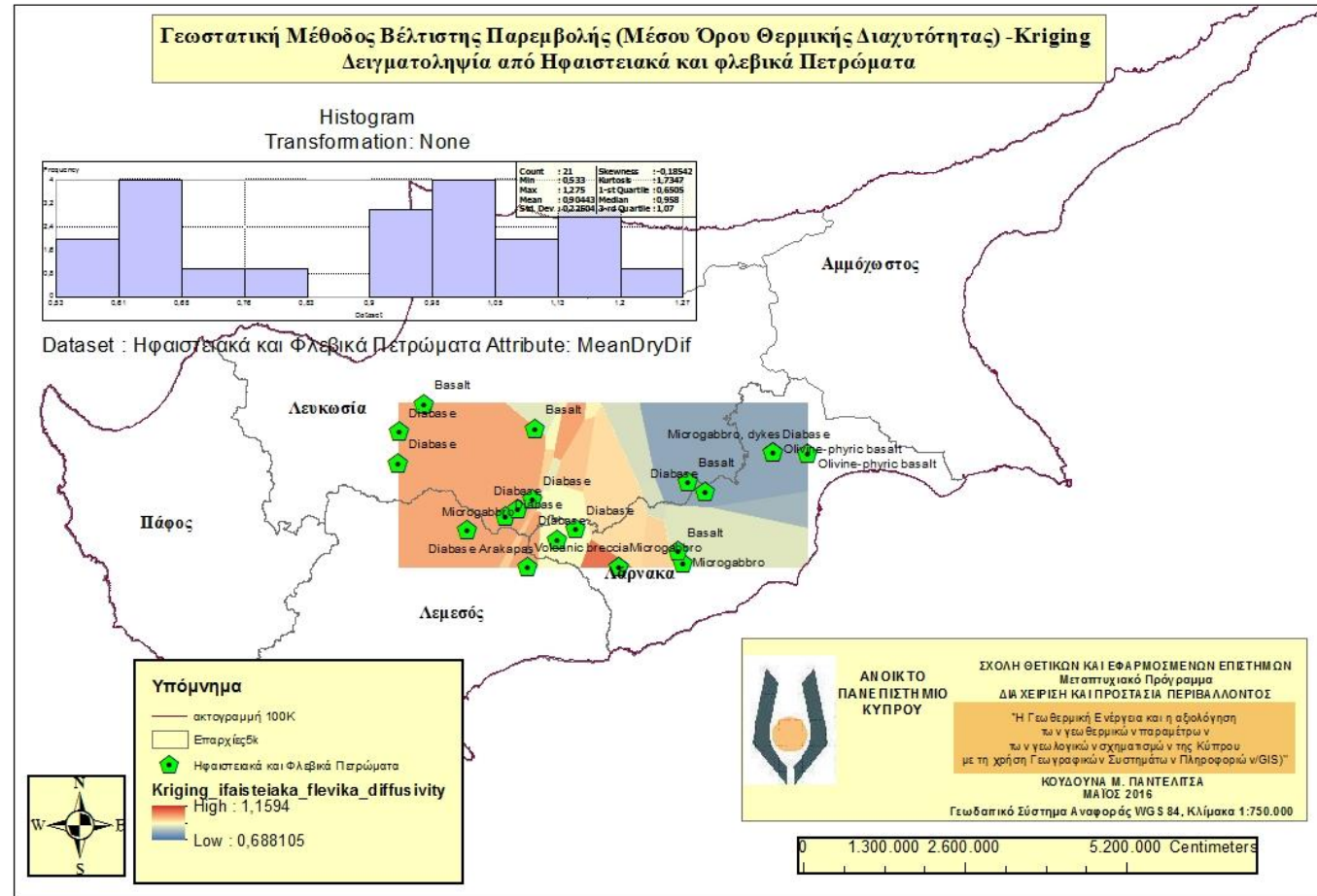
#### 4.5.2 Γεωστατική Μέθοδος Παρεμβολής (Kriging)-Μέσου όρου Θερμικής Αγωγιμότητας , λ (Thermal Conductivity W/mK)

##### ι. Πλουτώνια Πετρώματα και Ακολουθία του Μανδύα



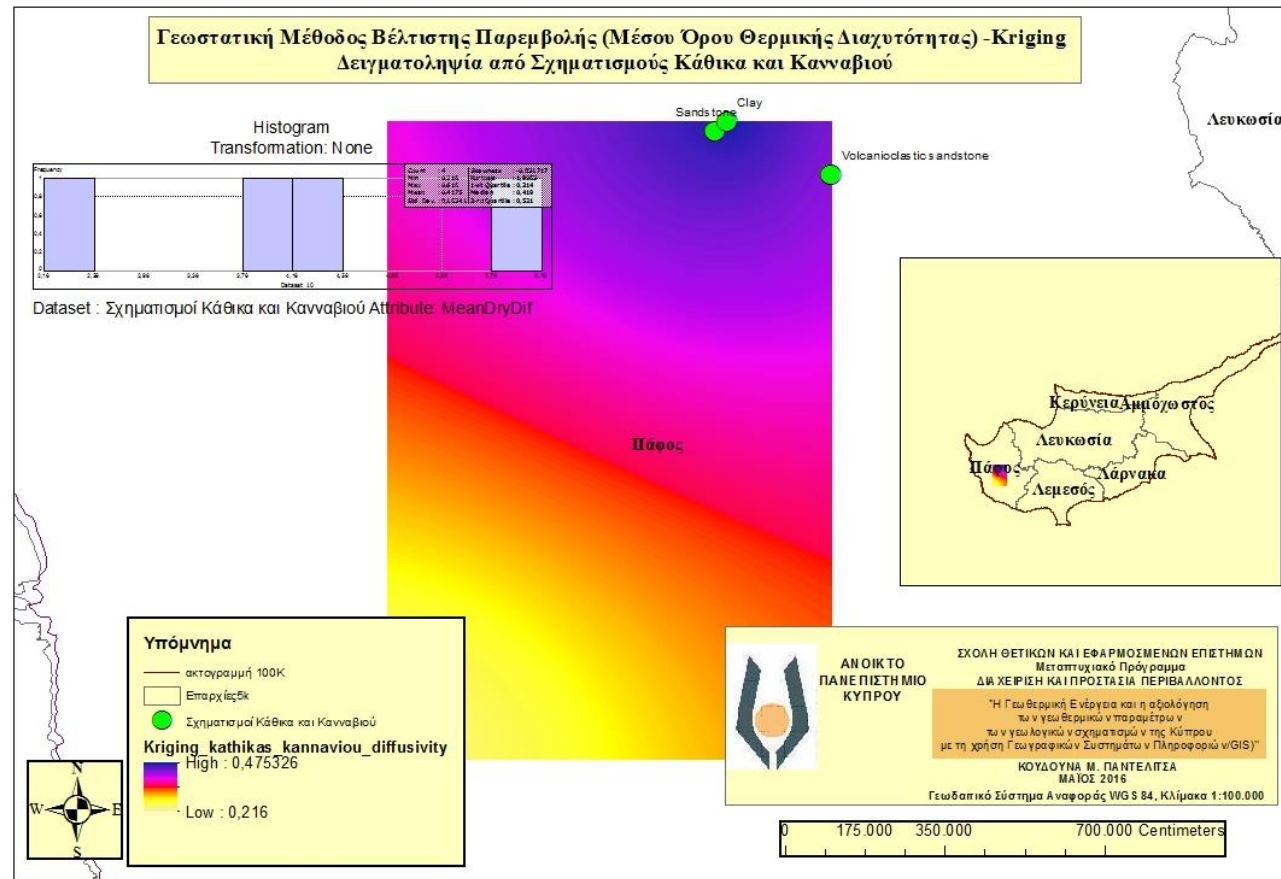
**Χάρτης 16:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου όρου Θερμικής Αγωγιμότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες των Πλουτώνιων πετρωμάτων και των Πετρωμάτων του Μανδύα

## ii. Ηφαιστειακά και Φλεβικά Πετρώματα



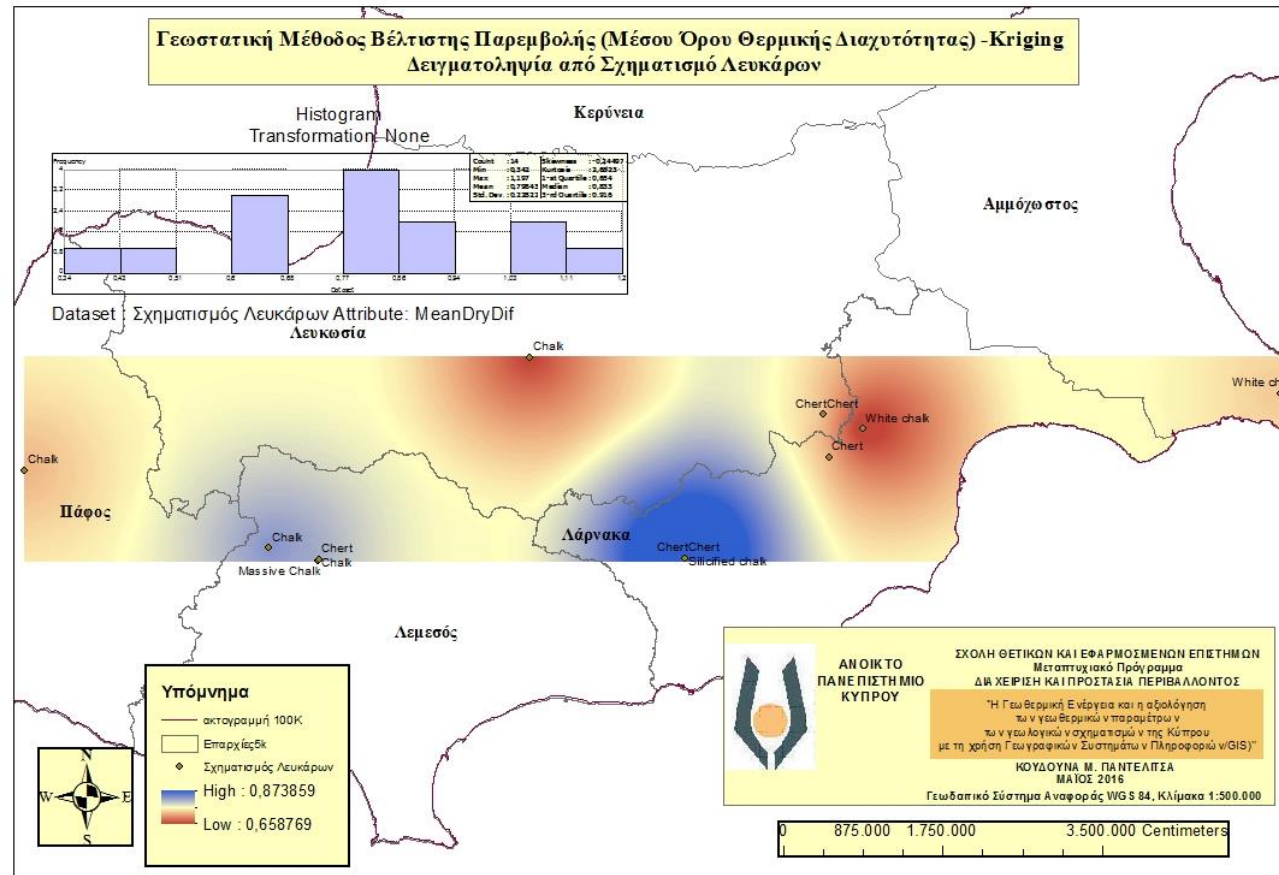
**Χάρτης 17:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου Όρου Θερμικής Αγωγιμότητας στα σημεία δειγματοληψίας από τα Ηφαιστειακά και Φλεβικά Πετρώματα

### iii. Σχηματισμοί Κάθικα και Κανναβιού



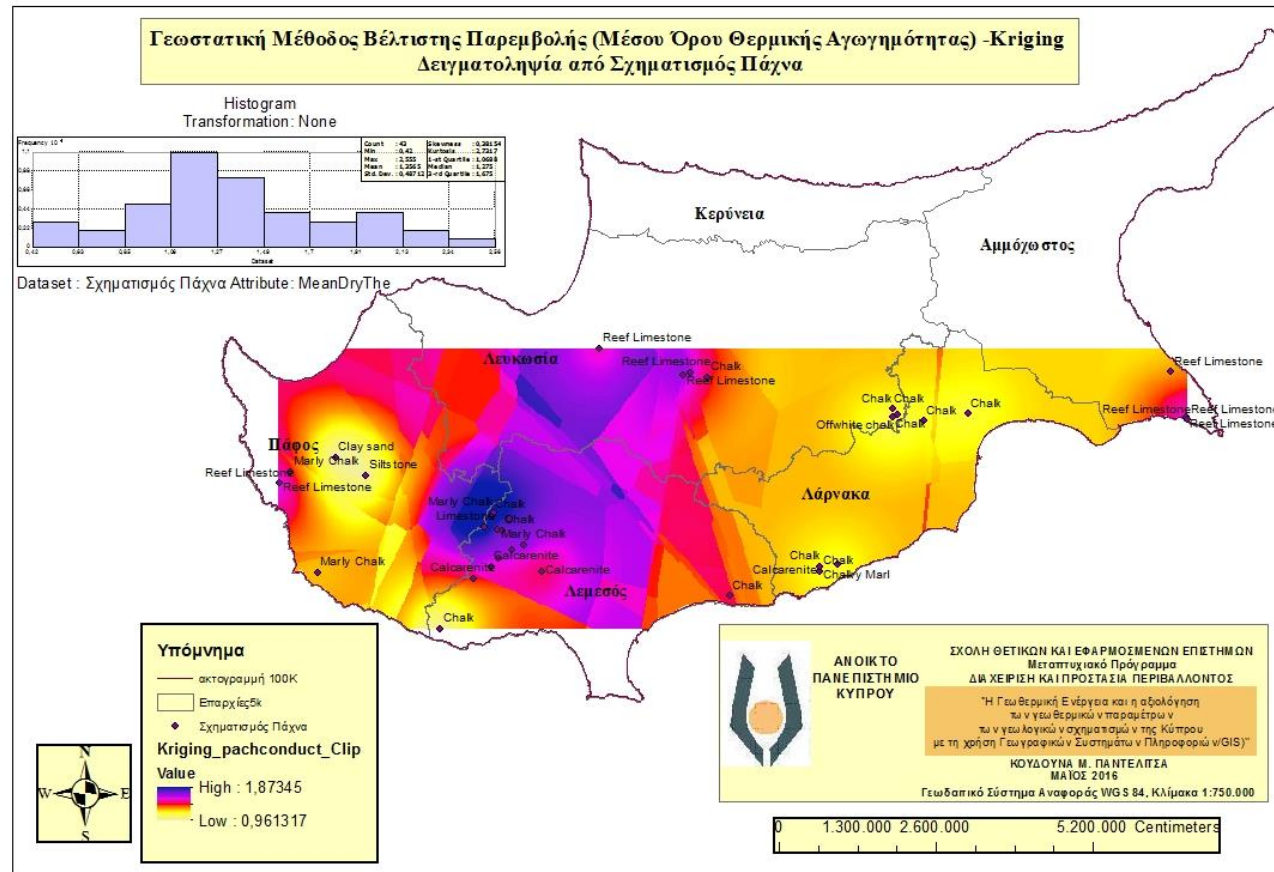
**Χάρτης 18:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου Όρου Θερμικής Αγωγιμότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες των Σχηματισμών Κάθικα και Κανναβιού

#### iv. Σχηματισμός Λευκάρων



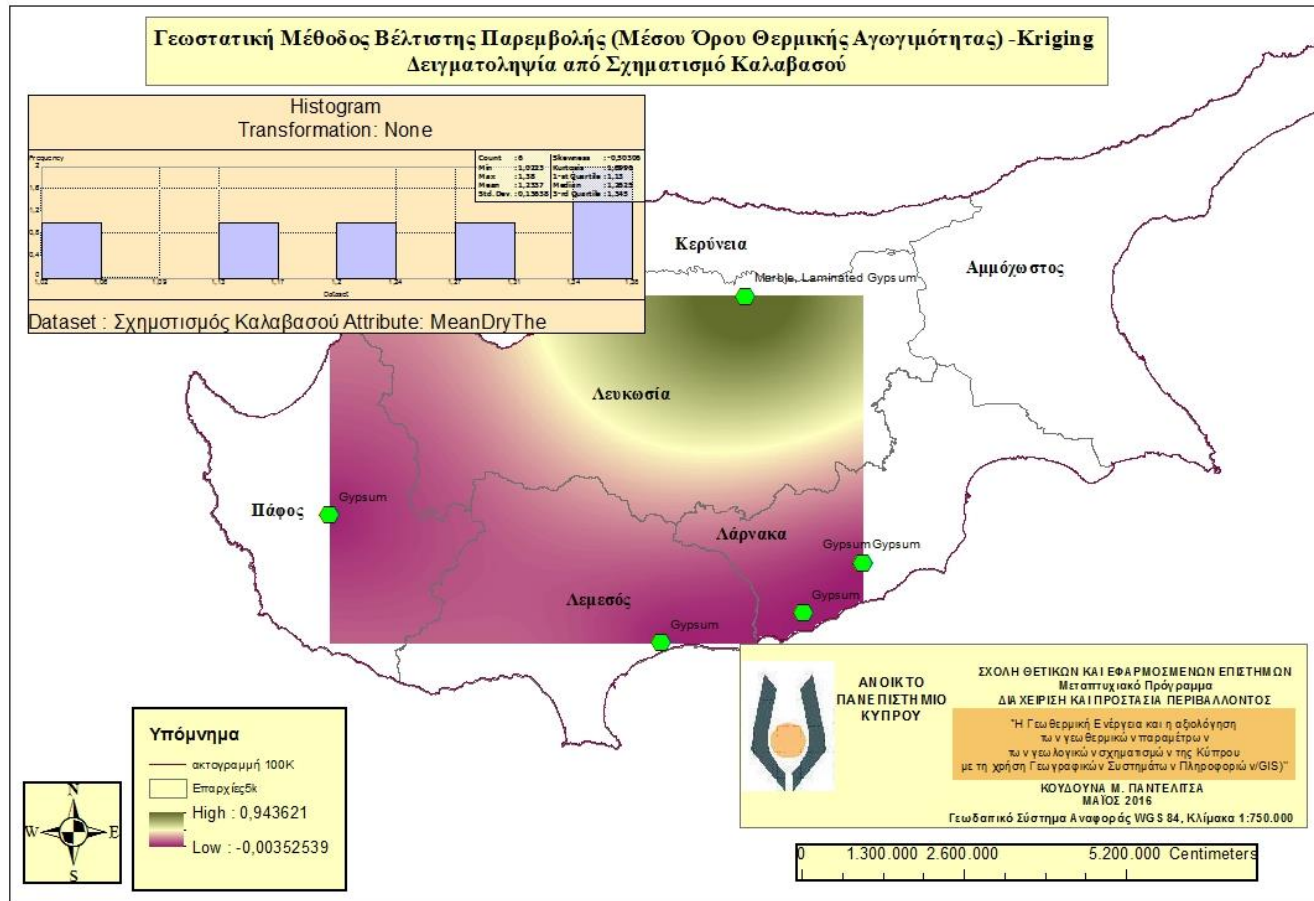
**Χάρτης 19:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου Όρου Θερμικής Αγωγιμότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού των Λευκάρων

ν. Σχηματισμός Πάχνα-Υφαλογενείς Ασβεστόλιθοι Μέλους Κορονιά (ηλικίας 7μγα) και Μέλους Τέρα (22μγα)



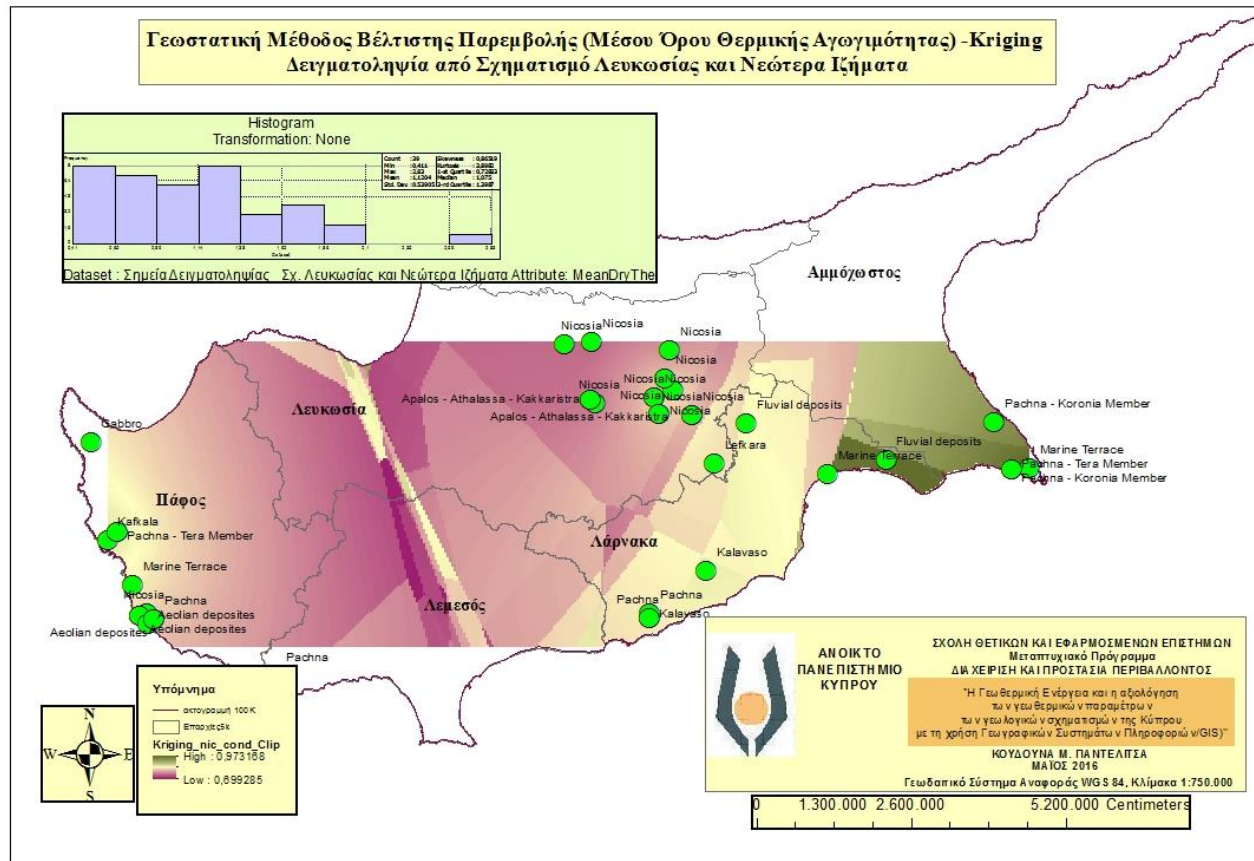
**Χάρτης 20:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου Όρου Θερμικής Αγωγιμότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμός Πάχνα-Υφαλογενείς Ασβεστόλιθοι Μέλους Κορονιά

vi. Σχηματισμός Καλαβασού (7-5,3mγα)



**Χάρτης 21:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου Όρου Θερμικής Αγωγιμότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμός Καλαβασού

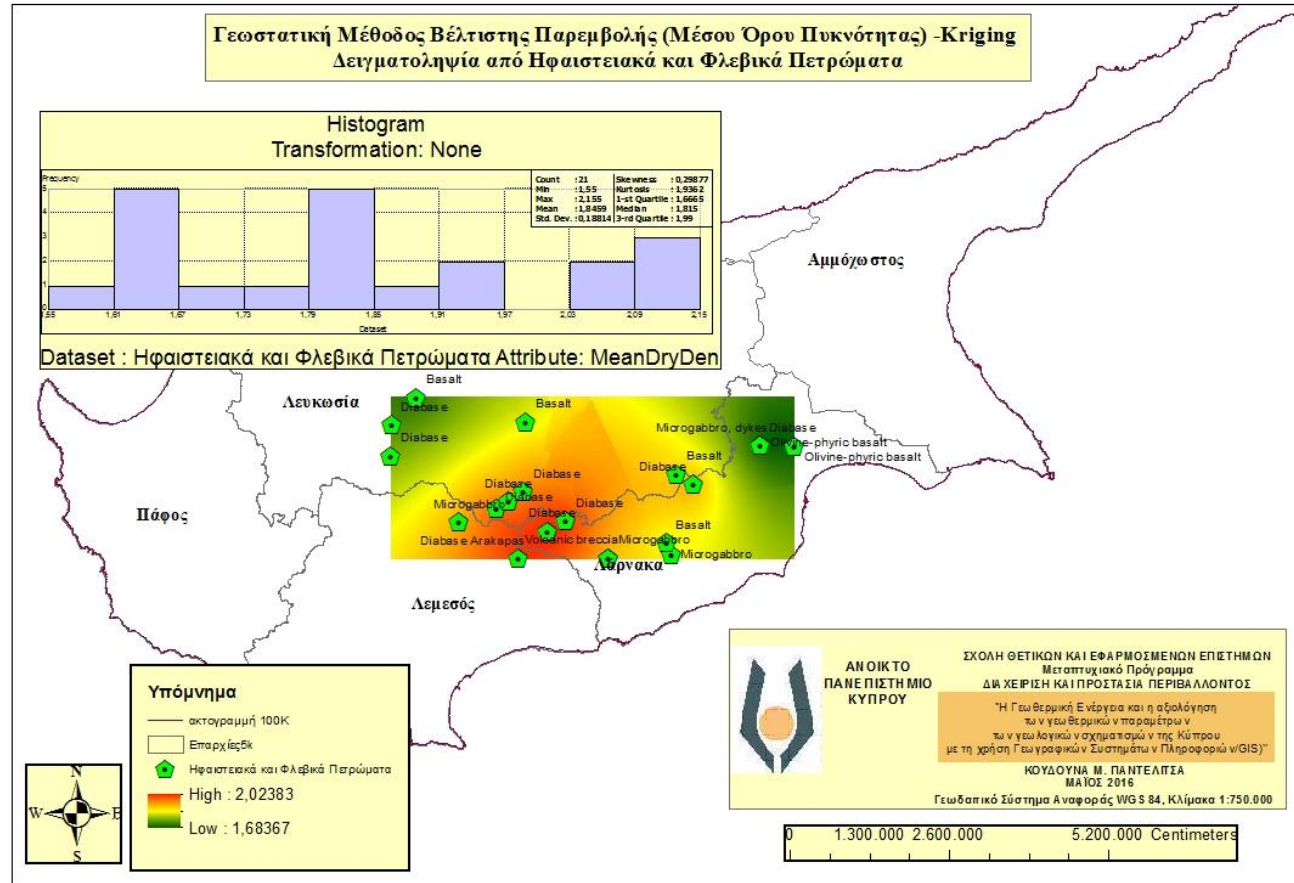
vii. Σχηματισμός Λευκωσίας και νεότερα ιζήματα (5-2μγα)



**Χάρτης 22:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο του Μέσου Όρου Θερμικής Αγωγιμότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού Λευκωσίας και των νεότερων ιζημάτων

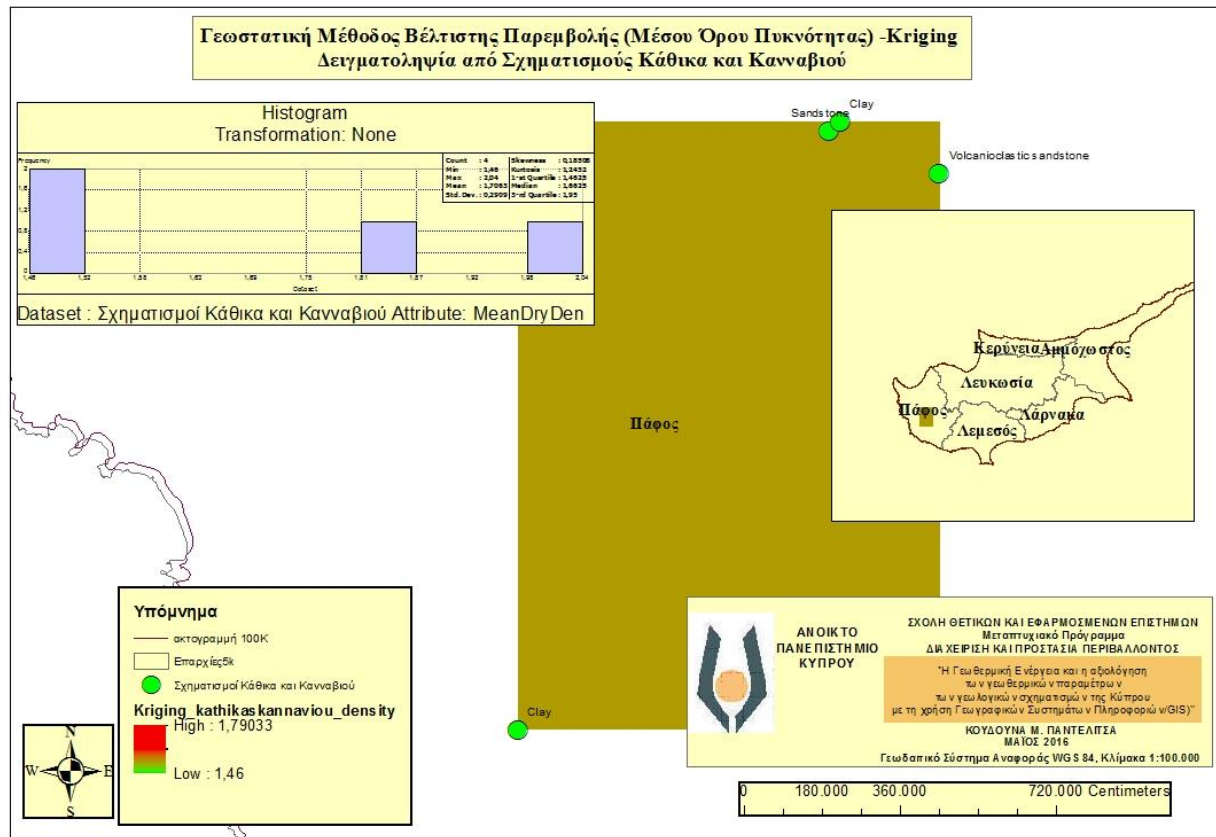


## ii. Ηφαιστειακά και Φλεβικά Πετρώματα



**Χάρτης 24:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Πυκνότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Ηφαιστειακά και Φλεβικά Πετρώματα

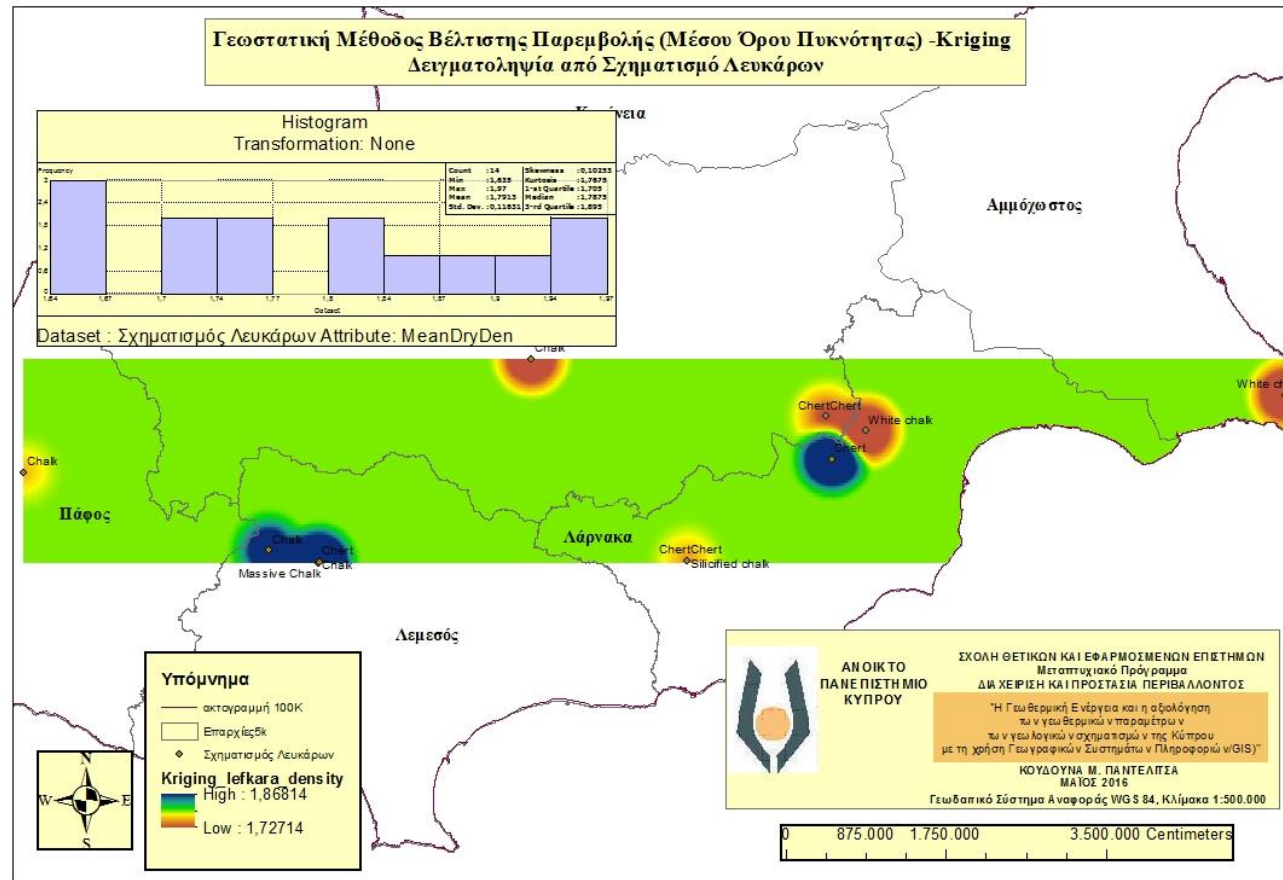
### iii. Σχηματισμοί Κάθικα και Κανναβιού



Όπως διακρίνεται και στο χάρτη, η εφαρμογή της μεθόδου για τους σχηματισμούς Κάθικα και Κανναβιού δεν είναι αντιπροσωπευτική καθώς η δοκιμή της Πυκνότητας εφαρμόστηκε μόνο σε τέσσερα δείγματα τα αποτελέσματα της οποίας διακρίνονται στον πιο που ακολουθεί (πίνακας 24)

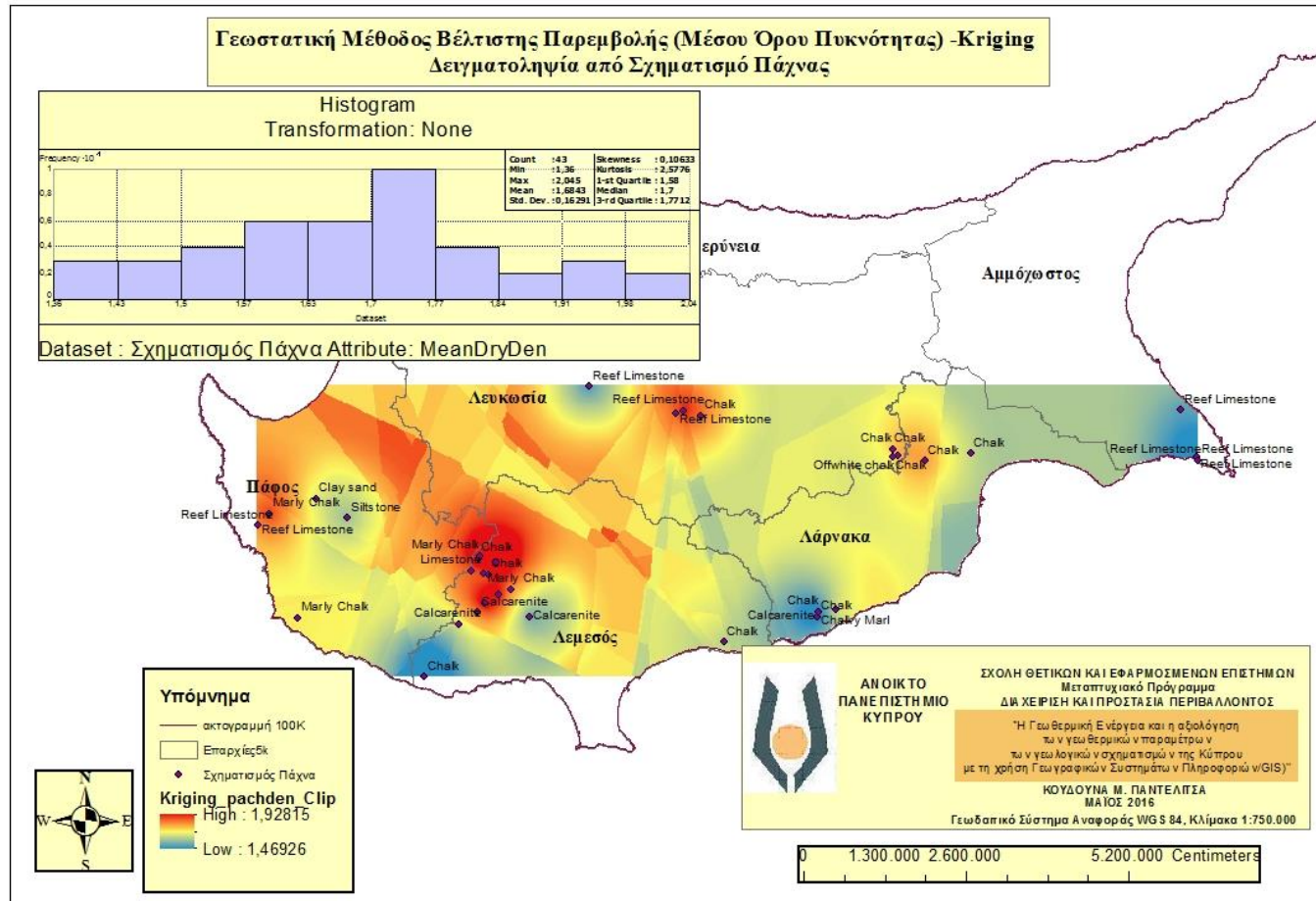
**Χάρτης 25:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Πυκνότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες των Σχηματισμών Κάθικα και Κανναβιού

#### iv. Σχηματισμός Λευκάρων



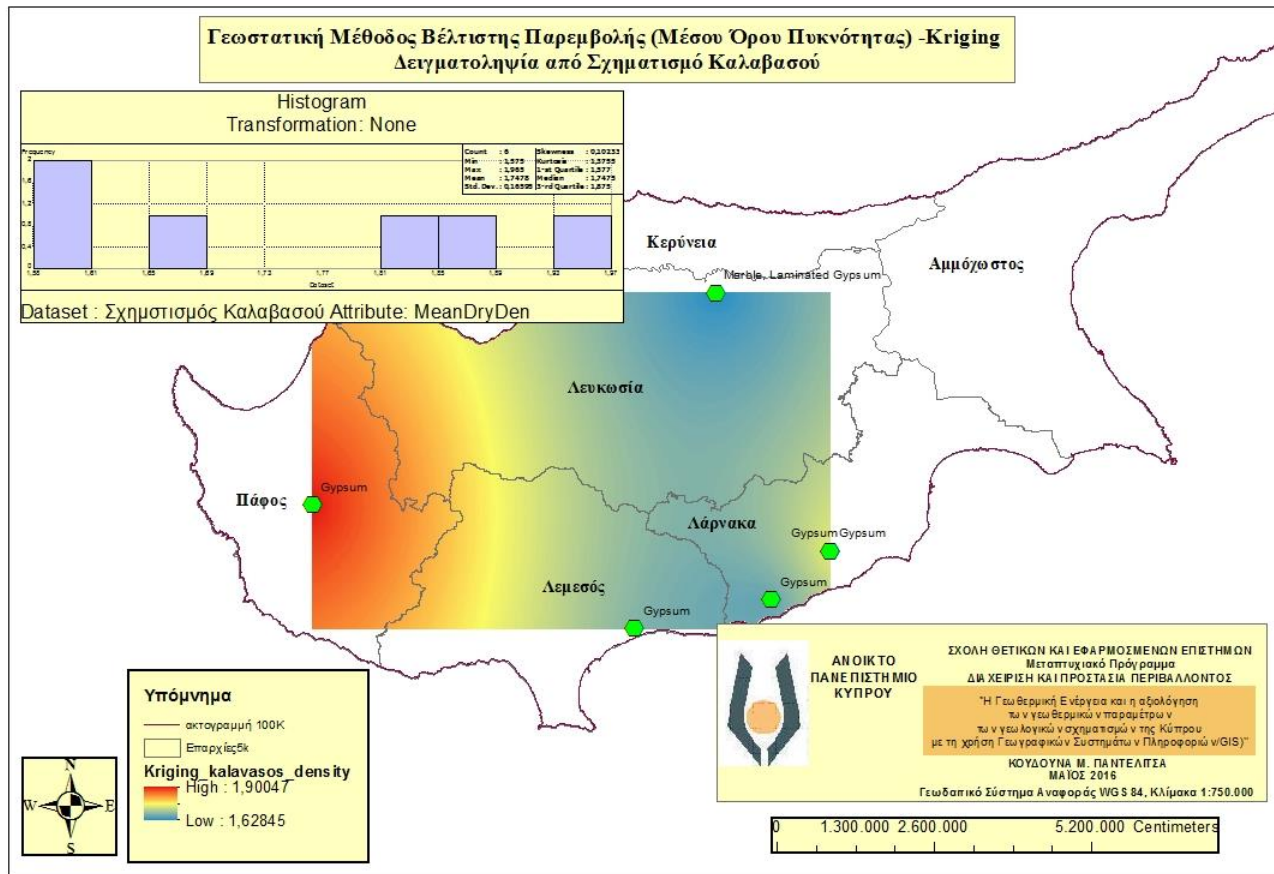
**Χάρτης 26:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Πυκνότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού των Λευκάρων

ν. Σχηματισμός Πάχνα-Υφαλογενής Ασβεστόλιθοι Μέλους Κορονιά (ηλικίας 7mγα) και Μέλους Τέρα (22mγα)



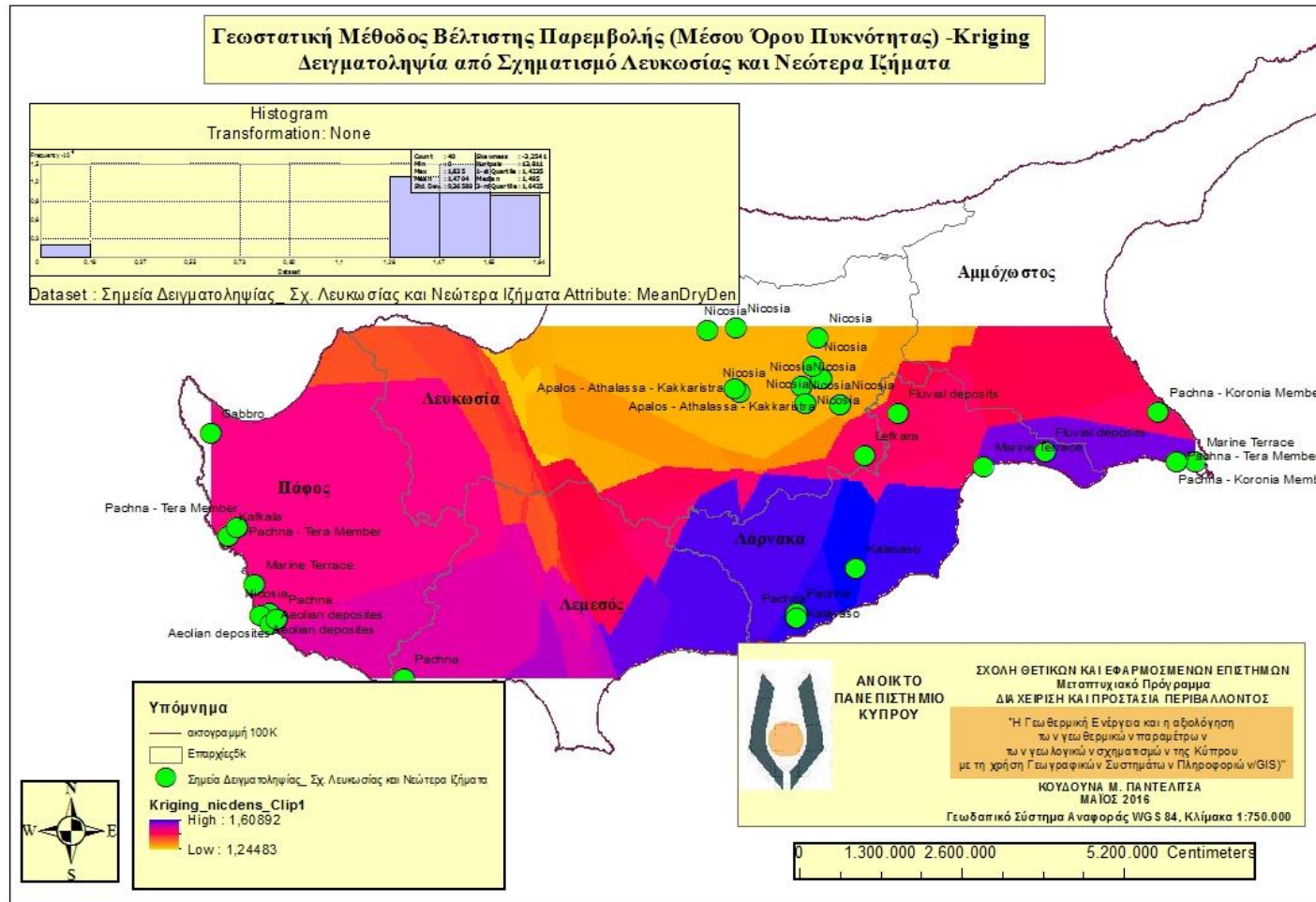
**Χάρτης 27:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Πυκνότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμός Πάχνα-Υφαλογενής Ασβεστόλιθοι Μέλους Κορονιά και Μέλους Τέρα

vi. Σχηματισμός Καλαβασού (7-5,3mγα)



**Χάρτης 28:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Πυκνότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού Καλαβασού

viii. Σχηματισμός Λευκωσίας και Νεότερα ιζήματα (5-2mya)



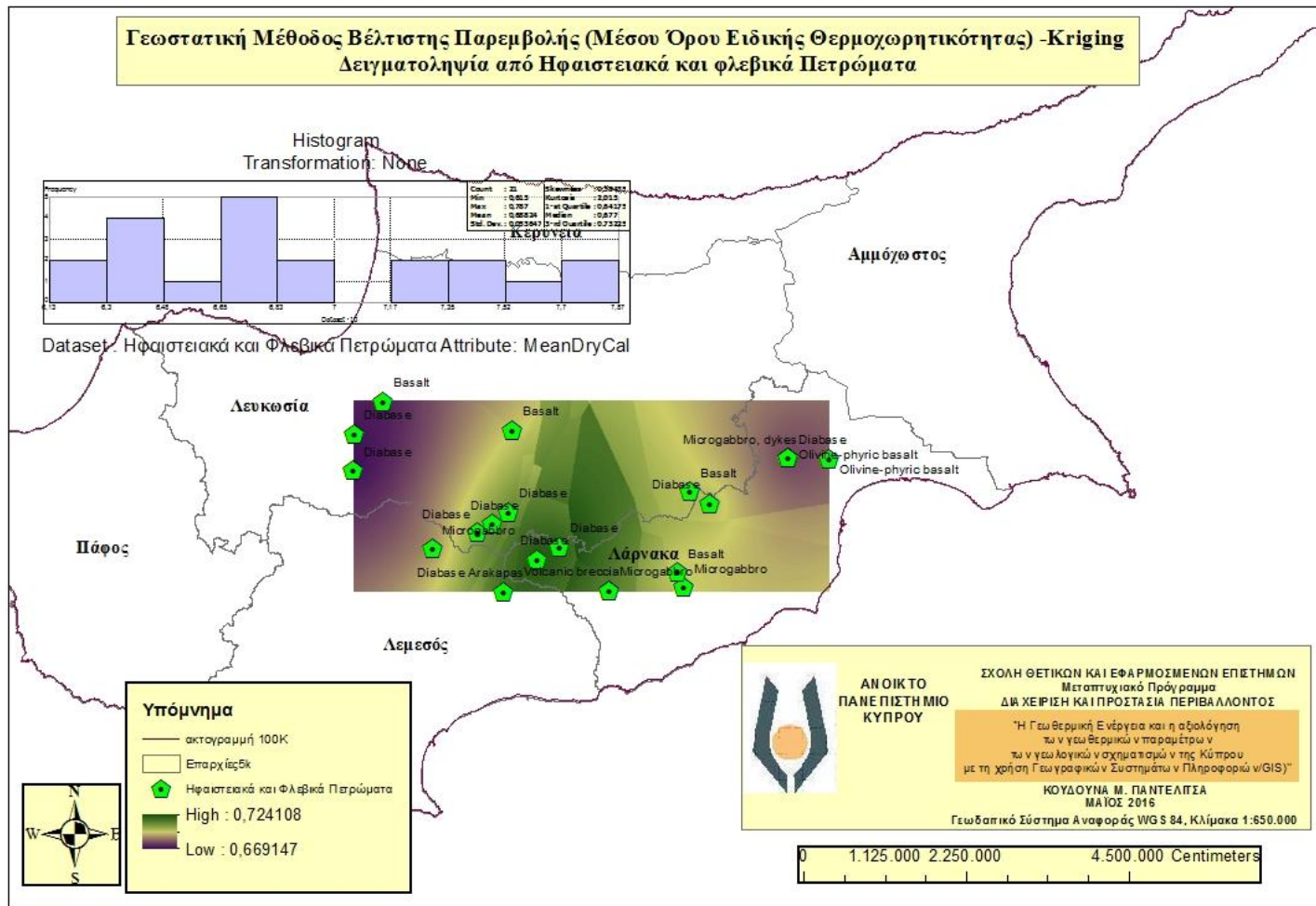
**Χάρτης 29:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Πυκνότητας στα σημεία δειγματοληψίας από λιθολογίες του Σχηματισμού Λευκωσίας και Νεότερων Ιζημάτων

4.5.4 Γεωστατική Μέθοδος Παρεμβολής (Kriging)-Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας, Cr  
 i. Πλουτώνια Πετρώματα και Ακολουθία Μανδύα



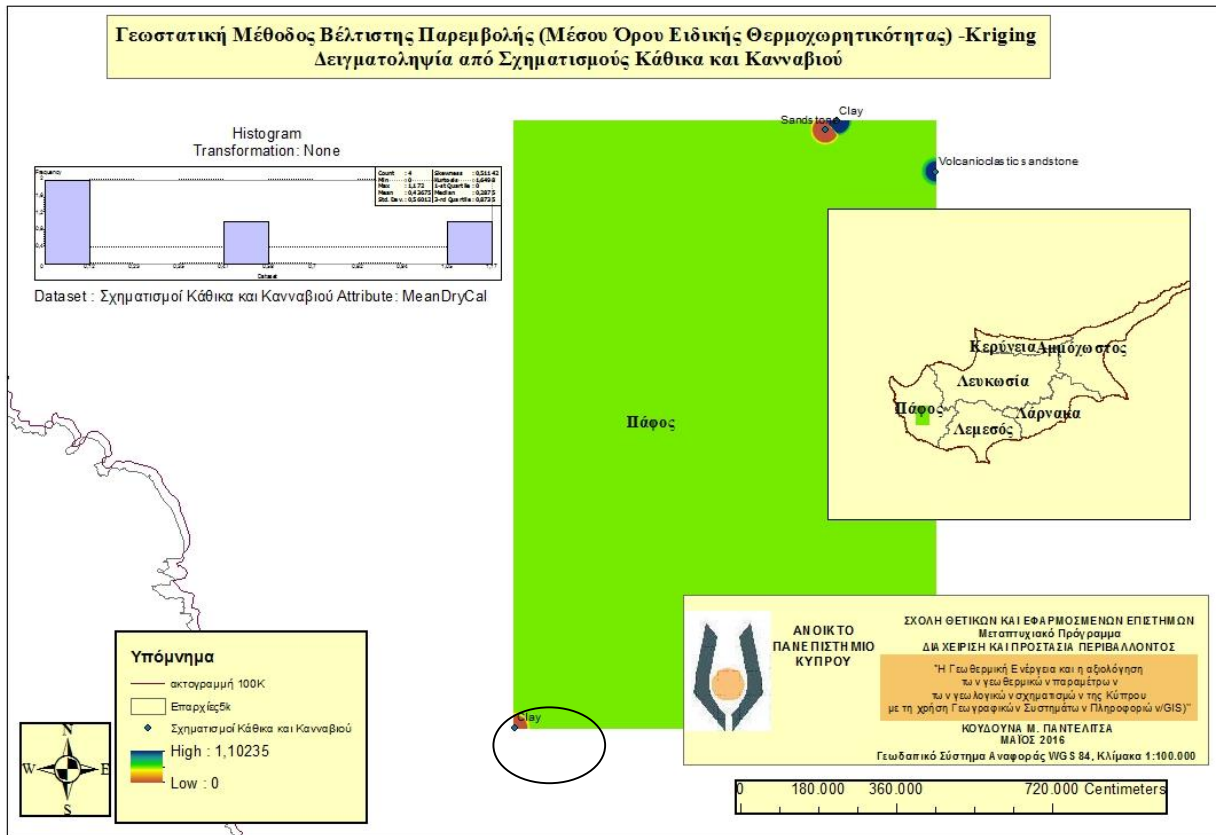
**Χάρτης 30:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Πλουτώνια Πετρώματα και Ακολουθία Μανδύα

## ii. Ηφαιστειακά και Φλεβικά Πετρώματα



**Χάρτης 31:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Πλουτώνια Πετρώματα και Ακολουθία Μανδύα

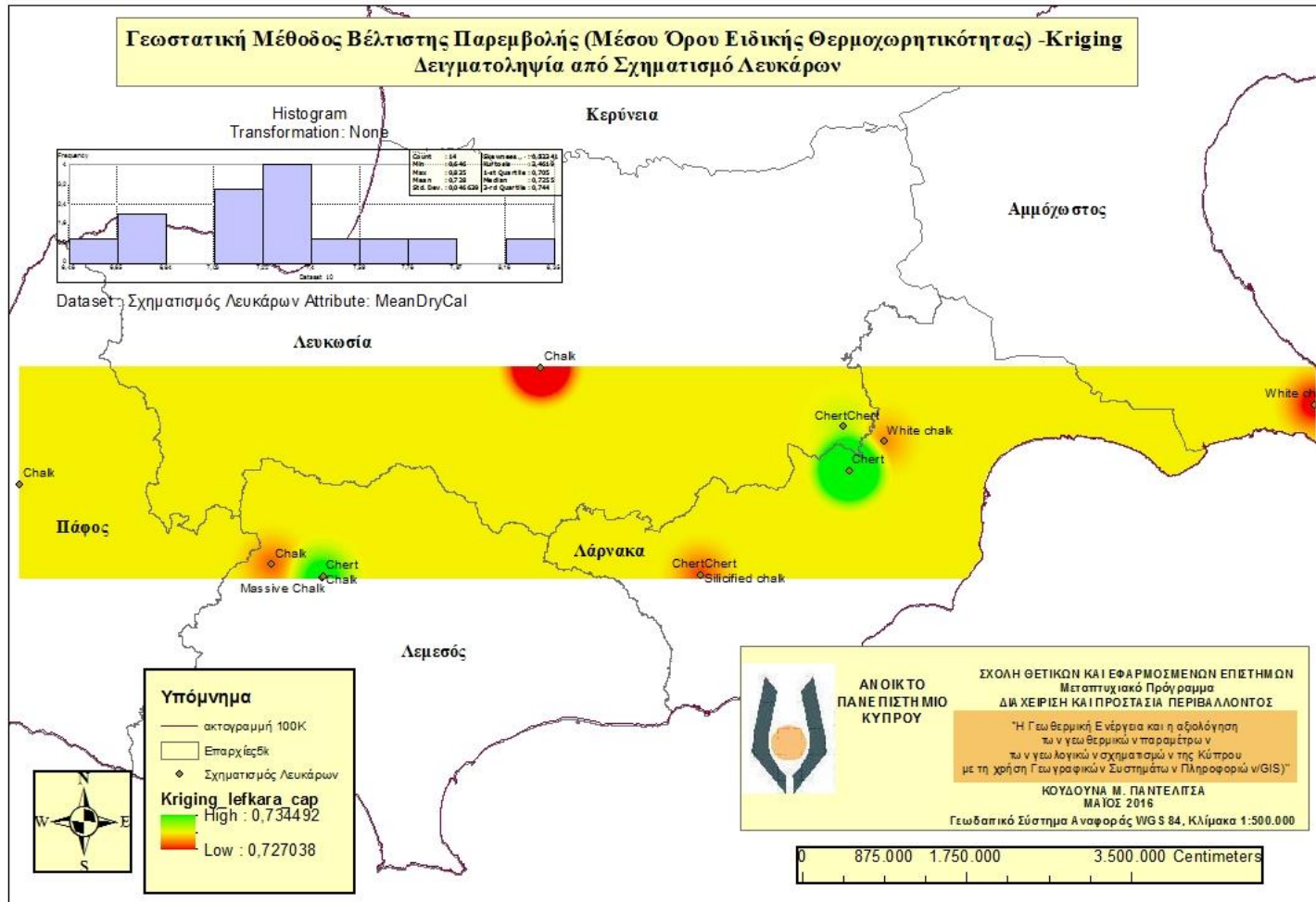
### iii. Σχηματισμοί Κάθικα και Κανναβιού



Όπως διακρίνεται και στο χάρτη, η εφαρμογή της μεθόδου για τους σχηματισμούς Κάθικα και Κανναβιού δεν είναι αντιπροσωπευτική καθώς η ειδική θερμοχωρητικότητα εφαρμόστηκε μόνο σε δύο δείγματα τα αποτελέσματα της οποίας διακρίνονται στον πιο που ακολουθεί (πίνακας 24)

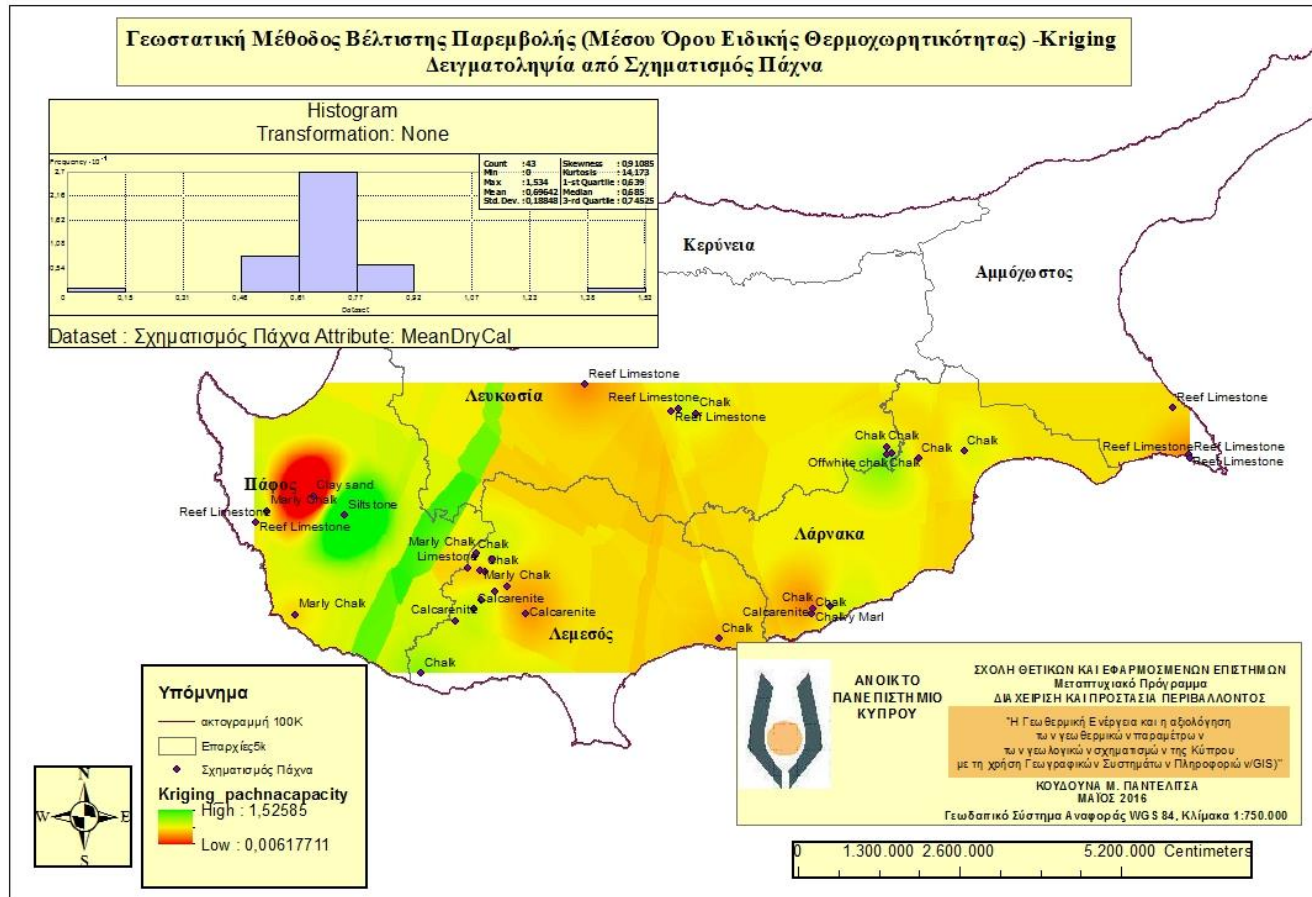
**Χάρτης 32:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Λιθολογίες των Σχηματισμών Κάθικα και Κανναβιού

#### iv. Σηματοσιμός Λευκάρων



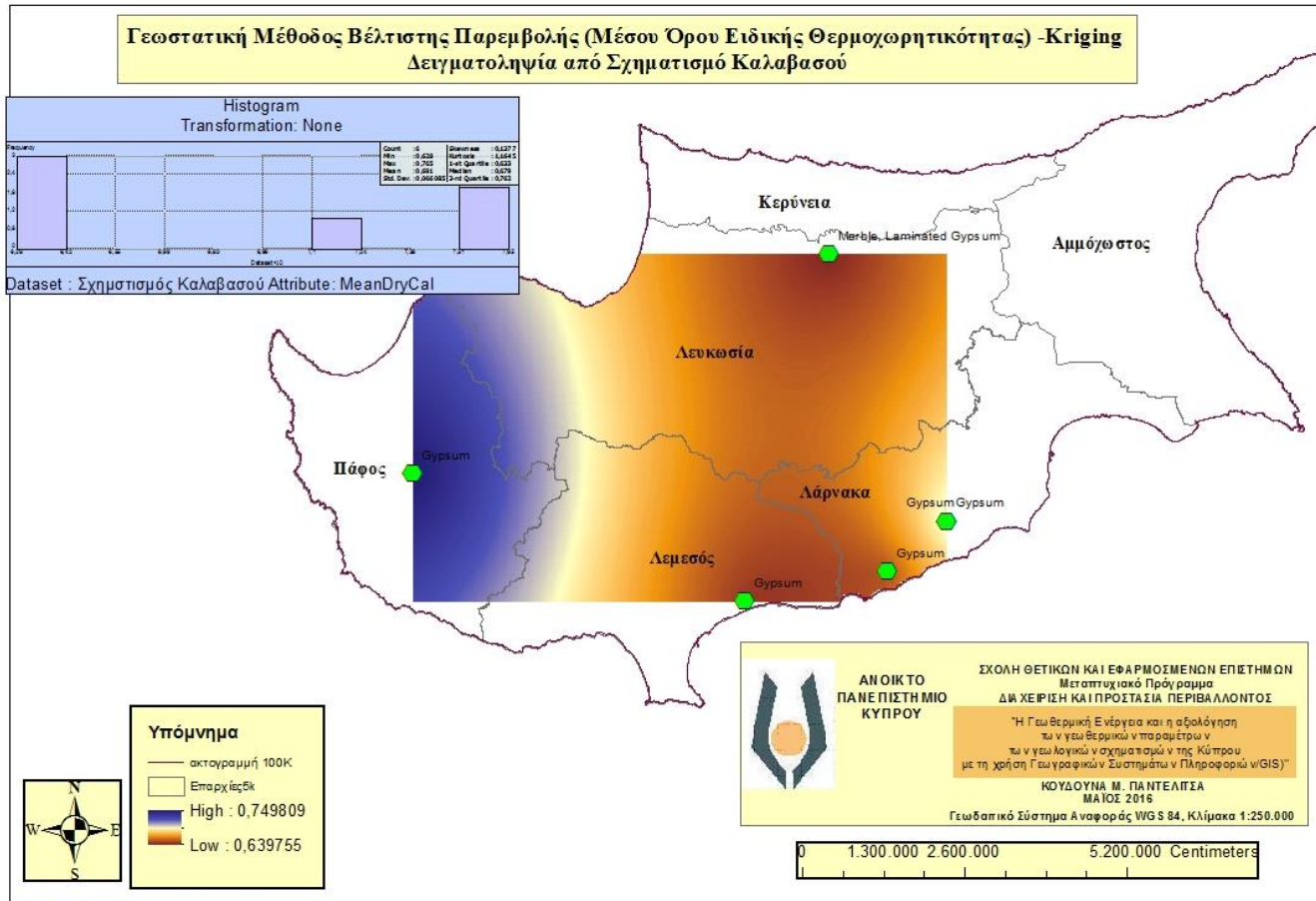
**Χάρτης 33:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Λιθολογίες των Σχηματισμών Λευκάρων

viii. Σχηματισμός Πάχνα-Υφαλογενής Ασβεστόλιθοι Μέλους Κοροινιά (ηλικίας 7mya) και Μέλους Τέρα (22mya)



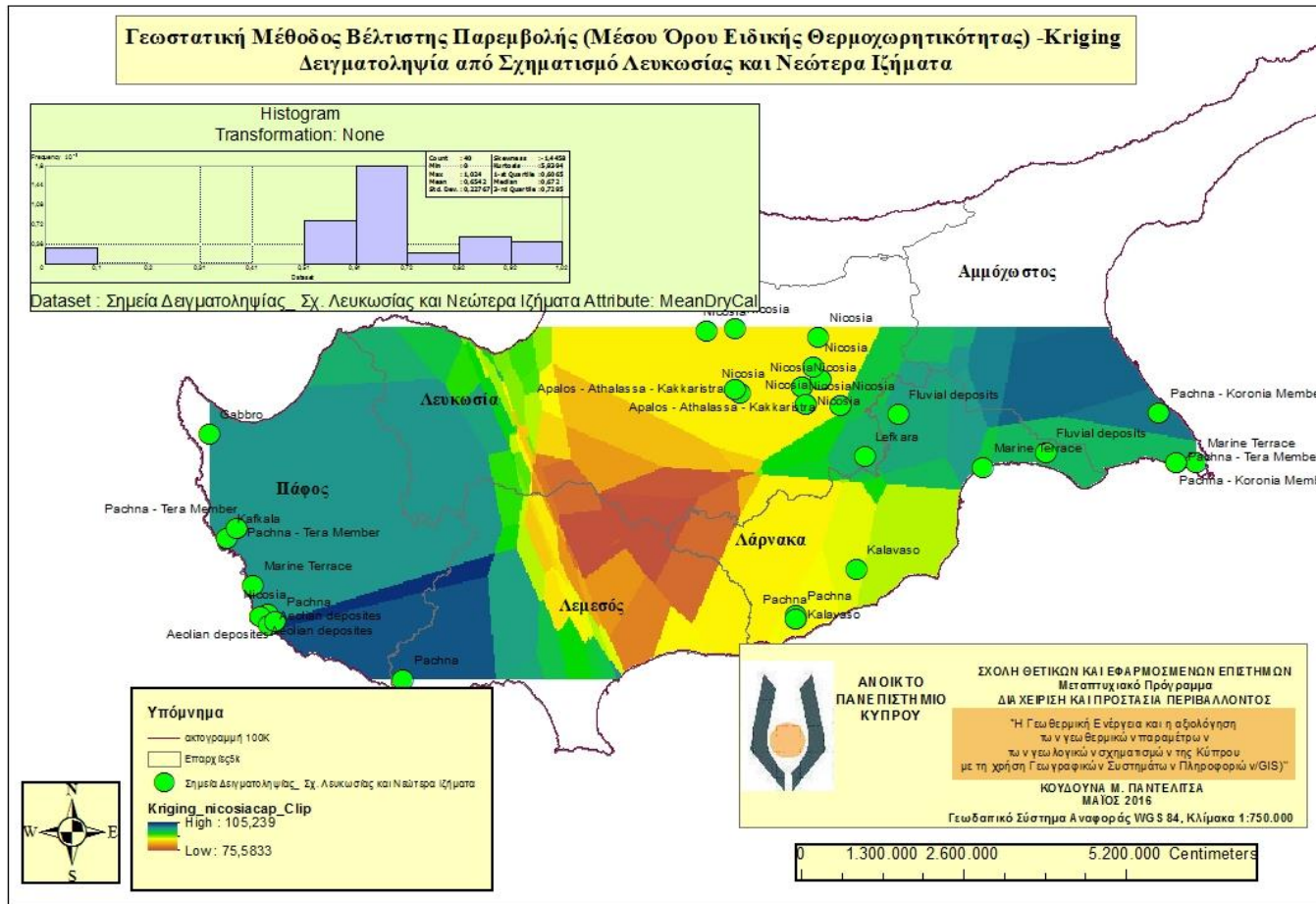
**Χάρτης 34:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Λιθολογίες του Σχηματισμού Πάχνας-Υφαλογενής Ασβεστόλιθοι Μέλους Κοροινιά και Μέλους Τέρα

ix. Σχηματισμός Καλαβασού (7-5,3mya)



**Χάρτης 35:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Λιθολογίες του Σχηματισμού Καλαβασού

χ. Σχηματισμός Λευκωσίας και νεότερα ιζήματα (5-2mya)



**Χάρτης 36:** Εφαρμογή της Γεωστατικής Μεθόδου παρεμβολής (Kriging) για τη θερμική παράμετρο της Θερμικής Χωρητικότητας/Θερμοχωρητικότητας στα σημεία δειγματοληψίας από Λιθολογίες του Σχηματισμός Λευκωσίας και νεότερων ιζημάτων

#### 4.5.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων

**Πίνακας 23:** Σύνοψη αποτελεσμάτων των Θερμικών Παραμέτρων των Γεωλογικών Σχηματισμών, που εξήχθησαν από τους χάρτες

Γεωλογικοί Σχηματισμοί	Αρ.Δειγμάτων	Θερμική	Θερμική	Ειδική	Πυκνότητα g/cm <sup>3</sup>
		Διαχυτότητα(ξηρή) x 10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /sec	Αγωγιμότητα (ξηρή) W/mK	θερμοχωρητικότητα (ξηρή) x 10 <sup>3</sup> J/Kkg	
Ηφαιστειακά και φλεβικά Πετρώματα	21	Min 0,533 Max 1,275 Mean 0,904	Min 0,883 Max 2,75 Mean 1,69	Min 0,613 Max 0,787 Mean 0,688	Min 1,55 Max 2,155 Mean 1,846
Πλουτώνια Πετρώματα και ακολουθία του Μανδύα	13	Min 0,785 Max 1,925 Mean 1,2119	Min 1,285 Max 4,17 Mean 2,449	Min 1,285 Max 4,17 Mean 2,437	Min 1,475 Max 2,3 Mean 2,012
Σχηματισμός Κάθικα και Κανναβιού	4	Min 0,216 Max 0,616 Mean 0,418	Min 1,022 Max 1,38 Mean 1,234	Min 0,575 Max 1,172 Mean 0,874	Min 1,46 Max 2,04 Mean 1,706
Σχηματισμός Καλαβασού	6	Min 0,647 Max 0,815 Mean 0,7098	Min 1,022 Max 1,38 Mean 1,234	Min 0,628 Max 0,765 Mean 0,69	Min 1,575 Max 1,9658 Mean 1,748
Σχηματισμός Λευκάρων	14	Min 0,342 Max 1,197 Mean 0,798	Min 0,56 Max 2,10 Mean 1,439	Min 0,646 Max 0,835 Mean 0,728	Min 1,635 Max 1,97 Mean 0,798
Σχηματισμός Πάχνας	43	Min 0,296 Max 1,455 Mean 0,796	Min 0,42 Max 2,555 Mean 1,356	Min 0,531 Max 1,534 Mean 1,0325	Min 1,36 Max 2,045 Mean 1,6843
Σχηματισμός Λευκωσίας και Νεότερων Ιζημάτων	40	Min 0,298 Max 1,925 Mean 1,111	Min 0,411 Max 2,38 Mean 1,12	Min 0,525 Max 1,024 Mean 0,775	Min 1,37 Max 1,835 Mean 1,60

Στον πίνακα 24 παρουσιάζονται οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας για συγκεκριμένα πυριγενή και ιζηματογενή πετρώματα και εδάφη όπως αναφέρονται στη γερμανική κατευθυντήρια γραμμή VDI 4640 μέρος 1 (τεύχος 2010).

**Πίνακας 24:** Θερμική Αγωγιμότητα πυριγενών και ιζηματογενών πετρωμάτων και εδαφών όπως συνίσταται από το Γερμανικό VDI 4640 (τεύχος 2010) Μέρος 1, και αφορά τα συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας

<b>Τύπος Πετρώματος</b>	<b>Θερμική Αγωγιμότητα W/mK</b>
<b>Πυριγενή Πετρώματα</b>	
Γρανίτης	3,3
Ρυόλιθος	2,6
Ανδεσίτης	2,3
Βασάλτης	1,8
Γάββρος	2,8
Διορίτης	2,8
<b>Μεταμορφωμένα Πετρώματα</b>	
Αμφιβολίτης	3
Σερπεντινίτης	3,5
Χαλαζίτης	5
<b>Ιζηματογενή Πετρώματα/Εδάφη</b>	
Άργιλος Ξηρή	0,5
Άμμος Ξηρή	0,4
Ασβεστόλιθος	2,8
Γύψος	1,6
Ψαμμίτης	3,7

# Κεφάλαιο 5

## 5. Συμπεράσματα

Η κατανομή της θερμοκρασίας στο υπέδαφος παίζει σημαντικό ρόλο στον τομέα της γεωθερμίας. Η γνώση του τρόπου κατανομής της θερμοκρασίας μέσα στο υπέδαφος, για οποιοδήποτε τύπο εδάφους, είναι απαραίτητη για τη σωστή και οικονομική τεχνική εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας. Η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο αριθμό δραστηριοτήτων και εφαρμογών οι οποίες διακρίνονται σε ηλεκτρικές και άμεσες χρήσεις.

Η υλοποίηση γεωθερμικών έργων απαιτεί τη χορήγηση διαφόρων αδειών. Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, ισχύει και εφαρμόζεται η Οδηγία 2009/28ΕΚ (ΑΠΕ) σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ΑΠΕ. Το άρθρο 13 της οδηγίας αυτής, επιβάλλει στα κράτη μέλη να καθορίσουν και να συντονίσουν τις αντίστοιχες αρμοδιότητες των εθνικών, περιφερειακών και τοπικών διοικητικών αρχών, όσον αφορά στις εγκρίσεις, στις πιστοποιήσεις και στις εν γένει αδειοδοτικές διαδικασίες έργων, συμπεριλαμβανομένου του χωροταξικού σχεδιασμού αυτών.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή είχε σαν κύριο στόχο τη διερεύνηση και τον καθορισμό των γεωθερμικών παραμέτρων των γεωλογικών σχηματισμών της Κύπρου με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών.

Από τις μέχρι τώρα έρευνες που έχουν γίνει για το γεωθερμικό δυναμικό της Κύπρου και οι οποίες αναλύθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει δυνατότητα εκμετάλλευσης της ενέργειας των γεωλογικών σχηματισμών. Η θερμοκρασία του υπεδάφους σε βάθος 5 - 100 m είναι σχεδόν σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και κυμαίνεται από 18 έως 22°C και για το λόγο αυτό χαρακτηρίζεται ως αβαθής γεωθερμία. Η αβαθής γεωθερμία οφείλεται στην ικανότητα των διαφόρων λιθολογιών να αποθηκεύουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Βρίσκεται διαθέσιμη και εκμεταλλεύσιμη παντού, είναι

αρκετά εύκολη στην αξιοποίησή της και μπορεί να συνδυαστεί και με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως π.χ με την ηλιακή.

Το Γεωθερμικό δυναμικό της Κύπρου δύναται να εκμεταλλευτεί με ΓΑΘ. Είναι επιθυμητό το έδαφος να έχει υψηλή ικανότητα μεταφοράς θερμότητας, γιατί έτσι η απαιτούμενη θερμότητα φθάνει στις γεωτρήσεις και στους γεωεναλλάκτες ή μπορεί να απομακρυνθεί εύκολα από το υπέδαφος. Για τον υπολογισμό του δυναμικού θερμικού δυναμικού, σε κάθε περιοχή, γίνεται χρήση των γεωλογικών χαρτών.

Η αξία των εγκαταστάσεων αβαθούς γεωθερμίας ορίζεται από τη σταθερότητα της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας στο υπέδαφος και τη διατήρησή της μέσης ετήσιας τιμής θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος συντελώντας στη λειτουργία των αντλιών θερμότητας σε υψηλούς βαθμούς απόδοσης.

Στην περίπτωση της Κύπρου, η θερμοχωρητικότητα των υλικών του υπεδάφους είναι ιδιαίτερα υψηλή συγκρινόμενη με τη θερμοχωρητικότητα του αέρα, που αποτελεί την κύρια πηγή θερμότητας που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις κλιματισμού. Αυτό σημαίνει πως δημιουργείται η δυνατότητα άντλησης ή απορρόφησης μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας στο υπέδαφος χωρίς να μεταβάλλονται σημαντικά οι θερμοκρασιακές του συνθήκες.

Βασικό εργαλείο της μεταπτυχιακής αυτής διατριβής υπήρξε η Γεωστατική Μέθοδος χωρικής συσχέτισης –Kriging της πρόσφατης έκδοσης του λογισμικού Arc GIS-ArcMap 10.2. Το λογισμικό παρέχει την ευχέρεια χρήσης και ανάλυσης χωρικών πληροφοριών κάθε είδους. Η μέθοδος αυτή αποτελεί την πιο διαδεδομένη γεωστατική μέθοδο χωρικής συσχέτισης, που εφαρμόζεται στα περισσότερα λογισμικά πακέτα GIS. Ουσιαστικά πρόκειται για περιοχοποίηση της πληροφορίας. Όπως αποδείχθηκε από την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, το λογισμικό προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας δυναμικών χαρτών υφιστάμενων δεδομένων αλλά και απεικόνισης και εξέτασης μελλοντικών τροποποιήσεων.

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν και καταγράφηκαν στο λογισμικό με την επιθυμητή ακρίβεια και παράχθηκαν οι σχετικοί θεματικοί χάρτες.

Για την εκπόνηση των χαρτών πραγματοποιήθηκε ανάλυση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών των θερμικών παραμέτρων, των γεωλογικών σχηματισμών που πραγματοποιήθηκαν σε 170 δείγματα ξηρής και κορεσμένης μάζας. Η δειγματοληψία

πραγματοποιήθηκε από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης σε όλη την ελεύθερη Κύπρο στα πλαίσια του προγράμματος «Διερεύνηση και καθορισμός γεωθερμικών παραμέτρων του εδάφους της Κύπρου, για την δημιουργία του Γεωθερμικού χάρτη του νησιού». Συγκεκριμένα οι θερμικές παράμετροι που εξετάστηκαν είναι η θερμική αγωγιμότητα, η θερμική διαχυτότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα καθώς και η πυκνότητα των πετρωμάτων σε ξηρές και κορεσμένες συνθήκες.

Η μέθοδος Kriging εφαρμόστηκε σε κάθε Γεωλογικό Σχηματισμό της Κύπρου και για κάθε θερμική παράμετρο ξεχωριστά και από αυτήν εξήχθησαν 28 χάρτες. Στους χάρτες αυτούς διακρίνονται με διαφορετικές χρωματικές αποχρώσεις, οι περιοχές κάθε παραμέτρου στις οποίες εμφανίζονται οι μέγιστες, ενδιάμεσες και ελάχιστες τιμές. Από τους χάρτες αυτούς θα μπορεί ο οποιοσδήποτε μελετητής να διακρίνει σε ποιες λιθολογίες των σχηματισμών και σε ποιες περιοχές της Κύπρου οι θερμικές παράμετροι παρουσιάζουν υψηλές τιμές και σε ποιες χαμηλές τιμές. Για παράδειγμα για την εφαρμογή ΓΑΘ σε μία περιοχή, από το σύνολο των πετρωμάτων που συγκροτούν τη λιθολογία, θα δίνεται η δυνατότητα να επιλέγονται αυτά που έχουν τη μεγαλύτερη εξάπλωση και αποτελούν το υπόβαθρο της περιοχής του έργου.

Επιπλέον μέσα από το λογισμικό κατασκευάστηκε ιστόγραμμα με στατιστικά δεδομένα για κάθε χάρτη ξεχωριστά. Από τα δεδομένα αυτά καταγράφηκαν σε πίνακα (Πίνακας 23) η χαμηλότερη και υψηλότερη τιμή, καθώς και ο μέσος όρος της κάθε παραμέτρου που εμφανίζεται σε κάθε γεωλογικό σχηματισμό.

Η παράμετρος της **Θερμικής Διαχυτότητας** εκφράζει την ταχύτητα με την οποία διαχέεται η θερμότητα διαμέσου ενός υλικού. Τη μεγαλύτερη τιμή μέσου όρου θερμικής διαχυτότητας παρουσίασαν τα Πλουτώνια Πετρώματα και η ακολουθία του Μανδύα με τιμή  $1,2119 \times 10^6 \text{m}^2/\text{sec}$  και ακολούθως ο Σχηματισμός Λευκωσίας και Νεώτερων ιζημάτων, τα Ηφαιστειακά και Φλεβικά Πετρώματα, ο Σχηματισμός Λευκάρων, ο Σχηματισμός Πάχνας, ο Σχηματισμός Καλαβασού, και τέλος οι λιθολογίες του Σχηματισμού Κάθικα και Κανναβιού.

Όσον αφορά την παράμετρο της **Θερμικής Αγωγιμότητας** η οποία δείχνει την ικανότητα του εδάφους ή του πετρώματος να μεταφέρει θερμότητα με αγωγή, τα Πλουτώνια πετρώματα και η ακολουθία του Μανδύα παρουσίασαν τις μεγαλύτερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας με τιμή μέσου όρου  $2,449 \text{ W/mK}$ , ενώ αμέσως μετά τα Ηφαιστειακά και Φλεβικά πετρώματα, ο Σχηματισμός των Λευκάρων, ο Σχηματισμός Πάχνας, ο Σχηματισμός

Καλαβασού ενώ τη χαμηλότερη τιμή μέσου όρου θερμικής αγωγιμότητας παρουσίασαν τα πετρώματα του Σχηματισμού Κάθικα και Κανναβιού.

Για την παράμετρο της **Ειδικής Θερμοχωρητικότητας** η οποία αντιπροσωπεύει την ικανότητα συγκεκριμένου όγκου υλικού του εδάφους και πετρώματος, να αποθηκεύει εσωτερική ενέργεια, την υψηλότερη τιμή μέσου όρου παρουσίασαν τα Πλουτώνια Πετρώματα με τιμή  $2,437 \times 10^3$  J/Kkg, και ακολούθως οι λιθολογίες του Σχηματισμού Πάγκας, ο Σχηματισμός Κάθικα και Κανναβιού, ο Σχηματισμός Λευκωσίας και Νεώτερων Ιζημάτων, ο Σχηματισμός Λευκάρων, ο Σχηματισμός Καλαβασού και τελευταία τα Ηφαιστειακά και Φλεβικά πετρώματα.

Τέλος η **Πυκνότητα** εκφράζει το βάρος ανά μονάδα όγκου των στερεών συστατικών του εδάφους. Τη μεγαλύτερη τιμή μέσου όρου πυκνότητας παρουσιάζουν τα Πλουτώνια πετρώματα και τα πετρώματα της ακολουθίας του μανδύα ( $2,012 \text{ g/cm}^3$ ), και ακολούθως τα Ηφαιστειακά και Φλεβικά πετρώματα, τα πετρώματα του Σχηματισμού Καλαβασού, τα Πετρώματα του Σχηματισμού Κάθικα και Κανναβιού, τα πετρώματα του Σχηματισμού Πάγκας, και τέλος οι λιθολογίες του Σχηματισμού των Λευκάρων.

Οι σωστές και αντιπροσωπευτικές τιμές των θερμικών παραμέτρων παρουσιάζονται στις περιοχές όπου υπάρχουν αρκετά σημεία δειγματοληψίας. Αντίθετα εκεί όπου τα σημεία δειγματοληψίας είναι λίγα ή δεν υπάρχουν τότε οι τιμές των θερμικών παραμέτρων και συνεπώς οι χρωματισμοί είναι παραπλανητικοί. Ταυτόχρονα η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την εκπόνηση των χαρτών ομαδοποιεί όλες τις περιοχές ανεξάρτητα του αριθμού των σημείων δειγματοληψίας.

Διαφαίνεται λοιπόν, ότι τα πετρώματα του οφειολιθικού συμπλέγματος του Τροόδους (κυρίως τα Πλουτώνια και η ακολουθία του μανδύα καθώς και τα Ηφαιστειακά και Φλεβικά πετρώματα) παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές θερμικών παραμέτρων σε σχέση με τους ίζηματογενείς σχηματισμούς. Το συμπέρασμα αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς πρόκειται για πετρώματα του οφειολιθικού συμπλέγματος του Τροόδους που αποτελούν τμήμα του ωκεάνιου φλοιού. Τα πετρώματα αυτά σχηματίζονται όταν το μάγμα ανέρχεται από το μανδύα προς της επιφάνεια της γης, και ακολούθως ψύχεται και στερεοποιείται σε διάφορα βάθη.

Από τα πετρώματα του οφειολιθικού συμπλέγματος του Τροόδους, τα πλουτώνια πετρώματα παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές θερμικών παραμέτρων. Τα πλουτώνια πετρώματα σχηματίστηκαν σε μεγάλο βάθος μέσα στον φλοιό και, λόγω της αργής ψύξης του μάγματος, σχημάτισαν μεγάλους κρυστάλλους. Τα πετρώματα αυτά έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε μέταλλα όπως πυρίτιο και μαγνήσιο τα οποία αποτελούν καλούς αγωγούς θερμότητας.

Η θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους αποτελεί τη βασικότερη παράμετρο στο σχεδιασμό έργων, όπως είναι τα συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας με γεωεναλλάκτη, καθώς η γνώση της είναι απαραίτητη για τη σωστή διαστασιολόγηση του γεωεναλλάκτη. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους, τόσο διευκολύνεται η μετάδοση θερμότητας σε αυτό και συνεπώς απαιτείται μικρότερο μήκος γεωεναλλάκτη για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Από τα ιζηματογενή πετρώματα, τα αργιλικά πετρώματα έχουν τη χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα. Επιπλέον στο έδαφος ή και στα μη ενοποιημένα ιζήματα η θερμική αγωγιμότητα είναι μικρότερη από ότι στα σκληρά πετρώματα. Συγκρίνοντας τις τιμές θερμικής αγωγιμότητας των λιθολογιών των σχηματισμών της Κύπρου με τις αντίστοιχες τιμές για τα πυριγενή και ιζηματογενή πετρώματα όπως συνίστανται από το Γερμανικό οδηγό VDI 4640 (Πίνακας 24) διαφαίνεται πως οι λιθολογίες των γεωλογικών σχηματισμών της Κύπρου παρουσιάζουν σχετικά ικανοποιητικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας. Ο ακριβής προσδιορισμός της θερμικής αγωγιμότητας του υπεδάφους αποτελεί σημαντικό παράγοντα, καθώς πιθανές παραδοχές της τιμής της θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να οδηγήσουν σε υπερδιαστασιολόγηση του γεωεναλλάκτη με αρνητικές συνέπειες (αύξηση κόστους- μειωμένη ενεργειακή απόδοση και λειτουργία).

Όταν η θερμική αγωγιμότητα παρουσιάζει υψηλές τιμές τότε διευκολύνεται η απορρόφηση θερμότητας από τους γεωεναλλάκτες προς το έδαφος και η αναπλήρωση ή απόρριψη αυτής της θερμότητας στον περιβάλλοντα χώρο του υπεδάφους αποθήκευσης, με αποτέλεσμα τη μικρότερη θερμοκρασιακή διαταραχή και τη σταθερότερη λειτουργία του όλου συστήματος. Επιπρόσθετα η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από τους γεωεναλλάκτες είναι μεγαλύτερη κατά την περίοδο της θέρμανσης και χαμηλότερη κατά την περίοδο της ψύξης, με αποτέλεσμα τη βελτίωση του συντελεστή απόδοσης της Γ.Α.Θ.

Εκτός από την θερμική αγωγιμότητα σημαντικό ρόλο στις τιμές της ροής θερμότητας παίζει και η ηλικία των σχηματισμών, αφού η θερμική ροή μειώνεται με την τεκτονική ηλικία. Επίσης, η φύση και η λιθολογία των πετρωμάτων συμβάλει στη διαφοροποίηση της ροής

θερμότητας, εξαιτίας κυρίως της μεγαλύτερης ή μικρότερης περιεκτικότητας ραδιενεργών στοιχείων. Τα ραδιενεργά στοιχεία είναι περισσότερα στα όξινα πετρώματα ( $\text{SiO}_2 > 66\%$ ) και λιγότερα στα Υπερβασικά ( $\text{SiO}_2 < 45\%$ ). Έτσι τα μαγματικά όξινα πετρώματα (π.χ. οι γρανίτες με ποσοστό  $\text{SiO}_2 > 63\%$ ) έχουν αυξημένη παραγωγή θερμότητας με μεγάλο ποσοστό ραδιενεργών στοιχείων, ενώ οι ασβεστόλιθοι μέτρια έως μικρή και οι βασάλτες ακόμη πιο μικρή.

Η εφαρμογή των συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας φαίνεται να αποτελούν την καταλληλότερη λύση για ανάκτηση του γεωθερμικού δυναμικού της Κύπρου. Πρόκειται για μία εύκολη και οικονομικά προσιτή πρόταση εφαρμογής, η οποία είναι φιλική προς το περιβάλλον, έχει γρήγορη απόσβεση και μπορεί να υλοποιηθεί χωρίς ιδιαίτερες γραφειοκρατικές διαδικασίες από κάθε ενδιαφερόμενο πολίτη ο οποίος επιθυμεί μια εναλλακτική πηγή ενέργειας για τη θέρμανση και τη ψύξη του χώρου όπου ζει, κινείται και εργάζεται.

# Κεφάλαιο 6

## 6. Επίλογος

Η γεωθερμία είναι μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας η οποία παρουσιάζει μεγάλο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η εφαρμογή της στην Κύπρο κυρίως για θέρμανση και κλιματισμό κτηρίων και σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα ψύξης και θέρμανσης τα οποία καταναλώνουν πετρέλαιο και φυσικό αέριο, μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας έως και 70%. Για το λόγο αυτό αποτελεί μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες που μπορούν να συνεισφέρουν στην εξοικονόμηση ενέργειας στους τομείς θέρμανσης και κλιματισμού, βοηθώντας στην επίτευξη των στόχων 20-20-20 του 2020 της ενεργειακής πολιτικής της ΕΕ.

Παρόλα τα πενιχρά αποτελέσματα των μέχρι τώρα προσπαθειών ανάπτυξης της γεωθερμίας στην Κύπρο, υποστηρίζεται ότι είναι θετικές οι προοπτικές για την καλύτερη αξιοποίησή της. Τονίζεται επίσης ότι θα πρέπει να προωθηθούν τα αποτελέσματα των ερευνών για το γεωθερμικό δυναμικό της Κύπρου ούτως ώστε να γίνουν αντιληπτά στο ευρύ κοινό τα οφέλη που μπορούν να προκύψουν από την αξιοποίηση της γεωθερμίας στον τόπο μας.

Ως εκ τούτου για να μπορέσει να γίνει εφικτή η αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας στο νησί μας με τη χρήση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, ιδιαίτερα σε περιοχές με αυξημένες ανάγκες θέρμανση. Επιβάλλεται η θέσπιση ελκυστικών οικονομικών κινήτρων, εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο ακόμη μεγαλύτερη ώθηση για την αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού της Κύπρου.

# 7. Βιβλιογραφία

## 7.1 Ελληνική

1. Αρβανίτης, Α. 2008. Μύθοι και Πραγματικότητα για τη Γεωθερμία. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών. Αθήνα: Υπουργείο Ανάπτυξης, 2.
2. Βραχοπουλος, Μ. & Παπαγεωργακης, Ι. 1999. Εκμεταλλεύσιμη Ηλιογενής και Γηγενής Θερμότητα στο Αβαθές Υπέδαφος της Αττικής. Τεχνικά Χρονικά ΤΕΕ (1998) Τόμ, 1.
3. Γιαννακούρας, Ζαραβέλα, Μανδρόκας, 2006. Προγράμματα Ανοικτών Περιβαλλοντικών. "ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ–ΗΠΙΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ." Τάξεων, 17.
4. Ζερβός, Α. 2007. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 36-37.
5. Κάβουρας, Μ. 1998. Αρχές Γεωπληροφορικής και Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
6. Καρυδάκης, Ι. Γ. 2008. Γεωθερμική Ενέργεια, Αθήνα.
7. Κουτσόπουλος, Κ. 2002. Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και ανάλυση χώρου. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
8. Κωνσταντίνου, Κ. & Παναγίδης, Ι. 2013. Κύπρος και Γεωλογία: Επιστήμη – Περιβάλλον – Πολιτισμός Πολιτιστικό Ίδρυμα Τραπεζής Κύπρου, 2013
9. Μενδρινός, Δ. & Καρύτσας, Κ. 2005. Ηλεκτροπαραγωγή από Γεωθερμία Χαμηλής Ενθαλπίας <150οC. Πρακτικά 3ου Εθνικού Συνεδρίου «Η Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας: Προοπτικές και Προτεραιότητες προς το Στόχο του 2010», Αθήνα, 307-310.
10. Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Brunel University, Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, Υπηρεσία Ενέργειας Υπουργείου Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού, Ίδρυμα Ενέργειας Κύπρου. 2010. Διερεύνηση και καθορισμός γεωθερμικών παραμέτρων του εδάφους της Κύπρου, για τη δημιουργία Γεωθερμικού χάρτη του νησιού. Available: [http://www.moa.gov.cy/moa/gsd/gsd.nsf/All/F8C615D8FCE161C8C2257CF4001CD1D1/\\$file/Final%20Leaflet\\_1.pdf?OpenElement](http://www.moa.gov.cy/moa/gsd/gsd.nsf/All/F8C615D8FCE161C8C2257CF4001CD1D1/$file/Final%20Leaflet_1.pdf?OpenElement) [Accessed 12/12/2015].

11. Παπαγεωργάκης, Ι. Ε. 1993. Αξιοποίηση της ομαλής γεωθερμικής ενέργειας στον ελληνικό χώρο.= Utilisation of normal geothermal energy in Greece. Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 28, 551.
12. Πιριπίτσι, Κ. 2010. Σύγχρονα Ενεργειακά Ζητήματα, σημασία των ΑΠΕ και ΕΞΕ, τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας [Online]. Λευκωσία: Ίδρυμα Ενέργειας Κύπρου. Available: <http://www.mcit.gov.cy/mcit/mcit.nsf> [Accessed 12 Φεβρουαρίου 2016 2016].
13. Ενεργειακό Γραφείο Κύπριων Πολιτών. 2010. Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας Εφαρμογές στον Οικιακό Τομέα. Available: <http://www.cea.org.cy/TOPICS/Renewable%20Energy/Heat%20Pumps%20-%20energy%20from%20the%20earth.pdf> [Accessed 11 Νοεμβρίου 2015].
14. Υπηρεσία Ενέργειας Βιομηχανίας και Τουρισμού. 2015. Επιχειρησιακό Πρόγραμμα "Ανταγωνιστικότητα και Αειφόρος Ανάπτυξη", Προγραμματική Περίοδος 2014-2020, [Online]. Λευκωσία: Κυπριακή Δημοκρατία. [Accessed 18 Δεκεμβρίου 2015].
15. Υπουργείο Εμπορίου Βιομηχανίας και Τουρισμού. 2010. Εθνικό Σχέδιο Δράσης για την Ανανεώσιμη Ενέργεια με Βάση την Οδηγία 2009/28ΕΚ (2010-2020). Available: [http://www.mcit.gov.cy/mcit/mcit.nsf/All/789553C60B9DF658C225777D0033353D/\\$file/National%20Action%20Plan\\_Final.pdf](http://www.mcit.gov.cy/mcit/mcit.nsf/All/789553C60B9DF658C225777D0033353D/$file/National%20Action%20Plan_Final.pdf) [Accessed 20/12/2015].
16. Φυτίκας, Μ. & Αδρίτσος, Ν. 2004α. Γεωθερμία. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
17. Φυτίκας, Μ. & Ανδρίτσος, Ν. 2004β. Γεωθερμία, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Τζιόλα.
18. Φυτίκας, Μ. Δ. & Ανδρίτσος, Ν. 2008. Δυνατότητες αξιοποίησης του γεωθερμικού πεδίου Σουσακίου, Αγίων Θεοδώρων Κορινθίας= Utilization of geothermical fluids in the soussaki field, Ag. Theodoroi, Corinth Area. Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 41, 145-153.
19. Χατζηγιάνης Γ. & Αρβανίτης Α., 2007. Συστήματα Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας, Περιοδικό «Περιβάλλον & ENGINEERING 2007», Ετήσια Έκδοση για την Τεχνολογία Προστασίας του Περιβάλλοντος, Εκδόσεις ΜΕΔΕΩΝ - Τεχνικές Κλαδικές Εκδόσεις. Αθήνα, 280-286.

## 7.2 Ξενόγλωσση

20. Antics M. & Sanner B. 2007. Status of Geothermal Energy Use and Resources in Europe. Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany,

21. Armstead, H. 1983. Geothermal energy: Its past, present, and future contributions to the energy needs of man E. & FN Spon. London, UK.
22. Armstead, H. C. H. 1978. Geothermal energy: its past, present and future contributions to the energy needs of man.
23. International Geothermal Association. 2014. Geothermal Energy [Online]. Germany: Bochum University of Applied Sciences. Available: [http://www.geothermal-energy.org/what\\_is\\_geothermal\\_energy.html](http://www.geothermal-energy.org/what_is_geothermal_energy.html) [Accessed 12 October 2015 2015].
24. Axelsson, G. & Gunnlaugsson, E. 2000. Background: Geothermal utilization, management and monitoring. Long-term monitoring of high-and low enthalpy fields under exploitation, WGC, 3-10.
25. Barbier, E. 1997. Nature and technology of geothermal energy: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1, 1-69.
26. Benderitter, Y. & Cormy, G. 1990. Possible approach to geothermal research and relative costs. Small geothermal resources: A guide to development and utilization, Unitar, New York, 59-69.
27. Bercovici, D. 2003. The generation of plate tectonics from mantle convection. Earth and Planetary Science Letters, 205, 107-121.
28. Bergman, T. L., Incropera, F. P. & Lavine, A. S. 2011. Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons.
29. Bertani, R. 2016. Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report. Geothermics, 60, 31-43.
30. Blair, P. D., Cassel, T. A. & Edelstein, R. H. 1982. Geothermal energy: investment decisions and commercial development.
31. Bloomquist, R. G. 2003. Geothermal space heating. Geothermics, 32, 513-526.
32. Boyd, T. L. & Lund, J. W. Geothermal heating of greenhouses and aquaculture facilities. 2006 ASAE Annual Meeting, 2006. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1.
33. Boyle, G. 1996. Renewable energy: power for a sustainable future. Oxford University Press.
34. Boyle, G., Everett, B., Ramage, J. & University, T. O. 2003. Energy systems and sustainability, Oxford University Press Oxford.
35. Brower, M. 1992. Cool energy: renewable solutions to environmental problems, MIT press.
36. Beown, D. W. 2003. Geothermal energy production with supercritical fluids. Google Patents.

37. Budd, C. 1984. Geothermal energy for electrical generation. *Journal of petroleum technology*, 36, 189-195.
38. Çengel, Y. A., Boles, M. A. & Kanoglu, M. 2015. *Thermodynamics: an engineering approach*, McGraw-Hill Education.
39. Chandrasekharam, D. & Bundschuh, J. 2008. *Low-enthalpy geothermal resources for power generation*, CRC Press Leiden.
40. Chrisman, N. R. 1999. What does 'GIS' mean? *Transactions in GIS*, 3, 175-186.
41. Combs, J. & Muffler, L. 1973. P., *Exploration for Geothermal Resources* in *Geothermal Energy: Resources, Productions, Stimulation*, edited by Paul Kruger and Carel Otte. Stanford University Press.
42. Commission, E. 2015. Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions. *Renewable energy progress report*. Brussels.
43. Condie, K. C. 2013. *Plate tectonics & crustal evolution*, New Mexico, Elsevier.
44. Del Moro, A., Puxeddu, M., Di Brozolo, F. R., & Villa, I. M. 1982. Rb-Sr and K-Ar ages on minerals at temperatures of 300–400 C from deep wells in the Larderello geothermal field (Italy). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 81(4), 340-349.
45. Dickinson, W. R. 1974. *Plate tectonics and sedimentation*.
46. Dickson, M. H. & Fanelli, M. 2013. *Geothermal energy: utilization and technology*, Routledge.
47. Dipippo, R. 1991. Geothermal energy electricity generation and environmental impact. *Energy Policy*, 19, 798-807.
48. Dipippo, R. 2012. *Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact*, Butterworth-Heinemann.
49. Duffie, J. A. 2006. *William A. Beckman Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, INC. NY.
50. Europa. 2016α. Ενεργειακή απόδοση των κτιρίων [Online]. European Union. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=URISERV%3Aen0021> [Accessed 16 Ιανουαρίου 2016 2016].
51. Europa. 2016β. Προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές [Online]. Europe: Europa Eunion. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=URISERV%3Aen0009> [Accessed 10 Ιανουαρίου 2016 2016].
52. Evans, A., Strezov, V., & Evans, T. J. 2009. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(5), 1082-1088.

53. Faust, C. R. & Mercer, J. W. 1979. Geothermal reservoir simulation: 2. Numerical solution techniques for liquid-and vapor-dominated hydrothermal systems. *Water Resources Research*, 15, 31-46.
54. Florides, G., Pouloupatis, P., Kalogirou, S., Messaritis, V., Panayides, I., Zomeni, Z., Partasides, G., Lizides, A., Sophocleous, E. & Koutsoumpas, K. 2011. The geothermal characteristics of the ground and the potential of using ground coupled heat pumps in Cyprus. *Energy*, 36, 5027-5036.
55. Frasher, A. 1994. Outlook on the influence of geological structures in the scattering of geothermal field in Albania= Μελέτη της επίδρασης των γεωλογικών δομών στην κατανομή των γεωθερμικών πεδίων στην Αλβανία. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 30, 27-31.
56. Fridleifsson, I. B. 2001. Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and sustainable energy reviews*, 5, 299-312.
57. Fridleifsson, I. B. 2003. Status of geothermal energy amongst the world's energy sources. *Geothermics*, 32, 379-388.
58. Garnish, J. D. 1978. Progress in geothermal energy. Elsevier [Online], 2. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0160932778900583> [Accessed 18/12/2015].
59. Goosen, M., Mahmoudi, H. & Ghaffour, N. 2010. Water desalination using geothermal energy. *Energies*, 3, 1423-1442.
60. Gudmundsson, A. 1992. Formation and growth of normal faults at the divergent plate boundary in Iceland. *Terra Nova*, 4, 464-471.
61. Haehnlein, S., Bayer, P. & Blum, P. 2010. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2611-2625.
62. Halmann, M. M. & Steinberg, M. 1998. Greenhouse gas carbon dioxide mitigation: science and technology, CRC press.
63. Harper, P. N. 1989. *The Structure of the Earth. Work Out Geography GCSE.* London: Macmillan Education UK.
64. Hayes, A. & Johnson, W. C. 1980. Geothermal aquaculture: a guide to freshwater prawn culture. Oregon Inst. of Tech., Klamath Falls (USA). Geo-Heat Utilization Center.
65. Hettiarachchi, H. M., Golubovic, M., Worek, W. M. & Ikegami, Y. 2007. Optimum design criteria for an organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources. *Energy*, 32, 1698-1706.

66. Hochstein, M. 1990. Classification and assessment of geothermal resources. Small geothermal resources: A guide to development and utilization, Unitar, New York, 31-57.
67. Holloway, S. 1997. Safety of the underground disposal of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, 38, 241-245.
68. Hutterer, G. W. 2001. The status of world geothermal power generation 1995–2000. *Geothermics*, 30, 1-27.
69. Jaeger, J. C. 1965. Application of the theory of heat conduction to geothermal measurements. *Terrestrial heat flow*. 7-23.
70. Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K. & Lucas, N. 2001. Using ArcGIS geostatistical analyst, Esri Redlands.
71. Kegel A., Bates D. & Gawell K., 2007. *A Guide to Geothermal Energy and the Environment*. Geothermal Energy Association. Washington D.C., U.S.A., 86.
72. Kalogirou, S. A., Florides, G. A., Pouloupatis, P. D., Panayides, I., Joseph-Stylianou, J. & Zomeni, Z. 2012. Artificial neural networks for the generation of geothermal maps of ground temperature at various depths by considering land configuration. *Energy*, 48, 233-240.
73. Kanoglu, M. 2002. Exergy analysis of a dual-level binary geothermal power plant. *Geothermics*, 31, 709-724.
74. Kaygusuz, K. & Kaygusuz, A. 2002. Geothermal Energy: Power for a Sustainable Future. *Energy Sources*, 24, 937-947.
75. Lee, K. C. 2001. Classification of geothermal resources by exergy. *Geothermics*, 30, 431-442.
76. Lindal, B. 1973. Industrial and other applications of geothermal energy:(except power production and district heating).
77. Lumb, J. 1981. Prospecting for geothermal resources. *Geothermal Systems, Principles and Case Histories*, J. Wiley & Sons, New York, 77-108.
78. Lund, J., Sanner, B., Rybach, L., Curtis, R. & Hellstrom, G. 2004. Geothermal (ground-source) heat pumps—a world overview. *GHC Bulletin*, 25, 1-10.
79. Lund, J. W. 1990. Geothermal heat pumps. *Energy digest*, 19, 35-42.
80. Lund J. W. & Boyd, T. L. 2016. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66-93.
81. Lund, J. W. & Freeston, D. H. 2001. World-wide direct uses of geothermal energy 2000. *Geothermics*, 30, 29-68.

82. Lund, J. W., Freeston, D. H. & Boyd, T. L. 2005. Direct application of geothermal energy: 2005 worldwide review. *Geothermics*, 34, 691-727.
83. Lund, J. W., Freeston, D. H. & Boyd, T. L. 2011. Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. *Geothermics*, 40, 159-180.
84. Lunis, B. & Breckenridge, R. 1991. Environmental considerations. *Geothermal Direct Use, Engineering and Design Guidebook*, Geo-Heat Center, Klamath Falls, Oregon, 437-445.
85. Maguire, D. J. 1991. An overview and definition of GIS. *Geographical information systems: Principles and applications*, 1, 9-20.
86. Majer, E. L., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B. & Asanuma, H. 2007. Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. *Geothermics*, 36, 185-222.
87. Martin, D., Longley, P. & Higgs, G. 1994. The use of GIS in the analysis of diverse urban databases. *Computers, Environment and Urban Systems*, 18, 55-66.
88. Meidav, T. 1998. Rural electrification with renewable energy: geothermal power in arid regions. *The Arid Frontier*. Springer.
89. Mihalakakou, G., Santamouris, M. & Asimakopoulos, D. 1992. Modelling the earth temperature using multiyear measurements. *Energy and Buildings*, 19, 1-9.
90. Milora, S. L. & Tester, J. W. 1976. Geothermal energy as a source of electric power. *Thermodynamic and economic design criteria*.
91. Morgan, P. 1973. *Terrestrial near flow studies in Cyprus and Kenya*. University of London.
92. Muffler, P. & Cataldi, R. 1978. Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 7, 53-89.
93. Naarasimhan, T. & Goyal, K. 1984. Subsidence due to geothermal fluid withdrawal. *Reviews in Engineering Geology*, 6, 35-66.
94. Nicholson, K. 1993. *Geothermal Fluids*, 263 pp. Springer, New York.
95. Nicholson, K. 2012. *Geothermal fluids: chemistry and exploration techniques*, Springer Science & Business Media.
96. Partasides, G., Lizides, A., Kassinis, S., Florides, G., Pouloupatis, D., Kalogirou, S., Messaritits, V., Panayides, I., Zomeni, Z. & Sophocleous, E. 2011. Investigation and determination of the geothermal parameters of the ground in Cyprus for the exploitation of geothermal energy and the impact of the results in the design of the geothermal systems.

97. Paoletti, G. 2013. Ολοκληρωμένος Ενεργειακός Σχεδιασμός στην πρακτική των Δήμων. AffirmFative Integrated Energy Design Action. AIDA, 3.
98. Pehnt, M. 2006. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable energy*, 31, 55-71.
99. Phetteplace, G. 2007. Geothermal heat pumps. *Journal of Energy Engineering*, 133, 32-38.
100. Pirajno, F. 2000. *The Earth's Internal Structure and Convection in the Mantle. Ore Deposits and Mantle Plumes*. Springer.
101. Prol-Ledesma, R. 2000. Evaluation of the reconnaissance results in geothermal exploration using GIS. *Geothermics*, 29, 83-103.
102. Rybach, L. 2003. Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics*, 32, 463-470.
103. Rybach, L. & Muffler, L. J. P. 1981. *Geothermal systems: principles and case histories*. Chichester, Sussex, England and New York, Wiley-Interscience, 1981. 371 p., 1.
104. Sanner, B. 2001. Shallow geothermal energy. *GHC Bulletin*, 22, 19-25.
105. Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinou, D. & Rybach, L. 2003. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics*, 32, 579-588.
106. Sanyal, S. K. 2005. Cost of geothermal power and factors that affect it. *Proceedings World Geothermal Congress*, 24-29.
107. Smith, R. & Shaw, H. 1979. Igneous-related geothermal systems. *US Geol Surv Circ*, 790, 12-17.
108. Suarez-Arriaga, M.-C., Bundschuh, J. & Samaniego, F. 2014. Assessment of submarine geothermal resources and development of tools to quantify their energy potentials for environmentally sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 83, 21-32.
109. Truesdell, A. & White, D. 1973. Production of superheated steam from vapor-dominated geothermal reservoirs. *Geothermics*, 2, 154-173.
110. Varet, J., 2006. Energy and climate change issues: earth science solution. *Geoscience for a sustainable Earth BRGM – EuroGeoSurveys*. Bucharest, Romania.
111. Verhoogen, J. 1980. *Energetics of the Earth*. In: SCIENCES, N. A. O. (ed.). Washington: National Academy Press.
112. Visvalingam, M. 1989. Cartography, GIS and maps in perspective. *The Cartographic Journal*, 26, 26-32.

113. Von Zabeltitz, C. 1986. Greenhouse heating with solar energy. *Energy in agriculture*, 5, 111-120.
114. Weres, O. 1984. Numerical evaluation of surface condensers for geothermal power plants. *Geothermics*, 13, 293-304.
115. White, D. E. 1973. Characteristics of geothermal resources. *EOS, Trans., Am. Geophys. Union*, 54.
116. White, R. L. 1969. Review of recent work on the magnetic and spectroscopic properties of the rare-earth orthoferrites. *Journal of Applied Physics*, 40, 1061-1069.
117. Wiggs, B. R., Womack, J. L., Bickford, W. C. & Hawk, J. E. 1998. Geothermal heat exchange unit. Google Patents.
118. Williams, C. F., Reed, M. J. & Mariner, R. H. 2008. A review of methods applied by the US Geological Survey in the assessment of identified geothermal resources. *US Geological Survey Open-File Report*, 1296, 27.
119. Zohdy, A. A., Anderson, L. & Muffler, L. 1973. Resistivity, self-potential, and induced-polarization surveys of a vapor-dominated geothermal system. *Geophysics*, 38, 1130-1144.
120. Zwarycz, K. 2002. Snow melting and heating systems based on geothermal heat pumps at Goleniow Airport, Poland.

### 7.3 Ιστοσελίδες

- <http://www.mfa.gov.cy/mfa/mfa2006.nsf/All/59F3D984344920DAC2257C4E0035D356?OpenDocument>
- [http://www.moa.gov.cy/moa/gsd/gsd.nsf/All/F8C615D8FCE161C8C2257CF4001CD1D1/\\$file/Final%20Leaflet\\_1.pdf?OpenElement](http://www.moa.gov.cy/moa/gsd/gsd.nsf/All/F8C615D8FCE161C8C2257CF4001CD1D1/$file/Final%20Leaflet_1.pdf?OpenElement)
- <http://www.moa.gov.cy/moa/environment/environment.nsf/0/633e2b3c7024b431c22578a400364299?OpenDocument&ExpandSection=1>
- <http://imarinakiss.webs.com/geothermal.pdf>
- [www.cres.gr](http://www.cres.gr)
- <http://www.ecotec.gr/article.php?ID=128><http://www.geothermal-energy.org/319.html>
- [http://www.vdi.eu/guidelines/vdi\\_4640\\_blat\\_2-thermische\\_nutzung\\_des\\_untergrundes\\_erdgekoppelte\\_waermepumpenanlagen/](http://www.vdi.eu/guidelines/vdi_4640_blat_2-thermische_nutzung_des_untergrundes_erdgekoppelte_waermepumpenanlagen/)