ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ»

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Μπαζιώνη Κ. Ιωάννη

Επιβλέπων

Τζιβανίδης Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Τομέας Θερμότητας

Αθήνα, Οκτώβρης 2018

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΕΡΓΑΣΙΑ:	**«Μοντέλο υπολογισμού θερμικής συμπεριφοράς κατακόρυφου γεωθερμικού εναλλάκτη»**
ΦΟΙΤΗΤΗΣ:	**Μπαζιώνης Κ. Ιωάννης**
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:	**Τζιβανίδης Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Τομέας Θερμότητας**
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΕΤΟΣ:	**2017-18**

Σύνοψη

Στην παρούσα εργασία θα αναπτυχθεί και επιβεβαιωθεί υπολογιστικό μοντέλο προσδιορισμού της θερμικής συμπεριφοράς γεωθερμικών εναλλακτών θερμότητας λαμβάνοντας υπόψη τις θερμικές ιδιότητες των υπεδαφικών υλικών και την ποικιλομορφία της παρουσίας τους εντός του επιφανειακού φλοιού. Παράλληλα αναπτύχτηκε και διαμορφώθηκε το μοντέλο αλληλεπίδρασης των επιδόσεων συναρτήσει του χρόνου. Αναπτύχτηκε μαθηματικό μοντέλο και βάση δεδομένων με υπεδαφικά υλικά, η οποία ως δυναμική θα μπορεί να επεκταθεί και σε άλλες περιοχές με άλλα υλικά και σε δομές μετάδοσης θερμότητας μέσω των γεωθερμικών εναλλακτών θερμότητας. Για την ανάπτυξη χρησιμοποιήθηκαν έτοιμες δομές προγραμματισμού και αναπτύχτηκαν, συμπληρώθηκαν νέοι υπολογιστικοί κώδικες. Οι δομές προγραμματισμού αφορούν σε παράδειγμα κτιρίου το οποίο έχει ετήσιες απαιτήσεις σε θέρμανση και ψύξη. Η λογική του προγραμματισμού ορίζεται στην υποχρεωτική κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων σε ετήσια βάση εξαντλώντας την συνθήκη θερμοκρασιακής διαφοράς. Τα αποτελέσματα ανταποκρίνονται στην επιλογή των δεδομένων που «τυχαία» επιλέχτηκαν ως ενεργειακές απαιτήσεις ενώ οι τιμές των θερμικών ιδιοτήτων των υπεδαφικών υλικών εκτιμηθήκαν με βάση την διεθνώς αναγνωρισμένη ερευνητική λογική από τα πετρώματα πυκνοκατοικημένων περιοχών του ελλαδικού χώρου. Το πεδίο υπολογισμών θεωρήθηκε ομοιογενές και ισότροπο, μια παραδοχή η οποία δεν υφίσταται στην πραγματικότητα αλλά που για τόσο μεγάλα πεδία ελέγχου η πιθανότητα σφάλματος είναι περιορισμένη. Στο τέλος παρουσιάζονται και αναλύονται οι πινάκες αναπτυσσομένων θερμοκρασιών και τα αντίστοιχα διαγράμματα που προκύπτουν από την εκτέλεση του κώδικα. Επίσης από την τελική επεξεργασία εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά: Γεωθερμικός Εναλλάκτης Θερμότητας, Ροή Θερμότητας, Ροή μάζας

Περίληψη

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η κατασκευή ενός μοντέλου υπολογισμού για τη διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς κατακόρυφου γεωθερμικού εναλλάκτη. Για την ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν έτοιμες δομές προγραμματισμού με μικρές προσθήκες προσαρμογής για τις μετρήσεις μας, καθώς και για τη συμβατότητα με νεότερα προγράμματα.

Μέσω της χρήσης του υπολογιστικού μοντέλου που αναπτύχθηκε σε προγραμματιζόμενο κώδικα προκύπτουν πίνακες θερμοκρασιακών τιμών καθώς και απεικονίσεις θερμοκρασιακών διαβαθμίσεων από την οποία προκύπτουν διάφορα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των γεωθερμικών εναλλακτών. Τα συμπεράσματα σχετίζονται τόσο με τις γεωλογικές συνθήκες κάθε περιοχής μελέτης και των θερμικών χαρακτηριστικών αυτής, αλλά και με τη μεταβολή των θερμοκρασιακών τιμών συναρτήσει του χρόνου. Επιπλέον μας δίνεται η δυνατότητα να εκτιμήσουμε την αποδοτικότητα του υπό μελέτη συστήματος, καθώς και να προτείνουμε τρόπους βελτίωσης της απόδοσης σε περιπτώσεις προβληματικών αποτελεσμάτων.

Αρχικά, γίνεται παρουσίαση κάποιων γενικών δεδομένων σχετικά με τη γεωθερμία, με στόχο την κατανόηση κάποιων γενικών αρχών της, της προέλευσης της καθώς και των συστημάτων ανοιχτού και κλειστού κυκλώματος που χρησιμοποιούνται για στην εκμετάλλευσή της για ανθρώπινη δραστηριότητα.

Στη συνέχεια παρατίθενται δεδομένα για τη γεωθερμική δραστηριότητα στην Ελλάδα. Η παρούσα μελέτη γίνεται με στόχο να παρατηρηθεί η συμπεριφορά κατακόρυφων γεωθερμικών εναλλακτών σε επιλεγμένες αστικές περιοχές της χώρας. Για να γίνει αυτό απαιτήθηκε να εκτιμηθούν οι τιμές θερμικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων κάθε περιοχής (πυκνότητα εδάφους, θερμική αγωγιμότητα, ειδική θερμοχωρητικότητα, θερμική διάχυση). Μελετώντας τους αντίστοιχους γεωλογικούς χάρτες των επιλεγμένων περιοχών, εκτιμήθηκε η ποσοστιαία παρουσία πετρωμάτων σε αυτές και κατασκευάστηκαν πίνακες τιμών των παραπάνω θερμικών ιδιοτήτων.

Προχωρώντας, παρουσιάζεται ο κώδικας τον οποίο προσαρμόσαμε για να τρέξει το πρόγραμμα. Αρχικά περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίχθηκε ο κώδικας, ώστε να κατανοηθούν οι αρχές στις οποίες βασίστηκε. Το σημαντικό που προσφέρει ο κώδικας είναι η δυνατότητα κυκλικών επαναλήψεων ανά έτος ώστε να δούμε τη μεταβολή των θερμοκρασιακών τιμών συναρτήσει του χρόνου. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθούν οι συνθήκες με τις οποίες τρέχει ο κώδικας. Έχει θεωρηθεί κτίριο με μηνιαίες ενεργειακές ανάγκες και ημερήσιες ώρες λειτουργίας. Οι παραπάνω τιμές είναι αυθαίρετες. Η αρχική θερμοκρασία του εδάφους έχει οριστεί στους 20 °C, εκφράζοντας έτσι μια μέση τιμή θερμοκρασίας του εδάφους του ελλαδικού χώρου. Τέλος έχει οριστεί ένας αριθμός δυο γεωεναλλακτών και βάθους 60 μέτρων.

Οι μόνες τιμές που αλλάζουν ουσιαστικά είναι αυτές των θερμικών ιδιοτήτων για κάθε περιοχή. Παρατηρώντας το σύνολο των αποτελεσμάτων δίνεται η δυνατότητα εκτίμησης της απόδοσης του συνολικού συστήματος. Παράλληλα τυχόν αποτελέσματα που εκτιμήθηκαν να μην εκφράζουν υψηλή απόδοση, βελτιώθηκαν αυξάνοντας τον αριθμό των γεωεναλλακτών ή/και το βάθος αυτών. Στόχος, η μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς των προκυπτόντων θερμοκρασιακών τιμών με την αρχική θερμοκρασία του εδάφους ώστε να αυξηθεί η ποσότητα απαγόμενης θερμότητας και κατά συνέπεια η απόδοση του συστήματος.

Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι οι παραπάνω βελτιώσεις της απόδοσης του συστήματος, προϋποθέτουν οικονομική επιβάρυνση, παρόλα αυτά έτσι προκύπτει το συμπέρασμα για το πόσο συμφέρουσα είναι μια τέτοια επένδυση σε ένα αντίστοιχο γεωθερμικό σύστημα σε κάθε περιοχή.

Με βάση τα παραπάνω, παρουσιάζονται στο 4^{ο} κεφάλαιο τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας. Αποτυπώνονται οι απεικονίσεις της θερμοκρασιακής κατανομής για κάθε περίπτωση. Γίνεται εκτίμηση των αποτελεσμάτων και βελτίωση εκείνων που δεν είναι αποδοτικά για το αρχικό σύστημα. Επιπλέον προβαίνουμε σε συμπεράσματα για την επίδραση των γεωθερμικών χαρακτηριστικών στο σύστημα, την αλληλεπίδραση των γεωτρήσεων του συστήματος τόσο μεταξύ τους όσο και με το εδαφικό περιβάλλον, καθώς και η σημασία παρουσίας νερού στο υπέδαφος.

Τέλος, αφού παρουσιαστούν αναλυτικά τα παραπάνω συμπεράσματα, προτείνονται περαιτέρω χρήσεις του κώδικα με διαφορετικά προκύπτοντα συμπεράσματα σε μηνιαία ή και ημερήσια βάση, καθώς και δυνατότητες εξέλιξης της παρούσας διπλωματικής εργασίας για μελέτη και ανάλυση περισσότερων δεδομένων.

POST-GRADUATE THESIS:	**«Calculation model of thermal behavior of borehole heat exchangers»**
STUDENT:	**Bazionis K. Ioannis**
SUPERVISOR:	**Tzivanidis Christos, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, NTUA, Thermal Engineering Section**
ACADEMIC YEAR:	**2017-18**

Abstract

In this paper, a calculation model for determining the thermal behavior of geothermal heat exchangers was developed and confirmed taking into account the thermal properties of the underground materials and the diversity of their presence in the surface crust. At the same time, the performance interaction model was developed as a function of heat transfer over time. A mathematical model and value base of the underground materials was developed, which as a dynamic, it can be extended to other areas with different materials as well as to heat transmission structures through geothermal heat exchangers. For the development, ready-made programming structures were used and developed. The programming structures relate to the example of a building that has annual heating or cooling requirements. The planning logic is defined as the mandatory coverage of energy requirements on a yearly basis, exhausting the temperature difference condition. The results correspond to the choice of data that were «randomly» selected for energy requirements while the values of the thermal properties of the underground materials were estimated from the densely populated rocks of the Greek space. The calculation field was considered to be homogeneous and isotropic, an assumption that does not actually exist, but for such large control fields the probability of error is limited. In the end, both the presentation and analysis of the charts and the temperature tables resulting from the execution of the code are presented, as well as the final conclusions in which the above procedure leads to.

Key words: Geothermal heat exchanger, heat flow, mass flow

Summary

The aim of the present study is to construct a calculation model for investigating the thermal behavior of a borehole geothermal heat exchanger. For the development of the mathematical model, ready-made programming structures were used with small adaptations for our measurements, as well as for compatibility adaptations with recent software.

Through the use of the programming code, temperature value tables and temperature gradient tables result from which various conclusions can be drawn for the behavior of geothermal exchangers. The conclusions are related both to the geological conditions of each studied area and its thermal characteristics, but also to the change in temperature values over time. In addition, we are able to evaluate the efficiency of the system under study, as well as suggest ways to improve performance in case of problematic results.

Initially, some general geothermal data are presented to understand some of its general principles, its origins as well as the open and closed circuit systems used for its exploitation for human activity.

Subsequently, data on the geothermal activity in Greece are presented. The present study is aims to observe the behavior of borehole geothermal exchangers in selected urban areas of the country. In order to do this it was necessary to estimate the values of the thermal characteristics of the rocks of each region (soil density, thermal conductivity, specific heat capacity, thermal diffusion). By studying the respective geological maps of the selected areas, the percentage of rocks in them was estimated and the values of the above thermal properties were constructed.

Moving forward, we present the code that we customized to run the program. At first the theoretical background of the code is presented, in order to understand the principles on which it was based. The key feature of the code is the possibility of circular repetitions per year to see the change in temperature values over time. At this point, the conditions under which the code runs should be mentioned. We consider a building with monthly energy needs and daily hours of operation. The above values are arbitrary. The initial underground temperature is set at 20 °C, expressing an average temperature of the soil in Greece. Finally, a number of two geothermal exchangers and a depth of 60 meters have been set.

The only values that essentially change are those of the thermal properties for each region. Observing all the results, it is possible to assess the performance of the overall system. At the same time, any results estimated not to indicate high performance have been improved by increasing the number of the borehole exchangers and / or their depth. The objective is to reduce the temperature difference of the resulting temperature values to the initial soil temperature in order to increase the amount of heat absorbed and consequently the system's performance.

Here, it should be noted that the above improvements in system performance imply a financial burden, yet this leads to a conclusion on how viable such investment is, in a corresponding geothermal system in each region.

Based on the above, the results of the above procedure are presented in Chapter 4. Representations of the temperature distribution for each case are captured. We evaluate the results and improve those that are not profitable for the original system. In addition, we make conclusions about the effect of geothermal characteristics on the system, the interaction of the drillings of the system with each other and as well as with the soil environment, and the importance of the presence of water in the underground rocks.

Finally, after presenting the above conclusions in detail, further uses of the code are proposed with different resulting conclusions on a monthly or daily basis, as well as possibilities for the development of this thesis for study and analysis of more data.

Περιεχόμενα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ 6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ 8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ 10
ΠΡΟΛΟΓΟΣ 11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ 12
1.1 Γεωθερμική ενέργεια και η προέλευση της 12
1.1.1 Γεωθερμία και γεωθερμική ενέργεια 12
1.1.2 Προέλευση της θερμότητας στο εσωτερικό της Γης 12
1.2 Γεωθερμική βαθμίδα και θερμική κυκλοφορία 13
1.3 Γεωθερμικά πεδία – Σχηματισμός – Ταξινόμηση 15
1.4 Κανονική γεωθερμία – Τεχνολογίες αξιοποίησης 15
1.4.1 Συστήματα ανοικτού κυκλώματος 16
1.4.2 Συστήματα κλειστού κυκλώματος 17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΕΛΛΑΔΑΣ 19
2.1 Γενικά στοιχεία για τη γεωλογία της Ελλάδας 19
2.2 Εμφάνιση γεωθερμίας στον Ελλαδικό χώρο 20
2.3 Χαρακτηριστικά γεωλογικών πετρωμάτων ελλαδικού χώρου 22
2.4 Επιφανειακή γεωλογία κεντρικών περιοχών 23
2.5 Επιλογή χαρακτηριστικών πετρωμάτων 33
2.6 Χαρακτηριστικές ιδιότητες των πετρωμάτων 33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ-ΚΩΔΙΚΑΣ 37
3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο κώδικα – επιλογή της μεθόδου 37
3.1.1 Εξίσωση πεπερασμένων διαφορών 37
3.1.2 Οριακές συνθήκες 38
3.1.3 Μόνιμη διδιάστατη αγωγή θερμότητας 40
3.1.4 Επίλυση συστήματος εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών 41
3.1.5 Επαναληπτική μέθοδος 41
3.1.6 Κριτήρια σύγκλισης 41
3.2 Παρουσίαση του κώδικα 43
3.3 Επεξήγηση του κώδικα 64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΩΔΙΚΑ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 101

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: *Εξέλιξη της ραδιογενούς θερμότητας με το χρόνο* 13

Εικόνα 1.2: *Διάγραμμα απεικόνισης μεταβολής γεωθερμικής βαθμίδας με το βάθος* 14

Εικόνα 1.3: *Παγκόσμιο δίκτυο γεωθερμικής δραστηριότητας* 15

Εικόνα 1.4: *Σχηματική απεικόνιση τυπικού γεωθερμικού συστήματος* 16

Εικόνα 1.5: *Σχηματική απεικόνιση οριζόντιων κλειστών γεωθερμικών συστημάτων, μία μορφή διάταξης με αύξηση του ενεργού όγκου* 17

Εικόνα 1.6: *Σχηματική απεικόνιση κατακόρυφων κλειστών γεωθερμικών συστημάτων, μια μορφή διάταξης με εν σειρά παράλληλες ομάδες εναλλακτών* 18

Εικόνα 2.1: *Σχήμα Γεωτεκτονικών Ζωνών της Ελλάδας* 20

Εικόνα 2.2: *Μερικά από τα αναγνωρισμένα γεωθερμικά πεδία της Ελλάδας* 21

Εικόνα 2.3: *Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας* 22

Εικόνα 2.4: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Αθήναι – Πειραιεύς (ΙΓΜΕ)* 24

Εικόνα 2.5: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Κηφισιά (ΙΓΜΕ)* 25

Εικόνα 2.6: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Αθήναι – Ελευσίς (ΙΓΜΕ)* 26

Εικόνα 2.7: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Κορωπί – Πλάκα (ΙΓΜΕ)* 27

Εικόνα 2.8: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Θεσσαλονίκη (ΙΓΜΕ)* 28

Εικόνα 2.9: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Λάρισα (ΙΓΜΕ)* 29

Εικόνα 2.10: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Πάτραι (ΙΓΜΕ)* 30

Εικόνα 2.11: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Ηράκλειο (ΙΓΜΕ)* 31

Εικόνα 2.12: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Βόλος (ΙΓΜΕ)* 32

Εικόνα 3.1: *Ομάδα τριών κόμβων και συμβολισμός αποστάσεων* 38

Εικόνα 3.2: *Εσωτερικός και οριακοί όγκοι αναφοράς* 39

Εικόνα 3.3: *Παράδειγμα απεικόνισης κώδικα* 64

Εικόνα 3.4: *Παράδειγμα απεικόνισης κώδικα* 65

Εικόνα 3.5: *Πίνακας θερμοκρασιακών αποτελεσμάτων κώδικα* 65

Εικόνα 3.6: *Απεικόνιση θερμοκρασιακών διακυμάνσεων όπως προκύπτουν από τον κώδικα* 66

Εικόνα 4.1: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για την Αθήνα για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 67

Εικόνα 4.2: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομή για την Αθήνα για δυο έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 68

Εικόνα 4.3: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για την Αθήνα για τρία έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 68

Εικόνα 4.4: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Ηράκλειο για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 69

Εικόνα 4.5: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Ηράκλειο για δυο έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 69

Εικόνα 4.6: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Ηράκλειο για τρία έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 70

Εικόνα 4.7: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Βόλο για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 70

Εικόνα 4.8: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Βόλο για δυο έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 71

Εικόνα 4.9: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Βόλο για τρία έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 71

Εικόνα 4.10: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για την Πάτρα για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 72

Εικόνα 4.11: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για την Αθήνα για ένα έτος υπολογισμών σε πετρώματα κορεσμένα σε νερό* 73

Εικόνα 4.12: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Ηράκλειο για ένα έτος υπολογισμών σε πετρώματα κορεσμένα σε νερό* 74

Εικόνα 4.13: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Βόλο για ένα έτος υπολογισμών σε πετρώματα κορεσμένα σε νερό* 74

Εικόνα 4.14: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Θεσσαλονίκη για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 76

Εικόνα 4.15: *Πίνακας θερμοκρασιακών αποτελεσμάτων κώδικα για τη Θεσσαλονίκη για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 76

Εικόνα 4.16: *Πίνακας ενεργειακών απαιτήσεων κτιρίου ανά μήνα και ημερήσιος χρόνος λειτουργίας* 77

Εικόνα 4.17: *Τελική απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Θεσσαλονίκη για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 78

Εικόνα 4.18: *Τελική απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Θεσσαλονίκη για δυο έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 78

Εικόνα 4.19: *Τελική απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Θεσσαλονίκη για τρία έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 79

Εικόνα 4.20: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Λάρισα και την Πάτρα για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα* 80

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: *Διάγραμμα t – T για την Αθήνα για ξηρά πετρώματα (2 εναλλάκτες / 60m)* 87

Διάγραμμα 2: *Διάγραμμα t – T για τη Θεσσαλονίκη για ξηρά πετρώματα (4εναλλάκτες / 80m)* 87

Διάγραμμα 3: *Διάγραμμα t – T για τη Λάρισα για ξηρά πετρώματα (5 εναλλάκτες / 100m)* 87

Διάγραμμα 4: *Διάγραμμα t – T για την Πάτρα για ξηρά πετρώματα (5 εναλλάκτες / 100m)* 88

Διάγραμμα 5: *Διάγραμμα t – T για το Ηράκλειο για ξηρά πετρώματα (2 εναλλάκτες / 60m)* 88

Διάγραμμα 6: *Διάγραμμα t – T για το Βόλο για ξηρά πετρώματα (2 εναλλάκτες / 60m)* 88

Διάγραμμα 7: *Διάγραμμα t – T για την Αθήνα για πετρώματα κορεσμένα με νερό(2 εναλλάκτες / 60m)* 89

Διάγραμμα 8: *Διάγραμμα t – T για τη Θεσσαλονίκη για πετρώματα κορεσμένα με νερό (2 εναλλάκτες / 60m)* 89

Διάγραμμα 9: *Διάγραμμα t – T για τη Λάρισα για πετρώματα κορεσμένα με νερό (2 εναλλάκτες / 60m)* 89

Διάγραμμα 10: *Διάγραμμα t – T για την Πάτρα για πετρώματα κορεσμένα με νερό (2 εναλλάκτες / 60m)* 90

Διάγραμμα 11: *Διάγραμμα t – T για το Ηράκλειο για πετρώματα κορεσμένα με νερό (2 εναλλάκτες / 60m)* 90

Διάγραμμα 12: *Διάγραμμα t – T για το Βόλο για πετρώματα κορεσμένα με νερό (2 εναλλάκτες / 60m)* 90

Διάγραμμα 13: *Διάγραμμα t – T για την Αθήνα για ξηρά πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)* 93

Διάγραμμα 14: *Διάγραμμα t – T για τη Θεσσαλονίκη για ξηρά πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (4 εναλλάκτες / 80m)* 93

Διάγραμμα 15: *Διάγραμμα t – T για τη Λάρισα για ξηρά πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (5 εναλλάκτες / 100m)* 93

Διάγραμμα 16: *Διάγραμμα t – T για την Πάτρα για ξηρά πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (5 εναλλάκτες / 100m)* 94

Διάγραμμα 17: *Διάγραμμα t – T για το Ηράκλειο για ξηρά πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)* 94

Διάγραμμα 18: *Διάγραμμα t – T για το Βόλο για ξηρά πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)* 94

Διάγραμμα 19: *Διάγραμμα t – T Αθήνας για κορεσμένα με νερό πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)* 95

Διάγραμμα 20: *Διάγραμμα t – T Θεσ/νίκης για κορεσμένα με νερό πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)* 95

Διάγραμμα 21: *Διάγραμμα t – T Λάρισας για κορεσμένα με νερό πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)* 95

Διάγραμμα 22: *Διάγραμμα t – T Πάτρας για κορεσμένα με νερό πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)* 96

Διάγραμμα 23: *Διάγραμμα t – T Ηρακλείου για κορεσμένα με νερό πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)* 96

Διάγραμμα 24: *Διάγραμμα t – T Βόλου για κορεσμένα με νερό πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)* 96

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: *Τυπικές τιμές γεωθερμικών χαρακτηριστικών πετρωμάτων* 34

Πίνακας 2: *Ενδεικτικές μέσες τιμές ιδιοτήτων υπεδαφικών υλικών για ξηρά πετρώματα* 35

Πίνακας 3: *Ενδεικτικές μέσες τιμές ιδιοτήτων υπεδαφικών υλικών για κορεσμένα σε νερό πετρώματα* 36

Πίνακας 4: *Απεικόνιση θερμοκρασιακών τιμών εξωτερικού ημικυκλίου θερμοκρασιακών διαβαθμίσεων για ξηρά πετρώματα* 86

Πίνακας 5: *Απεικόνιση θερμοκρασιακών τιμών εξωτερικού ημικυκλίου θερμοκρασιακών διαβαθμίσεων για πετρώματα κορεσμένα σε νερό* 86

Πίνακας 6: *Απεικόνιση θερμοκρασιακών τιμών του χώρου αλληλεπίδρασης των για ξηρά πετρώματα* 92

Πίνακας 7: *Απεικόνιση θερμοκρασιακών τιμών του χώρου αλληλεπίδρασης των για κορεσμένα με νερό πετρώματα* 92

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στα πλαίσια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Χρήστο Τζιβανίδη, Αναπληρωτή Καθηγητή, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία και τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα αντικείμενο του ενδιαφέροντος μου σε επίπεδο μεταπτυχιακής εργασίας.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Μιχάλη Γρ. Βραχόπουλο, Καθηγητή, ο οποίος είναι ο αποκλειστικός διδάσκων του αντικειμένου της γεωθερμίας στο αντίστοιχο μάθημα «Ηλιακή Ενέργεια – Γεωθερμία», του μεταπτυχιακού προγράμματος «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας» του τμήματος ΗΜΜΥ του ΕΜΠ. Η παρούσα εργασία ολοκληρώθηκε χάρη στη συνεχή εποπτεία και καθοδήγηση του, καθώς και στη συστηματική συμβουλευτική του πάνω στο αντικείμενο.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Ιωάννη Αλεξόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή, και κ. Χρήστο Φίλη, Γεωλόγο (MSc) Υποψήφιο Διδάκτορα του Τομέα Τεκτονικής του τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του ΕΚΠΑ, για την πολύτιμη βοήθεια τους με την παροχή και επεξήγηση γεωλογικών χαρτών που χρειάστηκαν για τη μελέτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 -ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

1.1Γεωθερμική ενέργεια και η προέλευση της

1.1.1 Γεωθερμία και γεωθερμική ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μορφές ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα. Αποτελεί ενέργεια εγκλωβισμένη στο εσωτερικό της Γης, και είναι πρακτικά απεριόριστη, γεγονός που την εντάσσει εν μέρει στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η μετάδοση της θερμότητας προς την επιφάνεια πραγματοποιείται:

i. είτε με αγωγή από το εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνειά του με ρυθμό 0.04 – 0.06 W/m^2
ii. είτε μέσω ρευμάτων μεταφοράς που εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών λόγω παρουσίας έντονης ηφαιστειότητας και υδροθερμικών φαινομένων.[1]

Από περιβαλλοντικής άποψης θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως πράσινη πηγή ενέργειας αφού οι εκπομπές σε αέρια του θερμοκηπίου είναι ουσιαστικά μηδενικές συγκριτικά με άλλες μεθόδους παραγωγής ενέργειας. Για παράδειγμα, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι περίπου 45gr/kWh_e, δηλαδή κοντά στο 5% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από καύση λιγνίτη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.[2]

Στις βασικές και άμεσες χρήσεις τις γεωθερμίας, απ' όπου δηλαδή γίνεται αξιοποίηση των ρευστών ως πηγή θερμότητας χωρίς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνονται η θέρμανση κτιρίων, χρήσεις σε κτηνοτροφία και γεωργία, αφαλάτωση, υδατοκαλλιέργειες, διάφορες βιομηχανικές χρήσεις κ.ά.

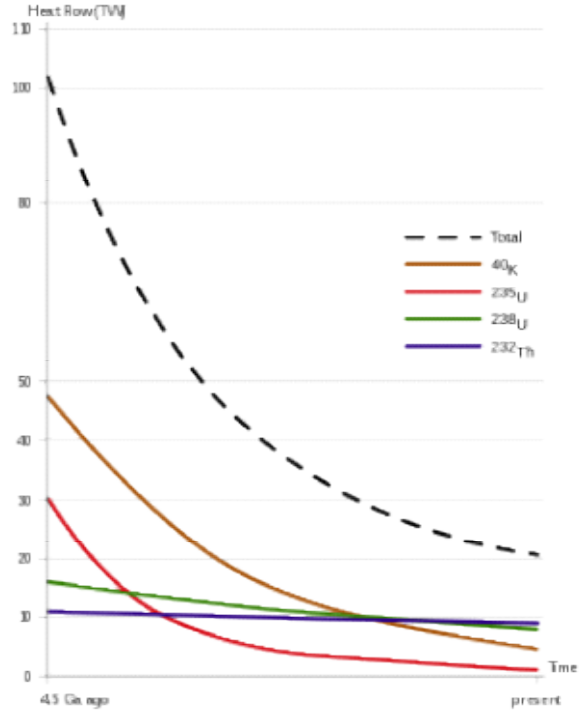
Το ιδιαίτερα μεγάλο δυναμικό της καθώς και τα πλεονεκτήματά της σε περιβαλλοντικό επίπεδο οδηγούν στο εύλογο συμπέρασμα ότι η αξιοποίηση της γίνεται όλο και σημαντικότερη προτεραιότητα στον ενεργειακό χώρο. Βασικός σκοπός λοιπόν της Γεωθερμίας ως επιστήμη είναι ο εντοπισμός γεωθερμικών συστημάτων και η μετ' έπειτα αξιοποίησή τους.

1.1.2 Προέλευση της θερμότητας στο εσωτερικό της Γης

Η θερμότητα του εσωτερικού της Γης συνδέεται άμεσα τόσο με τη γένεση του πλανήτη, όσο και με την εξέλιξη του καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του. Η ροή θερμότητας προς την επιφάνεια του πλανήτη υπολογίζεται στα 47 TW[3] και προέρχεται από δύο βασικές πηγές, τη ραδιογενή και την πρωτογενή θερμότητα.

i. <u>*Ραδιογενής θερμότητα*</u>
Η ραδιενεργή διάσπαση στοιχείων στον μανδύα και το φλοιό της Γης έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αδελφών ισοτόπων και την απελευθέρωση σωματιδίων και θερμικής ενέργειας, ή αλλιώς ραδιογενή θερμότητα. Τα βασικότερα ραδιενεργά ισότοπα που έχουν μεγάλους χρόνους ημιζωής και αρκετή συγκέντρωση ώστε να παράγουν σημαντικές ποσότητες θερμότητας είναι, ουράνιο-238 (^{238}U), ουράνιο-235 (^{235}U), θόριο-232 (^{232}Th) και κάλιο-40 (^{40}K).[4,5,6,7,8]Πρόσφατοι υπολογισμοί και

μελέτες δείχνουν ότι το 80% της θερμικής ροής που εμφανίζεται στην επιφάνεια της Γης είναι ραδιογενούς προέλευσης.



Εικόνα 1.1: *Εξέλιξη της ραδιογενούς θερμότητας με το χρόνο*

ii. *Πρωτογενής θερμότητα*

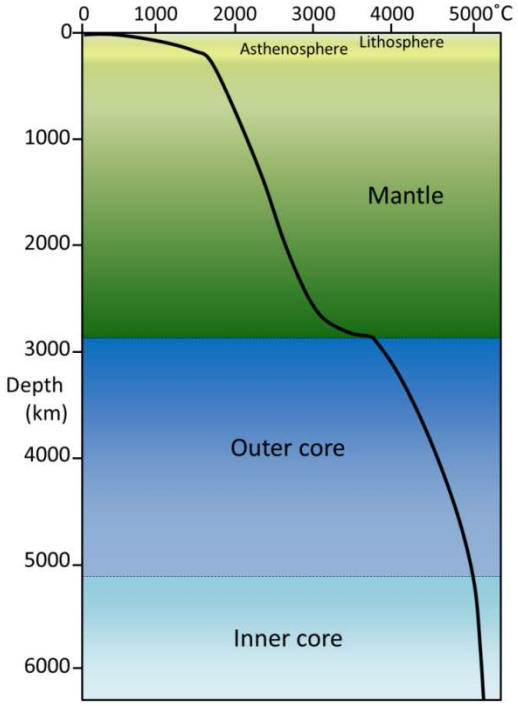
Πρόκειται για τη θερμότητα που εκλύεται από τον πυρήνα της Γης ήδη από την αρχή της δημιουργίας του πλανήτη. Η εξέλιξη και ο σχηματισμός της Γης μέσα στο χρόνο οδήγησε σε σταδιακή διαφοροποίηση στην εσωτερική της δομή. Σωματίδια άρχισαν να προσκρούουν λόγω βαρυτικής έλξης. Η πρόσκρουση αυτή είχε ως αποτέλεσμα την έκλυση μεγάλης ποσότητας θερμότητας. Μέσω της βαρύτητας και της περιστροφής της, υλικά μεγαλύτερου ειδικού βάρους καθίζαναν στο κέντρο της Γης σχηματίζοντας τον πυρήνα της από τον οποίον μέχρι και σήμερα απελευθερώνονται σημαντικά ποσά θερμότητας, τα οποία αποτελούν την πρωτογενή θερμότητα. [5,9]

1.2 Γεωθερμική βαθμίδα και θερμική κυκλοφορία

Η θερμοκρασία του εσωτερικού της Γης αυξάνεται με το βάθος. Την αύξηση αυτή σε σχέση με το βάθος εκφράζει η γεωθερμική βαθμίδα. Κυμαίνεται από 15-30K(°C)/km στα πρώτα 100 km βάθος, στη συνέχεια μειώνεται ενώ στη βάση του μανδύα αυξάνεται απότομα και καταλήγει να αυξάνεται αργά στο εσωτερικό του πυρήνα. Χαρακτηριστικά, στη βάση του φλοιού συναντώνται θερμοκρασίες κοντά στους 1000 °C, ενώ στη βάση του μανδύα η θερμοκρασία κυμαίνεται στους 3500 °C. Τέλος στο εσωτερικό του πυρήνα, η θερμοκρασία ξεπερνά τους

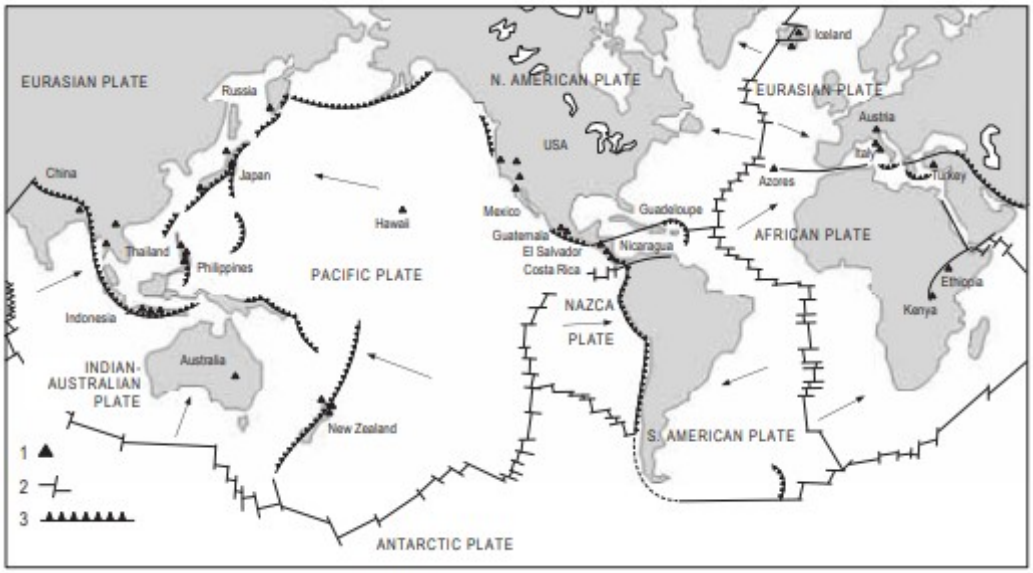
5000°C. Όπως φαίνεται λοιπόν και στην **Εικόνα 1.2**, η αύξηση της θερμοκρασίας του εσωτερικού της Γης δε γίνεται γραμμικά.[9]

Πιο συγκεκριμένα, επειδή προφανώς η ανθρώπινη δραστηριότητα στο χώρο της γεωθερμίας περιορίζεται σε πολύ μικρά βάθη στην επιφάνεια του φλοιού, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η γεωθερμική βαθμίδα στο χώρο της λιθόσφαιρας ποικίλει ανάλογα τις τεκτονικές συνθήκες. Στα ηπειρωτικά κομμάτια έχει σχετικά χαμηλές τιμές, στις ζώνες υποβύθισης μεγαλύτερες τιμές, ενώ στα αποκλίνοντα περιθώρια και τάφρους, οι τιμές τις γεωθερμικής βαθμίδας αυξάνεται ακόμα περισσότερο.[9]



Εικόνα 1.2: *Διάγραμμα απεικόνισης μεταβολής γεωθερμικής βαθμίδας με το βάθος*

Παρακολουθώντας την τεκτονική της Γης, είναι αρκετά εύκολο να εκτιμήσουμε που μπορεί να υπάρχει σημαντική έκλυση θερμότητας. Ζώνες υποβύθισης, μεσοωκεάνιες ράχες, ρήγματα μετασχηματισμού αποτελούν ουσιαστικά το δίκτυο σύνδεσης των λιθοσφαιρικών πλακών. Σημαντικές δυνάμεις τριβής και μεταφοράς που ασκούνται στα ρήγματα μετασχηματισμού και τις ζώνες υποβύθισης και προφανώς η παρουσία μαγματικής δραστηριότητας στις θέσεις αυτές, κάνουν προφανές ότι το παραπάνω δίκτυο τεκτονικών δομών αποτελεί και το βασικό δίκτυο γεωθερμικής δραστηριότητας του πλανήτη, όπως βλέπουμε και στην **Εικόνα 1.3**.



Εικόνα 1.3: *Παγκόσμιο δίκτυο γεωθερμικής δραστηριότητας*

1.3 Γεωθερμικά πεδία – Σχηματισμός – Ταξινόμηση

Γεωθερμικό πεδίο αποτελεί ο χώρος στον οποίο γίνεται η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας. Ανάλογα τη θερμοκρασία των ρευστών που συναντούμε, διακρίνουμε τα γεωθερμικά πεδία σε:

i. *Υψηλής ενθαλπίας*
Πρόκειται για υδροφόρους ορίζοντες θερμοκρασιών 150 °C - 300 °C σε σχετικά μικρά βάθη. Κατά κύριο λόγο τα ρευστά αυτά αποτελούνται από μίγμα υγρού ατμού και θερμού νερού.

ii. *Μέσης ενθαλπίας*
Πρόκειται για υδροφόρους ορίζοντες με θερμοκρασίες 100 °C- 150 °C.

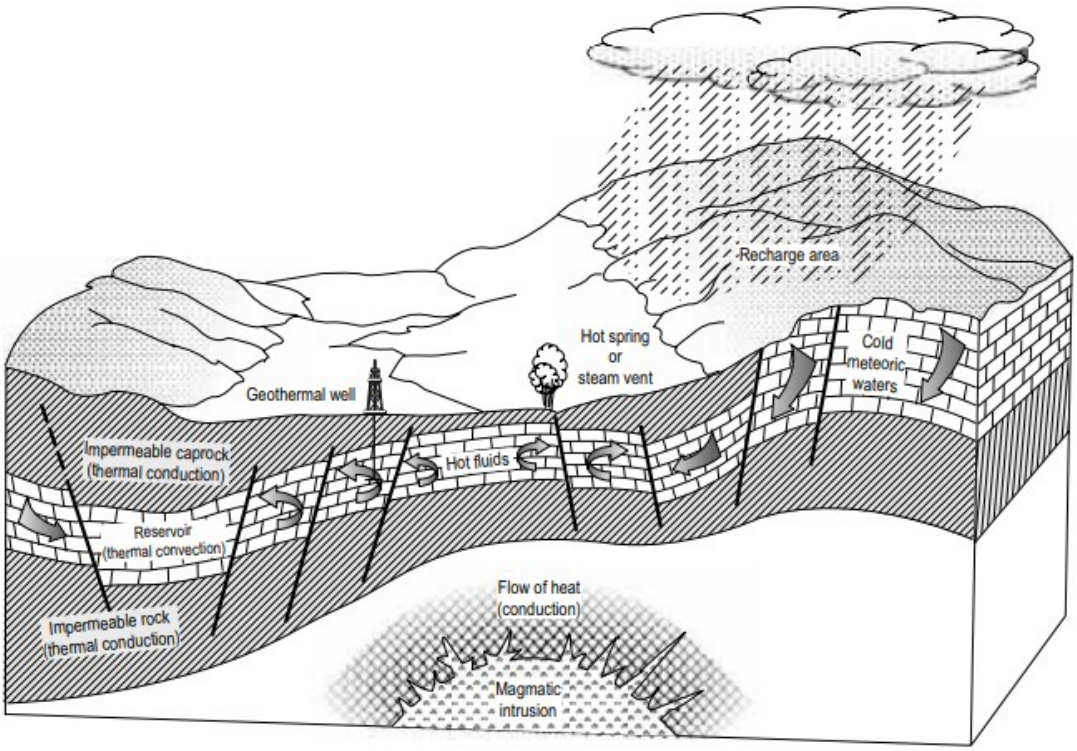
iii. *Χαμηλής ενθαλπίας*
Πρόκειται για υδροφόρους ορίζοντες θερμοκρασιών 25 °C - 100 °C.[10] Τυπικά η τιμή έναρξης σχετίζεται με την περιοχή και ως ελάχιστη θερμοκρασία ορίζεται η αντίστοιχη μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της γης στην ευρύτερη περιοχή.

1.4 Κανονική γεωθερμία – Τεχνολογίες αξιοποίησης

Ως κανονική (ή κατ' άλλους αβαθής) γεωθερμική ενέργεια, χαρακτηρίζεται η θερμότητα γεωλογικών σχηματισμών και υδάτων (είτε επιφανειακών, είτε υπόγειων) που δεν χαρακτηρίζονται ως γεωθερμικό δυναμικό.[10,11,12,13] Η αβαθής γεωθερμία αναφέρεται σε ένα βάθος μέχρι τα 400m[11] (αν και τις περισσότερες φορές, λόγω της αδυναμίας αντοχής υλικών δε γίνεται αναφορά για βάθη μεγαλύτερα των 100~120m). Αυτή είναι μια εκ' των ειδών γεωθερμικής ενέργειας την οποία επιδιώκει να εκμεταλλευθεί ο άνθρωπος για την κάλυψη αναγκών θέρμανσης και κλιματισμού μέσω των αντλιών θερμότητας. Η εκμετάλλευση αυτή ξεκινάει από την επιλογή των τρόπων αξιοποίησης δηλαδή των γεωθερμικών συστημάτων.

Ως γεωθερμικό σύστημα λοιπόν χαρακτηρίζεται ένα σύστημα που βρίσκεται σε περιορισμένο χώρο στον ανώτερο φλοιό, απ' το οποίο κινούμενο νερό μεταφέρει θερμότητα από μια πηγή σε μια δεξαμενή θερμότητας, η οποία συνήθως είναι μια ελεύθερη επιφάνεια.[15]

Επομένως για την ύπαρξη ενός γεωθερμικού συστήματος απαιτούνται τρία βασικά συστατικά, πηγή θερμότητας, ταμιευτήρας και το ρευστό ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.4. Η πηγή θερμότητας μπορεί να είναι από μια υψηλής θερμοκρασίας μαγματική διείσδυση (>600 - 700 °C) μέχρι την ίδια την θερμοκρασία του υπεδάφους που όπως προαναφέρθηκε αυξάνεται με το βάθος. Ο ταμιευτήρας αποτελείται από υδατοπερατά πετρώματα τα οποία επιτρέπουν την κυκλοφορία ρευστών καθώς και την τροφοδοσία του από επιφανειακό και μετεωρικό νερό. Όσο για το μεταφορικό ρευστό, πρόκειται ουσιαστικά για νερό, μετεωρικό στις περισσότερες περιπτώσεις, το οποίο συναντάται είτε στην υγρή είτε στην αέρια μορφή του, ανάλογα τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του ταμιευτήρα.[4]



Εικόνα 1.4: *Σχηματική απεικόνιση τυπικού γεωθερμικού συστήματος*

1.4.1 Συστήματα ανοικτού κυκλώματος

Πρόκειται για συστήματα που εκμεταλλεύονται την άντληση υπόγειων υδάτων αξιοποιώντας την ιδιότητα της σταθερής θερμοκρασίας που έχουν αυτά. Μέσω γεωτρήσεων, γίνεται άντληση του υπεδαφικού νερού από τον ταμιευτήρα το οποίο χρησιμοποιείται για θερμικές ανάγκες και στη συνέχεια επανεισάγεται στο υπέδαφος ή σε επιφανειακά νερά. Συνήθως μεταξύ του ανοικτού κυκλώματος και της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας παρεμβάλλεται εναλλάκτης

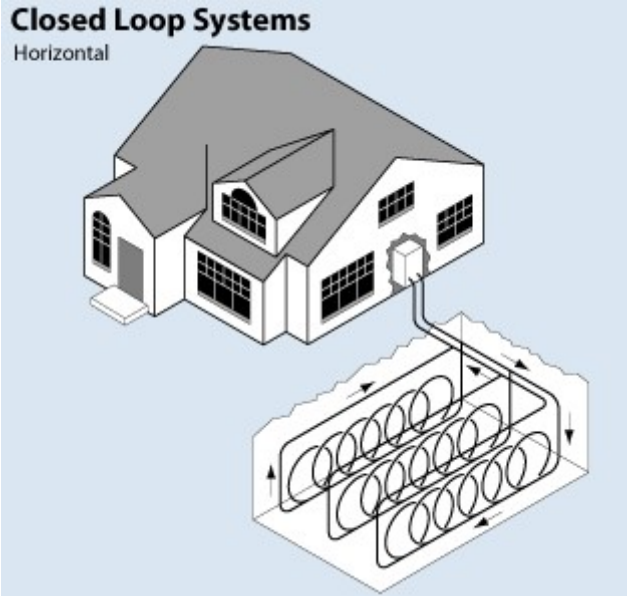
νερού/νερού ώστε να επιτυγχάνεται πρόσδοση ή απορρόφηση ενέργειας στο σύστημα πριν το νερό επιστρέψει στον ταμιευτήρα.[10]

1.4.2 Συστήματα κλειστού κυκλώματος

Πρόκειται για εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν κλειστό κύκλωμα σωληνώσεων θαμμένο στο έδαφος διαμέσου του οποίου γίνεται η μεταφορά της θερμότητας στην επιφάνεια και διακρίνεται σε δύο κατηγορίες:

i. *Οριζόντια κλειστά συστήματα*

Πρόκειται για συστήματα που τοποθετούνται σε μικρά βάθη εκμεταλλευόμενα τη θερμοκρασία του υπεδάφους, σε θέση οριζόντια σε σχέση με το έδαφος (όπως προδίδει και το χαρακτηρισμός τους). Έχουν μικρό αρχικό κόστος συγκριτικά με άλλα συστήματα, εύκολη εγκατάσταση αφού δεν απαιτούνται μεγάλα βάθη, και μεγάλη διάρκεια ζωής. Βασικό τους μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι απαιτούν μεγάλη επιφάνεια για εγκατάσταση.[10,13] Εδώ, λόγο μικρού βάθους, συχνά η επίδραση της γεωθερμικής ροής θερμότητας εμφανίζεται μέσω της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

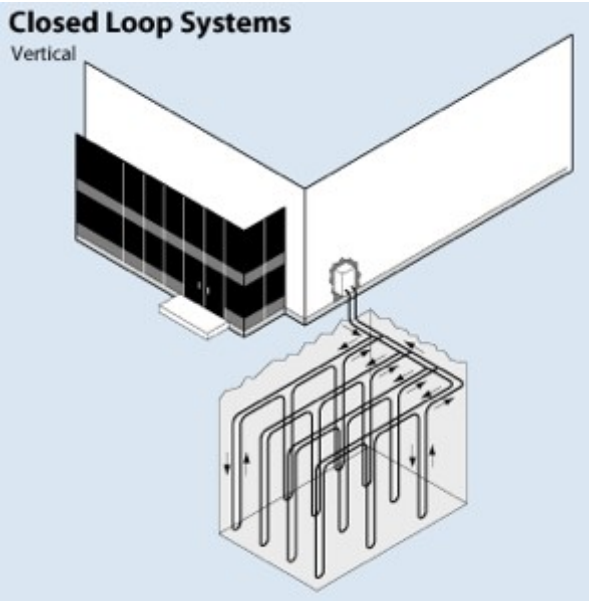


Εικόνα 1.5: *Σχηματική απεικόνιση οριζόντιων κλειστών γεωθερμικών συστημάτων, μία μορφή διάταξης με αύξηση του ενεργού όγκου*

ii. *Κατακόρυφα κλειστά συστήματα*

Όπως φαίνεται από το χαρακτηρισμό τους, πρόκειται για συστήματα κατακόρυφων γεωεναλλακτών σε προφανώς μεγαλύτερα βάθη από αυτά των οριζόντιων συστημάτων. Σε γεωτρήσεις που συνήθως φτάνουν τα 100m (οικονομικά συμφέροντα βάθη), και στο εσωτερικό τους τοποθετούνται κατακόρυφα σωλήνες, σαν διπλό U, που σχηματίζουν ένα κλειστό κύκλωμα. Απαιτείται μικρή επιφάνεια εγκατάστασης, το αρχικό κόστος όμως είναι ιδιαίτερα υψηλό κυρίως λόγω των απαιτούμενων γεωτρήσεων.[10,11,13,16] Στην περίπτωση των κατακόρυφων

γεωτρήσεων η υπεδαφική ροή θερμότητας επηρεάζει σχετικά λίγο την συμπεριφορά ειδικά στις περιπτώσεις συνεχούς λειτουργίας. Τούτο συμβαίνει λόγω της μικρής σχετικά πυκνότητας θερμότητας και του μεγάλου όγκου των υλικών του υπεδάφους.



Εικόνα 1.6: *Σχηματική απεικόνιση κατακόρυφων κλειστών γεωθερμικών συστημάτων, μια μορφή διάταξης με εν σειρά παράλληλες ομάδες εναλλακτών*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΕΛΛΑΔΑΣ

2.1 Γενικά στοιχεία για τη γεωλογία της Ελλάδας

Η χώρα μας, εδώ και εκατομμύρια χρόνια, βρίσκεται σε μια άκρως ενεργή γεωτεκτονική θέση κάτι που καθορίζει μέχρι και σήμερα τόσο την γεωλογία της όσο και την ενεργό τεκτονική της.

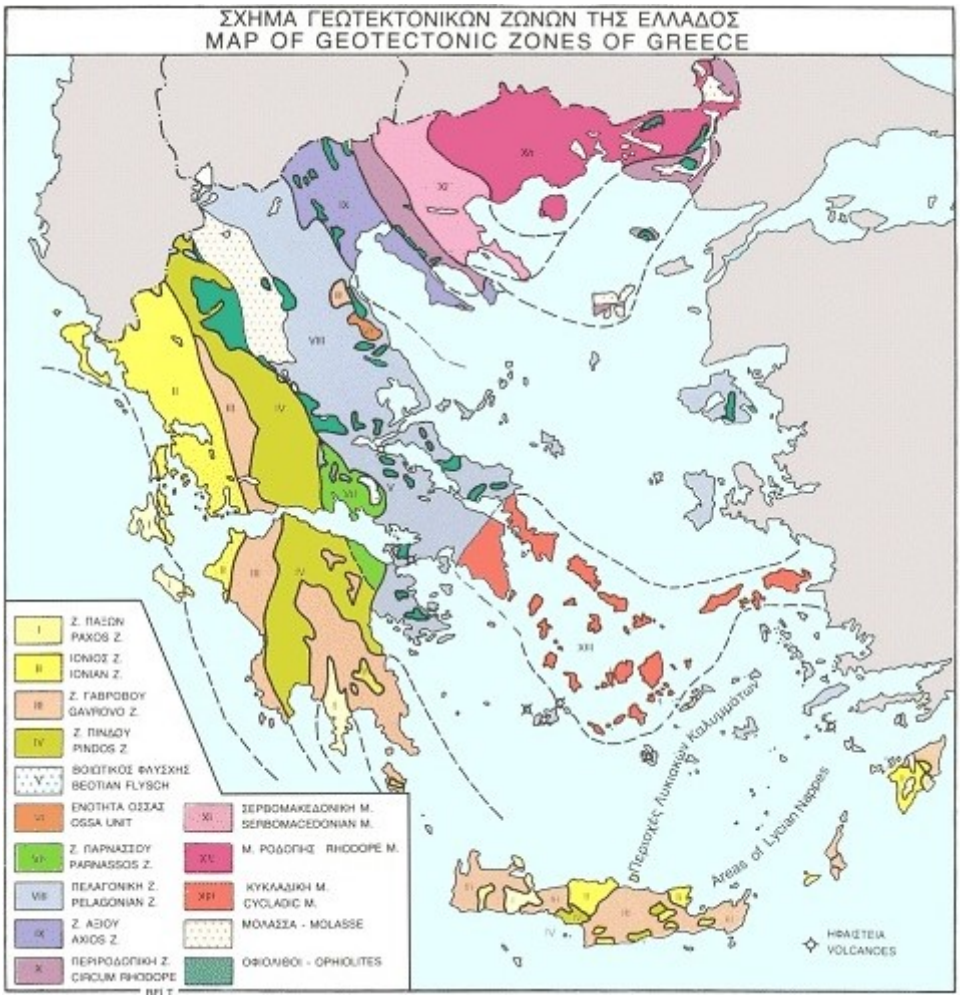
Από γεωγραφική άποψη, από τα πρώτα κιόλας χρόνια της νεότερης ιστορίας, θεωρείται ότι βρίσκεται σε μια θέση ιδιαίτερης σημασίας τόσο οικονομικά όσο και πολιτισμικά.

Από γεωτεκτονικής άποψης όμως η θέση της είναι ακόμα πιο ενδιαφέρουσα. Έντονη ορογένεση, ηφαιστειακό τόξο, έντονη σεισμική δραστηριότητα είναι κάποια από τα γεωλογικά σημάδια τα οποία μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η τεκτονική της χώρας μας είναι ενεργή ακόμα και σήμερα.

Πιο συγκεκριμένα, η Ελλάδα εδώ και δεκάδες εκατομμύρια χρόνια βρίσκεται στο μέτωπο μιας ζώνης υποβύθισης (νότια της Κρήτης), όπου η αφρικανική τεκτονική πλάκα, υποβυθίζεται κάτω από την ευρασιατική (στην οποία ανήκει και η χώρα μας). Στο κεντρικό Αιγαίο, εκτείνεται το ηφαιστειακό τόξο ενώ στο χώρο του βορείου Αιγαίου υπάρχουν σημαντικά ρήγματα (ρήγμα Ανατολίας) που καθορίζουν την τεκτονική δραστηριότητα της περιοχής.[17, 18]

Το γεωλογικό υπόβαθρο έχει ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον και σημασία για την παρούσα μελέτη. Η Ελλάδα αποτελεί μέρος του Αλπικού ορογενετικού κύκλου ο οποίος περιλαμβάνει μεγάλα όρη όπως οι Άλπεις, τα Καρπάθια, τα Πυρηναία, ο Καύκασος, αλλά και τα Ιμαλάια. Το ορογενετικό αυτό σύστημα δημιουργήθηκε από τη σύγκρουση των μεγάλων ηπειρωτικών τμημάτων της Ευρασίας με τη Γκοντβάνα. Ενδιάμεσα των δύο αυτών ηπειρωτικών τεμαχών υπήρχε ο ωκεανός της Τυθύος ο οποίος και άρχισε κατά το Τριαδικό – Ιουρασικό να εξαφανίζεται. Εκείνη την περίοδο έχουμε και τις πρώτες αποθέσεις θαλάσσιων ιζημάτων στον ελλαδικό χώρο. Κατά το Α. Ιουρασικό – Κ. Κρητιδικό η θάλασσα αποσύρεται και εμφανίζονται οι εσωτερικές ελληνίδες. Στο Α. Κρητιδικό η στάθμη της θάλασσας ξανανεβαίνει καλύπτοντας τις εσωτερικές ελληνίδες (Ανωκρητιδική επίκληση). Κατά το Τριτογενές ξεκίνησε η διαδικασία της ορογένεσης ενώ φτάνοντας στο Τεταρτογενές δημιουργούνται σημαντικά ενεργά ρήγματα του Ελληνικού χώρου που λίγο πολύ καθόρισαν τη σημερινή μορφή της χώρας.[17, 18, 19]

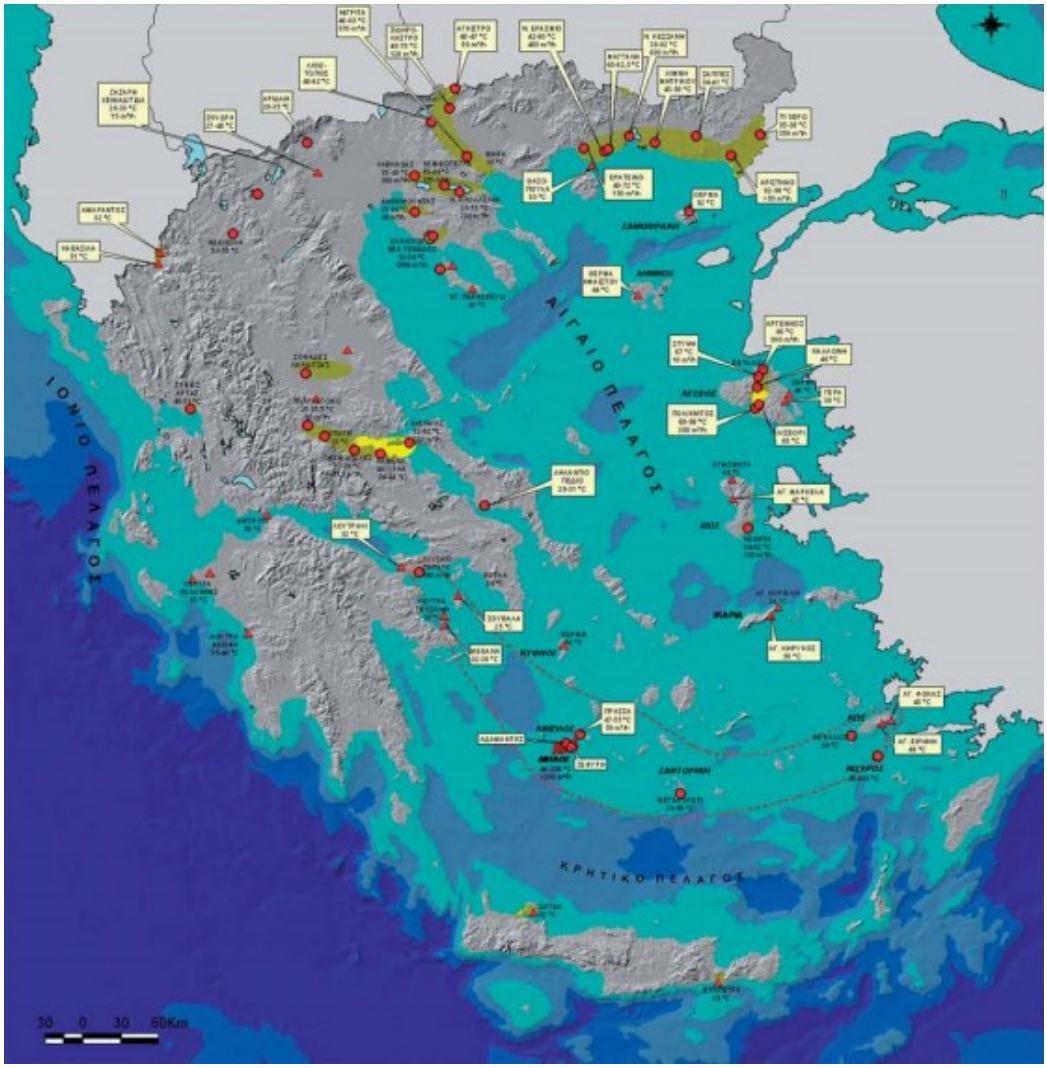
Γεωλογικά χωρίζεται η Ελλάδα σε γεωτεκτονικές ζώνες πετρωμάτων όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 2.1**. Κάθε μια από αυτές απεικονίζει μια συγκεκριμένη στρωματογραφική διαδοχή των ιζημάτων που τις αποτελούν, τους ιδιαίτερους λιθολογικούς χαρακτήρες που περιέχει, αλλά και την ιδιαίτερη τεκτονική συμπεριφορά των πετρωμάτων της κατά τη γεωλογική τους ιστορία.



Εικόνα 2.1: *Σχήμα Γεωτεκτονικών Ζωνών της Ελλάδας*

2.2 Εμφάνιση γεωθερμίας στον Ελλαδικό χώρο

Η χώρα μας, χάρη στη γεωτεκτονική της θέση, διαθέτει σημαντικό δυναμικό γεωθερμικής ενέργειας σε όλη την έκταση του ελλαδικού χώρου. Από τις αρχές του 1970 κιόλας, ξεκίνησαν οι έρευνες στα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας της Μήλου και της Νισύρου. Μέσα στην ίδια δεκαετία ξεκίνησε η έρευνα κι άλλων γεωθερμικών πεδίων στη Βόρεια Ελλάδα και στο χώρο του Αιγαίου. Στην **Εικόνα 2.2** παρουσιάζονται τα πλέον αναγνωρισμένα γεωθερμικά πεδία στον ελλαδικό χώρο.



Εικόνα 2.2: *Μερικά από τα αναγνωρισμένα γεωθερμικά πεδία της Ελλάδας*

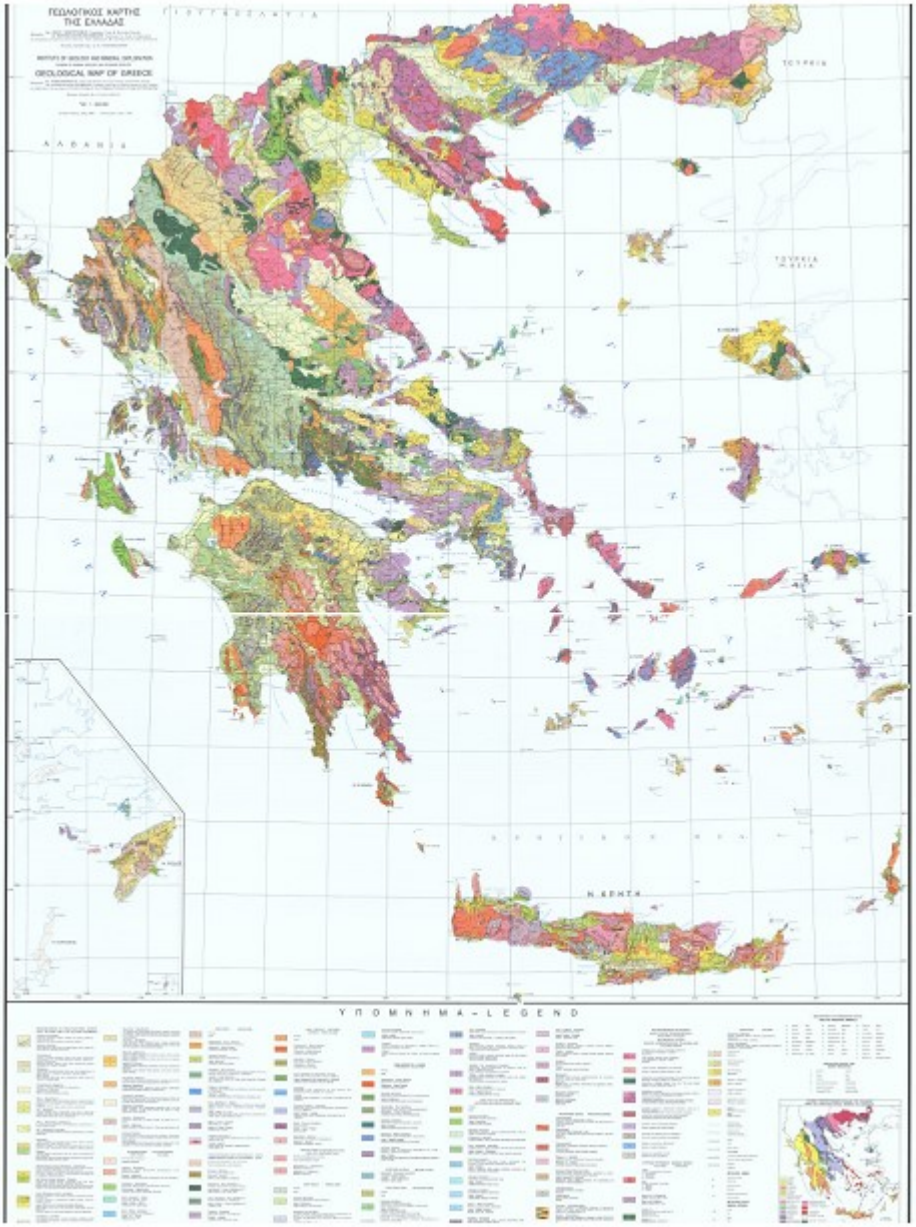
Παρατηρείται ότι τα δύο βασικά γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας, αυτό της Μήλου και της Νισύρου, περιορίζονται στο χώρο του ελληνικού ηφαιστειακού τόξου με άλλα πιθανά όπως για παράδειγμα αυτό της Κιμώλου. Σε «τεκτονική προέκταση» του ηφαιστειακού τόξου συναντώνται σημαντικά γεωθερμικά πεδία μέσης ενθαλπίας όπως αυτά της Χίου και της Λέσβου. Τέλος γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας απαντώνται σε όλο τον ελλαδικό χώρο με τα πιο χαρακτηριστικά να έχουν εντοπιστεί στις τεκτονικές λεκάνες της βορείου Ελλάδας καθώς και σε πολλά νησιά του Αιγαίου.

Η γεωγραφική αλλά και γεωτεκτονική θέση της Ελλάδας προσφέρει τις ιδανικές συνθήκες για την εμφάνιση γεωθερμικών πεδίων. Ιδιαίτερα ο ευρύτερος χώρος του Αιγαίου αποτελεί μια πολύ ενεργό περιοχή από τεκτονικής άποψης. Τόσο το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου, η υποβυθιζόμενη αφρικανική πλάκα κάτω από την ευρασιατική, όσο και τα πολλά ενεργά ρήγματα ευνοούν την γεωθερμία στην περιοχή.

2.3 Χαρακτηριστικά γεωλογικών πετρωμάτων ελλαδικού χώρου

Όπως προαναφέρθηκε, η Ελλάδα ανήκει στον αλπικό ορογενετικό κύκλο και αποτελεί μέχρι και σήμερα μια περιοχή του πλανήτη έντονη γεωτεκτονικά. Ως αποτέλεσμα οι σχηματισμοί που συναντώνται στη χώρα μας ποικίλουν τόσο σε γεωλογική ηλικία όσο και σε μικροτεκτονικά και πετρολογικά χαρακτηριστικά.

Στην **Εικόνα 2.3** παρουσιάζεται ο γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας ο οποίος δίνει μια πρώτη γενική ιδέα των διαφόρων κατηγοριών πετρωμάτων που βρίσκονται σε αυτή.



Εικόνα 2.3: *Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας*

Κοιτώντας το υπόμνημα του χάρτη διαπιστώνεται ότι παρά την ιδιαίτερα μεγάλη ποικιλία, υπάρχουν χαρακτηριστικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται σε όλο το γεωγραφικό εύρος της χώρας. Η ηπειρωτική Ελλάδα, κυρίως πλευρικά της οροσειράς της Πίνδου χαρακτηρίζεται από

ανθρακικά ιζηματογενή πετρώματα και συγκεκριμένα ασβεστόλιθο αλλά και δολομίτη (ορυκτολογικά συγγενή πετρώματα). Αν και ανάλογα την τεκτονική ζώνη που ανήκουν, τα πετρώματα αυτά χαρακτηρίζουν διαφορετικές γεωτεκτονικές περιόδους, τα πετρολογικά χαρακτηριστικά τους δεν παύουν να είναι ίδια. Προχωρώντας στην βόρεια Ελλάδα, συναντούμε σε μεγάλο βαθμό μεταμορφωμένα πετρώματα, στην πλειοψηφία τους μάρμαρα, γνεύσιους και σχιστόλιθους χωρίς όμως κι εδώ να απουσιάζουν τα ανθρακικά. Τέλος την γενική εικόνα ολοκληρώνουν τα νησιά στα οποία κατά κύριο λόγο εμφανίζονται μεταμορφωμένα πετρώματα αλλά και ηφαιστειακά.

Σημαντικό επίσης είναι να αναφερθεί ότι, σε μεγάλες εκτάσεις εκτείνονται αλλουβιακές αποθέσεις (μικρού πάχους κατά πλειοψηφία αλλά ανάλογα τη μορφολογία του εδάφους μπορεί να σχηματίσουν δομές σημαντικού πάχους), οι οποίες αποτελούν κατά κύριο λόγο αποθέσεις φερτών υλικών-εδαφών, όπως άργιλο, άμμο και χαλίκι.

Τα παραπάνω δεδομένα καθώς και ο γεωλογικός χάρτης της **Εικόνας 2.3**, επιτρέπουν κατ' αρχάς μια γεωγραφική κατανομή των γεωλογικών στοιχείων στη χώρα. Για την παρούσα εργασία, θα μελετηθεί στη συνέχεια η ευρεία γεωλογία κεντρικών περιοχών – πόλεων ώστε να προσδιοριστεί η επιφανειακή τους γεωλογία. Στη συνέχεια, βάσει των συμπερασμάτων που θα προκύψουν, θα εκτιμηθούν κάποια χαρακτηριστικά πετρώματα για τα οποία θα τρέξει ο κώδικας.

2.4 Επιφανειακή γεωλογία κεντρικών περιοχών

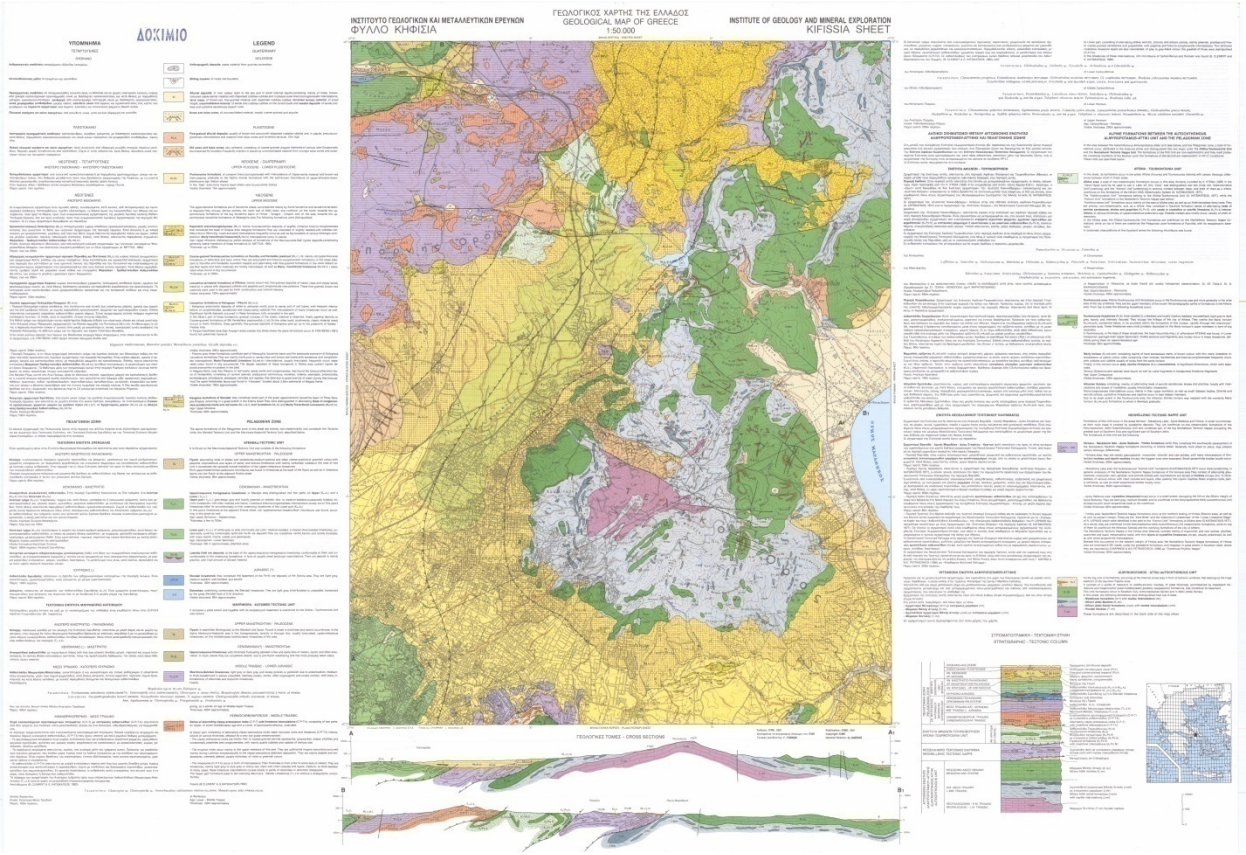
Στόχος του υποκεφαλαίου είναι η μελέτη της επιφανειακής γεωλογίας μεγάλων κεντρικών περιοχών ώστε να εντοπιστούν τα πετρώματα με μεγαλύτερο εύρος εμφάνισης που θα χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη. Παράλληλα παρουσιάζονται γεωλογικοί χάρτες με τα αντίστοιχα υπομνήματα με βάση τους οποίους θα γίνει μια εκτίμηση της αναλογίας επιφανειακών πετρωμάτων.

Αττική

Λόγω της γεωλογικής πολυπλοκότητας του χώρου της Αττικής, η εκτίμηση της επιφανειακής γεωλογίας της πραγματοποιήθηκε με χρήση πολλαπλών χαρτών.

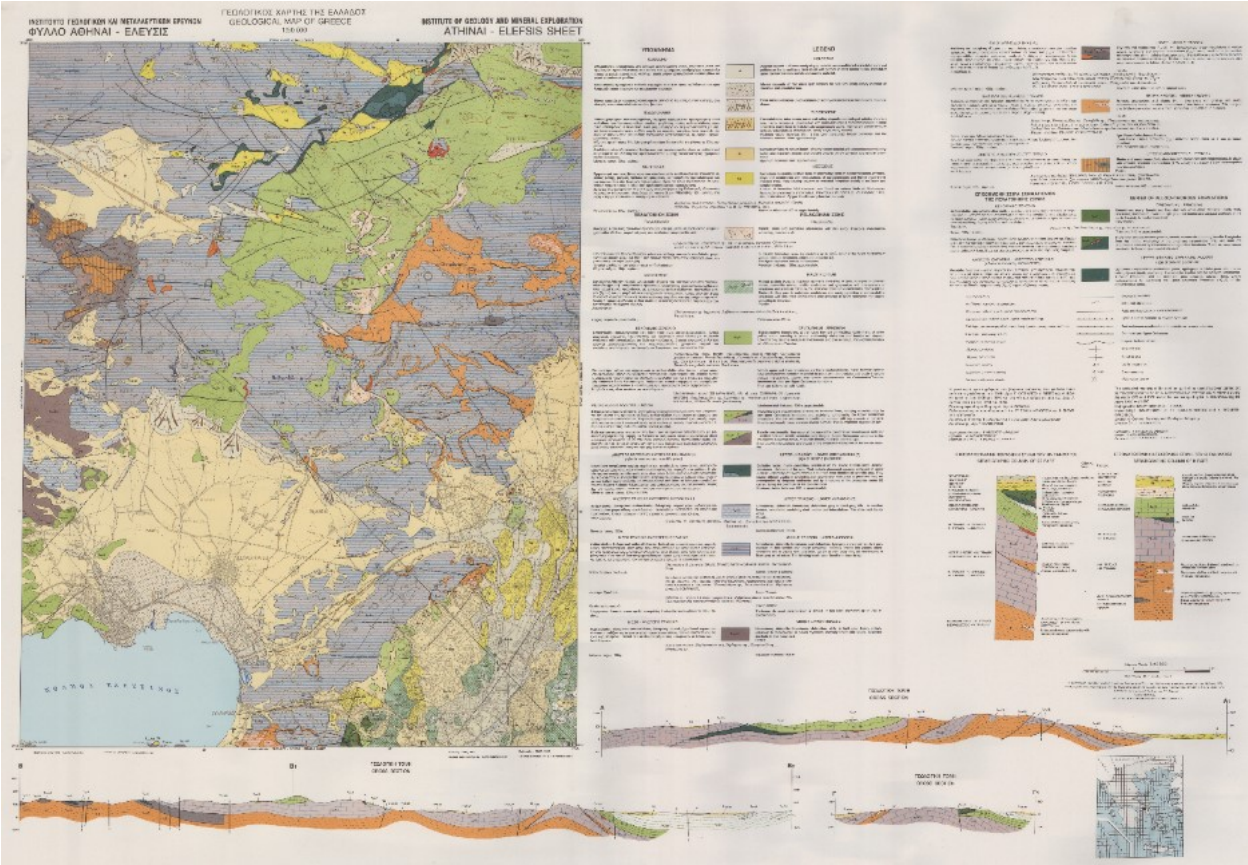
Εικόνα 2.4: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Αθήναι – Πειραιεύς (ΙΓΜΕ)*

Ο παραπάνω χάρτης της **Εικόνας 2.4** αφορά το νοτιοδυτικό τμήμα της Αττικής. Παρατηρώντας το υπόμνημα φαίνεται να κυριαρχούν δύο τυπικοί σχηματισμοί. Όπως είναι λογικό το γεγονός ότι πρόκειται για μια σημαντικά κατοικήσιμη περιοχή, δικαιολογεί την εμφάνιση αλλουβιακών αποθέσεων και κορημάτων στην ευρύτερη περιοχή. Ως επί το πλείστον, κυρίαρχη είναι η εμφάνιση ασβεστολιθικών σχηματισμών με πάχη που ξεκινούν από τα 40 ως και τα 250 μέτρα. Σημαντική είναι και η εμφάνιση σχιστολιθικών σχηματισμών (πάχος 200-250 μέτρα) όπως φαίνονται στο βορειοανατολικό τμήμα του χάρτη. Οι γεωλογικές τομές κάτω από τον χάρτη αποδεικνύουν την επικράτηση των δύο προαναφερθέντων πετρωμάτων αφού από την τομή Α-Α’ διαπιστώνεται η έκταση των σχιστολιθικών εμφανίσεων τόσο επιφανειακά όσο και σε μεγάλα βάθη, ενώ από την τομή Β – Β’ φαίνονται και οι επιφανειακές εμφανίσεις των ασβεστόλιθων επίσης τόσο επιφανειακά όσο και σε σημαντικά βάθη.



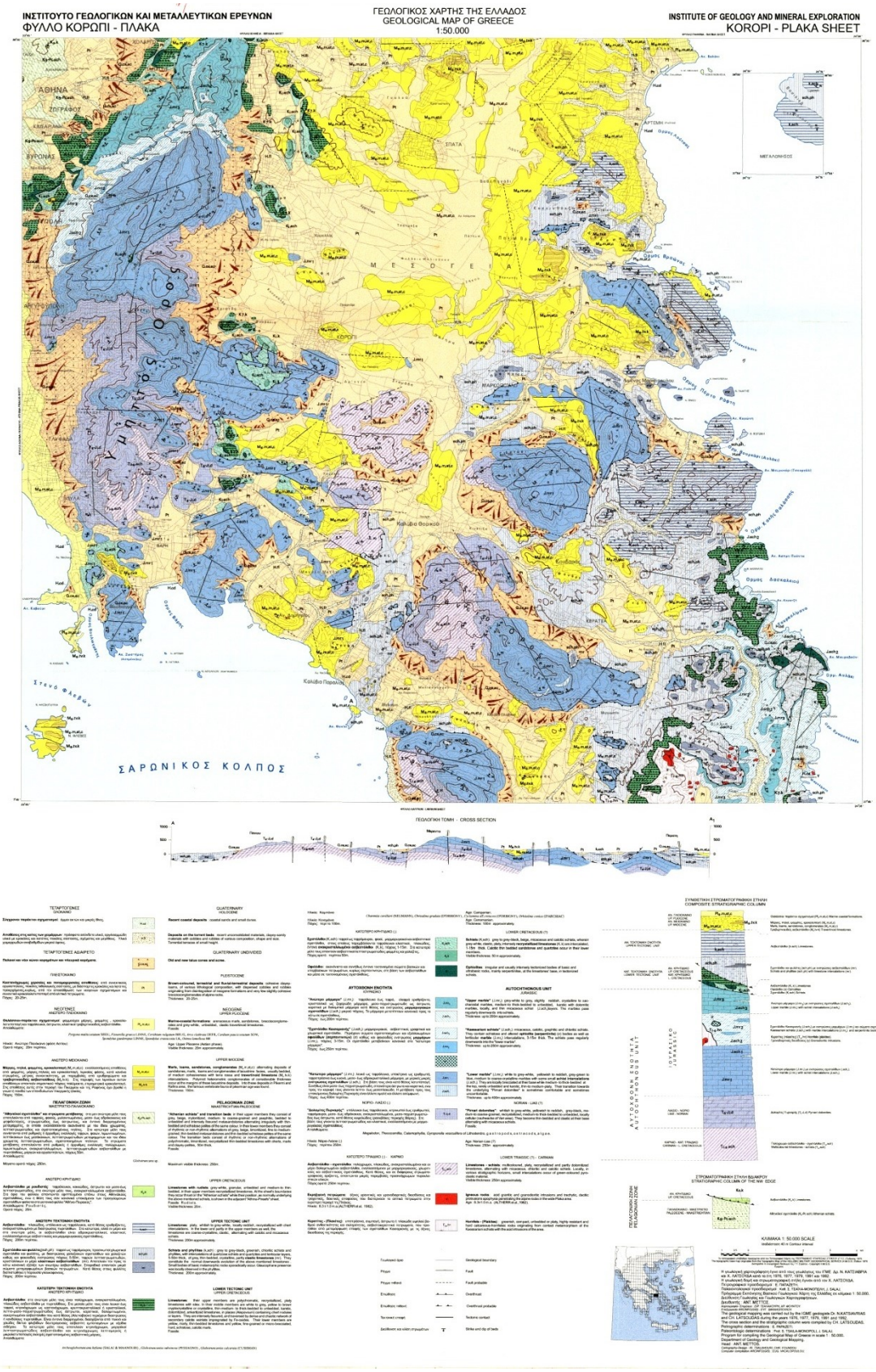
Εικόνα 2.5: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Κηφισιά (ΙΓΜΕ)*

Στον παραπάνω χάρτη της **Εικόνας 2.5** απεικονίζεται το κεντρικό τμήμα της Αττικής. Όπως και στην **Εικόνα 2.4**, έτσι κι εδώ έχουμε εμφάνιση νεογενών αποθέσεων. Πρόκειται κυρίως για ποταμολιμναίες αποθέσεις που αποτελούνται από κροκαλοπαγείς και λατυποπαγείς σχηματισμούς, καθώς και άμμος και άργιλος. Πέραν των νεογενών εμφανίζονται μεταμορφωμένα πετρώματα, κατά κύριο λόγο μάρμαρα αλλά και σχιστόλιθοι, στο κεντροανατολικό τμήμα του χάρτη. Τέλος στο βορειοδυτικό τμήμα του χάρτη εμφανίζονται ασβεστολιθικοί σχηματισμοί διαφόρων γεωλογικών ενοτήτων. Οι γεωλογικές τομές κάτω από το χάρτη δείχνουν τα εκτεινόμενα βάθη των παραπάνω σχηματισμών. Έτσι λοιπόν, τόσο επιφανειακά, όσο και μέχρι ένα τυπικό βάθος των 100 μέτρων έχουμε εμφάνιση τόσο ασβεστολιθικών σχηματισμών, όσο και μεταμορφωμένων πετρωμάτων, μαρμάρων και σχιστόλιθων.



Εικόνα 2.6: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Αθήναι – Ελευσίς (ΙΓΜΕ)*

Στην **Εικόνα 2.6**, παρουσιάζεται το δυτικό τμήμα της Αττικής. Χαρακτηριστική είναι η έντονη εμφάνιση ασβεστόλιθων διαφορετικών ηλικιών σε όλη την έκταση του χάρτη. Τα πάχη των σχηματισμών ξεκινούν από 300 μέτρα ενώ πιθανολογείται ότι ξεπερνούν τα 700. Η άλλη σημαντική παρουσία είναι αυτή των αλλούβιων σχηματισμών που εντοπίζονται κυρίως στο νότιο τμήμα του χάρτη. Αποτελείται κυρίως από άμμο, άργιλο, κροκαλοπαγή και ψαμμίτες. Τέλος στο ανατολικό τμήμα του χάρτη εντοπίζονται και κάποιες μικρές εμφανίσεις σχιστόλιθων. Όπως φαίνεται και από τις γεωλογικές τομές σε επιφανειακά βάθη έχουμε ουσιαστικά ασβεστόλιθους, με μικρές εμφανίσεις σχιστόλιθων και νεογενών σχηματισμών.



Εικόνα 2.7: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Κορωπί – Πλάκα (ΙΓΜΕ)*

Η **Εικόνα 2.7** πρόκειται για τον τελευταίο χάρτη που μελετήθηκε για την περιοχή της Αττικής και αναφέρεται στο νοτιοανατολικό τμήμα αυτής. Εδώ επικρατούν κυρίως μεταμορφωμένα πετρώματα, μάρμαρα και σχιστόλιθοι πάχους μέχρι και 250 μέτρα, ενώ έχουμε και μικρές εμφανίσεις ασβεστολιθικών σχηματισμών. Ποταμοχερσαίες αποθέσεις κάνουν κι εδώ την εμφάνιση τους στο κεντρικό τμήμα του χάρτη.

Ως συμπέρασμα εξάγεται ότι για την ευρύτερη περιοχή της Αττικής, εμφανίζονται κυρίως ασβεστόλιθοι, καθώς και μεταμορφωμένοι σχηματισμοί, στην περίπτωση αυτή μάρμαρα και σχιστόλιθοι ενώ σημαντική είναι και η παρουσία νεογενών σχηματισμών, όπως άμμος, άργιλος, κροκάλες και ψαμμίτες.

Θεσσαλονίκη

Εικόνα 2.8: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Θεσσαλονίκη (ΙΓΜΕ)*

Η ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2.8** χαρακτηρίζεται από μεγάλη εμφάνιση νεογενών πετρωμάτων και αποθέσεων του τεταρτογενούς. Πρόκειται για παράκτιες αποθέσεις όπως άμμοι και άργιλοι ενώ υπάρχουν και μικρές ενστρώσεις κροκαλοπαγών στρωμάτων. Στον κύριο χώρο της πόλης όπως βλέπουμε στο ανατολικό τμήμα του χάρτη κυριαρχούν μεταμορφωμένα πετρώματα, κατά κύριο λόγο γνεύσιοι και σχιστόλιθοι. Ανάμεσα τους απαντώνται τόσο μαγματικά πετρώματα, κυρίως γάββροι αλλά και ασβεστόλιθοι.

Όπως διαπιστώνεται και από την υπάρχουσα γεωλογική τομή κάτω από τον χάρτη, τα πετρώματα της περιοχής έχουν ιδιαίτερα μεγάλη κλίση με αποτέλεσμα να εκτείνονται σε σημαντικά βάθη. Επομένως η επιφανειακή τους εμφάνιση εκφράζει και τη σε βάθος κατανομή τους.

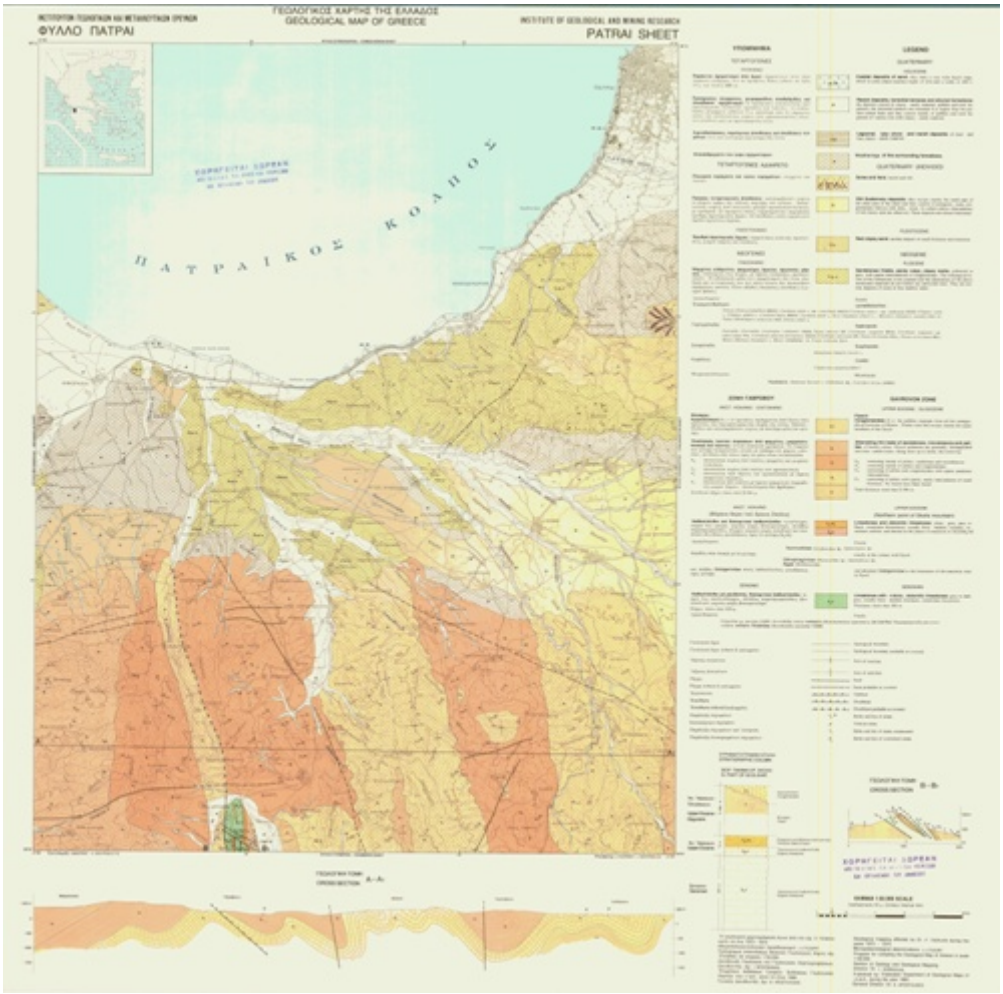
Έτσι ως συμπέρασμα εξάγεται ότι στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, υπάρχει επικράτεια των μεταμορφωμένων πετρωμάτων γνευσίων και σχιστόλιθων. Επιπλέον ιδιαίτερα σημαντική είναι η εμφάνιση άμμων και αργίλων κυρίως στην ευρύτερη περιοχή αλλά και στον καθ' αυτού χώρο της πόλης. Με εξαίρεση μια σημαντική εμφάνιση γάββρων στην περιοχή, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι λοιπά πετρώματα όπως ασβεστόλιθοι, δεν καλύπτουν σημαντικό ποσοστό της επιφανειακής και υπεδάφικής γεωλογίας της περιοχής.

Λάρισα

Εικόνα 2.9: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Λάρισα (ΙΓΜΕ)*

Στην **Εικόνα 2.9,** παρατηρείται ότι η πόλη της Λάρισας, καθώς και η ευρύτερη περιοχή αυτής, έχει μια σχετικά απλή επιφανειακή γεωλογία. Αυτό δικαιολογείται τόσο από την ύπαρξη έντονου ποτάμιου δικτύου στην περιοχή όσο και από τη θέση της πόλης στο χώρο του θεσσαλικού κάμπου. Η γεωλογία της περιοχής αποτελείται κατά βάση από ολοκαινικές και πλειστοκαινικές αποθέσεις ποματολιμναίων και αλλουβιακών σχηματισμών. Ουσιαστικά πρόκειται για άμμους και αργίλους πάσης φύσεως ενώ υπάρχει και εμφάνιση κροκαλοπαγών και λατυποπαγών.

Πάτρα

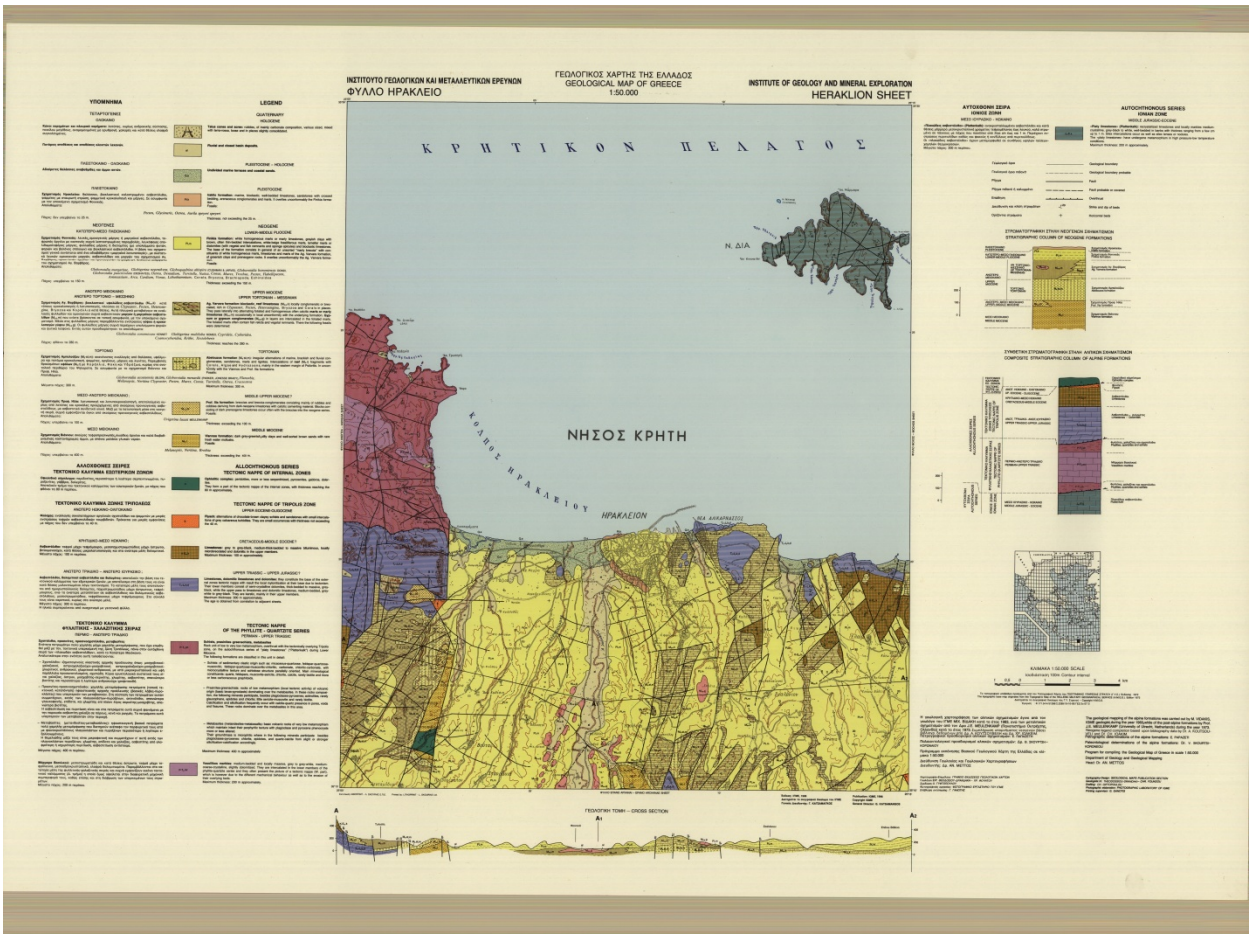


Εικόνα 2.10: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Πάτραι (ΙΓΜΕ)*

Τόσο ο κύριος χώρος της Πάτρας όσο και η ευρύτερη περιοχή, αποτελεί άλλη μια κεντρική περιοχή στην οποία επικρατούν νέα πετρώματα του νεογενούς και του τεταρτογενούς. Όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.10**, στο χώρο της πόλης έχουμε παράκτιες αμμώδεις αποθέσεις με

πάχος ως και 400 μέτρα καθώς και αλλουβιακές αποθέσεις από άργιλο, άμμο και κροκάλες που μπορεί να ξεπερνούν σε πάχος τα 800 μέτρα. Αλλά και η ευρύτερη περιοχή δε διαφέρει ιδιαίτερα αφού τα πετρώματα που κυριαρχούν είναι κυρίως νεογενείς άμμοι, άργιλοι και ψαμμίτες.

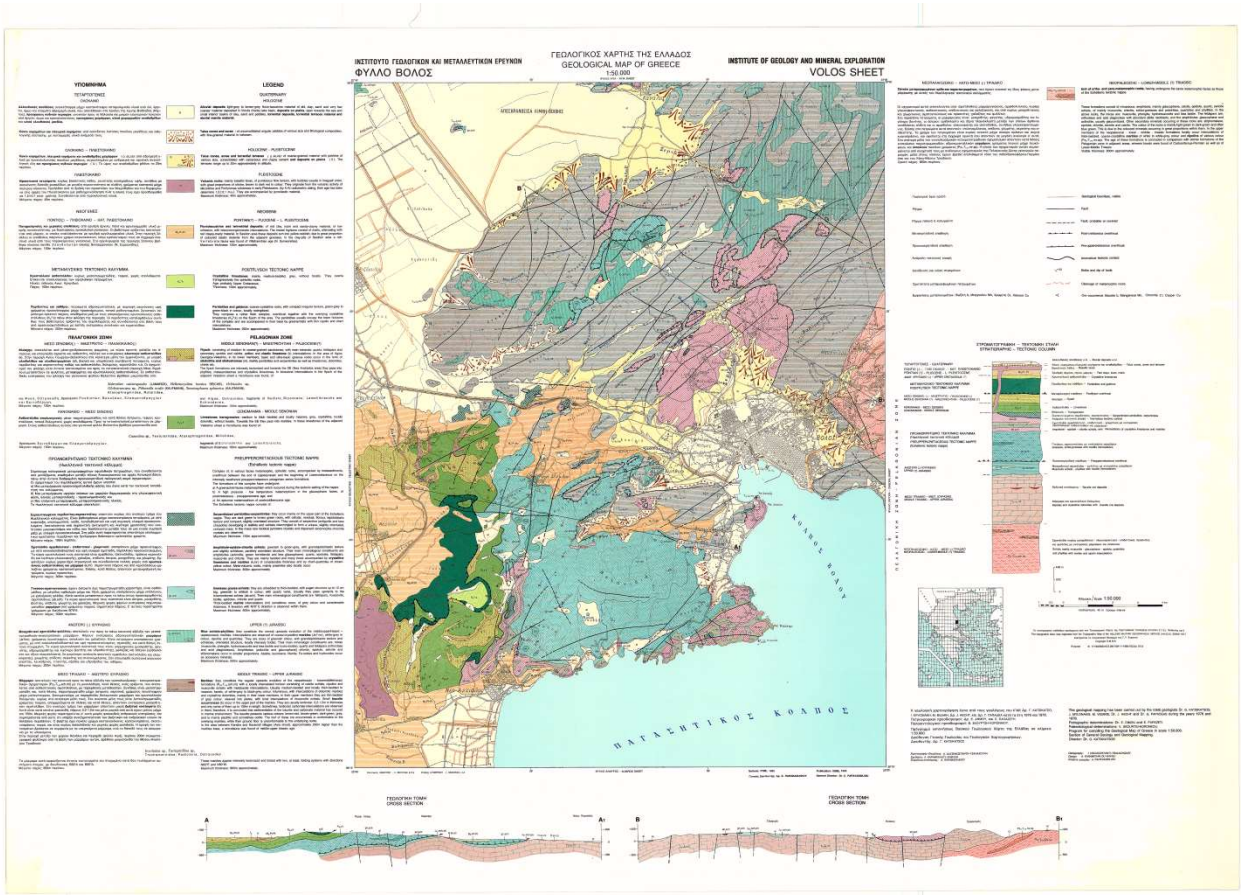
Ηράκλειο



Εικόνα 2.11: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Ηράκλειο (ΙΓΜΕ)*

Η Κρήτη χαρακτηρίζεται από εμφάνιση ασβεστολιθικών σχηματισμών διαφόρων ηλικιών και ενοτήτων. Έτσι και στην περιοχή του Ηρακλείου, που φαίνεται στην **Εικόνα 2.11**, κυριαρχούν ασβεστόλιθοι πάχους έως και 350 μέτρα. Φυσικά κι εδώ συναντώνται σχηματισμοί του τεταρτογενούς αλλά και αλλουβιακές και ποταμοχερσαίες αποθέσεις, όπως άμμοι, άργιλοι, κροκάλες και ψαμμίτες.

Βόλος



Εικόνα 2.12: *Γεωλογικός Χάρτης – Φύλλο Βόλος (ΙΓΜΕ)*

Ο Βόλος αποτελεί μια περιοχή με ποικίλη γεωλογία, όπως εμφανίζεται στην **Εικόνα 2.12**. Συναντώνται τόσο ιζηματογενή πετρώματα όσο και μεταμορφωμένα, αλλά και νεογενείς αποθέσεις. Κατά κύριο λόγο υπάρχει μεγάλη εμφάνιση μαρμάρων αλλά και γνεύσιων τόσο στο κέντρο της πόλης όσο και στην ευρύτερη περιοχή. Όπως φαίνεται κι απ' τον χάρτη δεν απουσιάζουν σημαντικές εκτάσεις αλλουβιακών αποθέσεων και κώνων κορρημάτων. Μικρή είναι η εμφάνιση ασβεστόλιθων στην περιοχή αφού κατά πλειοψηφία τη θέση του έχουν πάρει τα μάρμαρα.

Συμπερασματικά, το κύριο πέτρωμα που χαρακτηρίζει την περιοχή είναι το μάρμαρο που εκτείνεται τόσο επιφανειακά σε μεγάλη έκταση, όσο και σε σημαντικό βάθος (μεγαλύτερο από 600 μέτρα). Σημαντική είναι επίσης η παρουσία γνεύσιων ενώ τα νεογενή καλύπτουν επιφανειακά σημαντικό μέρος της πόλης του Βόλου.

2.5 Επιλογή χαρακτηριστικών πετρωμάτων

Για την παρούσα εργασία, επιλέχθηκαν συγκεκριμένα πετρώματα τα οποία εμφανίζονται στον ελλαδικό χώρο σε βάθη 70-100m και κυρίως κοντά σε μεγάλα αστικά κέντρα όπου και θα έχει σημασία η χρήση γεωθερμικής δραστηριότητας. Από το υποκεφάλαιο 2.4 κοιτώντας τους χάρτες μεγάλων πόλεων της Ελλάδας, διακρίνονται τα παρακάτω πετρώματα:

Από τα ιζηματογενή πετρώματα επιλέχθηκαν:

i. *Ασβεστόλιθος*
   Πρόκειται για ανθρακικά πετρώματα, βιογενούς ως και βιοχημικής προέλευσης και σχηματίζονται στην αρχική θέση που αρχικά είχαν αποτεθεί τα ανθρακικά ιζήματα. Ορυκτολογικά αποτελούνται από > 50% ορυκτά του $CaCO_3$.
ii. *Μάργα*
   Ιζηματογενές πέτρωμα με σύσταση μεταξύ ασβεστόλιθου και αργίλου.

Από μεταμορφωμένα πετρώματα:

i. *Μάρμαρο*
   Είναι το αποτέλεσμα της μεταμόρφωσης ανθρακικών πετρωμάτων (ασβεστόλιθου ή δολομίτη). Ορυκτολογικά αποτελείται κατά κύριο λόγο από ασβεστίτη ($CaCO_3$).
ii. *Σχιστόλιθος*
   Αναφέρεται σε σχιστοφυή μεταμορφωμένα πετρώματα που αποτελούνται από χλωρίτη, βιοτίτη, χαλαζία κ.ά. διατεταγμένα σε παράλληλη διάταξη.

Από ηφαιστειακά:

i. *Βασάλτης*
   Πρόκειται για έκχυτο εκρηξιγενές πέτρωμα που σχηματίζεται από την ταχεία ψύξη βασαλτικής λάβας. Ορυκτολογικά περιέχει πλαγιόκλαστα, αυγίτη και ολιβίνη. Η περιεκτικότητα του σε οξείδιο του πυριτίου είναι μεταξύ 45-50 %.
ii. *Γρανίτης*
   Πλουτώνιο πυριγενές πέτρωμα που δημιουργήθηκε από τη στερεοποίηση και κρυστάλλωση μάγματος σε μεγάλα βάθη στο εσωτερικό του φλοιού. Ορυκτολογικά περιέχει σημαντικό ποσοστό χαλαζία και αστρίους (ορθόκλαστο, πλαγιόκλαστο).

Από εδάφη – πετρώματα μη ενοποιημένα:

i. *Άμμος*
ii. *Κροκαλοπαγή*
iii. *Άργιλος*

2.6 Χαρακτηριστικές ιδιότητες των πετρωμάτων

Λόγω του ότι η εκμετάλλευση και η απόδοση των συστημάτων αυτών είναι καθαρά θερμική, οι ιδιότητες που ενδιαφέρουν στα πεδία αυτά σχετίζονται με τα θερμικά χαρακτηριστικά τους. Οι κυριότερες ιδιότητες που ενδιαφέρουν είναι:

i. *Πυκνότητα (ρ)*

Είναι το φυσικό μέγεθος που εκφράζει τη μάζα ενός υλικού που περιέχεται σε μια μονάδα όγκου. Ως μονάδα μέτρησης στο SI χρησιμοποιείται το kg/m^3.

ii. *Θερμική αγωγιμότητα (λ ή k)*

Είναι η ιδιότητα των υλικών που προσδιορίζει την ευκολία ή δυσκολία μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό αυτών. Ως μονάδα μέτρησης στο SIχρησιμοποιείται το W/m.K.

iii. *Ειδική θερμότητα (κατά συνήθεια θερμοχωρητικότητα)(c_p)*

Είναι η ποσότητα θερμότητας ενός σώματος που απαιτείται για να ανυψωθεί η θερμοκρασία της μονάδας μάζας του σώματος αυτού κατά 1K. Στο SI η μονάδα μέτρησης της είναι το J/kg.K. Για την παρούσα μελέτη όμως θα χρησιμοποιήσουμε την ογκομετρική θερμοχωρητικότητα (ή καλύτερα ειδική θερμοχωρητικότητα, C) με μονάδα μέτρησης το J/m^3K.

iv. *Θερμική διάχυση (α)*

Πρόκειται για την παράμετρο που καθορίζει πόσο γρήγορα διαχέεται η θερμοκρασία στο έδαφος συναρτήσει του χρόνου. Μονάδα μέτρησης στο SI είναι το m^2/s. Ουσιαστικά αποτελεί μια συνδυαστική παράμετρο της πυκνότητας, της θερμικής αγωγιμότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας και προκύπτει από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} = \frac{\lambda}{C} \tag{2.1}$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1** κάποιες τυπικές τιμές των παραπάνω ιδιοτήτων για τα πετρώματα που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 2.5:

Πίνακας 1: *Τυπικές τιμές γεωθερμικών χαρακτηριστικών πετρωμάτων*

ΠΕΤΡΩΜΑ	**ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ρ (*10^3kg/m^3)**	**ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ λ (W/mK)**	**ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ MJ/m^3K**	**ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΧΥΣΗ (*10^{-4})m^2/s**
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	2.7-2.8	2.8	2.1-2.4	10.92
ΜΑΡΓΑ	2.5-2.6	2.1	2.2-2.3	7.53
ΜΑΡΜΑΡΟ	2.6-2.8	2.0	2.0	10.0
ΒΑΣΑΛΤΗΣ	2.4-3.1	1.8	2.3-2.6	5.34
ΓΡΑΝΙΤΗΣ	2.6-2.8	3.4	2.2-2.9	9.13
ΓΝΕΥΣΙΟΣ	2.7	2.8	1.9	7.98
ΑΜΜΟΣ ΞΗΡΗ	2.1-2.2	0.4	1.3-1.6	3.07
ΑΜΜΟΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΜΕ ΝΕΡΟ	2.6-2.7	2.4	2.2-2.9	10.91

ΧΑΛΙΚΙ ΞΗΡΟ	2.5-2.6	0.4	1.4-1.6	2.85
ΧΑΛΙΚΙ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ ΜΕ ΝΕΡΟ	2.7	1.8	2.4	7.5
ΑΡΓΙΛΟΣ ΞΗΡΗ	0.5	0.5	1.5-1.6	3.33
ΑΡΓΙΛΟΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΜΕ ΝΕΡΟ	1.7	1.7	1.6-3.4	10.61
ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ	2.6-3.2	2.7	1.8	9.6

Στη συνέχεια, βάση των τιμών του **Πίνακα 1** προκύπτει, για κάθε περιοχή που μελετήθηκε στην υποενότητα 2.3, ένας νέος πίνακας οι τιμές του οποίου προκύπτουν αθροίζοντας το γινόμενο της εκτιμώμενης ποσοστιαίας παρουσίας κάθε πετρώματος στην κάθε περιοχή επί την αντίστοιχη τιμή του **Πίνακα 1**. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας φαίνονται στον **Πίνακα 2**και **Πίνακα 3**.

Πίνακας 2: *Ενδεικτικές μέσες τιμές ιδιοτήτων υπεδαφικών υλικών για ξηρά πετρώματα*

ΠΟΛΗ	**ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ** ρ **(*10^{3}kg/m^3)**	**ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ** λ **(W/mK)**	**ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ MJ/m^{3}K**
ΑΘΗΝΑ	2.5075	1.915	1.925
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	1.43	0.905	1.565
ΛΑΡΙΣΑ	1.505	0.43	1.48
ΠΑΤΡΑ	1.6125	0.425	1.475
ΗΡΑΚΛΕΙΟ	2.42	2.09	2.025
ΒΟΛΟΣ	2.32	1.61	1.835

Πίνακας 3: *Ενδεικτικές μέσες τιμές ιδιοτήτων υπεδαφικών υλικών για κορεσμένα σε νερό πετρώματα*

ΠΟΛΗ	**ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ** ρ **(*10^{3}kg/m^3)**	**ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ** λ **(W/mK)**	**ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ MJ/m^{3}K**
ΑΘΗΝΑ	2.6825	2.415	2.2275
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	2.31	2.185	2.385
ΛΑΡΙΣΑ	2.365	2.19	2.535
ΠΑΤΡΑ	2.2	2.225	2.5375
ΗΡΑΚΛΕΙΟ	2.63	2.55	2.32
ΒΟΛΟΣ	2.59	2.13	2.15

Οι διαφορές των τιμών στους δυο πίνακες προκύπτουν από την περιεκτικότητα των πετρωμάτων σε νερό. Ο **Πίνακας 2** αφορά ξηρά πετρώματα, ενώ ο **Πίνακας 3** αφορά πετρώματα κορεσμένα σε νερό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ-ΚΩΔΙΚΑΣ

3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο κώδικα – επιλογή της μεθόδου

Το πρακτικό τμήμα της εργασίας έχει να κάνει καθαρά με την επίλυση ζητημάτων μετάδοσης θερμότητας. Η αρχική υπόθεση ήταν ότι η μελέτη θα γίνει σε ένα πεδίο θερμοκρασιών χωρίς να υπάρχει μεταβολή της μάζας, δηλαδή οι θερμοκρασίες των σχηματισμών δε θα είναι ούτε αρκετά μεγάλες ώστε να υπάρχει εξάτμιση αλλά ούτε και αρκετά μικρές ώστε να οδηγούν σε στερεοποίηση.

Ουσιαστικά το υπέδαφος και τα εκάστοτε πετρώματα θεωρούνται ένας σταθερός σχηματισμός, με συγκεκριμένες τιμές πετρολογικών και θερμικών ιδιοτήτων οι οποίες μεταβάλλονται αποκλειστικά και μόνο από την παρουσία νερού.

Για να στηριχθεί η παραπάνω αρχική υπόθεση, επιλέχθηκε η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών για την πραγματοποίηση της εργασίας με βάση την οποία η κάθε περιοχή μελέτης χωρίζεται σε υποπεριοχές αποτελούμενες από ένα πλέγμα γραμμών.

Οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων του πλέγματος δεν πρέπει να είναι ίσες απαραίτητα. Αντίθετα συνηθίζεται ένα ανομοιόμορφο πλέγμα όπου οι κόμβοι του είναι πυκνότεροι στις περιοχές όπου υπάρχει σημαντική μεταβολή της παρατηρούμενης μεταβλητής.[20]

Πρακτικότερα, εξετάζεται η επίλυση, με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, της ελλειπτικού τύπου διαφορικής εξίσωσης μονίμου μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας:

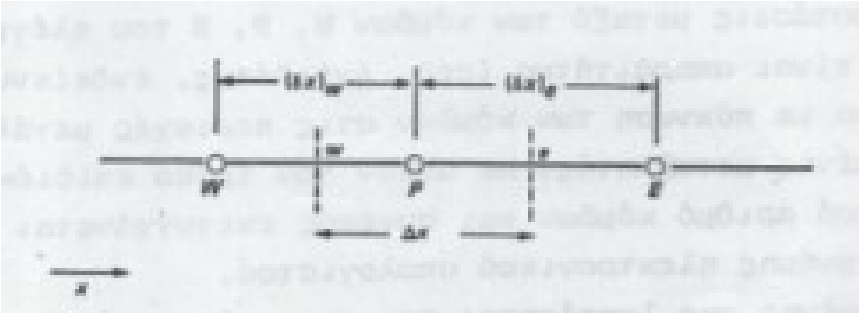
$$\frac{d}{dx}\left(k\frac{dT}{dx}\right)+S=0 \tag{3.1}$$

όπου **k** είναι η θερμική αγωγιμότητα, **T** η θερμοκρασία και **S** ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας ανά μονάδα όγκου.

3.1.1 Εξίσωση πεπερασμένων διαφορών

Η εξίσωση 3.1, βάσει της μεθόδου του όγκου αναφοράς, ολοκληρώνεται στον όγκο αναφοράς weπου περιβάλει τον κόμβο P, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1. Το αποτέλεσμα της εξίσωσης που προκύπτει είναι:

$$\left(k\frac{dT}{dx}\right)_e-\left(k\frac{dT}{dx}\right)_w+\int_w^e S dx=0 \tag{3.2}$$



Εικόνα 3.1: *Ομάδα τριών κόμβων και συμβολισμός αποστάσεων*

Εκφράζοντας τις παραγώγους dT/dx με την υπόθεση γραμμικής μεταβολής της θερμοκρασίας μεταξύ διαδοχικών κόμβων, η εξίσωση γίνεται:

$$k_e \frac{T_E - T_P}{(\delta x)_e} - k_w \frac{T_P - T_W}{(\delta x)_w} + \bar{S}\Delta x = 0 \tag{3.3}$$

όπου $\bar{\mathbf{S}}$ είναι η μέση τιμή του πηγαίου όρου S μέσα στον όγκο αναφοράς.

Υποθέτοντας αρχικά γραμμική σχέση μεταξύ S και T, δηλαδή,

$$\bar{S} = S_C + S_P T_P \tag{3.4}$$

η εξίσωση 3.3 παίρνει τυπική μορφή εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών:

$$A_P T_P = A_E T_E + A_W T_W + B \tag{3.5}$$

όπου:

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \tag{3.6}$$

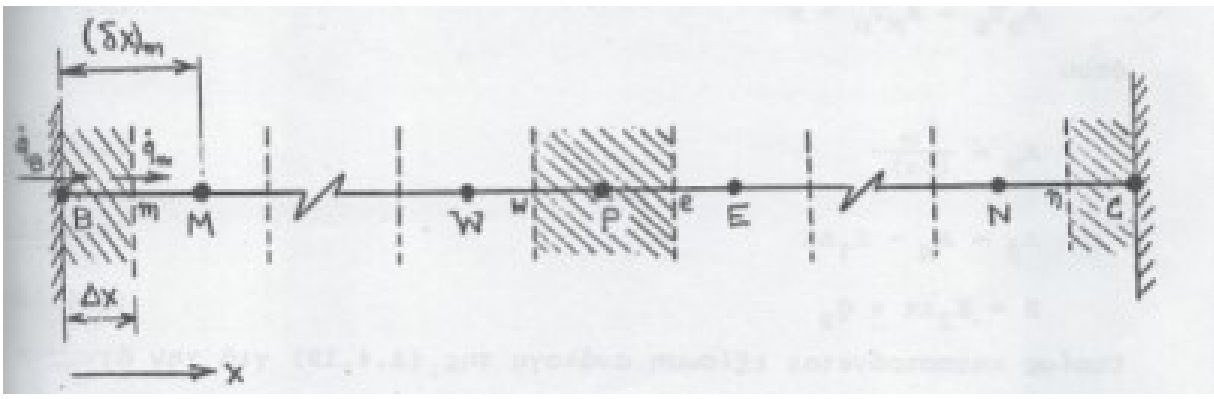
$$A_W = \frac{k_W}{(\delta x)_W} \tag{3.7}$$

$$A_P = A_E + A_W - S_P \Delta x \tag{3.8}$$

$$B = S_C \Delta x \tag{3.9}$$

3.1.2 Οριακές συνθήκες

Στην **Εικόνα 3.2** απεικονίζεται ένα μονοδιάστατο υπολογιστικό πλέγμα, που φέρει κόμβους Βκαι C πάνω στα δυο όρια. Στο πλέγμα σημειώνονται με διαγράμμιση ο τυπικός εσωτερικός όγκος αναφοράς γύρω από τον κόμβο P καθώς και οι οριακοί όγκοι αναφοράς, που γειτονεύουν με τα αντίστοιχα όρια και εκτείνονται μόνο προς τη μια πλευρά των οριακών κόμβων B και C.



Εικόνα 3.2: *Εσωτερικός και οριακοί όγκοι αναφοράς*

Για την τιμή της θερμοκρασίας T_P σε κάθε εσωτερικό κόμβο P μπορεί να γραφεί μια εξίσωση πεπερασμένων διαφορών της μορφής $A_PT_P = A_ET_E + A_WT_W + B$. Έτσι καταστρώνεται σύστημα εξισώσεων ισάριθμων με τους εσωτερικούς κόμβους. Η επίλυση του συστήματος όμως δεν είναι δυνατή γιατί εκτός των άγνωστων τιμών της θερμοκρασίας στο εσωτερικό των κόμβων, περιέχονται στις εξισώσεις και οι θερμοκρασίες στα όρια των κόμβων Βκαι C.[20] Οι δυο εξισώσεις που απαιτούνται για την συμπλήρωση του συστήματος παρέχονται από τις οριακές συνθήκες του προβλήματος:

i. Γνωστές τιμές θερμοκρασίας T_B, T_C στα όρια (Συνθήκη Dirichlet). Εάν είναι γνωστές οι τιμές της θερμοκρασίας των οριακών κόμβωνΒκαι C, προφανώς απαιτούνται επιπλέον εξισώσεις.
ii. Γνωστές τιμές της θερμορροής $\dot{q}_B$, $\dot{q}_C$για τα όρια (Συνθήκη Neumann). Στην περίπτωση αυτή καταστρώνονται δυο εξισώσεις που περιέχουν τις άγνωστες τιμές TB και TC, με ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης 3.1 πάνω στους οριακούς όγκους αναφοράς. Η ολοκλήρωση στον όγκο αναφοράς του κόμβου B (**Εικόνα 3.2**) δίνει:

$$\dot{q}_B - \dot{q}_m + (S_2 + S_1T_B)\Delta x = 0 \tag{3.9}$$

ή

$$\dot{q}_B - \frac{k_m(T_B - T_M)}{(\delta x)_m} + (S_2 + S_1T_B)\Delta x = 0 \tag{3.10}$$

όπου ο πηγαίος όρος Sεκφράστηκε με τη γραμμική μορφή 3.4. Η παραπάνω σχέση είναι η απαιτούμενη για την άγνωστη τιμή T_B. Υπό τη μορφή εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών γράφεται:

$$A_BT_B = A_MT_M + B \tag{3.11}$$

όπου,

$$A_M = \frac{k_m}{(\delta x)_m} \tag{3.12}$$

$$A_B = A_M - S_1\Delta x \tag{3.13}$$

$$B = S_2\Delta x + \dot{q}_B \tag{3.14}$$

Ομοίως καταστρώνεται εξίσωση ανάλογη της 3.11 για την άγνωστη οριακή θερμοκρασία T_C.

iii. Συνθήκη συναγωγής στα όρια. Στην περίπτωση αυτή είναι γνωστές οι συναγωγιμότητες h_B,h_C και η θερμοκρασία του διερχομένου ρευστού T_{fB}, T_{fC} στα όρια B και C αντίστοιχα. Η θερμορροή $\dot{q}_B$ εκφράζεται ως:

$$\dot{q}_B = h_B(T_{fB} - T_B) \tag{3.15}$$

Αν αντικαταστήσουμε την 3.15 στην 3.10 θα προκύψει η ζητούμενη εξίσωση για την άγνωστη τιμή T_B:

$$A_B T_B = A_M T_M + B \tag{3.16}$$

όπου,

$$A_M = \frac{k_m}{(\delta x)_m} \tag{3.17}$$

$$A_B = A_M - S_1 \Delta x + h_B \tag{3.18}$$

$$B = S_2 \Delta x + h_B T_{fB} \tag{3.19}$$

Ομοίως σχηματίζεται εξίσωση παρόμοια της 3.16 για την άγνωστη θερμοκρασία T_C.

3.1.3 Μόνιμη διδιάστατη αγωγή θερμότητας

Η μόνιμη διδιάστατη αγωγή θερμότητας, περιγράφεται από τη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + S = 0 \tag{3.20}$$

όπου k η θερμική αγωγιμότητα, T η θερμοκρασία και So ρυθμός παραγωγής θερμότητας ανά μονάδα όγκου.[20] Αν θεωρήσουμε πλέγμα με κεντρικό κόμβο P και περιμετρικούς κόμβους E, W, N, S και εφαρμόσουμε τη μέθοδο ολοκλήρωσης σε όγκο αναφοράς, προκύπτει η αντίστοιχη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών:

$$A_P T_P = A_E T_E + A_W T_W + A_N T_N + A_S T_S + B \tag{3.21}$$

όπου,

$$A_E = \frac{k_e \Delta y}{(\delta x)_e} \tag{3.22}$$

$$A_W = \frac{k_w \Delta y}{(\delta x)_e} \tag{3.23}$$

$$A_N = \frac{k_n \Delta x}{(\delta y)_n} \tag{3.24}$$

$$A_S = \frac{k_s \Delta x}{(\delta y)_s} \tag{3.25}$$

$$B = S_C \Delta x \Delta y \tag{3.26}$$

Ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας Sεκφράστηκε γραμμικά συναρτήσει της θερμοκρασίας, δηλαδή,

$$S = S_C + S_P T_P \tag{3.27}$$

3.1.4 Επίλυση συστήματος εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών

Καταστρώνοντας μια εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για κάθε κόμβο του πλέγματος, προκύπτει ουσιαστικά ένα σύστημα εξισώσεων με ισάριθμους αγνώστους τις τιμές της εξαρτώμενης μεταβλητής στους κόμβους.

Το σύστημα των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών μπορεί να είναι πραγματικά γραμμικό η να έχει τεθεί υπό γραμμική μορφή. Έχοντας να αντιμετωπίσουμε ένα μη γραμμικό απαιτούνται επαναληπτικοί υπολογισμοί. Τυπικές επαναληπτικές μέθοδοι είναι:

1. Ανά κόμβο επαναληπτική μέθοδος Gauss–Seidel
2. Ανά γραμμή επαναληπτική μέθοδος
3. Επαναληπτική μέθοδος εναλλασσόμενης διεύθυνσης
4. Επαναληπτική μέθοδος υπερχαλάρωσης

3.1.5 Επαναληπτική μέθοδος

Επιλέχθηκε η επαναληπτική μέθοδος Gauss–Seidel. Η εφαρμογή της στην παρούσα περίπτωση γίνεται υπολογίζοντας τη θερμοκρασία κάθε κόμβου P από την αντίστοιχη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών (3.21), δηλαδή:

$$T_P = \frac{1}{A_P}\left(\sum_{i=E,W,N,S} A_i T_i^* + B\right) \tag{3.28}$$

όπου με T_i^* συμβολίζονται οι πλέον πρόσφατα υπολογισμένες τιμές των γειτονικών κόμβωνE,W,N,S. Όταν η εξίσωση 3.28 εφαρμοσθεί σε όλους τους κόμβους της περιοχής επίλυσης, έχει ολοκληρωθεί ένας κύκλος υπολογισμών, δηλαδή μια επανάληψη. Ακολουθούν νέες επαναλήψεις μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση.

3.1.6 Κριτήρια σύγκλισης

Για να διαπιστωθεί αν οι τιμές που προκύπτουν από την επαναληπτική διαδικασίαεπίλυσης του συστήματος των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών, έχουν πλησιάσει ικανοποιητικά τη λύση ώστε να τερματισθεί η διαδικασία επίλυσης, γίνεται χρήση των παρακάτω κριτηρίων σύγκλισης:

i. Ελέγχεται αν η μέγιστη ανηγμένη διαφορά τιμών που προκύπτουν για τον ίδιο κόμβο σε δυο διαδοχικές επαναλήψεις είναι μικρότερη από μια επιθυμητή τιμή **α**, δηλαδή,

$$max\left|\frac{T_P - T_P'}{T_P}\right| < \alpha \tag{3.29}$$

ii. Μια βελτιωμένη μορφή της ….. είναι η:

$$max\left|\frac{T_P - T_P'}{T_{ref}}\right| < \alpha \tag{3.30}$$

Όπου η T_{ref}είναι μια αντιπροσωπευτική τιμή αναφοράς του πεδίου. Στην περίπτωση αργού ρυθμού σύγκλισης οι τιμές T_P και T'_P βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους και

συνεπώς ενδέχεται να ικανοποιούνται τα κριτήρια 3.29 και 3.30 ενώ οι τιμές $T_P \sim T'_P$ βρίσκονται ακόμα πολύ μακριά από τη λύση. Σε τέτοια περίπτωση χρησιμοποιείται το επόμενο κριτήριο που αν και ασφαλέστερο είναι σημαντικά πιο χρονοβόρο.

iii. Υπολογίζονται τα υπόλοιπα R_P των εξισώσεων σε όλους τους κόμβους P του πεδίου, δηλαδή:

$$R_P = A_P T_P - \sum_{i=E,W,N,S} A_i T_i - B$$

Όσο οι υπολογιζόμενες τιμές της θερμοκρασίας πλησιάζουν την ακριβή λύση του συστήματος, τόσο τα υπόλοιπα R_P τείνουν προς το μηδέν. Η επαναληπτική διαδικασία επίλυσης τερματίζεται όταν τα υπόλοιπα R_P σε ολόκληρο το πεδίο γίνουν μικρότερα μιας επιθυμητής τιμής.[20]

3.2 Παρουσίαση του κώδικα

```
PrivateSubCB_START_Click()                    'ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ ΚΥΡΙΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

'Η ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΘΑ ΓΙΝΕΙ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΕΚΦΡΑΣΗΣ


'ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ.....
Dim X As Single, Y As Single,                 'ΒΟΗΘΗΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΓΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ Χ & Υ
Dim I As Single, J As Single                  'ΒΟΗΘΗΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ
Dim pi As Single                              'Η ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ (π)
Dim Lx As Single, Ly As Single,               'ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΤΑ–Χ & ΚΑΤΑ –Υ
Dim KL As Single, RL As Single,               'ΣΥΝΤΕΛ.ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΩΤΗΤΑΣ, ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ,
CL As Single                                  ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ
Dim Dt As Single                              'ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΕ min
Dim Nx As Single, Ny As Single,               'ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΤΑ–Χ & ΚΑΤΑ –Υ
Dim DxDy As Single                            'ΧΩΡΙΚΟ ΒΗΜΑ (ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ
                                              ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ)
Dim ETOS_END As Single                        'ΕΤΟΣ ΠΟΥ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΣΤΑΜΑΤΑΝΕ ΟΙ
                                              ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ
Dim Hgeo As Single, Dgeo As Single,           'ΥΨΟΣ & ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
Vgeo As Single
Dim geo_N As Single                           'ΠΛΗΘΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ


'ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΨΥΞΗ & ΘΕΡΜΑΝΣΗ.....
Dim HC_1 As String, HC_2 As String, HC_3 As String, HC_4 As String, HC_5 As String, HC_6 As String, HC_7
As String, HC_8 As String, HC_9 As String, HC_10 As String, HC_11 As String, HC_12 As String


'ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣΚΤΙΡΙΟΥ (kWh).....
Dim KWh_1 As Single, KWh_2 As Single, KWh_3 As Single, KWh_4 As Single, KWh_5 As Single, KWh_6 As
Single, KWh_7 As Single, KWh_8 As Single, KWh_9 As Single, KWh_10 As Single, KWh_11 As Single,
KWh_12 As Single


'ΩΡΕΣΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣΑΝΑΗΜΕΡΑ.....
Dim Hour_1 As Single, Hour_2 As Single, Hour_3 As Single, Hour_4 As Single, Hour_5 As Single, Hour_6 As
Single, Hour_7 As Single, Hour_8 As Single, Hour_9 As Single, Hour_10 As Single, Hour_11 As Single, Hour_12
As Single
```

```
'ΜΕΣΗ ΙΣΧΥΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΑΝΑ ΜΗΝΑ.....

Dim Source_1 As Single, Source_2 As Single, Source_3 As Single, Source_4 As Single, Source_5 As Single,
Source_6 As Single, Source_7 As Single, Source_8 As Single, Source_9 As Single, Source_10 As Single,
Source_11 As Single, Source_12 As Single


Dim T0 As Single, DEIXTHS As Single, BEFORE As Single

Dim A_E As Single, A_W As Single, A_N As Single, A_S As Single,

Dim AP As Single, APO As Single

Dim PSI As Single

Dim Source As Single, ETOS As Single, DAY_YEAR As Single

DimDAYAsSingle


'ΛΗΨΗΤΙΜΩΝ ΑΠΟ ΤΑΦΥΛΛΑΤΟΥΕXCEL.....

'ΤΙΜΕΣΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ…….....
pi = 3.141592654                          'Η ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ (π)
Lx = Worksheets("DATA").Range("Lx")       'ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΤΑ Χ ΣΕ ΜΕΤΡΑ
Ly = Worksheets("DATA").Range("Ly")       'ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΤΑ Υ ΣΕ ΜΕΤΡΑ


'ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΔΑΦΟΥΣ .....
KL = Worksheets("DATA").Range("KL")       'ΣΥΝΤΕΛ.ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΩΤΗΤΑΣ (W/m*K)
RL = Worksheets("DATA").Range("RL")       'ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (Kg/m3)
CL = Worksheets("DATA").Range("CL")       'ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ (J/kg*K)


'ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ ΛΥΣΗΣ.....
Dt = Worksheets("DATA").Range("Dt")       'ΧΡΟΝΙΚΟΒΗΜΑΣΕΛΕΠΤΑ
PSI = 1440 / Dt                           'ΧΡΟΝΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
                                          ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ  ΜΙΑΣ ΗΜΕΡΑΣ
DxDy = Worksheets("DATA").Range("DxDy")   'ΧΩΡΙΚΟ ΒΗΜΑ (ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ
                                          ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ) ΣΕ ΜΕΤΡΑ
Nx = Worksheets("DATA").Range("Nx")       'ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΤΑ Χ
Ny = Worksheets("DATA").Range("Ny")       'ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΤΑ Υ
```

```
'ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗ ΡΟΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ.....
ReDim K(Nx, Ny) As Single, R(Nx, Ny) As Single, Cp(Nx, Ny) As Single
ReDim T(Nx, Ny, PSI) As Single
ReDim Sc(Nx, Ny, PSI) As Single, Sp(Nx, Ny, PSI) As Single


'ΑΡΧΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ.....
T0 = Worksheets("DATA").Range("T0")


'ΕΤΟΣ ΠΟΥ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΤΕΡΜΑΤΙΖΟΝΤΑΙ ΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ……
ETOS_END = Worksheets("RUN").Range("ETOS_END")


'ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥΕΝΑΛΛΑΚΤΗ.....
Hgeo = Worksheets("DATA").Range("Hgeo")
Dgeo = Worksheets("DATA").Range("Dgeo")
geo_N = Worksheets("RUN").Range("geo_N")
Vgeo = geo_N * (pi * Dgeo ^ 2 / 4) * Hgeo


'ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΨΥΞΗ & ΘΕΡΜΑΝΣΗ.....
HC_1 = Worksheets("RUN").Range("HC_1")
HC_2 = Worksheets("RUN").Range("HC_2")
HC_3 = Worksheets("RUN").Range("HC_3")
HC_4 = Worksheets("RUN").Range("HC_4")
HC_5 = Worksheets("RUN").Range("HC_5")
HC_6 = Worksheets("RUN").Range("HC_6")
HC_7 = Worksheets("RUN").Range("HC_7")
HC_8 = Worksheets("RUN").Range("HC_8")
HC_9 = Worksheets("RUN").Range("HC_9")
HC_10 = Worksheets("RUN").Range("HC_10")
HC_11 = Worksheets("RUN").Range("HC_11")
HC_12 = Worksheets("RUN").Range("HC_12")
```

```
'ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣΚΤΙΡΙΟΥ (kWh)..............................................................................
KWh_1 = Worksheets("RUN").Range("kwh_1")
KWh_2 = Worksheets("RUN").Range("kwh_2")
KWh_3 = Worksheets("RUN").Range("kwh_3")
KWh_4 = Worksheets("RUN").Range("kwh_4")
KWh_5 = Worksheets("RUN").Range("kwh_5")
KWh_6 = Worksheets("RUN").Range("kwh_6")
KWh_7 = Worksheets("RUN").Range("kwh_7")
KWh_8 = Worksheets("RUN").Range("kwh_8")
KWh_9 = Worksheets("RUN").Range("kwh_9")
KWh_10 = Worksheets("RUN").Range("kwh_10")
KWh_11 = Worksheets("RUN").Range("kwh_11")
KWh_12 = Worksheets("RUN").Range("kwh_12")


'ΩΡΕΣΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣΑΝΑΗΜΕΡΑ.....................................................................................
Hour_1 = Worksheets("RUN").Range("Hour_1")
Hour_2 = Worksheets("RUN").Range("Hour_2")
Hour_3 = Worksheets("RUN").Range("Hour_3")
Hour_4 = Worksheets("RUN").Range("Hour_4")
Hour_5 = Worksheets("RUN").Range("Hour_5")
Hour_6 = Worksheets("RUN").Range("Hour_6")
Hour_7 = Worksheets("RUN").Range("Hour_7")
Hour_8 = Worksheets("RUN").Range("Hour_8")
Hour_9 = Worksheets("RUN").Range("Hour_9")
Hour_10 = Worksheets("RUN").Range("Hour_10")
Hour_11 = Worksheets("RUN").Range("Hour_11")
Hour_12 = Worksheets("RUN").Range("Hour_12")


'ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΣΗΣ ΜΗΝΙΑΙΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ……
Source_1 = KWh_1 * 1000 / (31 * Hour_1 * Vgeo)
Source_2 = KWh_2 * 1000 / (28 * Hour_2 * Vgeo)
Source_3 = KWh_3 * 1000 / (31 * Hour_3 * Vgeo)
Source_4 = KWh_4 * 1000 / (30 * Hour_4 * Vgeo)
Source_5 = KWh_5 * 1000 / (31 * Hour_5 * Vgeo)
Source_6 = KWh_6 * 1000 / (30 * Hour_6 * Vgeo)
```

```
Source_7 = KWh_7 * 1000 / (31 * Hour_7 * Vgeo)
Source_8 = KWh_8 * 1000 / (31 * Hour_8 * Vgeo)
Source_9 = KWh_9 * 1000 / (30 * Hour_9 * Vgeo)
Source_10 = KWh_10 * 1000 / (31 * Hour_10 * Vgeo)
Source_11 = KWh_11 * 1000 / (30 * Hour_11 * Vgeo)
Source_12 = KWh_12 * 1000 / (31 * Hour_12 * Vgeo)

'ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΤΙΜΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΦΥΛΛΟ MESH
For X = 1 To Nx
        For Y = 1 To Ny
                Worksheets("MESH").Cells(X, Y) = ""
        Next Y
Next X


'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΙΜΩΝ ΣΤΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ
'ΔΙΝΟΝΤΑΙ ΣΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ ΟΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....
For X = 1 To Nx Step 1
        For Y = 1 To Ny Step 1
                K(X, Y) = KL
                R(X, Y) = RL
                Cp(X, Y) = CL
        NextY
NextX
'ΑΡΧΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ.....
For J = 1 To PSI Step 1
        For X = 1 ToNxStep 1
                For Y = 1 ToNyStep 1
                        T(X, Y, J) = T0
                Next Y
        Next X
NextJ


'ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΠΗΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ.....
For J = 1 To PSI Step 1
```

```
        For X = 1 ToNxStep 1
                For Y = 1 ToNyStep 1
                        Sc(X, Y, J) = 0
                        Sp(X, Y, J) = 0
                Next Y
        Next X
NextJ


'*****************************************************************************************
'ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....................................
ETOS = 0
DAY = 0
DAY_YEAR = 1


'ΟΛΟΚΛΗΡΩΝΟΥΜΕ ΤΟ ΠΡΩΤΟ 24ΩΡΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΕΧΙΖΟΥΜΕ.....................................
NEXTDAY:

If DAY_YEAR = 365 Then          '2 ΕΤΟΣΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ
   ETOS = 1
   DAY = 0
ElseIf DAY_YEAR = 730 Then              '3 ΕΤΟΣΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ
   ETOS = 2
   DAY = 0
ElseIf DAY_YEAR = 1095 Then             '4 ΕΤΟΣΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ
   ETOS = 3
   DAY = 0
ElseIf DAY_YEAR = 1460 Then             '5 ΕΤΟΣΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ
   ETOS = 4
   DAY = 0
ElseIf DAY_YEAR = 1825 Then             '6 ΕΤΟΣΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ
   ETOS = 5
   DAY = 0
ElseIf DAY_YEAR = 2190 Then             '7 ΕΤΟΣΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ
   ETOS = 6
   DAY = 0
```

```
ElseIf DAY_YEAR = 2555 Then            '8 ΕΤΟΣΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ
   ETOS = 7
   DAY = 0
ElseIf DAY_YEAR = 2920 Then            '9 ΕΤΟΣΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ
   ETOS = 8
   DAY = 0
ElseIf DAY_YEAR = 3285 Then            '10 ΕΤΟΣΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ
   ETOS = 9
   DAY = 0
ElseIf DAY_YEAR = 3650 Then            'END OF CALCULATIONS
GoTo 1000
End If

Worksheets("RUN").Range("ETOS") = ETOS
Worksheets("RUN").Range("DAY") = DAY

If ETOS = ETOS_END Then
        GoTo 1000
End If


If DAY > 0 And DAY < 32 And HC_1 = "HEATING" Then
        Source = -Source_1

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_1 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 0 And DAY < 32 And HC_1 = "COOLING" Then
        Source = Source_1
```

```
'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_1 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
  Next J

ElseIf DAY > 0 And DAY < 32 And HC_1 = "" Then
Source = 0

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_1 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 31 And DAY < 60 And HC_2 = "HEATING" Then
Source = -Source_2

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_2 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 31 And DAY < 60 And HC_2 = "COOLING" Then
```

```
Source = Source_2

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_2 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 31 And DAY < 60 And HC_2 = "" Then
Source = 0

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_2 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 59 And DAY < 91 And HC_3 = "HEATING" Then
Source = -Source_3

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_3 Step 1
                Sc(X, Y,I) = Source
        Next I
Next J
```

```
ElseIf DAY > 59 And DAY < 91 And HC_3 = "COOLING" Then
Source = Source_3

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_3 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 59 And DAY < 91 And HC_3 = "" Then
Source = 0

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_3 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 90 And DAY < 121 And HC_4 = "HEATING" Then
Source = -Source_4

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_4 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
```

```
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 90 And DAY < 121 And HC_4 = "COOLING" Then
Source = Source_4

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_4 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 90 And DAY < 121 And HC_4 = "" Then
Source = 0

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_4 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 120 And DAY < 152 And HC_5 = "HEATING" Then
Source = -Source_5

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)
```

```
        For I = 1 To Hour_5 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 120 And DAY < 152 And HC_5 = "COOLING" Then
Source = Source_5

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_5 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 120 And DAY < 152 And HC_5 = "" Then
Source = 0

 'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_5 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 151 And DAY < 182 And HC_6 = "HEATING" Then
Source = -Source_6

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
```

```
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_6 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 151 And DAY < 182 And HC_6 = "COOLING" Then
Source = Source_6

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_6 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 151 And DAY < 182 And HC_6 = "" Then
Source = 0

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_6 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 181 And DAY < 213 And HC_7 = "HEATING" Then
Source = -Source_7

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
```

```
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_7 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 181 And DAY < 213 And HC_7 = "COOLING" Then
Source = Source_7

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_7 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 181 And DAY < 213 And HC_7 = "" Then
Source = 0

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_7 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 212 And DAY < 244 And HC_8 = "HEATING" Then
Source = -Source_8
```

```
'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_8 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 212 And DAY < 244 And HC_8 = "COOLING" Then
Source = Source_8

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_8 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 212 And DAY < 244 And HC_8 = "" Then
Source = 0

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_8 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J
```

```
ElseIf DAY > 243 And DAY < 274 And HC_9 = "HEATING" Then
Source = -Source_9

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_9 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 243 And DAY < 274 And HC_9 = "COOLING" Then
Source = Source_9

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_9 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 243 And DAY < 274 And HC_9 = "" Then
Source = 0

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
ForJ = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_9 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
```

```
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 273 And DAY < 305 And HC_10 = "HEATING" Then
Source = -Source_10

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_10 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 273 And DAY < 305 And HC_10 = "COOLING" Then
Source = Source_10

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_10 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 273 And DAY < 305 And HC_10 = "" Then
Source = 0

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)
```

```
        For I = 1 To Hour_10 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 304 And DAY < 335 And HC_11 = "HEATING" Then
Source = -Source_11

 'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_11 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 304 And DAY < 335 And HC_11 = "COOLING" Then
Source = Source_11

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_11 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 304 And DAY < 335 And HC_11 = "" Then
Source = 0

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
```

```
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_11 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 334 And DAY < 366 And HC_12 = "HEATING" Then
Source = -Source_12

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_12 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 334 And DAY < 366 And HC_12 = "COOLING" Then
Source = Source_12

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_12 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

ElseIf DAY > 334 And DAY < 366 And HC_12 = "" Then
Source = 0

'ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
```

```
For J = 6 To 35 Step 1
        X = Worksheets("RUN").Cells(J, 8)
        Y = Worksheets("RUN").Cells(J, 9)

        For I = 1 To Hour_12 Step 1
                Sc(X, Y, I) = Source
        Next I
Next J

End If


DEIXTHS = 0

For J = Dt To 1440 Step Dt

        DEIXTHS = DEIXTHS + 1

        DoEvents


         'ΕΥΡΕΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΜΕΣΗ ΜΕΘΟΔΟ ..................................................................
        If DEIXTHS = 1 Then
                 BEFORE = 1440 / Dt
         Else
                BEFORE = DEIXTHS - 1
        End     If


        'ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΟΡΙΑΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.....................................................................................
                For X = 1 ToNx
                        T(X, 1, DEIXTHS) = T0
                        Worksheets("MESH").Cells(X, 1) = T(X, 1, DEIXTHS)
                        T(X, Ny, DEIXTHS) = T0
                        Worksheets("MESH").Cells(X, Ny) = T(X, Ny, DEIXTHS)
                Next X
```

```
        For Y = 1 To Ny
            T(1, Y, DEIXTHS) = T0
            Worksheets("MESH").Cells(1, Y) = T(X, 1, DEIXTHS)
            T(Nx, Y, DEIXTHS) = T0
            Worksheets("MESH").Cells(Nx, Y) = T(X, Ny, DEIXTHS)
        Next Y

    'ΥΠΟΛΟΓΙΜΟΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ.....................................................................
        For X = 2 To    Nx - 1
        For Y = 2 To    Ny - 1

            A_E = K(X + 1, Y)
            A_W = K(X - 1, Y)
            A_N = K(X, Y - 1)
            A_S = K(X, Y + 1)

            APO = R(X, Y) * Cp(X, Y) * DxDy * DxDy / (Dt * 60)
            AP = APO

            T(X, Y, DEIXTHS) = (1 / AP) * (A_E * T(X + 1, Y, BEFORE) + A_W * T(X - 1, Y,
            BEFORE) + A_N *T(X, Y - 1, BEFORE) + A_S * T(X, Y + 1, BEFORE) + (APO -
            (A_E + A_W + A_N + A_S)) * T(X, Y, BEFORE) + Sc(X, Y, DEIXTHS) * (DxDy *
            DxDy))

            If Chart_MESH_CheckBox.Value = True Then
            Worksheets("MESH").Cells(X, Y) = T(X, Y, DEIXTHS)
            End If
        Next Y
    Next X
NextJ                                   'ΕΔΩ ΚΑΝΕΙ LOOP ΜΕΤΟ SELECT CASE

DAY = DAY + 1
DAY_YEAR = DAY_YEAR + 1

GoTo NEXTDAY                            'ΤΟ 24ΩΡΟ LOOP
1000:
EndSub
```

3.3 Επεξήγηση του κώδικα

Στο αρχικό τμήμα του κώδικα (σελ 37-38), γίνεται μια κατηγοριοποίηση των εντολών που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του. Αναφέρεται συγκεκριμένα τι εκφράζει η κάθε μεταβλητή η οποία στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί για να τον καθορισμό του κάθε κελιού που θα χρειαστεί ως δεδομένο για την κατασκευή των τελικών διαγραμμάτων.

Ακολουθεί ο καθορισμός των κελιών που προαναφέρθηκαν (σελ 38-40), απ' όπου θα γίνεται λήψη των τιμών που απαιτούνται για την κατασκευή των διαγραμμάτων. Ουσιαστικά για κάθε μεταβλητή που θα χρησιμοποιηθεί, προσδιορίζεται το φύλλο στο οποίο θα αποτυπώνεται ώστε μόλις 'τρέξει' το πρόγραμμα, ο κώδικας να εντοπίζει τις τιμές που χρειάζεται.

Συγκεκριμένα, αρχικά αποτυπώνονται στον αλγόριθμο οι φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων που θα μελετηθούν, δηλαδή η πυκνότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, αφού πρόκειται για δεδομένα χαρακτηριστικά για κάθε πέτρωμα. Στη συνέχεια, προσδιορίζεται ο αριθμός των κόμβων κατά X και Y καθώς και το χρονικό βήμα στο οποίο θα εκτελείται ο κώδικας. Τέλος αναφέρεται και η αρχική θερμοκρασία του εδάφους για την οποία κάνουμε τις μετρήσεις καθώς και κάποια τυπικά στοιχεία του γεωθερμικού εναλλάκτη (βάθος και διάμετρος). Ένα παράδειγμα της απεικόνισης του κώδικα μέχρι αυτό το σημείο κατασκευής του φαίνεται στην **Εικόνα 3.3**.

	A	B	C
1			
2		ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΤΑ -X	10 m
3		ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΤΑ -Y	10 m
4		ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΤΑ -Z	1 m
5			
6		ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	0,4 W/mK
7		ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	1988 Kg/m³
8		ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	1475 J/KgK
9			
10			
11		ΧΩΡΙΚΟ ΒΗΜΑ (ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ)	0,25 m
12		ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΤΑ X	41
13		ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΤΑ Y	41
14		ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΤΑ Z	5
15			
16		**ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ ΘΑ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΕΙΝΑΙ ΜΙΚΡΟΤΕΡΟ ΑΠΟ**	**1198 min**
17		ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ	60 min
18			
19		ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	20 °C
20			
21		ΒΑΘΟΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ	60 m
22		ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ	0,20 m

Εικόνα 3.3: *Παράδειγμα απεικόνισης κώδικα*

Στη συνέχεια, κατασκευάζεται ο κυρίως αλγόριθμος θεωρώντας χρήση γεωθερμικής ενέργειας για ικανοποίηση ενεργειακών αναγκών κτιρίου για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (σελ 40 - 43). Έτσι πρέπει να καθοριστούν οι ενεργειακές απαιτήσεις σε kWh για κάθε μήνα του έτους. Προφανώς ανάλογα των θερμοκρασιακών συνθηκών κάθε εποχής, οι ενεργειακές απαιτήσεις μπορεί να είναι είτε απαιτήσεις για θέρμανση είτε για ψύξη. Επιπλέον ορίζονται και οι ώρες

λειτουργίας που απαιτούνται ανά ημέρα, ενώ προσδιορίζεται και η ετήσια διάρκεια σε μέρες ώστε ο κώδικας να μπορεί να εκτελέσει την τελική κυκλική διαδικασία

Τέλος καθορίζονται οι συντεταγμένες των θέσεων του αριθμού των εναλλακτών για τους οποίους επιλέγεται να εκτελεστεί το πρόγραμμα καθώς και ο αριθμός αυτών. Στην **Εικόνα 3.4** έχουμε ένα παράδειγμα της απεικόνισης των παραπάνω εντολών.

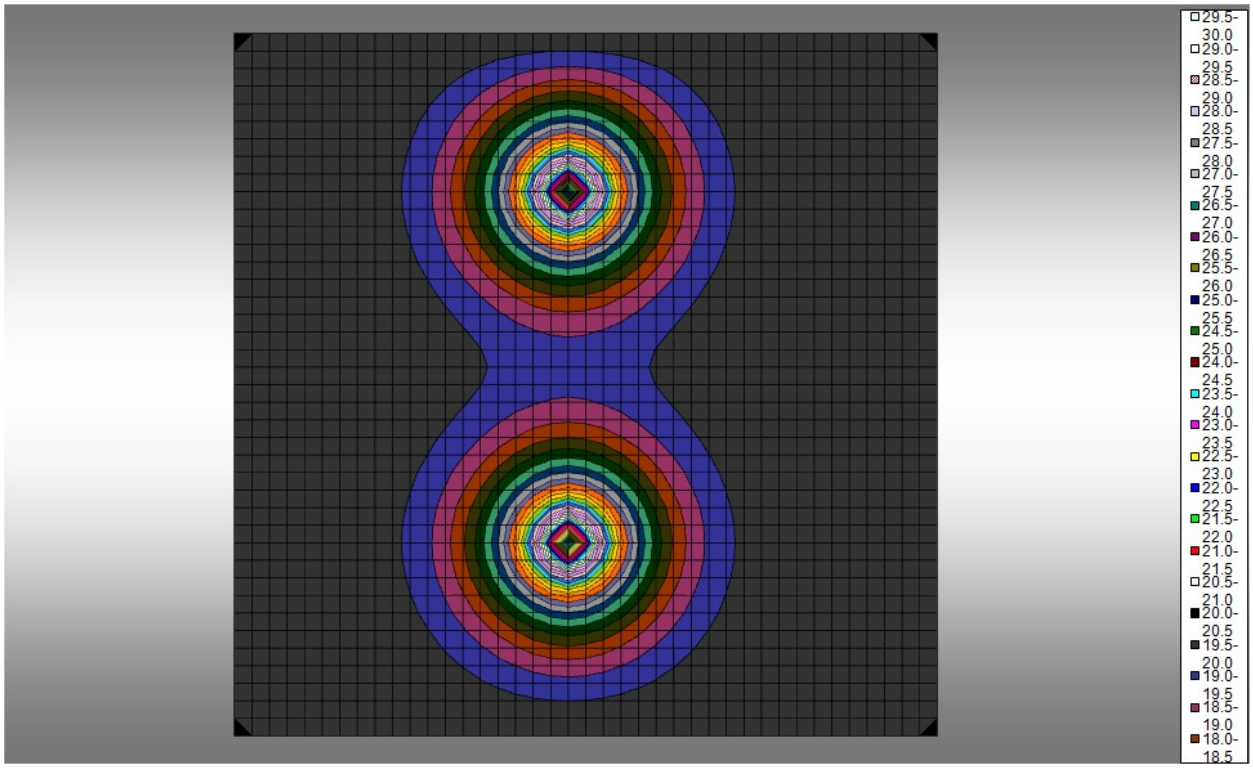
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
2		ΓΙΑ ΠΟΣΑ ΕΤΗ ΝΑ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	3										
3													
4			HEATING COOLING	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΤΙΡΙΟΥ (KWh)	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΑ ΗΜΕΡΑ		ΘΕΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ (X(m)/DxDy) & (Y(m)/DxDy)			ΠΛΗΘΟΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ			2
5	1	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	HEATING	3000	24		Α/Α	Χ (ΚΟΜΒΟΣ)	Υ (ΚΟΜΒΟΣ)	Χ (m)	Υ (m)		
6	2	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	HEATING	3000	24		1	20	10	5	2,5		
7	3	ΜΑΡΤΙΟΣ	HEATING	3000	24		2	20	30	5	7,5		
8	4	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	HEATING	2000	1		3						
9	5	ΜΑΙΟΣ	COOLING	1500	1		4						
10	6	ΙΟΥΝΙΟΣ	COOLING	1500	3		5						
11	7	ΙΟΥΛΙΟΣ	COOLING	1500	8		6						
12	8	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	COOLING	1500	8		7						
13	9	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	COOLING	1500	3		8						
14	10	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	HEATING	2000	3		9						
15	11	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	HEATING	2000	5		10						
16	12	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	HEATING	2000	7		11						
17			Htot	**17000**			12						
18			Ctot	**7500**			13						
19							14						
20							15						
21		START	EXIT				16						
22							17						
23		ΕΤΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ	1				18						
24		ΗΜΕΡΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ	130				19						

Εικόνα 3.4: *Παράδειγμα απεικόνισης κώδικα*

Τελικώς ο αλγόριθμος του κώδικα προσαρμόζεται σε μορφή κυκλικών επαναλήψεων ώστε να επαναλαμβάνεται η διαδικασία ανάλογα τον αριθμό των ετών που επιλέγονται (σελ 43 - 57). Τα αποτελέσματα αναμένονται να είναι ένας πίνακας θερμοκρασιών καθώς και ένα διάγραμμα που κατασκευάζεται βάσει των θερμοκρασιών αυτών. Οι μορφή τόσο του πίνακα όσο και του διαγράμματος φαίνονται στις **Εικόνες 3.5** και **3.6**.

20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.8	19.8	19.8	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	20.0	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.8	19.8	19.8	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	19.9	19.9	19.9	19.8	19.8	19.8	19.8	19.7	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.8	19.8	19.8	19.8	19.7	19.7	19.8	19.8	19.8	19.8	19.9	19.9	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	19.9	19.9	19.8	19.8	19.7	19.7	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.7	19.7	19.8	19.8	19.8	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.8	19.8	19.8	19.7	19.7	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.7	19.7	19.8	19.8	19.9	19.9	19.9	20.0	20.0
20.0	19.9	19.8	19.8	19.7	19.6	19.5	19.5	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.6	19.7	19.7	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	19.7	19.7	19.6	19.5	19.5	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.6	19.7	19.7	19.8	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0
20.0	19.9	19.8	19.7	19.5	19.4	19.3	19.2	19.1	19.1	19.1	19.2	19.3	19.4	19.5	19.6	19.7	19.7	19.8	19.8	19.8	19.7	19.7	19.6	19.5	19.4	19.3	19.2	19.1	19.1	19.1	19.2	19.3	19.4	19.5	19.6	19.7	19.8	19.9	19.9	20.0	20.0
20.0	19.8	19.7	19.5	19.3	19.2	19.0	18.8	18.7	18.7	18.7	18.8	19.0	19.1	19.3	19.4	19.6	19.6	19.7	19.7	19.7	19.6	19.6	19.4	19.3	19.1	19.0	18.8	18.7	18.7	18.7	18.8	19.0	19.1	19.3	19.5	19.6	19.7	19.8	19.9	20.0	20.0
20.0	19.8	19.6	19.4	19.1	18.8	18.6	18.3	18.1	18.1	18.1	18.3	18.5	18.8	19.0	19.2	19.4	19.5	19.6	19.6	19.6	19.5	19.4	19.2	19.0	18.8	18.5	18.3	18.1	18.1	18.1	18.3	18.5	18.8	19.1	19.3	19.5	19.6	19.8	19.9	20.0	20.0
20.0	19.7	19.5	19.1	18.8	18.4	18.0	17.6	17.3	17.2	17.3	17.6	18.0	18.4	18.7	19.0	19.2	19.4	19.5	19.5	19.5	19.4	19.2	19.0	18.7	18.4	18.0	17.6	17.3	17.2	17.3	17.6	18.0	18.4	18.7	19.1	19.3	19.5	19.7	19.9	20.0	20.0
20.0	19.7	19.3	18.9	18.4	17.9	17.3	16.7	16.2	16.0	16.2	16.7	17.3	17.8	18.3	18.8	19.1	19.3	19.4	19.4	19.4	19.3	19.1	18.8	18.3	17.8	17.3	16.7	16.2	16.0	16.2	16.7	17.3	17.9	18.4	18.8	19.2	19.4	19.7	19.8	20.0	20.0
20.0	19.6	19.2	18.7	18.1	17.3	16.5	15.5	14.7	14.3	14.7	15.5	16.4	17.3	17.9	18.5	18.9	19.1	19.3	19.4	19.3	19.1	18.9	18.5	17.9	17.3	16.4	15.5	14.7	14.3	14.7	15.5	16.4	17.3	18.0	18.6	19.0	19.3	19.6	19.8	20.0	20.0
20.0	19.5	19.0	18.5	17.7	16.7	15.5	14.1	12.5	11.5	12.5	14.1	15.5	16.7	17.6	18.2	18.7	19.0	19.2	19.3	19.2	19.0	18.7	18.2	17.6	16.7	15.5	14.1	12.5	11.5	12.5	14.1	15.5	16.7	17.6	18.3	18.8	19.2	19.5	19.8	20.0	20.0
20.0	19.5	19.0	18.3	17.4	16.3	14.7	12.5	9.6	6.6	9.6	12.5	14.7	16.2	17.3	18.1	18.6	19.0	19.2	19.2	19.2	19.0	18.6	18.1	17.3	16.2	14.7	12.5	9.6	6.6	9.6	12.5	14.7	16.2	17.3	18.2	18.7	19.2	19.5	19.8	20.0	20.0
20.0	19.5	18.9	18.2	17.3	16.1	14.3	11.6	6.6	-4.5	6.6	11.5	14.3	16.0	17.2	18.0	18.6	18.9	19.1	19.2	19.1	18.9	18.6	18.0	17.2	16.0	14.3	11.5	6.6	-4.5	6.6	11.5	14.3	16.0	17.2	18.1	18.7	19.2	19.5	19.8	20.0	20.0
20.0	19.5	19.0	18.3	17.4	16.3	14.7	12.5	9.6	6.6	9.6	12.5	14.7	16.2	17.3	18.1	18.6	19.0	19.2	19.2	19.2	19.0	18.6	18.1	17.3	16.2	14.7	12.5	9.6	6.6	9.6	12.5	14.7	16.2	17.3	18.2	18.7	19.2	19.5	19.8	20.0	20.0
20.0	19.5	19.0	18.5	17.7	16.7	15.5	14.1	12.5	11.5	12.5	14.1	15.5	16.7	17.6	18.2	18.7	19.0	19.2	19.3	19.2	19.0	18.7	18.2	17.6	16.7	15.5	14.1	12.5	11.5	12.5	14.1	15.5	16.7	17.6	18.3	18.8	19.2	19.5	19.8	20.0	20.0
20.0	19.6	19.2	18.7	18.1	17.3	16.5	15.5	14.7	14.3	14.7	15.5	16.4	17.3	17.9	18.5	18.9	19.1	19.3	19.4	19.3	19.1	18.9	18.5	17.9	17.3	16.4	15.5	14.7	14.3	14.7	15.5	16.4	17.3	18.0	18.6	19.0	19.3	19.6	19.8	20.0	20.0
20.0	19.7	19.3	18.9	18.4	17.9	17.3	16.7	16.2	16.0	16.2	16.7	17.3	17.8	18.3	18.8	19.1	19.3	19.4	19.4	19.4	19.3	19.1	18.8	18.3	17.8	17.3	16.7	16.2	16.0	16.2	16.7	17.3	17.9	18.4	18.8	19.2	19.4	19.7	19.8	20.0	20.0
20.0	19.7	19.5	19.1	18.8	18.4	18.0	17.6	17.3	17.2	17.3	17.6	18.0	18.4	18.7	19.0	19.2	19.4	19.5	19.5	19.5	19.4	19.2	19.0	18.7	18.4	18.0	17.6	17.3	17.2	17.3	17.6	18.0	18.4	18.7	19.1	19.3	19.5	19.7	19.9	20.0	20.0
20.0	19.8	19.6	19.4	19.1	18.8	18.6	18.3	18.1	18.1	18.1	18.3	18.5	18.8	19.0	19.2	19.4	19.5	19.6	19.6	19.6	19.5	19.4	19.2	19.0	18.8	18.5	18.3	18.1	18.1	18.1	18.3	18.5	18.8	19.1	19.3	19.5	19.6	19.8	19.9	20.0	20.0
20.0	19.8	19.7	19.5	19.3	19.2	19.0	18.8	18.7	18.7	18.7	18.8	19.0	19.1	19.3	19.4	19.6	19.6	19.7	19.7	19.7	19.6	19.6	19.4	19.3	19.1	19.0	18.8	18.7	18.7	18.7	18.8	19.0	19.1	19.3	19.5	19.6	19.7	19.8	19.9	20.0	20.0
20.0	19.9	19.8	19.7	19.5	19.4	19.3	19.2	19.1	19.1	19.1	19.2	19.3	19.4	19.5	19.6	19.7	19.7	19.8	19.8	19.8	19.7	19.7	19.6	19.5	19.4	19.3	19.2	19.1	19.1	19.1	19.2	19.3	19.4	19.5	19.6	19.7	19.8	19.9	19.9	20.0	20.0
20.0	19.9	19.8	19.8	19.7	19.6	19.5	19.5	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.6	19.7	19.7	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	19.7	19.7	19.6	19.5	19.5	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.6	19.7	19.7	19.8	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0
20.0	19.9	19.9	19.8	19.8	19.7	19.7	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.7	19.7	19.8	19.8	19.8	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.8	19.8	19.8	19.7	19.7	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.7	19.7	19.8	19.8	19.9	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	19.9	19.9	19.9	19.8	19.8	19.8	19.8	19.7	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.8	19.8	19.8	19.8	19.7	19.7	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8	19.9	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.8	19.8	19.8	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	20.0	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.8	19.8	19.8	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0

Εικόνα 3.5: *Πίνακας θερμοκρασιακών αποτελεσμάτων κώδικα*



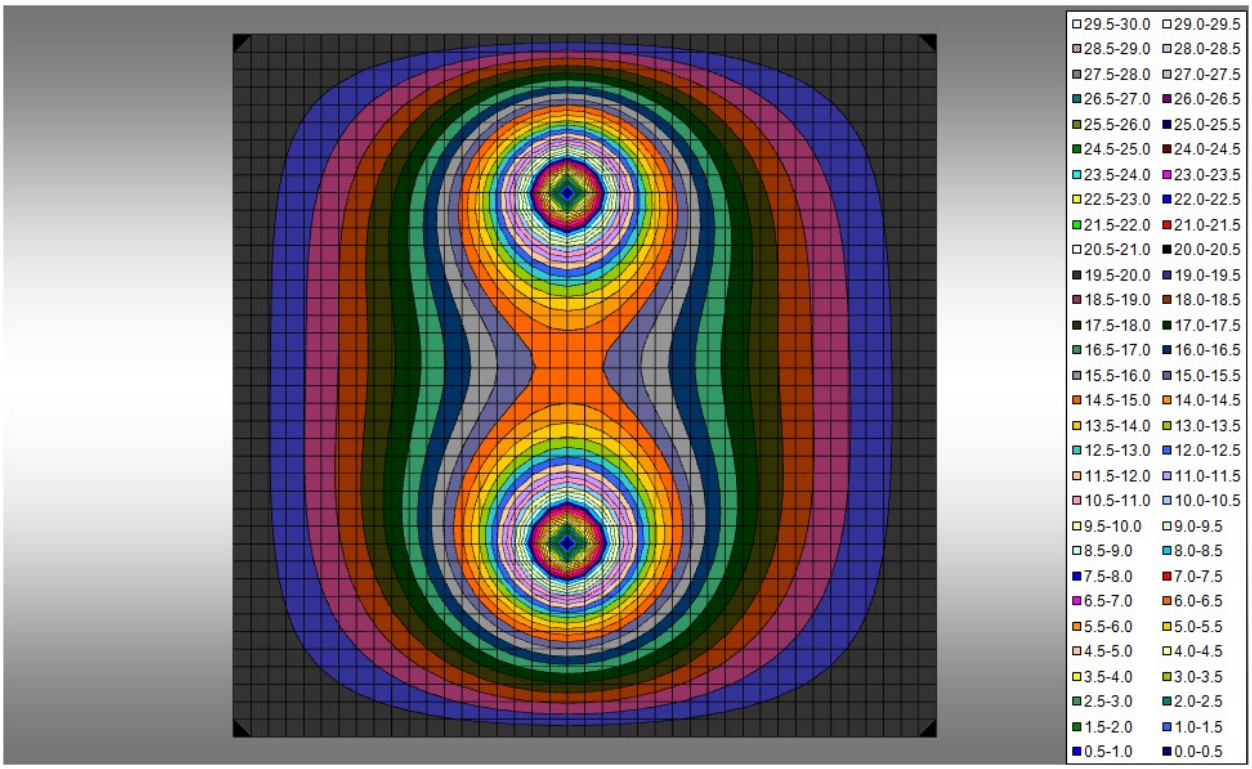
Εικόνα 3.6: *Απεικόνιση θερμοκρασιακών διακυμάνσεων όπως προκύπτουν από τον κώδικα*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 -ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΩΔΙΚΑ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

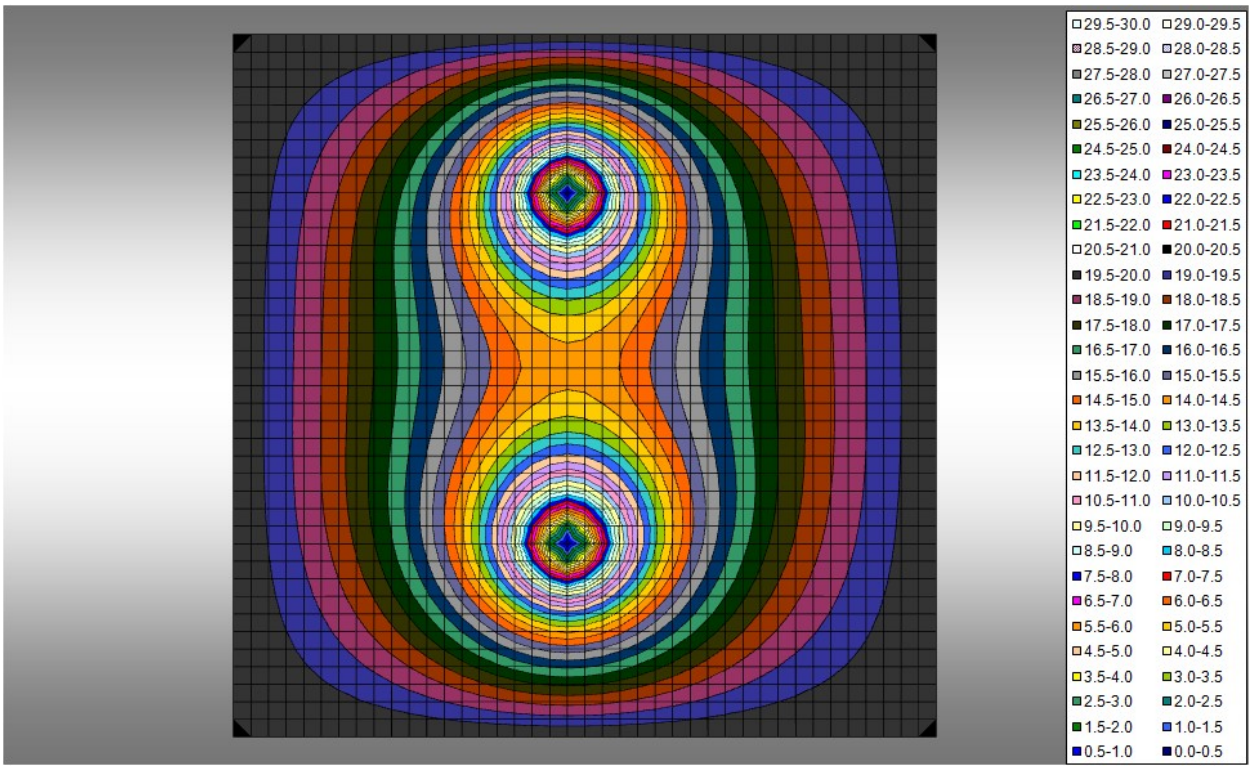
Έχοντας εκτελέσει τον κώδικα για όλες τις τιμές του **Πίνακα 2** και **Πίνακα 3**, προκύπτουν αποτελέσματα της μορφής που φαίνεται στις **Εικόνες 3.4** και **3.5**. Για κάθε περιοχή, η κυκλική διαδικασία του κώδικα εκτελέστηκε για 1, 2 και 3 έτη.

Τα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζουν δυο γεωτρήσεις και τη διακύμανση των θερμοκρασιών γύρω από αυτές. Κοιτώντας την **Εικόνα 3.5** βλέπουμε ότι γύρω από κάθε γεώτρηση σχηματίζεται ένας κύκλος θερμοκρασιακών διαβαθμίσεων οι τιμές των οποίων φαίνονται στο υπόμνημα στα δεξιά κάθε εικόνας. Κάθε θερμοκρασιακός κύκλος θα μπορούσε να χωριστεί σε δυο ημικύκλια. Παρατηρώντας την εικόνα από πάνω προς τα κάτω, βλέπουμε ότι τα εξωτερικά ημικύκλια κάθε γεώτρησης (το «πάνω» για την πρώτη γεώτρηση και το «κάτω» για την δεύτερη), ουσιαστικά δρουν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Αντιθέτως τα εσωτερικά ημικύκλια αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σχηματίζοντας αυτή την κλεψυδροειδή μορφή που φαίνεται στο κέντρο της εικόνας.

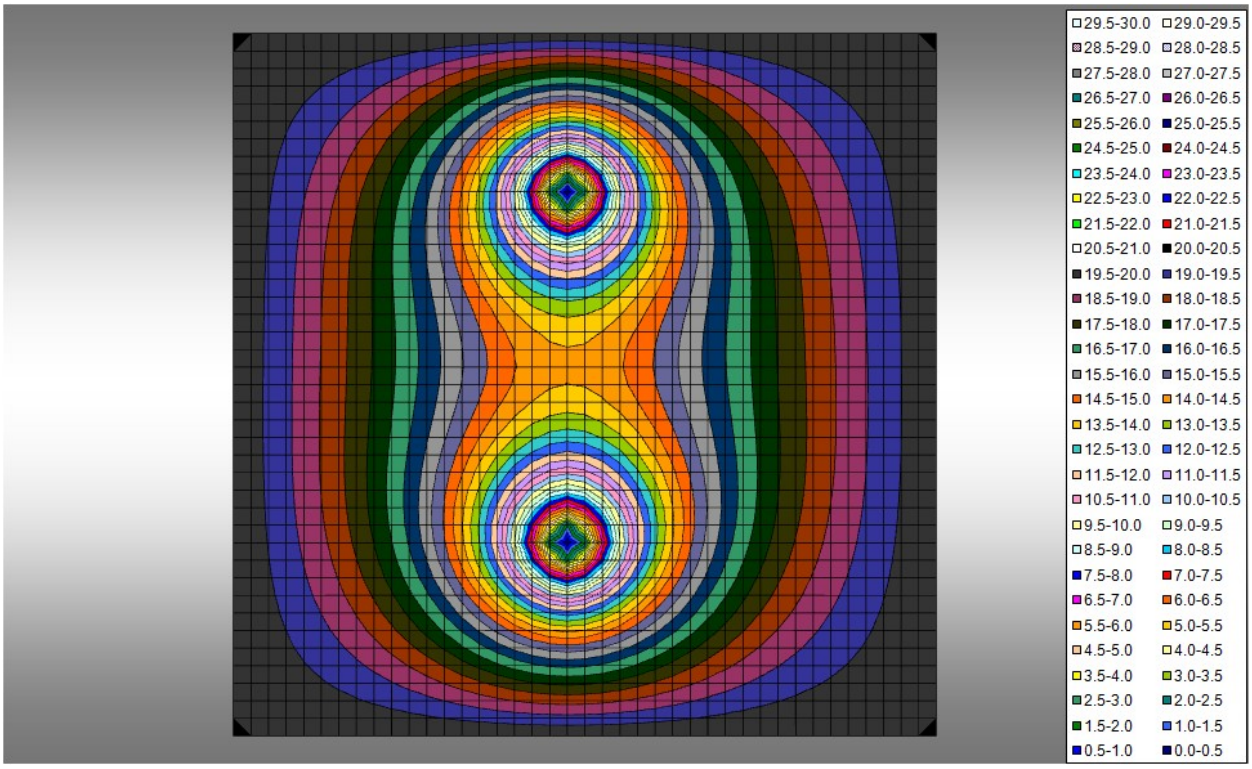
Αρχικά θα παρουσιαστούν στις **Εικόνες 4.1 – 4.9** τα αποτελέσματα μερικών από τις επιλεγμένες περιοχές ώστε να γίνει μια σύγκριση των θερμοκρασιακών τιμών σε σχέση με το χρόνο (1, 2, ή 3 έτη). Επιπλέον θα παρατηρηθεί πόσο επηρεάζουν τα αποτελέσματα οι θερμικές ιδιότητες των πετρωμάτων κάθε περιοχής, καθώς και η σημασία του αν τα πετρώματα είναι ξηρά ή κορεσμένα σε νερό.



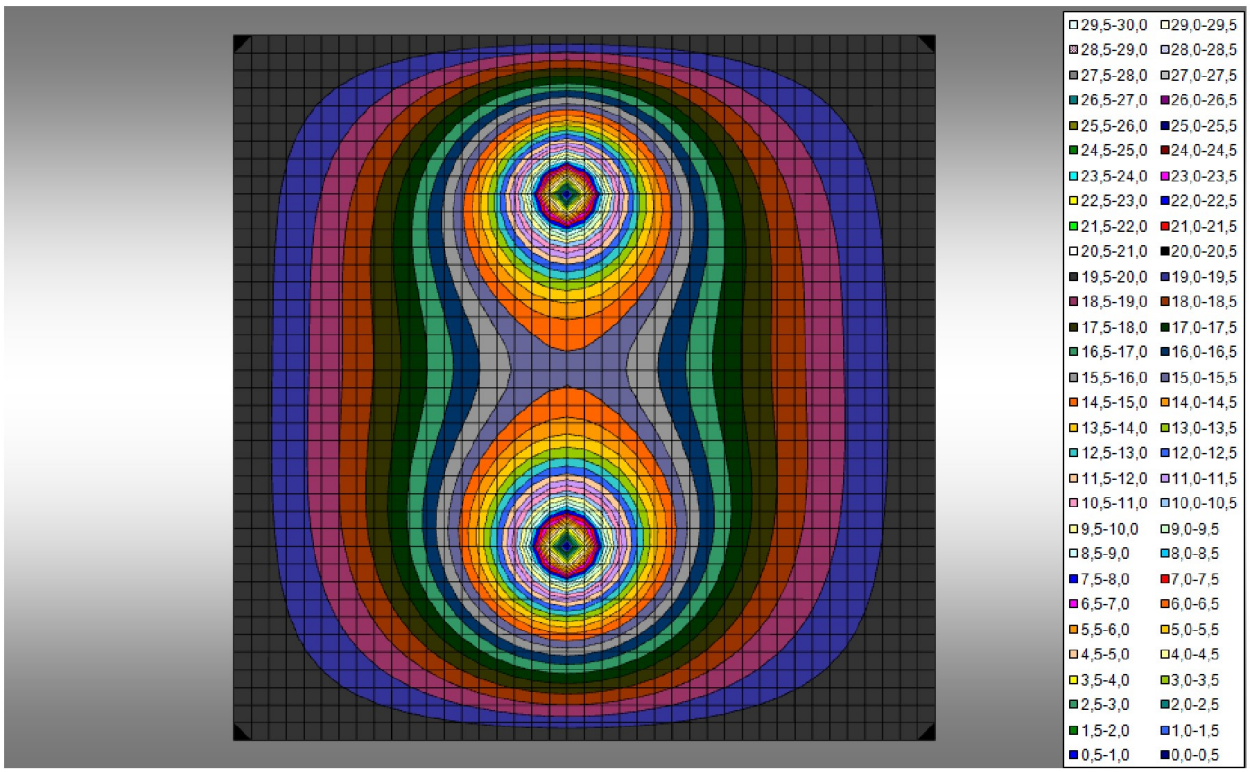
Εικόνα 4.1: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για την Αθήνα για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*



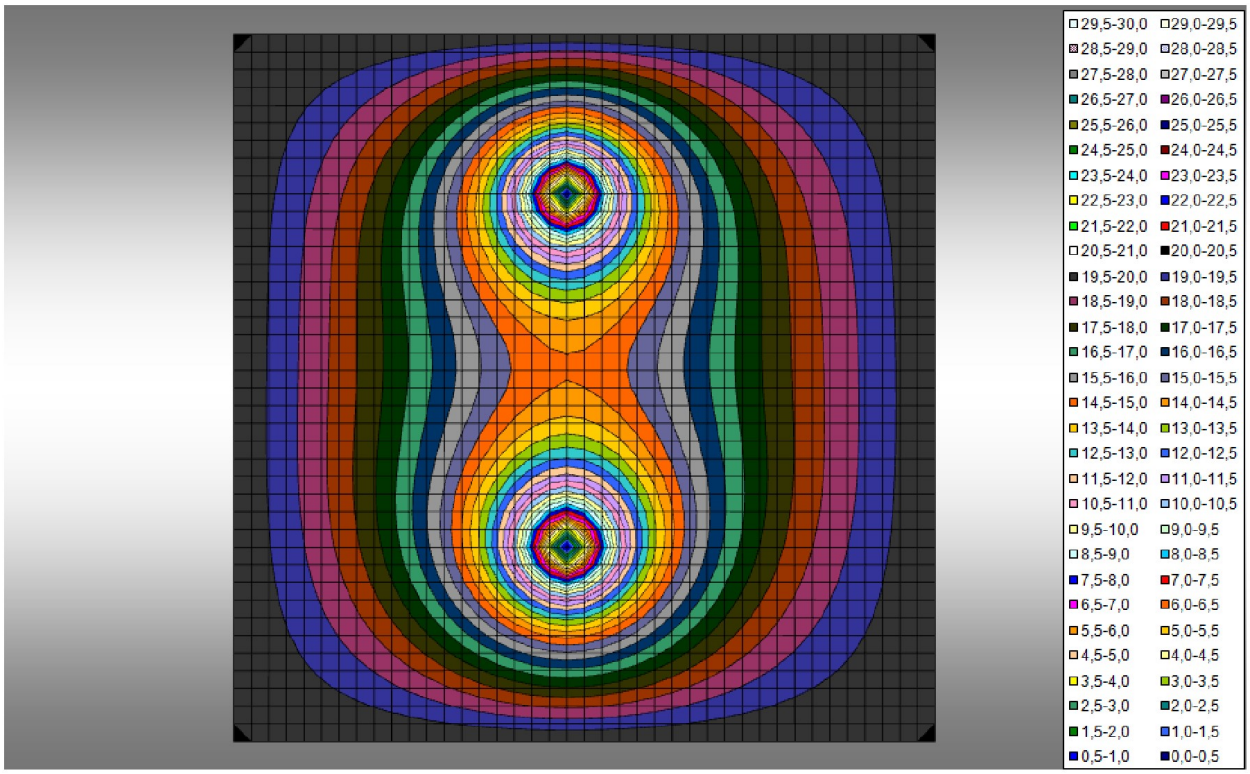
Εικόνα 4.2: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομή για την Αθήνα για δυο έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*



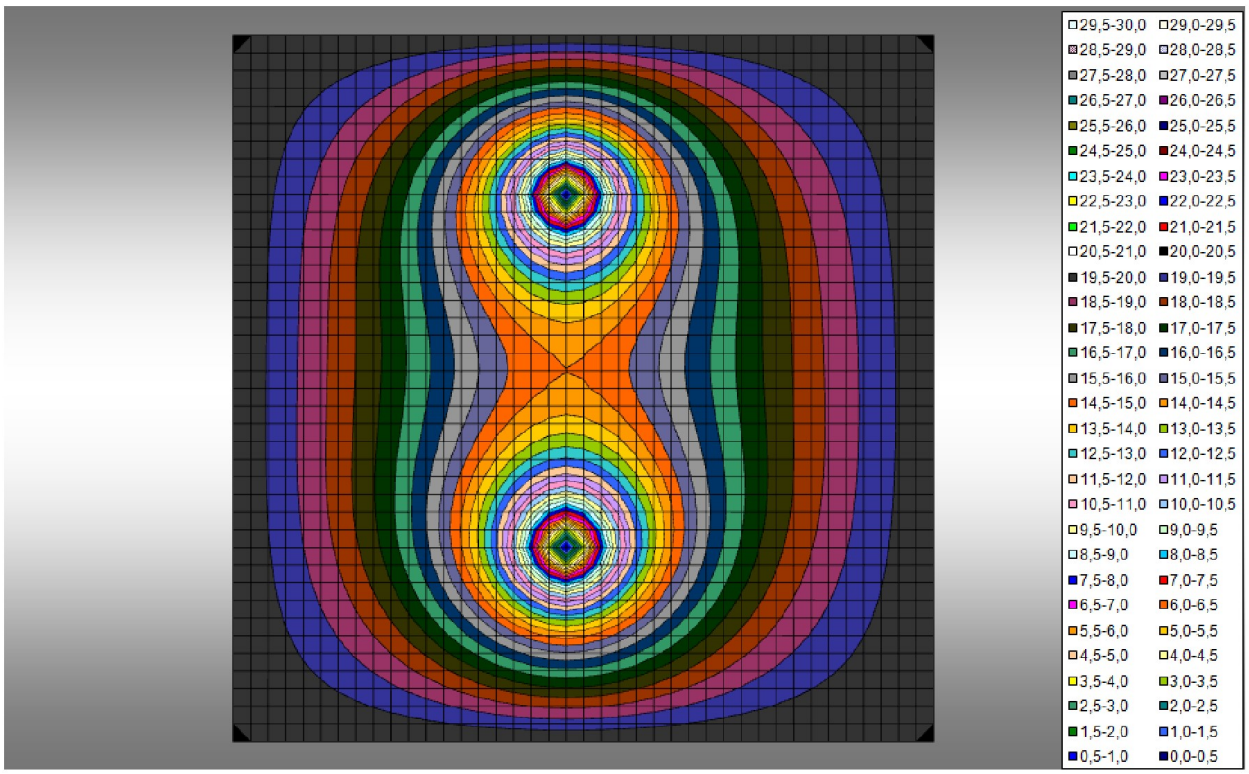
Εικόνα 4.3: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για την Αθήνα για τρία έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*



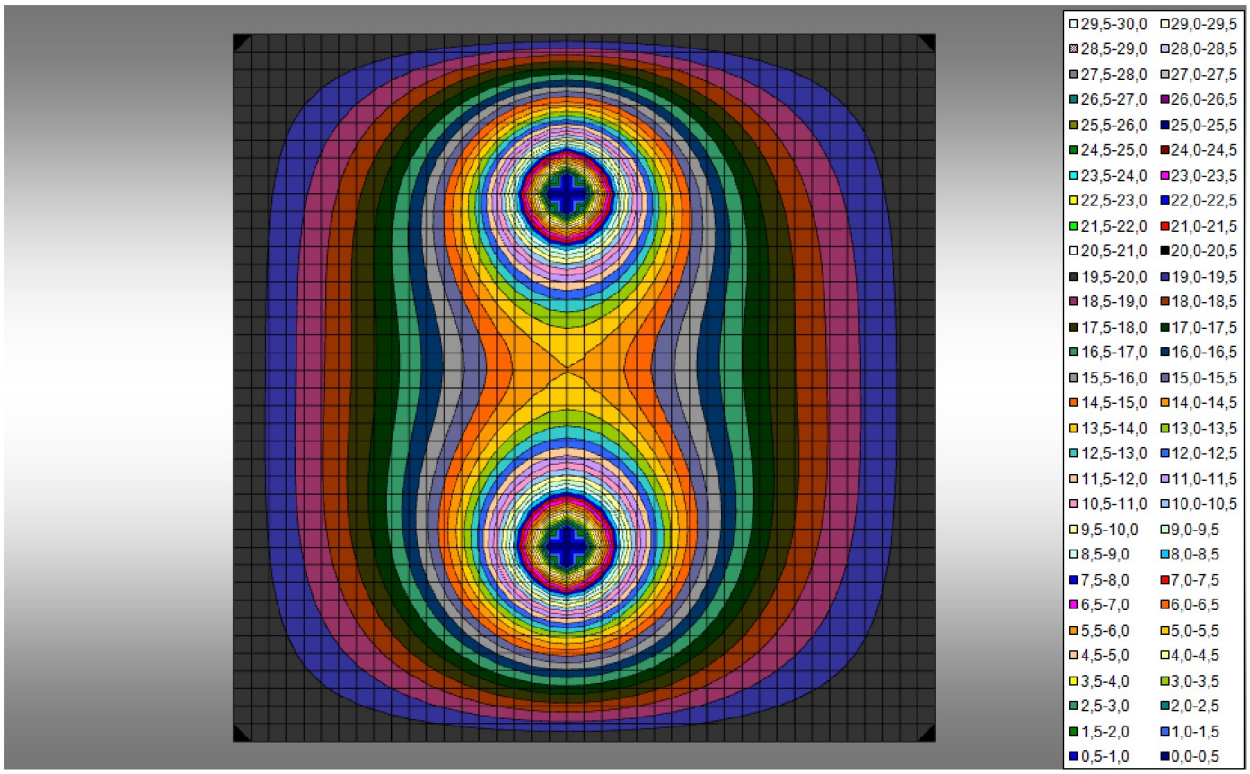
Εικόνα 4.4: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Ηράκλειο για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*



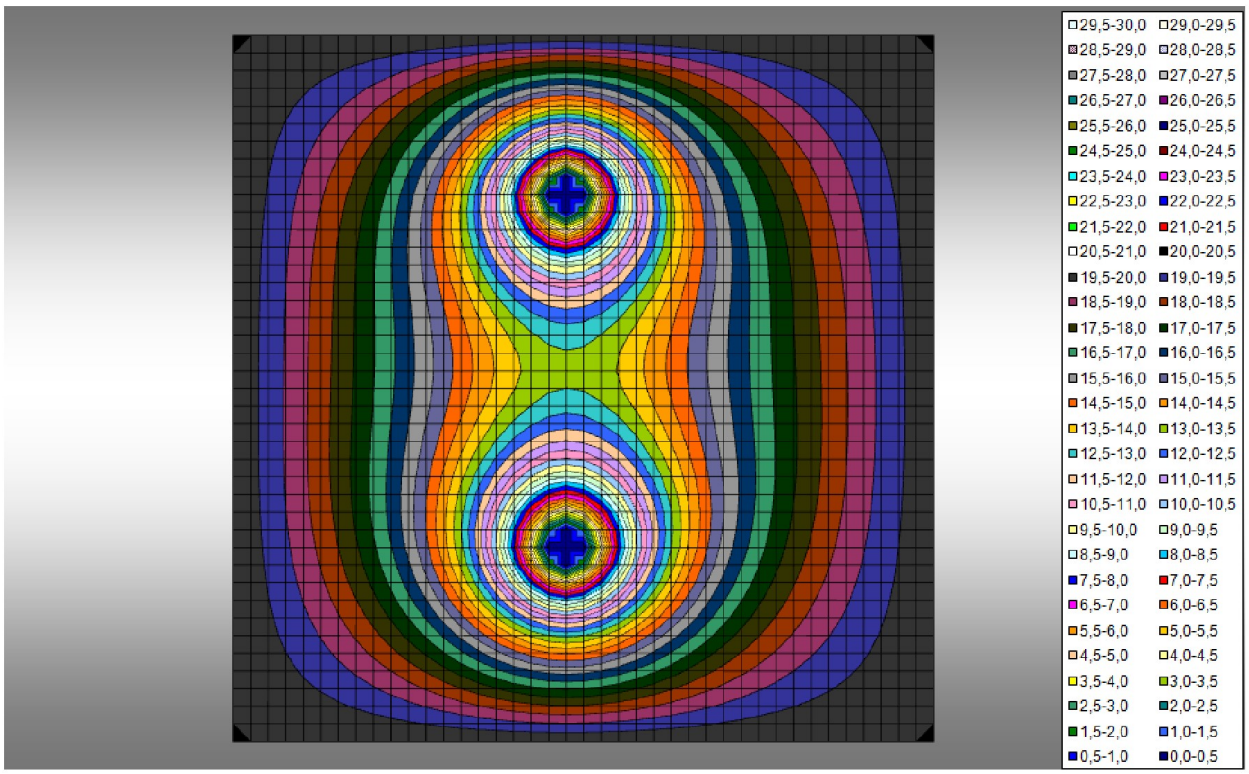
Εικόνα 4.5: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Ηράκλειο για δυο έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*



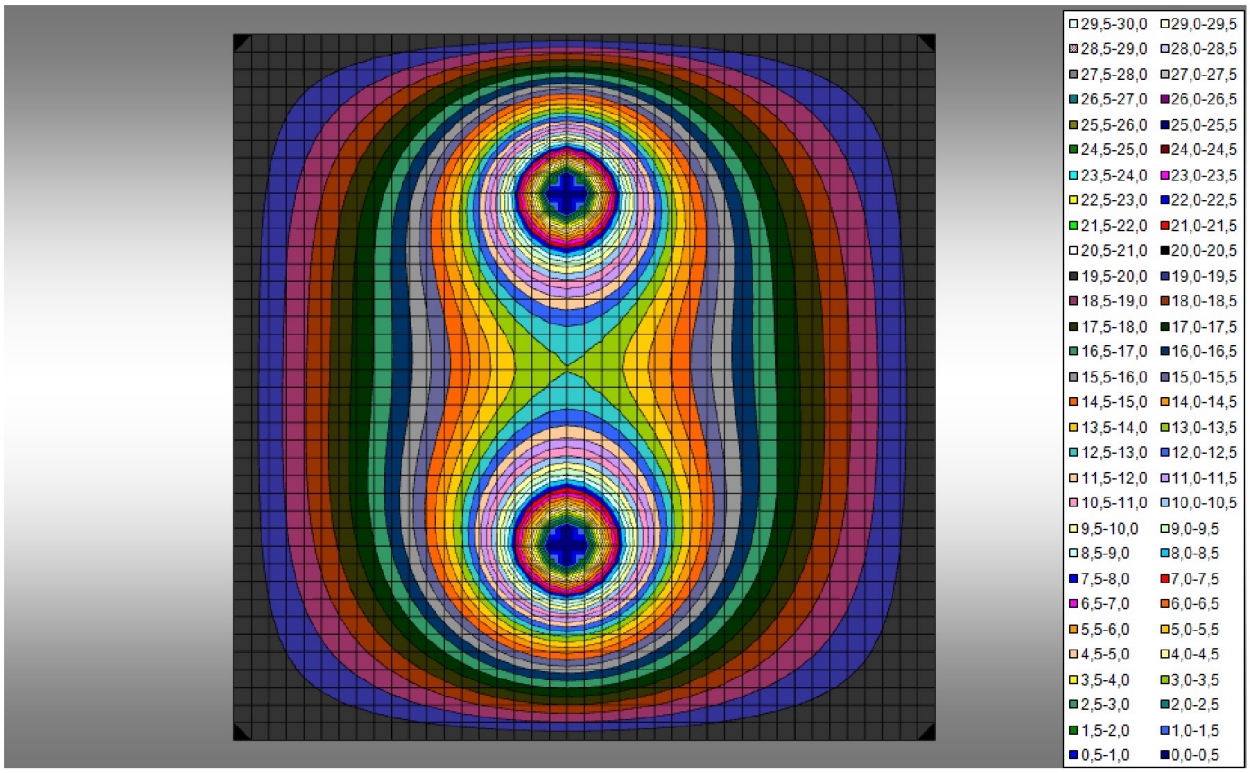
Εικόνα 4.6: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Ηράκλειο για τρία έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*



Εικόνα 4.7: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Βόλο για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*



Εικόνα 4.8: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Βόλο για δυο έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*

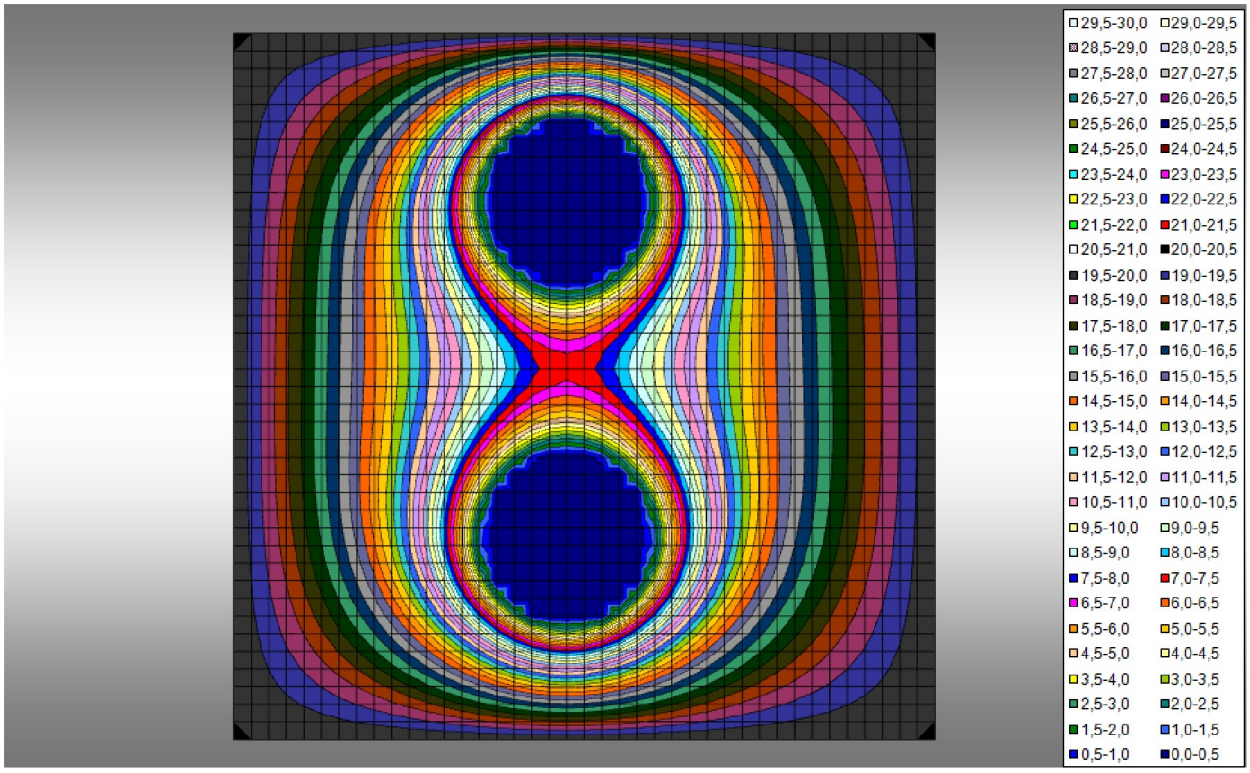


Εικόνα 4.9: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Βόλο για τρία έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*

Κοιτώντας τις παραπάνω εικόνες αρχικά το πρώτο που διαπιστώνουμε είναι ότι τα αποτελέσματα μοιάζουν όλα μεταξύ τους τόσο σε μορφή όσο και σε θερμοκρασιακές τιμές.

Πράγματι, σε όλες τις περιπτώσεις, οι τιμές κοντά στα κέντρα των γεωτρήσεων κυμαίνονται από 8 μέχρι 10 °C, ενώ προς το κέντρο των εικόνων, εκεί όπου οι δυο γεωτρήσεις αλληλεπιδρούν οι τιμές της θερμοκρασίας είναι από 14 μέχρι 15 °C. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι τα θερμικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων κάθε περιοχής έχουν αρκετά όμοιες τιμές, όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 2**. Πιο συγκεκριμένα μιλάμε για τιμές θερμικής αγωγιμότητας περίπου 2 W/mK, πυκνότητα περίπου 2500 kg/m^3 και ειδική θερμοχωρητικότητα κοντά στα 1900 kJ/m^{3}K. Για το σύστημα για το οποίο τρέχει ο κώδικας, οι τιμές αυτές θα μπορούσαν να θεωρηθούν αρκετά αποδοτικές, αφού βλέπουμε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες που πλησιάζουν αρκετά τους 20 °C που είναι η αρχική δεδομένη τιμή του εδάφους.

Αν συγκριθούν οι παραπάνω εικόνες με μια αντίστοιχη για την περιοχή της Πάτρας όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.10**, είναι εύκολο να οδηγηθούμε σε ένα σημαντικό συμπέρασμα για την επίδραση των θερμικών ιδιοτήτων στα αποτελέσματα.



Εικόνα 4.10: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για την Πάτρα για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*

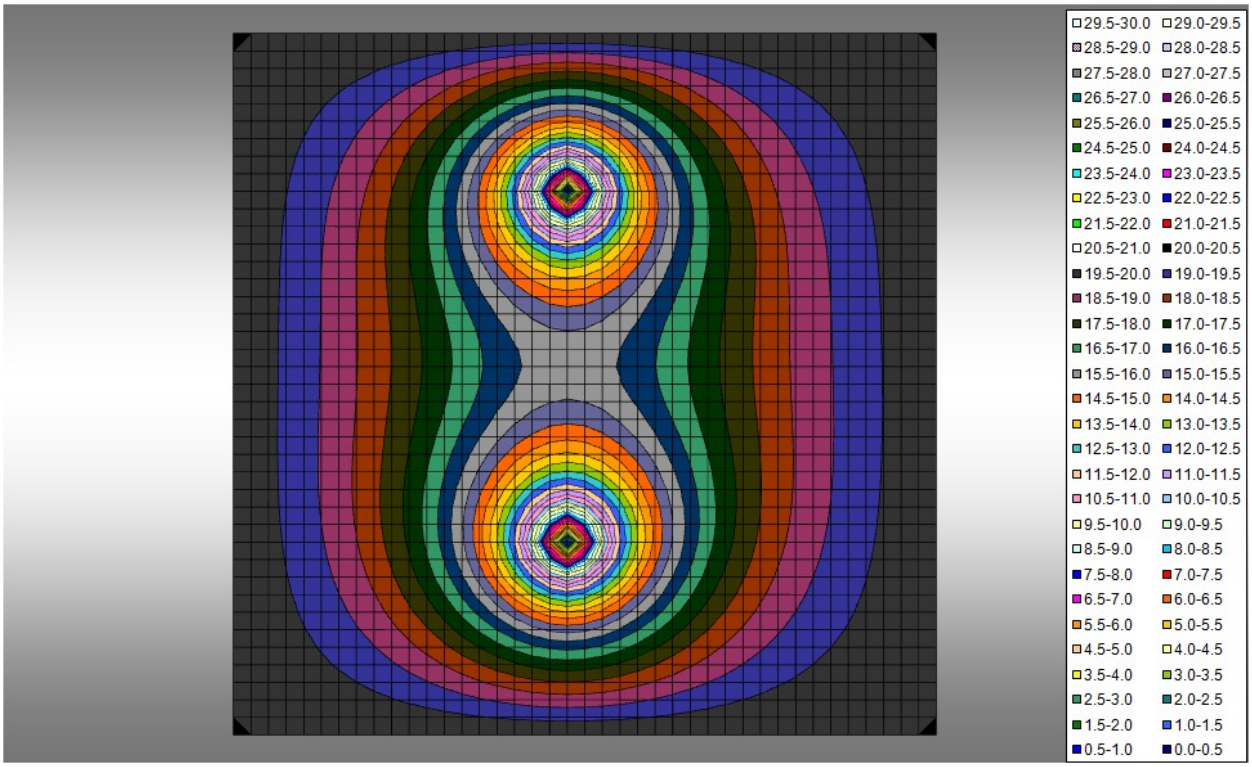
Από θερμοκρασιακής άποψης εδώ αναπτύσσονται πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τις προηγούμενες εικόνες. Στην περιοχή αλληλεπίδρασης οι θερμοκρασίες μετά βίας ξεπερνούν τους 7 °C, ενώ στα κέντρα των γεωτρήσεων βλέπουμε εξαιρετικά χαμηλές τιμές. Κοιτώντας τον **Πίνακα 2**, βλέπουμε ότι στην περιοχή της Πάτρας έχουμε τιμές θερμικής αγωγιμότητας 0.4W/mK, πυκνότητα 1988 kg/m^3 και ειδική θερμοχωρητικότητα κοντά στα 1475kJ/m^{3}K. Παρόμοιες είναι και η τιμές για την Λάρισα, η οποία μάλιστα έχει σχεδόν όμοια απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής με αυτήν της Πάτρας. Είναι λοιπόν φανερό ότι οι σημαντικά χαμηλότερες τιμές των θερμικών ιδιοτήτων και κυρίως της θερμικής αγωγιμότητας και παράλληλα θερμικής διαχυτότητας, έχουν οδηγήσει σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

Παρόλα αυτά η θερμοκρασιακή απεικόνιση της **Εικόνας 4.10**, δείχνει ένα μη αποδοτικό σύστημα, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια. Παρ' όλα αυτά, έχοντας τρέξει το πρόγραμμα για τις

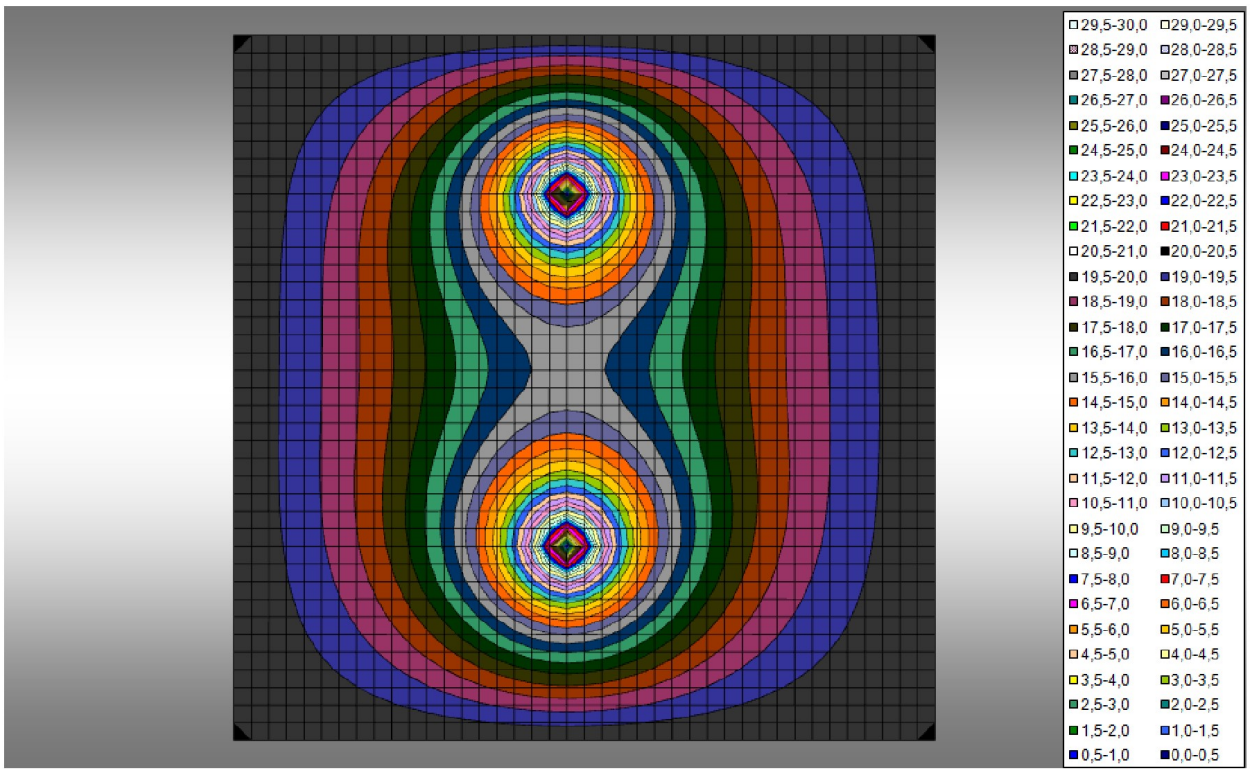
ίδιες συνθήκες με μόνη αλλαγή τις διαφορετικές τιμές των θερμικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων των περιοχών, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η μείωση των τιμών τους επηρεάζει με φθίνοντα τρόπο τις τιμές της θερμοκρασιακής κατανομής.

Μια άλλη παρατήρηση που μπορεί να γίνει κοιτώντας τις **Εικόνες 4.1 – 4.9**, είναι η μείωση της θερμοκρασίας με την πάροδο των χρόνων. Κυρίως από το πρώτο στο δεύτερο έτος κάθε περίπτωσης, στον κύριο χώρο των γεωτρήσεων και στο χώρο αλληλεπίδρασης τους, οι τιμές των θερμοκρασιών μειώνονται από 0.5 μέχρι και 1.5 °C. Από το δεύτερο στο τρίτο έτος, οι τιμές δείχνουν να σταθεροποιούνται ενώ σε λίγες περιπτώσεις αυτές μειώνονται μέχρι 0.5 °C.

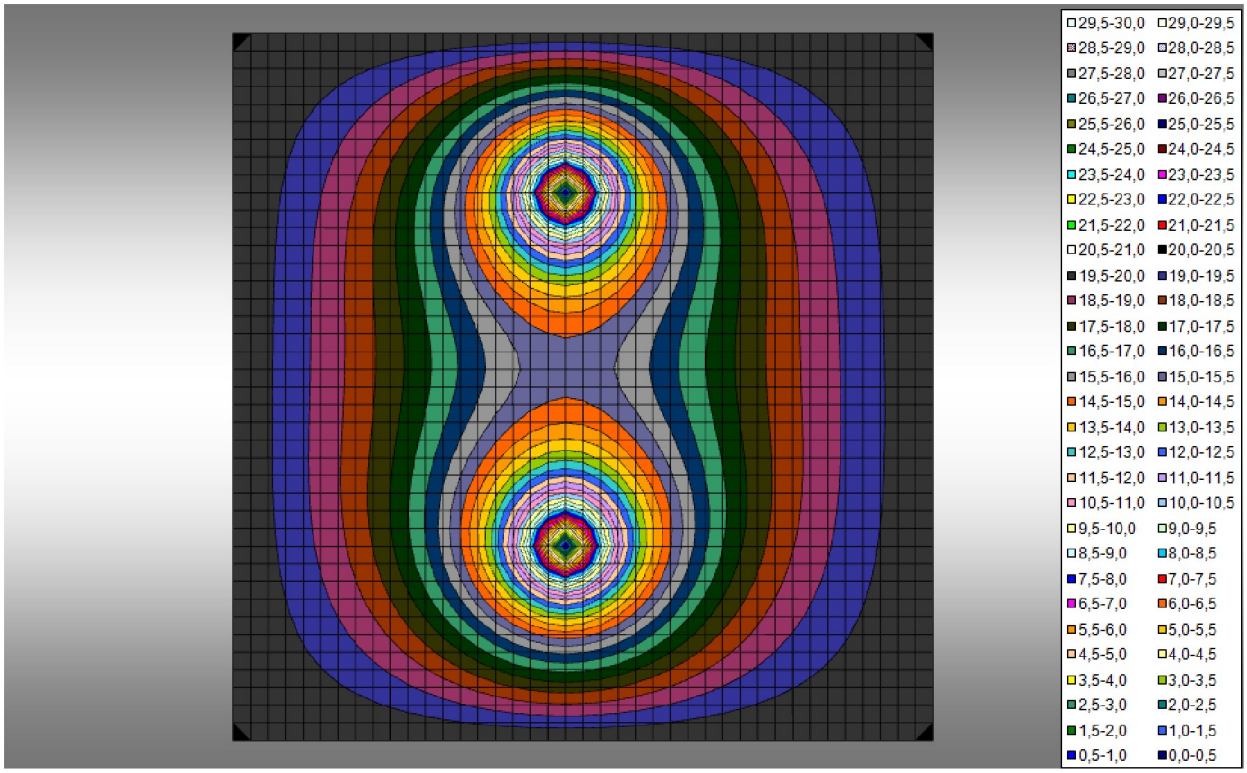
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν στις **Εικόνες 4.11 – 4,13** οι ίδιες απεικονίσεις για τις ίδιες περιοχές, βάσει όμως των τιμών του **Πίνακα 3**, όπου τα πετρώματα είναι κορεσμένα με νερό. Θα παρατεθούν οι απεικονίσεις για ένα έτος μετρήσεων αφού όπως και στην περίπτωση των ξηρών πετρωμάτων η διαφορά με το 2° και 3° έτος παρουσιάζεται πτώση θερμοκρασιών μέχρι και 1.5°C.



Εικόνα 4.11: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για την Αθήνα για ένα έτος υπολογισμών σε πετρώματα κορεσμένα σε νερό*



Εικόνα 4.12: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Ηράκλειο για ένα έτος υπολογισμών σε πετρώματα κορεσμένα σε νερό*



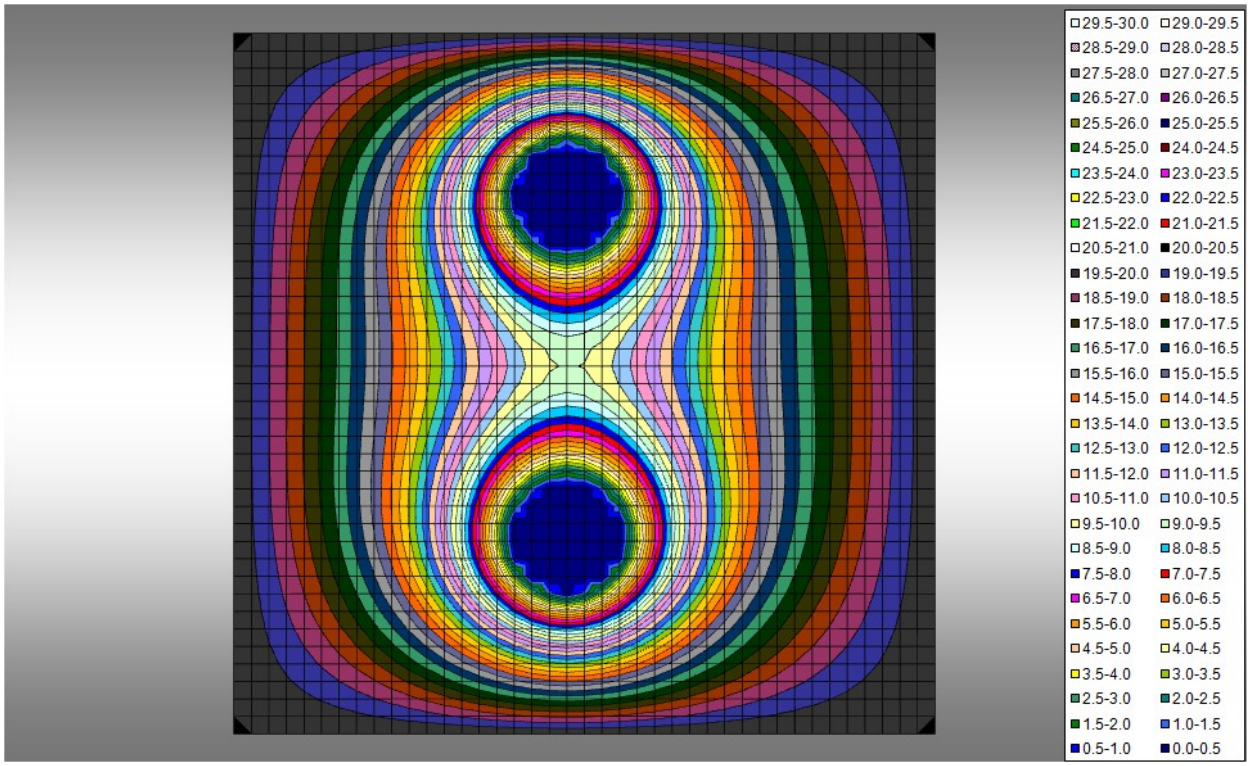
Εικόνα 4.13: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για το Βόλο για ένα έτος υπολογισμών σε πετρώματα κορεσμένα σε νερό*

Το βασικό χαρακτηριστικό των παραπάνω εικόνων, συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες ξηρών πετρωμάτων (**Εικόνα 4.1**, **Εικόνα 4.4**, **Εικόνα 4.7**) είναι οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες κυρίως

στο χώρο κοντά στις γεωτρήσεις όπου αναπτύσσονται τιμές μεγαλύτερες κατά 2 – 2.5 °C, ενώ και στο χώρο αλληλεπίδρασης των γεωτρήσεων παρατηρούνται αυξημένες τιμές κατά 1.5 – 2°C. Αυτό συμβαίνει διότι κοιτώντας τον **Πίνακα 3**, βλέπουμε ότι οι τιμές των θερμικών χαρακτηριστικών για κάθε περιοχή είναι σημαντικά υψηλότερες από αυτές του **Πίνακα 2**, όπου τα πετρώματα είναι ξηρά. Επομένως επιβεβαιώνεται η σημασία των τιμών θερμικών χαρακτηριστικών στην απόδοση του συγκεκριμένου συστήματος όπως προκύπτει από τις απεικονίσεις των θερμοκρασιακών τιμών.

Στην προκειμένη περίπτωση η διαφορά αυτή στις τιμές οφείλεται στην παρουσία του νερού στο σύστημα. Αν θεωρήσουμε ότι $Q = U \cdot \Delta T = m \cdot c_p \cdot \Delta T$, με U να εξαρτάται από λ, ρ, και c_p, είναι προφανές ότι μεγαλύτερες τιμές αυτών, οδηγούν σε μεγαλύτερη ροη θερμότητας, όπως και ότι μικρότερο ΔT, δίνει μεγαλύτερη ροη θερμότητας, κάνοντας το σύστημα πιο αποδοτικό. Σε αντίθεση λοιπόν με τα ξηρά πετρώματα, όπου τα μεταξύ τους κενά αλλά και το πορώδες τους είναι πληρωμένα με αέρα, στα πετρώματα που είναι κορεσμένα με νερό, οι τιμές των θερμικών τους ιδιοτήτων ανεβαίνουν κατακόρυφα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η αποδοτικότητα του συστήματος.

Για την Θεσσαλονίκη, το πρόβλημα στην απόδοση του συστήματος εντοπίζεται ήδη από το πρώτο έτος υπολογισμών. Κοιτώντας την **Εικόνα 4.15** διαπιστώνουμε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες αρνητικών τιμών σε μικρή ακτίνα από τα κέντρα των γεωτρήσεων. Στην περιοχή της Αθήνας για παράδειγμα, σε ακτίνα ενός μέτρου από τη γεώτρηση οι θερμοκρασιακές τιμές φτάνουν περίπου τους 10 °C στο πρώτο έτος λειτουργίας. Αντίθετα στη Θεσσαλονίκη οι τιμές σε αντίστοιχη ακτίνα ξεκινάν προσεγγιστικά από -40 °C και δε ξεπερνούν τους 0 °C. Στην **Εικόνα 4.14** δεν έχουμε τη δυνατότητα καταγραφής-έκφρασης αρνητικών θερμοκρασιών γι' αυτό και οι τιμές απεικονίζονται με τιμές έως και 1 °C. Ακόμα και στο χώρο αλληλεπίδρασης των δυο γεωτρήσεων, όπου αναμένονται σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, αυτές δεν ξεπερνούν τους 9.5°C.



Εικόνα 4.14: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Θεσσαλονίκη για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*

20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,9	19,9	19,8	19,8	19,8	19,7	19,7	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,6	19,6	19,6	19,6	19,7	19,7	19,8	19,8	19,9	19,9	20,0	20,0
20,0	19,9	19,8	19,7	19,6	19,5	19,4	19,3	19,3	19,2	19,2	19,1	19,1	19,1	19,1	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,1	19,1	19,1	19,2	19,2	19,3	19,4	19,4	19,5	19,6	19,7	19,8	19,9	20,0
20,0	19,8	19,7	19,5	19,4	19,2	19,1	19,0	18,9	18,8	18,7	18,7	18,6	18,6	18,6	18,6	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,6	18,6	18,7	18,7	18,8	18,9	19,0	19,1	19,3	19,4	19,6	19,7	19,8	20,0
20,0	19,8	19,6	19,3	19,1	18,9	18,8	18,6	18,5	18,4	18,3	18,2	18,1	18,1	18,1	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,1	18,2	18,3	18,4	18,5	18,7	18,8	19,0	19,2	19,4	19,6	19,8	20,0
20,0	19,7	19,4	19,1	18,9	18,6	18,4	18,2	18,0	17,9	17,7	17,7	17,6	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,5	17,5	17,6	17,7	17,9	18,1	18,3	18,6	18,7	18,9	19,2	19,5	19,7	20,0
20,0	19,6	19,3	18,9	18,6	18,2	18,0	17,7	17,5	17,3	17,2	17,1	17,0	17,0	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,9	17,0	17,2	17,3	17,6	17,8	18,1	18,4	18,7	19,0	19,3	19,7	20,0		
20,0	19,5	19,1	18,6	18,2	17,8	17,5	17,2	16,9	16,7	16,5	16,4	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,2	16,2	16,1	16,1	16,1	16,2	16,3	16,5	16,7	17,0	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,2	19,6	20,0		
20,0	19,4	18,9	18,3	17,8	17,3	16,9	16,5	16,2	15,9	15,8	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7	15,6	15,6	15,5	15,4	15,4	15,3	15,4	15,4	15,6	15,8	16,0	16,4	16,7	17,1	17,6	18,1	18,5	19,0	19,5	20,0
20,0	19,3	18,6	18,0	17,3	16,8	16,2	15,8	15,4	15,1	14,9	14,8	14,7	14,8	14,8	14,9	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	14,9	14,8	14,7	14,6	14,6	14,5	14,5	14,5	14,7	14,9	15,2	15,6	16,1	16,6	17,1	17,7	18,2	18,8	19,4	20,0
20,0	19,2	18,4	17,6	16,8	16,1	15,4	14,9	14,4	14,1	13,9	13,8	13,8	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,3	14,3	14,3	14,2	14,1	13,9	13,8	13,6	13,5	13,4	13,4	13,6	13,9	14,2	14,7	15,3	15,9	16,6	17,2	17,9	18,6	19,3	20,0
20,0	19,0	18,0	17,1	16,2	15,3	14,5	13,8	13,2	12,8	12,6	12,6	12,7	12,8	13,0	13,2	13,4	13,5	13,6	13,6	13,6	13,5	13,3	13,0	12,8	12,5	12,3	12,2	12,2	12,3	12,6	13,1	13,7	14,4	15,2	16,0	16,8	17,6	18,4	19,2	20,0
20,0	18,8	17,7	16,5	15,4	14,3	13,3	12,5	11,8	11,3	11,1	11,2	11,4	11,6	12,0	12,3	12,6	12,8	12,9	12,9	12,8	12,7	12,4	12,1	11,7	11,3	11,0	10,8	10,7	10,8	11,1	11,7	12,5	13,4	14,3	15,3	16,2	17,2	18,1	19,1	20,0
20,0	18,6	17,3	15,9	14,6	13,2	12,0	10,9	10,0	9,5	9,3	9,5	9,9	10,3	10,8	11,3	11,7	12,0	12,1	12,2	12,1	11,9	11,5	11,1	10,6	10,0	9,5	9,0	8,8	8,9	9,3	10,1	11,1	12,2	13,3	14,5	15,7	16,8	17,9	19,0	20,0
20,0	18,4	16,9	15,2	13,6	12,0	10,4	9,0	7,8	7,2	7,1	7,5	8,1	8,9	9,6	10,3	10,8	11,2	11,4	11,5	11,4	11,1	10,7	10,1	9,3	8,5	7,7	7,0	6,5	6,5	7,1	8,1	9,4	10,8	12,3	13,7	15,1	16,4	17,6	18,8	20,0
20,0	18,2	16,4	14,5	12,6	10,6	8,5	6,6	5,0	4,2	4,3	5,0	6,1	7,3	8,4	9,3	10,0	10,5	10,8	10,8	10,7	10,4	9,8	9,0	8,1	6,9	5,7	4,5	3,7	3,5	4,3	5,7	7,5	9,3	11,2	12,9	14,5	16,0	17,4	18,7	20,0
20,0	18,0	16,0	13,9	11,6	9,1	6,4	3,7	1,4	0,1	0,6	2,1	3,9	5,6	7,1	8,3	9,2	9,8	10,2	10,3	10,1	9,7	9,0	8,1	6,8	5,3	3,5	1,6	0,0	-0,6	0,6	2,8	5,3	7,8	10,1	12,1	13,9	15,6	17,1	18,6	20,0
20,0	17,9	15,6	13,3	10,6	7,6	4,2	0,4	-3,4	-6,0	-4,3	-1,3	1,7	4,1	6,0	7,5	8,6	9,3	9,7	9,8	9,7	9,2	8,4	7,3	5,7	3,7	1,2	-1,8	-4,9	-6,7	-4,3	-0,5	3,1	6,3	9,1	11,4	13,5	15,3	16,9	18,5	20,0
20,0	17,7	15,4	12,8	9,9	6,5	2,3	-3,0	-9,7	-16,3	-10,6	-4,7	-0,3	2,9	5,3	7,0	8,2	9,0	9,4	9,6	9,4	8,9	8,0	6,7	5,0	2,5	-0,7	-5,2	-11,2	-17,0	-10,6	-4,0	1,2	5,2	8,3	11,0	13,2	15,1	16,8	18,4	20,0
20,0	17,7	15,3	12,7	9,7	6,1	1,4	-5,1	-15,9	-36,7	-16,7	-6,9	-1,2	2,4	5,0	6,8	8,0	8,9	9,3	9,5	9,3	8,7	7,8	6,5	4,6	2,0	-1,7	-7,4	-17,3	-37,5	-16,7	-6,1	0,3	4,7	8,1	10,8	13,0	15,0	16,8	18,4	20,0
20,0	17,7	15,4	12,8	9,9	6,5	2,3	-3,0	-9,7	-16,3	-10,6	-4,7	-0,3	2,9	5,2	6,9	8,1	8,9	9,4	9,5	9,3	8,8	8,0	6,7	4,9	2,5	-0,8	-5,3	-11,2	-17,0	-10,6	-4,0	1,2	5,1	8,3	10,9	13,1	15,1	16,8	18,4	20,0
20,0	17,9	15,6	13,2	10,6	7,6	4,2	0,4	-3,5	-6,0	-4,3	-1,3	1,6	4,0	6,0	7,5	8,5	9,3	9,7	9,8	9,6	9,1	8,3	7,2	5,7	3,7	1,2	-1,8	-4,9	-6,8	-4,3	-0,6	3,1	6,3	9,0	11,4	13,5	15,3	16,9	18,5	20,0
20,0	18,0	16,0	13,8	11,5	9,0	6,4	3,7	1,3	0,0	0,5	2,0	3,8	5,6	7,0	8,2	9,1	9,7	10,1	10,2	10,0	9,6	8,9	8,0	6,7	5,2	3,4	1,5	-0,1	-0,7	0,5	2,7	5,3	7,7	10,0	12,1	13,9	15,6	17,1	18,6	20,0
20,0	18,2	16,4	14,5	12,5	10,5	8,5	6,5	4,9	4,1	4,2	4,9	6,0	7,2	8,2	9,1	9,8	10,3	10,6	10,7	10,6	10,2	9,7	8,9	7,9	6,8	5,6	4,4	3,6	3,4	4,2	5,6	7,4	9,3	11,1	12,8	14,4	15,9	17,3	18,7	20,0
20,0	18,4	16,8	15,2	13,6	11,9	10,3	8,9	7,7	7,1	7,0	7,3	8,0	8,7	9,5	10,1	10,7	11,0	11,3	11,3	11,2	10,9	10,5	9,9	9,2	8,4	7,6	6,8	6,4	6,4	7,0	8,0	9,3	10,7	12,2	13,7	15,0	16,3	17,6	18,8	20,0
20,0	18,6	17,3	15,9	14,5	13,2	11,9	10,8	9,9	9,4	9,2	9,3	9,7	10,2	10,7	11,1	11,5	11,8	11,9	12,0	11,9	11,7	11,3	10,9	10,4	9,8	9,3	8,9	8,7	8,7	9,2	10,0	10,9	12,1	13,3	14,4	15,6	16,8	17,9	18,9	20,0
20,0	18,8	17,6	16,5	15,3	14,2	13,2	12,3	11,7	11,2	11,0	11,0	11,2	11,4	11,8	12,1	12,3	12,5	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,5	11,1	10,8	10,5	10,5	10,6	11,0	11,6	12,3	13,2	14,2	15,2	16,2	17,1	18,1	19,1	20,0
20,0	19,0	18,0	17,0	16,1	15,2	14,3	13,6	13,1	12,7	12,4	12,4	12,4	12,6	12,8	13,0	13,1	13,3	13,3	13,4	13,3	13,2	13,0	12,8	12,5	12,3	12,1	12,0	12,0	12,1	12,4	12,9	13,5	14,3	15,0	15,9	16,7	17,5	18,4	19,2	20,0
20,0	19,2	18,3	17,5	16,7	16,0	15,3	14,7	14,2	13,9	13,6	13,5	13,5	13,6	13,7	13,8	13,9	14,0	14,0	14,0	14,0	13,9	13,8	13,6	13,5	13,3	13,2	13,1	13,2	13,4	13,6	14,0	14,5	15,1	15,8	16,4	17,1	17,9	18,6	19,3	20,0
20,0	19,3	18,6	17,9	17,2	16,6	16,1	15,6	15,2	14,9	14,6	14,5	14,5	14,5	14,5	14,6	14,6	14,7	14,7	14,7	14,7	14,6	14,6	14,5	14,4	14,3	14,2	14,2	14,2	14,4	14,6	15,0	15,4	15,9	16,4	17,0	17,6	18,2	18,8	19,4	20,0
20,0	19,4	18,8	18,2	17,7	17,2	16,7	16,3	16,0	15,7	15,5	15,3	15,3	15,2	15,2	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,2	15,2	15,1	15,0	15,0	15,0	15,0	15,1	15,3	15,5	15,8	16,1	16,5	17,0	17,4	17,9	18,4	19,0	19,5	20,0
20,0	19,5	19,0	18,5	18,1	17,6	17,3	16,9	16,6	16,4	16,2	16,1	16,0	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,8	15,8	15,8	15,7	15,7	15,7	15,8	15,9	16,0	16,2	16,4	16,7	17,1	17,4	17,8	18,2	18,7	19,1	19,6	20,0
20,0	19,6	19,2	18,8	18,4	18,1	17,7	17,4	17,2	17,0	16,8	16,7	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,4	16,4	16,4	16,4	16,3	16,3	16,3	16,4	16,4	16,5	16,6	16,8	17,0	17,3	17,5	17,9	18,2	18,5	18,9	19,3	19,6	20,0	
20,0	19,7	19,3	19,0	18,7	18,4	18,1	17,9	17,7	17,5	17,4	17,2	17,1	17,1	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	17,0	17,0	17,1	17,2	17,4	17,5	17,7	18,0	18,2	18,5	18,8	19,1	19,4	19,7	20,0	
20,0	19,7	19,5	19,2	18,9	18,7	18,5	18,3	18,1	18,0	17,8	17,7	17,6	17,6	17,5	17,5	17,5	17,5	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,5	17,5	17,6	17,7	17,8	18,0	18,1	18,3	18,5	18,8	19,0	19,2	19,5	19,7	20,0	
20,0	19,8	19,6	19,4	19,2	19,0	18,8	18,6	18,5	18,4	18,3	18,2	18,1	18,0	18,0	18,0	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	18,0	18,0	18,1	18,2	18,3	18,4	18,5	18,7	18,8	19,0	19,2	19,4	19,6	19,8	20,0	
20,0	19,8	19,7	19,5	19,3	19,2	19,1	18,9	18,8	18,7	18,6	18,6	18,5	18,5	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,3	18,3	18,3	18,3	18,4	18,4	18,4	18,4	18,5	18,6	18,6	18,7	18,8	19,0	19,1	19,2	19,4	19,5	19,7	19,8	20,0	
20,0	19,9	19,8	19,6	19,5	19,4	19,3	19,2	19,1	19,1	19,0	19,0	18,9	18,9	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,9	18,9	18,9	19,0	19,1	19,2	19,2	19,3	19,4	19,5	19,7	19,8	19,9	20,0
20,0	19,9	19,8	19,8	19,7	19,6	19,6	19,5	19,4	19,4	19,3	19,3	19,3	19,3	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,4	19,5	19,6	19,6	19,7	19,8	19,8	19,9	20,0
20,0	20,0	19,9	19,9	19,8	19,8	19,8	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,7	19,7	19,7	19,7	19,8	19,8	19,8	19,9	19,9	19,9	20,0	20,0
20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0

Εικόνα 4.15: *Πίνακας θερμοκρασιακών αποτελεσμάτων κώδικα για τη Θεσσαλονίκη για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*

Το πρόβλημα αυτό εντοπίζεται στους εξής λόγους. Οι αρχικές μετρήσεις έγιναν με βάση συγκεκριμένα δεδομένα τόσο για τις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου που αναφέρθηκε στο

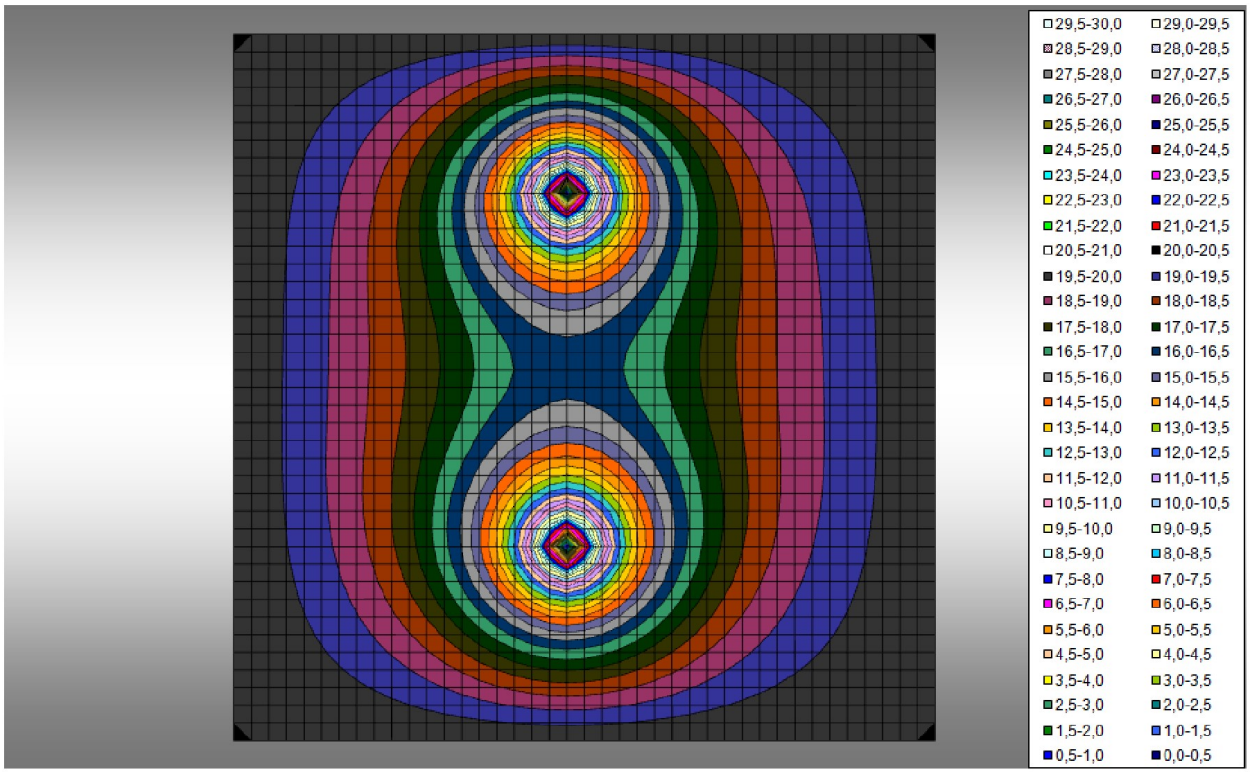
Κεφάλαιο 3.3, όσο και για τον αριθμό των γεωεναλλακτών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και το βάθος αυτών. Οι ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου παρουσιάζονται στην **Εικόνα 4.16**.

		HEATING COOLING	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΤΙΡΙΟΥ (KWh)	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΑ ΗΜΕΡΑ
1	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	HEATING	3000	24
2	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	HEATING	3000	24
3	ΜΑΡΤΙΟΣ	HEATING	3000	24
4	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	HEATING	2000	1
5	ΜΑΙΟΣ	COOLING	1500	1
6	ΙΟΥΝΙΟΣ	COOLING	1500	3
7	ΙΟΥΛΙΟΣ	COOLING	1500	8
8	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	COOLING	1500	8
9	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	COOLING	1500	3
10	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	HEATING	2000	3
11	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	HEATING	2000	5
12	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	HEATING	2000	7
		Htot	**17000**	
		Ctot	**7500**	

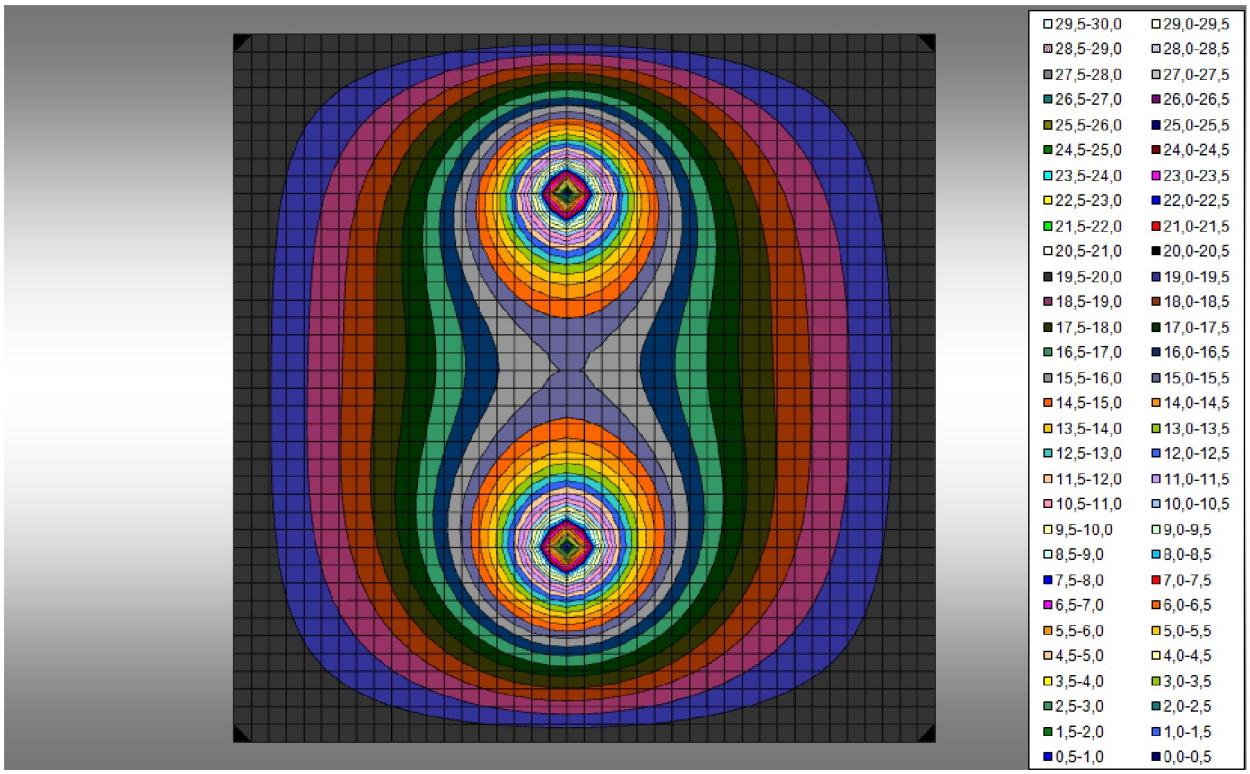
Εικόνα 4.16: *Πίνακας ενεργειακών απαιτήσεων κτιρίου ανά μήνα και ημερήσιος χρόνος λειτουργίας*

Οι τιμές των ενεργειακών απαιτήσεων σε kWh έγιναν τυχαία, ενώ αυθαίρετα ορίστηκαν και οι ώρες λειτουργίας ανά ημέρα. Επιπλέον οι αρχικές μετρήσεις χρησιμοποιούν 2 γεωεναλλάκτες σε βάθος 60m. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι για τις συγκεκριμένες ενεργειακές απαιτήσεις και για συγκεκριμένες θερμικές ιδιότητες της περιοχής της Θεσσαλονίκης, η απόδοση που δίνει σύστημα δυο εναλλακτών σε βάθος 60 μέτρων είναι σημαντικά χαμηλή. Έχοντας μια αρχική θερμοκρασία εδάφους στους 20 °C, το σύστημα γίνεται αποδοτικότερο όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασιακή διαφορά που προκύπτει από τις τιμές τους διαγράμματος της **Εικόνας 4.14**. Επομένως όταν κοντά στο χώρο της γεώτρησης έχουμε χαμηλές τιμές, πόσο μάλλον αρνητικές, το σύστημα είναι όχι μόνο μη αποδοτικό αλλά και ασύμφορο.

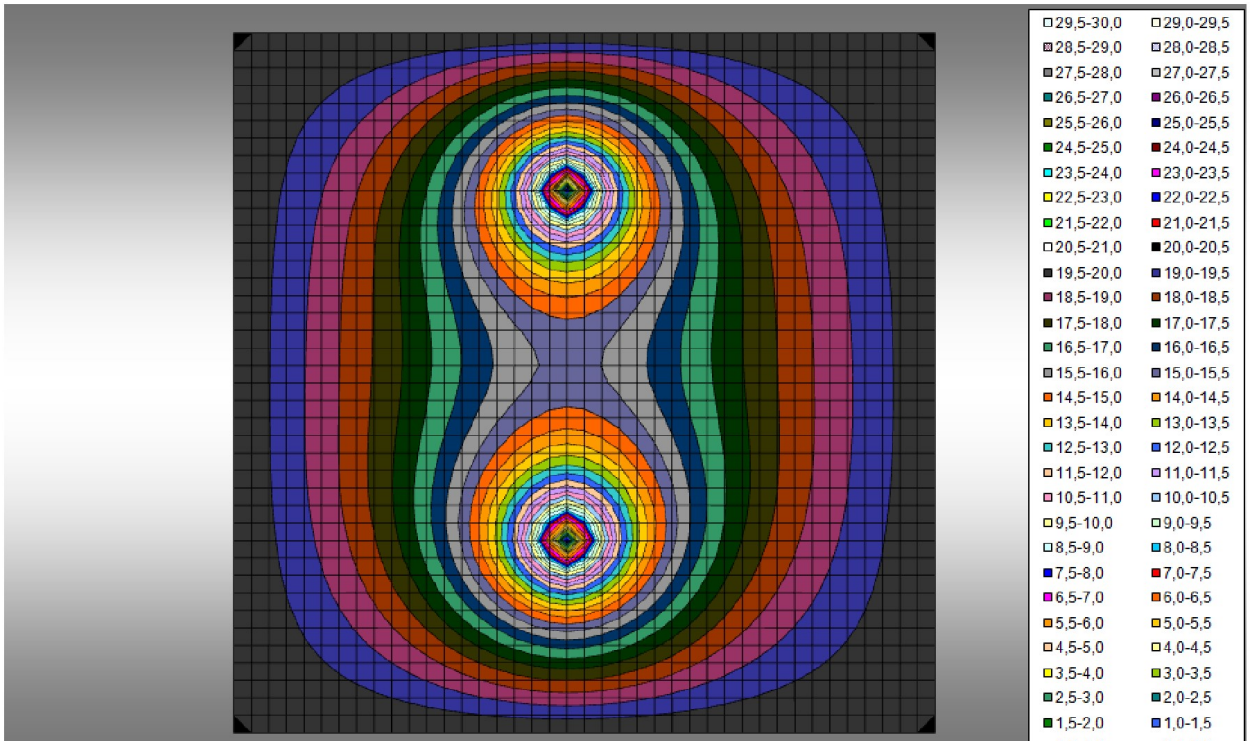
Επιδιώκοντας να γίνει το σύστημα αποδοτικότερο αυξήθηκε ο αριθμός των γεωεναλλακτών σε 4, ενώ ταυτόχρονα αυξήθηκε και το βάθος των τεσσάρων εναλλακτών στα 80m. Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στις **Εικόνες 4.17**, **4.18** και **4.19** για ένα, δύο και τρία έτη αντίστοιχα.



Εικόνα 4.17: *Τελική απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Θεσσαλονίκη για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*



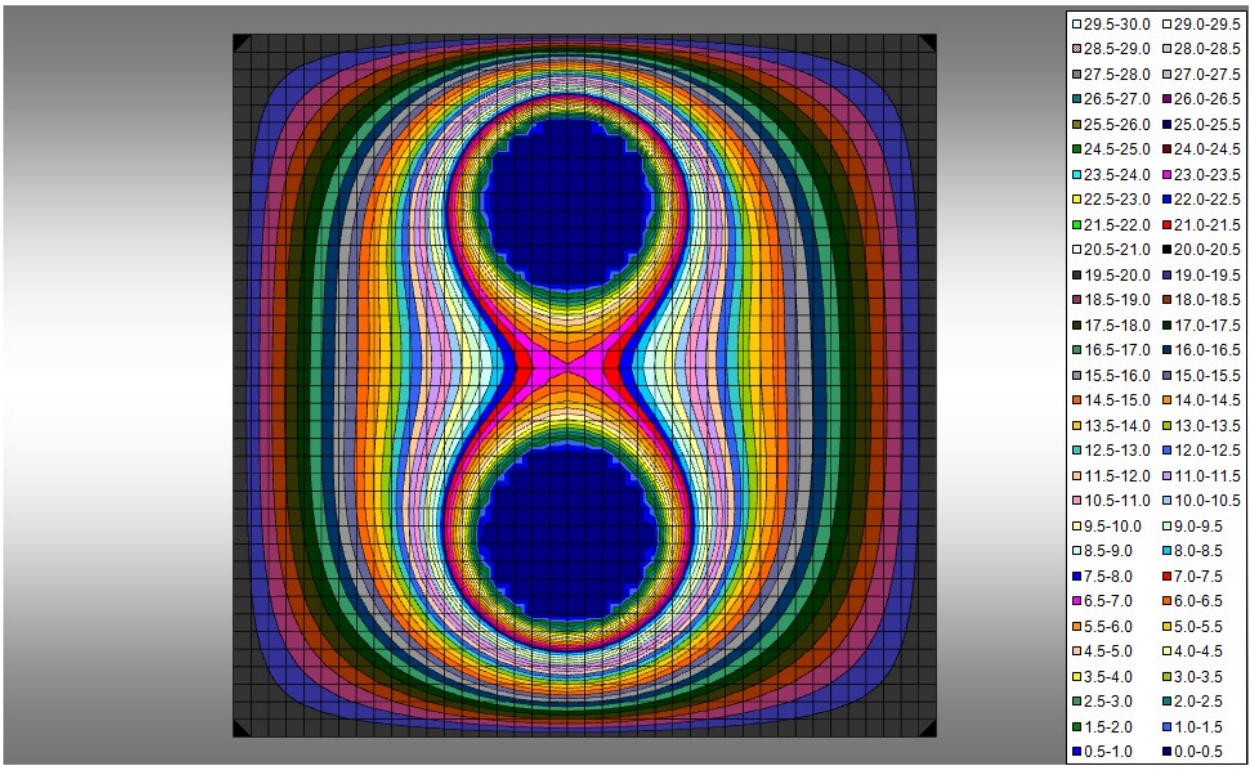
Εικόνα 4.18: *Τελική απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Θεσσαλονίκη για δυο έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*



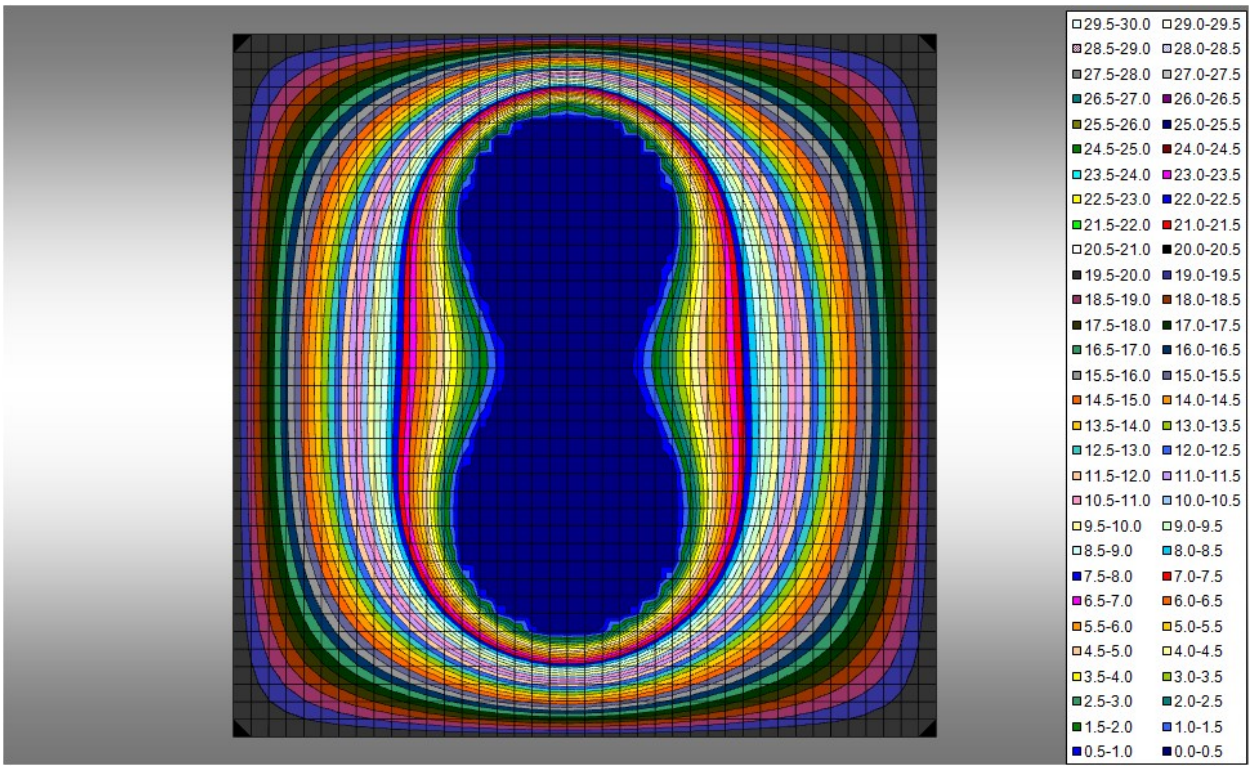
Εικόνα 4.19: *Τελική απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Θεσσαλονίκη για τρία έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*

Συγκρίνοντας την **Εικόνα 4.14**με την **Εικόνα 4.17**, παρατηρούμε στη δεύτερη έντονα αυξημένες θερμοκρασίες, οι οποίες κοντά στην περιοχή των γεωτρήσεων φτάνουν και ξεπερνούν τους 10 °C, ενώ στο χώρο αλληλεπίδρασης των γεωτρήσεων η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από 16 °C.

Αντίστοιχο πρόβλημα εντοπίστηκε και για την περιοχή της Πάτρας και της Λάρισας οι οποίες έχουν παρόμοιες θερμικές ιδιότητες πετρωμάτων όπως παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2** και **Πίνακα 3**. Η αρχική προκύπτουσα εικόνα των διαγραμματικών αποτελεσμάτων είναι αυτή της **Εικόνας 4.20**, όπου και πάλι βλέπουμε αρνητικές θερμοκρασίες σε ακτίνα τουλάχιστον 2 μέτρων από το κέντρο κάθε γεώτρησης, ενώ στο χώρο αλληλεπίδρασης των δυο γεωτρήσεων η θερμοκρασία δεν ξεπερνά τους 7 °C. Ακόμα προβληματικότερα εμφανίζονται τα αποτελέσματα για δυο ετήσιους κύκλους του κώδικα όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.21** και **Εικόνα 4.22**.



Εικόνα 4.20: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Λάρισα και την Πάτρα για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*

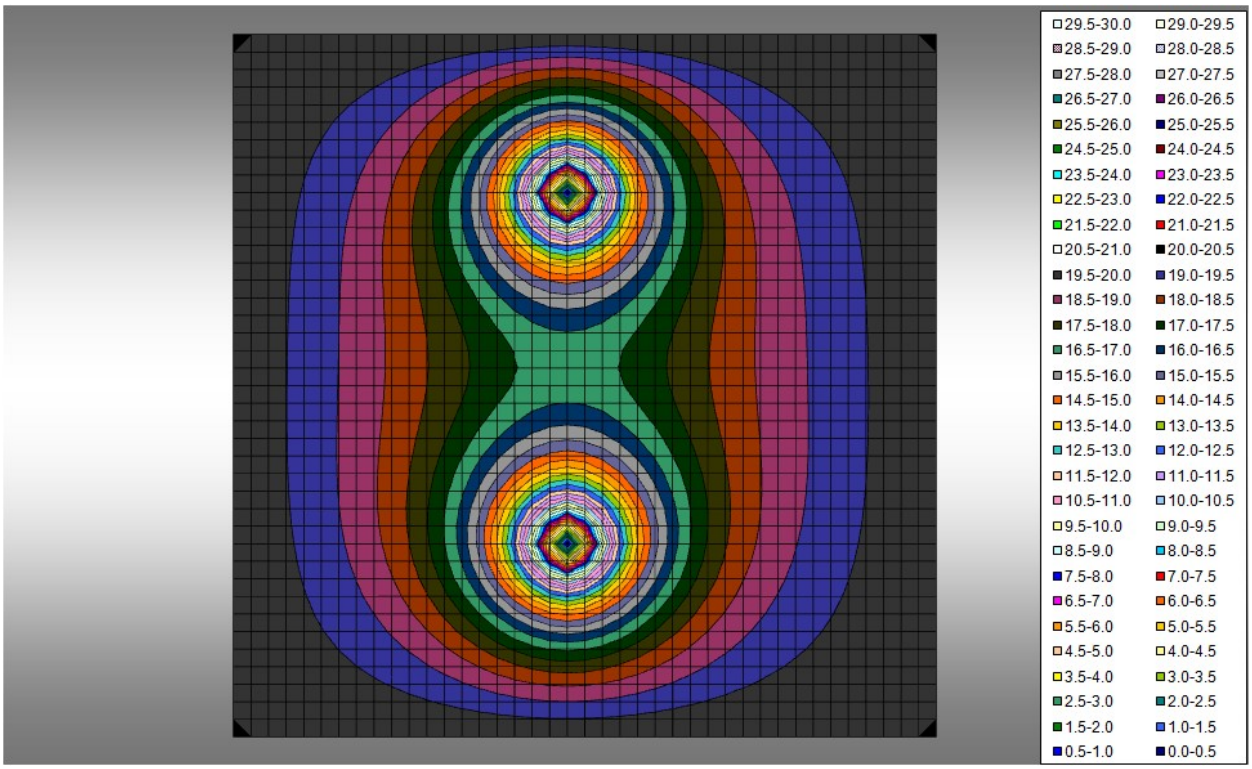


Εικόνα 4.21: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Λάρισα και την Πάτρα για δυο έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*

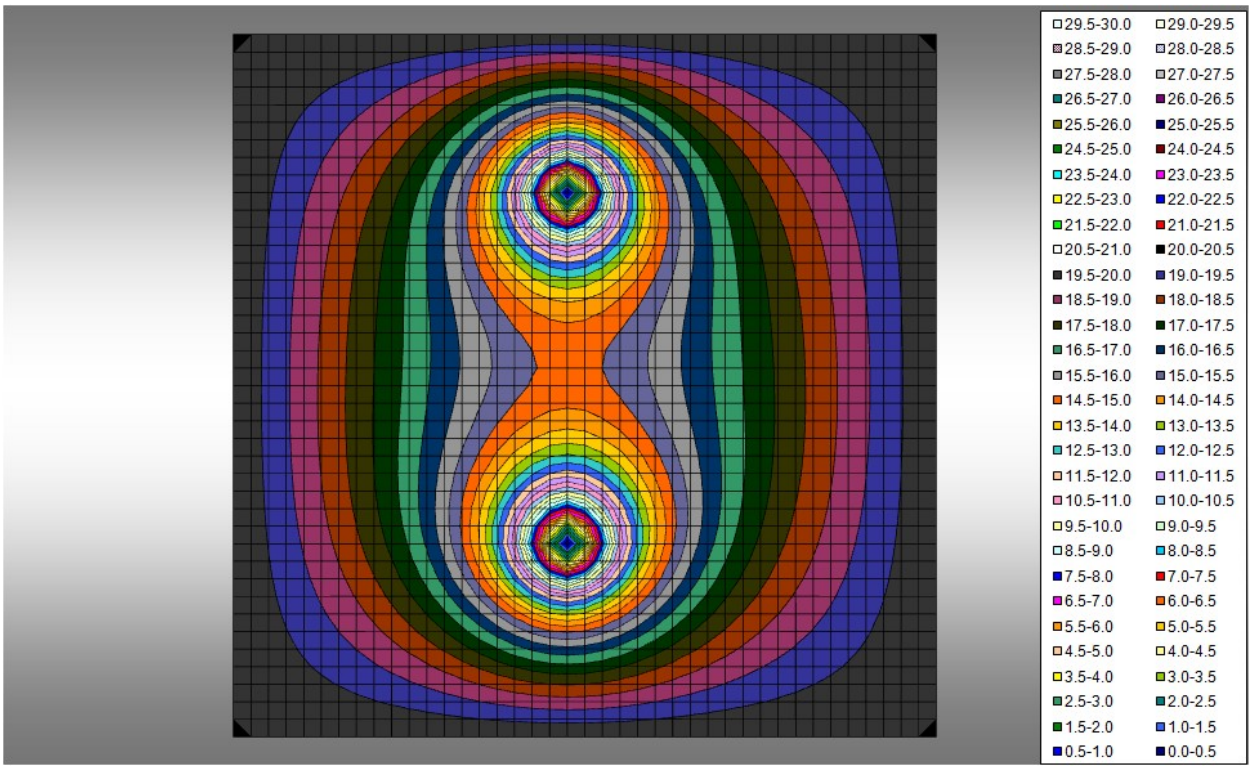
20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,9	19,8	19,6	19,5	19,4	19,3	19,2	19,1	19,1	19,0	18,9	18,9	18,8	18,8	18,8	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,8	18,8	18,8	18,9	18,9	19,0	19,1	19,1	19,2	19,3	19,4	19,5	19,7	19,8	19,9	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,8	19,5	19,3	19,1	18,8	18,6	18,4	18,3	18,1	18,0	17,9	17,8	17,7	17,6	17,5	17,5	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,5	17,5	17,6	17,6	17,7	17,9	18,0	18,1	18,3	18,5	18,7	18,9	19,1	19,3	19,5	19,8	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,6	19,3	18,9	18,6	18,3	17,9	17,7	17,4	17,2	17,0	16,8	16,6	16,5	16,4	16,3	16,2	16,2	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,2	16,3	16,3	16,5	16,6	16,8	17,0	17,2	17,4	17,7	18,0	18,3	18,6	18,9	19,3	19,6	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,5	19,0	18,5	18,1	17,6	17,2	16,8	16,5	16,2	15,9	15,7	15,5	15,3	15,2	15,0	15,0	14,9	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,9	15,0	15,1	15,3	15,4	15,7	15,9	16,2	16,5	16,9	17,3	17,7	18,1	18,6	19,1	19,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,4	18,8	18,2	17,6	17,0	16,5	16,0	15,6	15,2	14,8	14,5	14,3	14,1	13,9	13,8	13,7	13,6	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,6	13,7	13,8	14,0	14,2	14,5	14,8	15,2	15,6	16,1	16,6	17,1	17,6	18,2	18,8	19,4	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,2	18,5	17,7	17,0	16,3	15,7	15,1	14,6	14,1	13,7	13,4	13,1	12,8	12,7	12,5	12,4	12,3	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,3	12,4	12,5	12,7	13,0	13,3	13,7	14,1	14,7	15,2	15,8	16,5	17,1	17,8	18,5	19,3	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,1	18,2	17,3	16,4	15,6	14,8	14,1	13,5	13,0	12,5	12,1	11,8	11,5	11,4	11,2	11,1	11,0	10,9	10,9	10,9	10,9	10,8	10,8	10,9	10,9	11,0	11,2	11,4	11,7	12,0	12,5	13,0	13,6	14,3	15,0	15,8	16,6	17,4	18,3	19,1	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	18,9	17,8	16,8	15,8	14,8	13,9	13,1	12,3	11,7	11,2	10,7	10,4	10,2	10,0	9,9	9,8	9,7	9,6	9,6	9,5	9,5	9,5	9,5	9,6	9,7	9,9	10,2	10,6	11,2	11,8	12,5	13,3	14,2	15,1	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	18,7	17,5	16,2	15,0	13,9	12,8	11,8	11,0	10,2	9,7	9,2	8,9	8,7	8,6	8,5	8,4	8,4	8,3	8,3	8,2	8,2	8,1	8,1	8,0	8,1	8,2	8,3	8,6	9,1	9,7	10,4	11,3	12,2	13,2	14,3	15,4	16,6	17,7	18,8	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	18,5	17,1	15,6	14,2	12,8	11,5	10,4	9,4	8,6	8,0	7,5	7,3	7,1	7,1	7,1	7,1	7,0	7,0	7,0	6,9	6,8	6,7	6,6	6,5	6,4	6,4	6,5	6,8	7,3	8,0	8,8	9,8	11,0	12,2	13,5	14,8	16,1	17,4	18,7	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	18,3	16,6	14,9	13,2	11,5	10,0	8,6	7,4	6,5	5,9	5,5	5,4	5,4	5,4	5,5	5,6	5,7	5,7	5,7	5,6	5,4	5,3	5,0	4,8	4,6	4,5	4,5	4,7	5,2	5,9	6,9	8,1	9,5	11,0	12,5	14,0	15,5	17,0	18,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	18,0	16,0	14,0	12,0	10,0	8,1	6,4	5,0	4,0	3,4	3,2	3,2	3,4	3,7	4,0	4,2	4,4	4,4	4,4	4,3	4,1	3,8	3,4	3,0	2,6	2,2	2,0	2,1	2,5	3,4	4,6	6,1	7,8	9,6	11,4	13,2	15,0	16,7	18,3	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	17,7	15,4	13,0	10,6	8,2	5,9	3,7	2,0	0,8	0,2	0,2	0,6	1,2	1,8	2,3	2,7	3,0	3,2	3,2	3,0	2,7	2,3	1,7	1,0	0,3	-0,4	-1,0	-1,1	-0,8	0,2	1,8	3,7	5,9	8,1	10,2	12,3	14,3	16,3	18,1	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	17,4	14,7	11,9	9,0	6,1	3,1	0,3	-2,0	-3,4	-3,8	-3,4	-2,5	-1,4	-0,3	0,6	1,3	1,7	2,0	2,0	1,8	1,4	0,8	0,0	-1,1	-2,3	-3,6	-4,7	-5,3	-5,0	-3,8	-1,7	0,8	3,6	6,3	8,9	11,4	13,7	15,9	18,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	17,0	14,0	10,8	7,3	3,6	-0,3	-4,1	-7,2	-9,1	-9,1	-7,9	-6,1	-4,2	-2,5	-1,2	-0,2	0,5	0,9	0,9	0,7	0,2	-0,6	-1,8	-3,3	-5,2	-7,2	-9,2	-10,6	-10,8	-9,1	-6,2	-2,6	1,0	4,4	7,6	10,4	13,1	15,5	17,8	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	16,7	13,3	9,6	5,5	0,9	-4,2	-9,5	-14,3	-17,1	-16,3	-13,5	-10,2	-7,2	-4,7	-2,8	-1,4	-0,6	-0,1	0,0	-0,2	-0,9	-1,9	-3,4	-5,5	-8,2	-11,4	-14,8	-17,8	-18,9	-16,3	-11,7	-6,6	-1,8	2,5	6,2	9,5	12,5	15,1	17,6	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	16,4	12,7	8,5	3,8	-1,8	-8,4	-16,1	-24,0	-29,4	-26,0	-20,1	-14,5	-10,0	-6,6	-4,2	-2,5	-1,4	-0,8	-0,7	-1,0	-1,7	-3,0	-4,9	-7,5	-11,1	-15,7	-21,5	-27,6	-31,2	-26,0	-18,3	-10,9	-4,6	0,7	5,1	8,8	12,0	14,8	17,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	16,2	12,2	7,8	2,5	-3,9	-12,2	-23,0	-36,9	-51,2	-39,0	-27,1	-18,4	-12,3	-8,1	-5,2	-3,2	-2,0	-1,3	-1,2	-1,5	-2,3	-3,7	-5,8	-8,9	-13,3	-19,6	-28,5	-40,6	-53,0	-39,0	-25,2	-14,7	-6,8	-0,6	4,2	8,2	11,6	14,6	17,4	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	16,2	12,1	7,5	2,0	-4,8	-14,0	-27,4	-50,2	-97,0	-52,2	-31,5	-20,2	-13,3	-8,6	-5,5	-3,5	-2,2	-1,5	-1,3	-1,7	-2,5	-4,0	-6,2	-9,5	-14,3	-21,5	-32,9	-53,9	-98,8	-52,2	-29,7	-16,5	-7,7	-1,1	3,9	8,1	11,5	14,6	17,3	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	16,2	12,2	7,9	2,5	-4,0	-12,2	-23,0	-37,0	-51,2	-39,0	-27,1	-18,4	-12,4	-8,1	-5,2	-3,3	-2,0	-1,4	-1,2	-1,5	-2,4	-3,8	-5,9	-9,0	-13,4	-19,7	-28,6	-40,7	-53,1	-39,0	-25,3	-14,7	-6,8	-0,7	4,2	8,2	11,6	14,6	17,4	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	16,4	12,6	8,5	3,7	-1,8	-8,5	-16,1	-24,1	-29,5	-26,1	-20,2	-14,6	-10,1	-6,8	-4,3	-2,6	-1,5	-1,0	-0,8	-1,1	-1,9	-3,1	-5,0	-7,6	-11,2	-15,9	-21,6	-27,7	-31,3	-26,1	-18,4	-11,0	-4,6	0,6	5,0	8,7	11,9	14,8	17,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	16,7	13,2	9,5	5,4	0,8	-4,3	-9,6	-14,4	-17,2	-16,4	-13,6	-10,3	-7,3	-4,9	-3,0	-1,6	-0,7	-0,3	-0,2	-0,4	-1,1	-2,1	-3,6	-5,7	-8,3	-11,5	-15,0	-18,0	-19,0	-16,4	-11,8	-6,8	-1,9	2,4	6,2	9,5	12,4	15,1	17,6	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	17,0	13,9	10,7	7,2	3,5	-0,4	-4,2	-7,4	-9,2	-9,3	-8,1	-6,3	-4,4	-2,7	-1,4	-0,4	0,3	0,6	0,7	0,5	-0,1	-0,9	-2,0	-3,6	-5,4	-7,4	-9,4	-10,9	-11,0	-9,3	-6,3	-2,8	0,8	4,3	7,5	10,4	13,0	15,4	17,8	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	17,4	14,7	11,9	8,9	5,9	2,9	0,1	-2,2	-3,6	-4,0	-3,6	-2,7	-1,7	-0,6	0,3	0,9	1,4	1,6	1,7	1,5	1,1	0,5	-0,4	-1,4	-2,6	-3,9	-4,9	-5,5	-5,3	-4,0	-2,0	0,6	3,4	6,2	8,8	11,3	13,6	15,8	17,9	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	17,7	15,3	12,9	10,5	8,0	5,7	3,5	1,7	0,5	0,0	-0,1	0,3	0,8	1,4	1,9	2,3	2,6	2,8	2,8	2,6	2,3	1,9	1,3	0,6	-0,1	-0,8	-1,3	-1,5	-1,1	0,0	1,5	3,5	5,7	7,9	10,1	12,2	14,2	16,2	18,1	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	18,0	16,9	13,9	11,8	9,8	7,9	6,2	4,7	3,7	3,0	2,8	2,8	3,0	3,2	3,5	3,7	3,9	3,9	3,9	3,8	3,6	3,3	2,9	2,5	2,1	1,8	1,6	1,7	2,2	3,0	4,3	5,9	7,6	9,4	11,2	13,0	14,8	16,6	18,3	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	18,2	16,5	14,7	13,0	11,3	9,7	8,3	7,1	6,1	5,5	5,1	4,9	4,9	4,9	5,0	5,1	5,1	5,2	5,1	5,0	4,9	4,7	4,5	4,3	4,1	3,9	4,0	4,2	4,7	5,5	6,5	7,8	9,2	10,7	12,3	13,8	15,4	16,9	18,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	18,5	16,9	15,4	14,0	12,5	11,2	10,0	9,0	8,1	7,5	7,0	6,7	6,6	6,5	6,4	6,4	6,4	6,4	6,3	6,2	6,1	6,0	5,9	5,8	5,8	5,8	6,0	6,3	6,8	7,5	8,4	9,4	10,6	11,9	13,2	14,5	15,9	17,3	18,6	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	18,7	17,3	16,0	14,8	13,6	12,4	11,4	10,5	9,7	9,1	8,6	8,3	8,1	7,9	7,8	7,7	7,6	7,6	7,5	7,4	7,4	7,3	7,3	7,3	7,3	7,4	7,7	8,0	8,5	9,1	9,9	10,8	11,8	12,9	14,0	15,2	16,4	17,6	18,8	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	18,8	17,7	16,6	15,5	14,4	13,5	12,6	11,8	11,1	10,5	10,0	9,7	9,4	9,2	9,0	8,9	8,8	8,8	8,7	8,6	8,6	8,6	8,6	8,7	8,8	8,9	9,2	9,6	9,9	10,5	11,2	12,0	12,8	13,7	14,7	15,7	16,8	17,8	18,9	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,0	18,0	17,0	16,1	15,2	14,3	13,6	12,9	12,3	11,7	11,3	10,9	10,7	10,4	10,3	10,1	10,0	9,9	9,9	9,8	9,8	9,8	9,9	9,9	10,1	10,2	10,5	10,8	11,2	11,7	12,3	13,0	13,7	14,5	15,4	16,3	17,2	18,1	19,1	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,1	18,3	17,4	16,6	15,9	15,1	14,5	13,8	13,3	12,8	12,4	12,1	11,8	11,6	11,4	11,3	11,2	11,1	11,0	11,0	11,0	11,0	11,1	11,2	11,3	11,5	11,7	12,0	12,4	12,8	13,4	13,9	14,6	15,3	16,0	16,7	17,5	18,3	19,2	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,3	18,5	17,8	17,1	16,5	15,8	15,3	14,7	14,3	13,9	13,5	13,2	12,9	12,7	12,6	12,4	12,3	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,3	12,3	12,5	12,6	12,9	13,1	13,5	13,9	14,3	14,8	15,3	15,9	16,6	17,2	17,9	18,6	19,3	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,4	18,8	18,2	17,6	17,0	16,5	16,0	15,6	15,2	14,8	14,5	14,2	14,0	13,8	13,7	13,5	13,5	13,4	13,3	13,3	13,3	13,3	13,4	13,5	13,6	13,8	14,0	14,2	14,5	14,8	15,2	15,6	16,1	16,6	17,1	17,6	18,2	18,8	19,4	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,5	19,0	18,5	18,0	17,6	17,1	16,7	16,4	16,0	15,7	15,5	15,2	15,1	14,9	14,8	14,6	14,6	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,6	14,7	14,9	15,0	15,2	15,5	15,7	16,0	16,4	16,8	17,2	17,6	18,1	18,5	19,0	19,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,6	19,2	18,8	18,4	18,1	17,7	17,4	17,1	16,9	16,6	16,4	16,2	16,1	15,9	15,8	15,7	15,7	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,7	15,8	15,9	16,0	16,2	16,4	16,6	16,9	17,1	17,4	17,8	18,1	18,5	18,8	19,2	19,6	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,7	19,4	19,1	18,8	18,6	18,3	18,1	17,9	17,7	17,5	17,3	17,2	17,1	17,0	16,9	16,8	16,8	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7	16,8	16,9	16,9	17,0	17,2	17,3	17,5	17,7	17,9	18,1	18,3	18,6	18,8	19,1	19,4	19,7	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,8	19,6	19,4	19,2	19,0	18,9	18,7	18,6	18,4	18,3	18,2	18,1	18,0	18,0	17,9	17,9	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8	17,9	17,9	18,0	18,0	18,1	18,2	18,3	18,4	18,6	18,7	18,9	19,1	19,2	19,4	19,6	19,8	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	19,9	19,8	19,7	19,6	19,5	19,4	19,4	19,3	19,2	19,2	19,1	19,1	19,0	19,0	19,0	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	19,0	19,0	19,0	19,1	19,1	19,2	19,2	19,3	19,4	19,4	19,5	19,6	19,7	19,8	19,9	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0

Εικόνα 4.22: *Πίνακας θερμοκρασιακών αποτελεσμάτων κώδικα για τη Λάρισα και την Πάτρα για δυο έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*

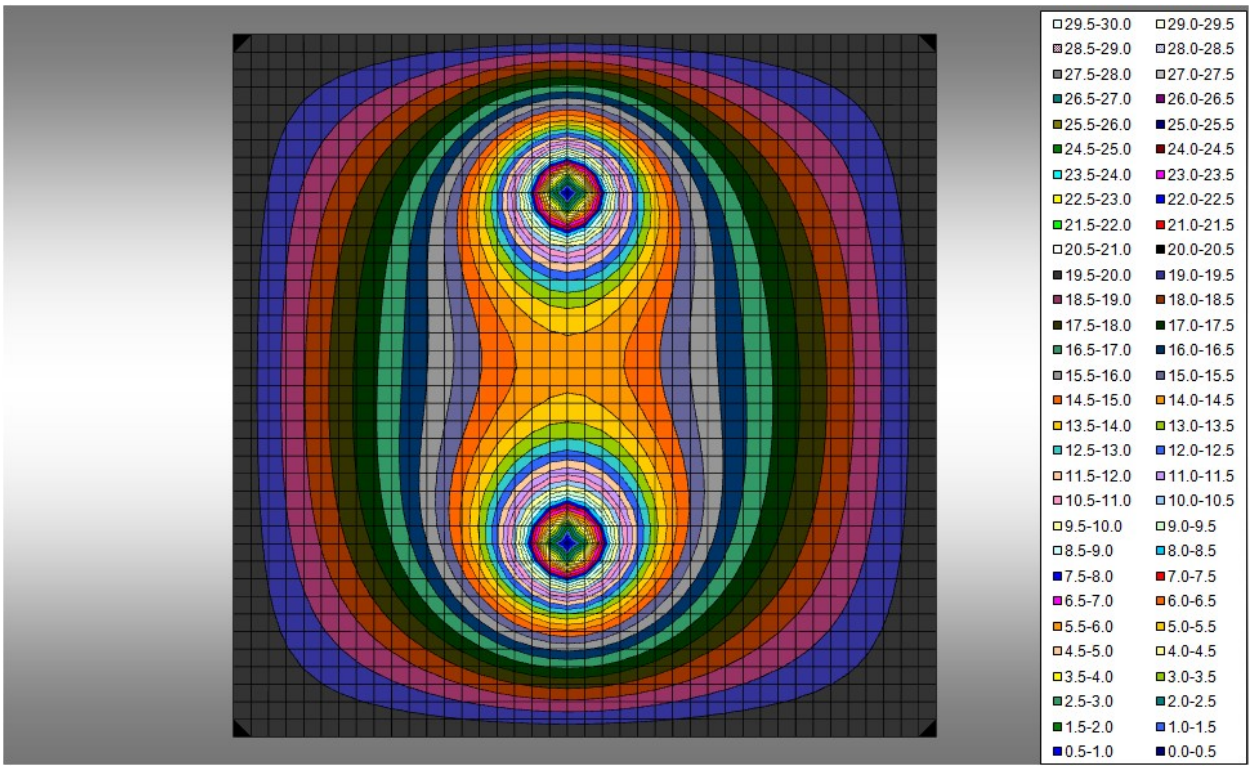
Εδώ οι τιμές όχι μόνο είναι αρνητικές ακόμα και στην περιοχή αλληλεπίδρασης των γεωτρήσεων αλλά κοντά στα σημεία των γεωτρήσεων οι θερμοκρασία παίρνει τιμές μέχρι και -97 °C. Το σύστημα δηλαδή με τις προδιαγραφές που έχει τρέξει ο κώδικας είναι σημαντικά λιγότερο αποδοτικό από το παράδειγμα της Θεσσαλονίκης. Δουλεύοντας με τον ίδιο τρόπο σκέψης, επιδιώκεται βελτίωσητης αποδοτικότητας του συστήματος αυξάνοντας τον αριθμό των γεωεναλλακτών καθώς και το βάθος τους. Σημαντικά βελτιωμένη κατέληξε η απόδοση θεωρώντας 5 γεωεναλλάκτες σε βάθος 100m. Στις **Εικόνες 4.23**, **4.24** και **4.25** παρουσιάζονται οι τελικές διαγραμματικές απεικονίσεις για την Λάρισα και την Πάτρα.



Εικόνα 4.23: *Τελική απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Λάρισα και την Πάτρα για ένα έτος υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*



Εικόνα 4.24: *Τελική απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Λάρισα και την Πάτρα για δυο έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*

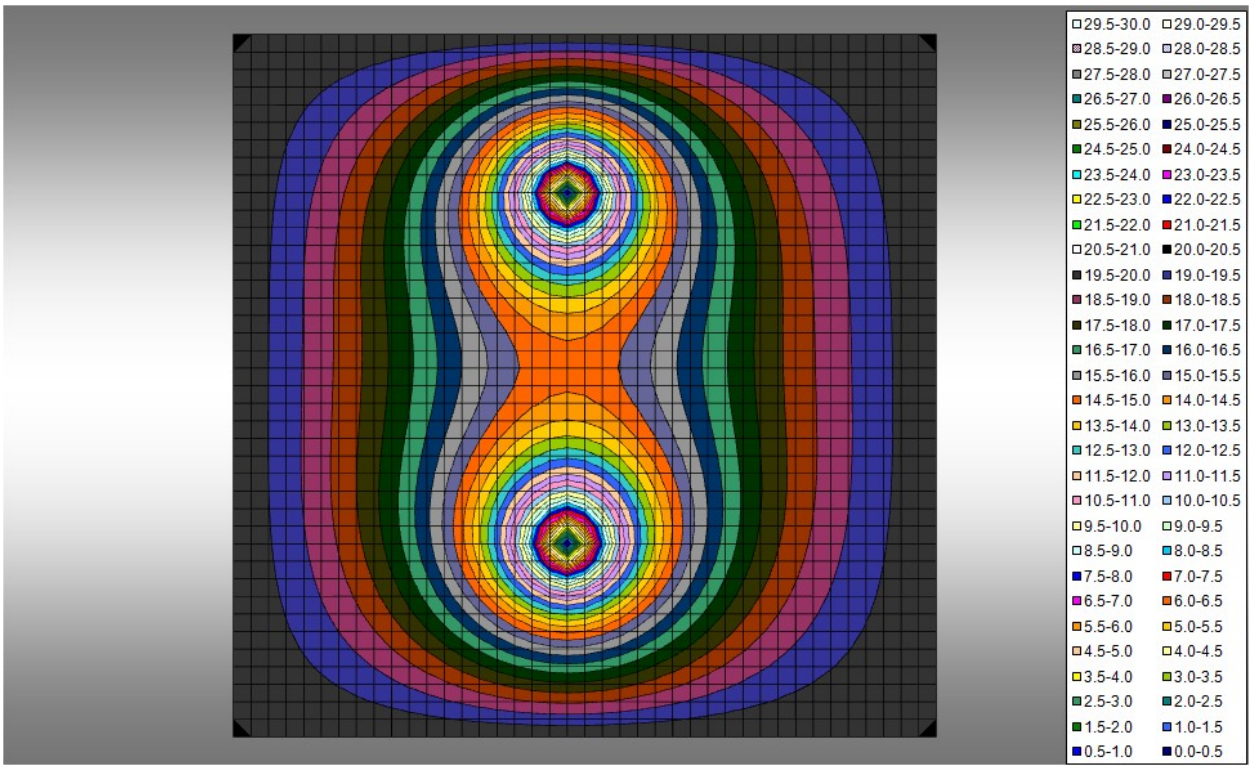


Εικόνα 4.25: *Τελική απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Λάρισα και την Πάτρα για τρία έτη υπολογισμών σε ξηρά πετρώματα*

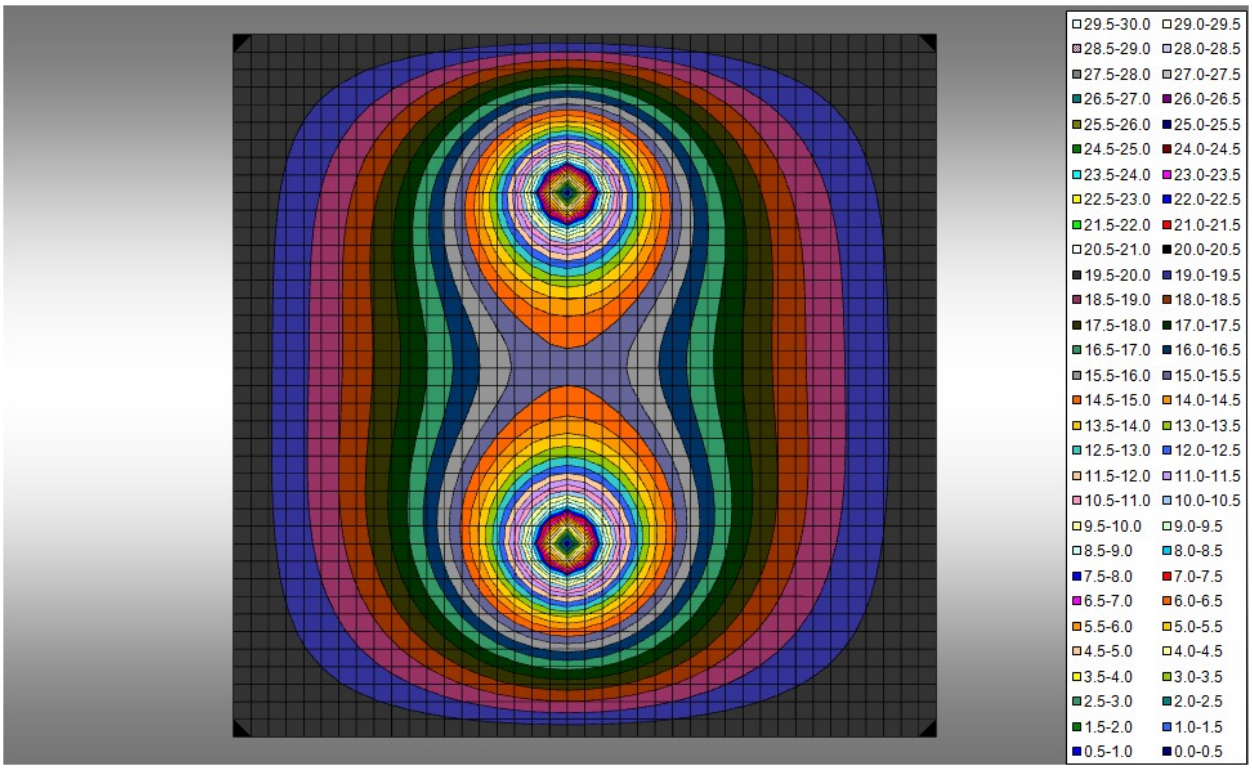
Και πάλι παρατηρείται πολύ καλύτερη θερμοκρασιακή διαβάθμιση τόσο κοντά στον χώρο των γεωτρήσεων όσο και στο χώρο αλληλεπίδρασης αυτών.

Εδώ είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι πέραν του να είναι το σύστημα όσο αποδοτικότερο γίνεται, λόγω της αύξησης του πλήθους και του μεγέθους των γεωτρήσεων, σημασία έχει και η οικονομική διαφορά των δυο συστημάτων σε ότι αφορά στην κατασκευή τους. Τόσο στην περίπτωση της Θεσσαλονίκης, όσο και στην περίπτωση της Πάτρας και της Λάρισας, η βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, επιβάρυνε με επιπλέον δυο και τρεις γεωεναλλάκτες αντίστοιχα τη διαδικασία βελτίωσης. Επιπλέον αυξήθηκε σημαντικά και το βάθος στο οποίο καλούνται να φτάσουν οι γεωεναλλάκτες, αφού η αρχική μας υπόθεση προέβλεπε βάθος 60m, ενώ τελικά κατέληξε να φτάνει έως και τα 100m.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η παραπάνω διαδικασία δε χρειάστηκε να γίνει για την περίπτωση όπου τα πετρώματα ήταν κορεσμένα σε νερό. Όπως φαίνεται στις **Εικόνες 4.26** και **4.27**, οι θερμοκρασίες που προκύπτουν είναι αρκετά υψηλές ώστε να είναι το σύστημα αποδοτικό. Αυτό σημαίνει ότι σε ένα περιβάλλον ξηρών πετρωμάτων, απαιτείται οικονομική επιβάρυνση ώστε να γίνει το σύστημα αποδοτικό αυξάνοντας τον αριθμό των γεωεναλλακτών, αλλά και το βάθος των γεωτρήσεων. Αντίθετα όμως, σε περιβάλλον κορεσμένο με νερό όπου οι θερμικές ιδιότητες των πετρωμάτων είναι υψηλότερες, δεν απαιτούνται μέτρα βελτίωσης της απόδοσης του συστήματος.



Εικόνα 4.26: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Θεσσαλονίκη για ένα έτος υπολογισμών σε πετρώματα κορεσμένα σε νερό*

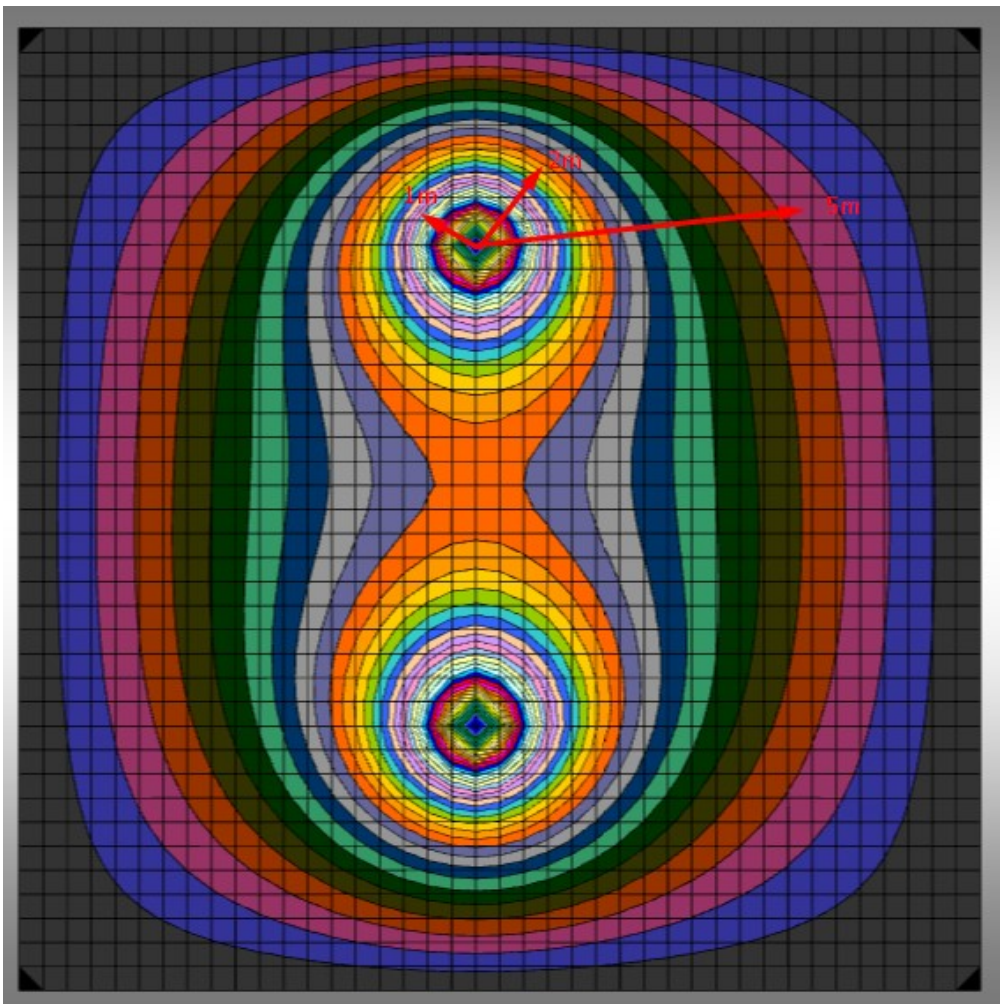


Εικόνα 4.27: *Απεικόνιση θερμοκρασιακής κατανομής για τη Λάρισα και την Πάτρα για ένα έτος υπολογισμών σε πετρώματα κορεσμένα σε νερό*

Τέλος θα απεικονιστεί σε μορφή διαγράμματος η θερμοκρασιακή μεταβολή σε συνάρτηση με το χρόνο, στα εξωτερικά ημικύκλια των θερμοκρασιακών διαβαθμίσεων των γεωτρήσεων που ουσιαστικά είναι ανεξάρτητα με το υπόλοιπο σύστημα, καθώς και στο χώρο όπου αλληλεπιδρούν οι δύο γεωτρήσεις.

Για τις τιμές της θερμοκρασίας στα εξωτερικά ημικύκλια, για να καλυφθεί ένα εύρος θερμοκρασιών σε σημαντική απόσταση, επιλέχθηκε να απεικονιστούν οι θερμοκρασίες σε ακτίνες 1m, 2m και 5m από το κέντρο κάθε γεώτρησης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.27**. Οι εικόνες που προκύπτουν από τον κώδικα ουσιαστικά αποτελούν απεικονίσεις θερμοκρασιακής κατανομής συναρτήσει της απόστασης. Οι διαστάσεις του πεδίου έχουν οριστεί στα 10x10m ενώ το πλέγμα έχει διαστάσεις 40x40 σε τετράγωνα, γεγονός που σημαίνει ότι κάθε τετράγωνο έχει διαστάσεις 40x40cm.

Στον **Πίνακα 4** και **Πίνακα 5**, παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας για κάθε απόσταση που επιλέχθηκε καθώς και για κάθε περιοχή. Από τις τιμές αυτές θα προκύψουν στη συνέχεια τα διαγράμματα θερμοκρασίας – χρόνου από τα οποία θα βγουν συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των πετρωμάτων γύρω από τη γεώτρηση σε σχέση με την ευρύτερη περιοχή.



Εικόνα 4.27: *Ακτίνες μετρήσεων θερμοκρασιακών τιμών*

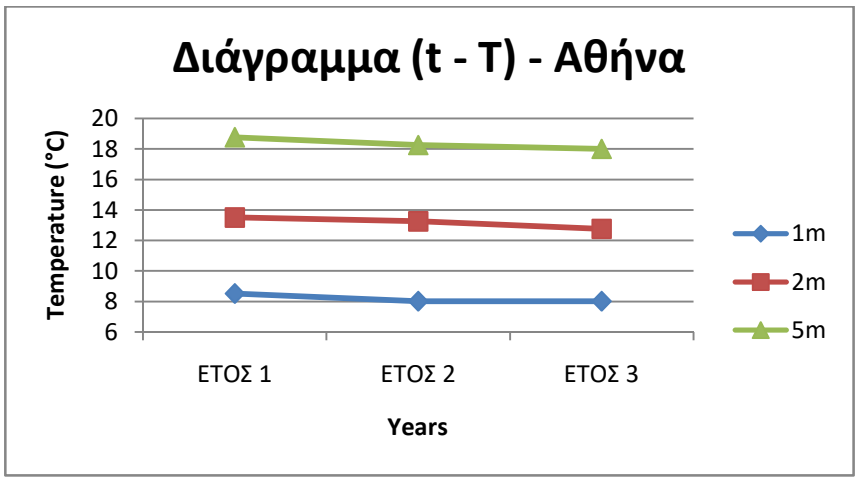
Πίνακας 4: *Απεικόνιση θερμοκρασιακών τιμών εξωτερικού ημικυκλίου θερμοκρασιακών διαβαθμίσεων για ξηρά πετρώματα*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΓΙΑ ΞΗΡΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ							
ΑΘΗΝΑ (2εναλλάκτες/60m)				ΠΑΤΡΑ (5εναλλάκτες/100m)			
	ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3		ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3
1m	8.5	8	8	1m	11	10	9.5
2m	13.5	13.25	12.75	2m	15.5	14.25	13.75
5m	18.75	18.25	18	5m	19	18.25	18
ΘΕΣ/ΝΙΚΗ (4εναλλάκτες/80m)				ΗΡΑΚΛΕΙΟ (2εναλλάκτες/60m)			
	ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3		ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3
1m	11.5	11	10.5	1m	9.75	9.25	9.25
2m	15.25	14.75	14.75	2m	14	13.25	13.25
5m	18.75	18.5	18.25	5m	18.5	18.25	18.25
ΛΑΡΙΣΑ (5εναλλάκτες/100m)				ΒΟΛΟΣ (2εναλλάκτες/60m)			
	ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3		ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3
1m	11	10	9.5	1m	8	7.75	7.5
2m	15.5	14.25	13.75	2m	12.5	12	11.5
5m	19	18.25	18	5m	18	17.5	17.25

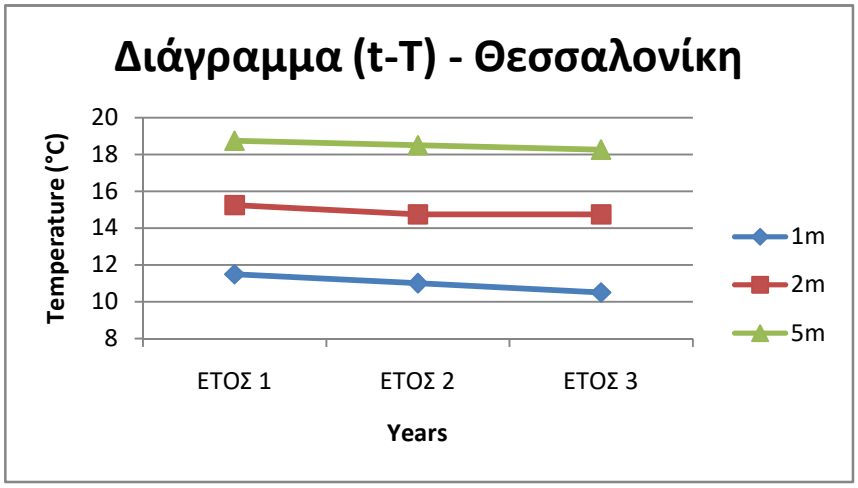
Πίνακας 5: *Απεικόνιση θερμοκρασιακών τιμών εξωτερικού ημικυκλίου θερμοκρασιακών διαβαθμίσεων για πετρώματα κορεσμένα σε νερό*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΓΙΑ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΣΕ ΝΕΡΟ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ							
ΑΘΗΝΑ (2εναλλάκτες/60m)				ΠΑΤΡΑ (2εναλλάκτες/60m)			
	ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3		ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3
1m	11.5	11	10.75	1m	10.5	10.25	10
2m	15	14.5	14.25	2m	14.5	14	14
5m	18.75	18.5	18.25	5m	18.5	18.25	18.25
ΘΕΣ/ΝΙΚΗ (2εναλλάκτες/60m)				ΗΡΑΚΛΕΙΟ (2εναλλάκτες/60m)			
	ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3		ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3
1m	10	9.75	9.5	1m	11.5	11.25	11
2m	14.5	13.75	13.75	2m	15	14.75	14.75
5m	18.75	18.25	18	5m	18.75	18.5	18.25
ΛΑΡΙΣΑ (2εναλλάκτες/60m)				ΒΟΛΟΣ (2εναλλάκτες/60m)			
	ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3		ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3
1m	10.5	10	10	1m	10.5	10	9.5
2m	14.25	14	13.75	2m	14.5	14	13.75
5m	18.75	18.25	18.25	5m	19	18.25	18.25

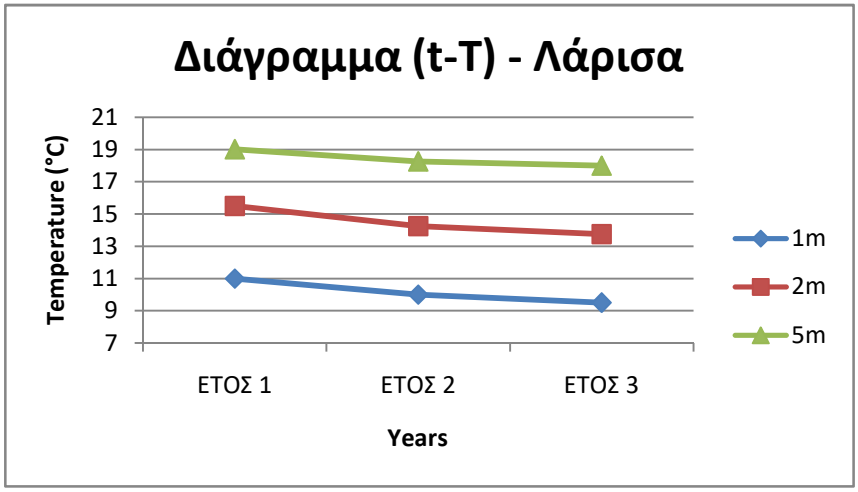
Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα που αντικατοπτρίζουν τις παραπάνω τιμές (**Διάγραμμα 1 – 12).**



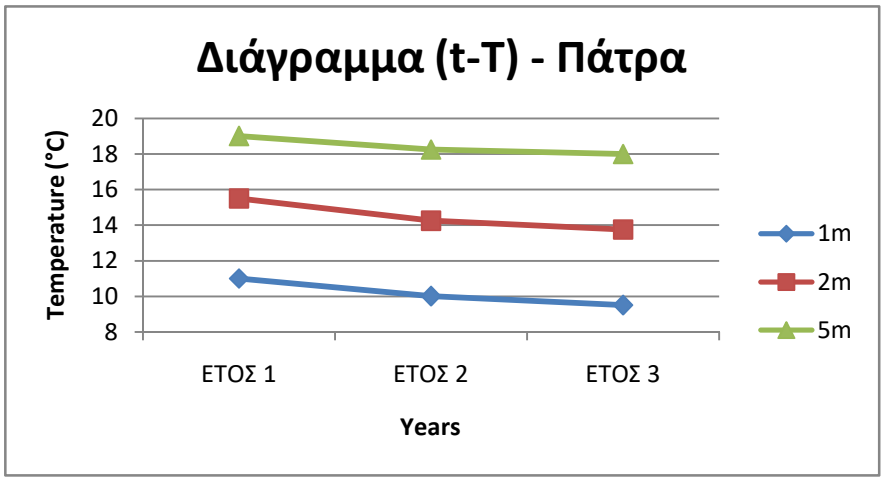
Διάγραμμα 1: *Διάγραμμα t – T για την Αθήνα για ξηρά πετρώματα (2 εναλλάκτες / 60m)*



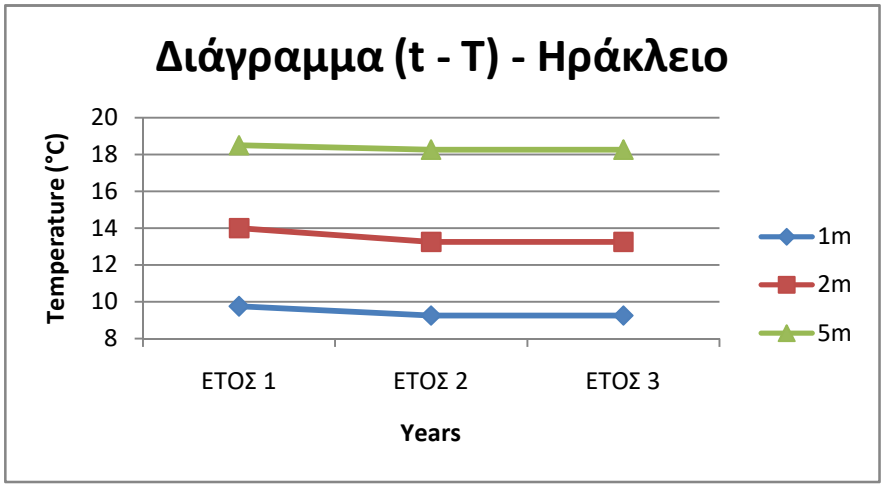
Διάγραμμα 2: *Διάγραμμα t – T για τη Θεσσαλονίκη για ξηρά πετρώματα (4εναλλάκτες / 80m)*



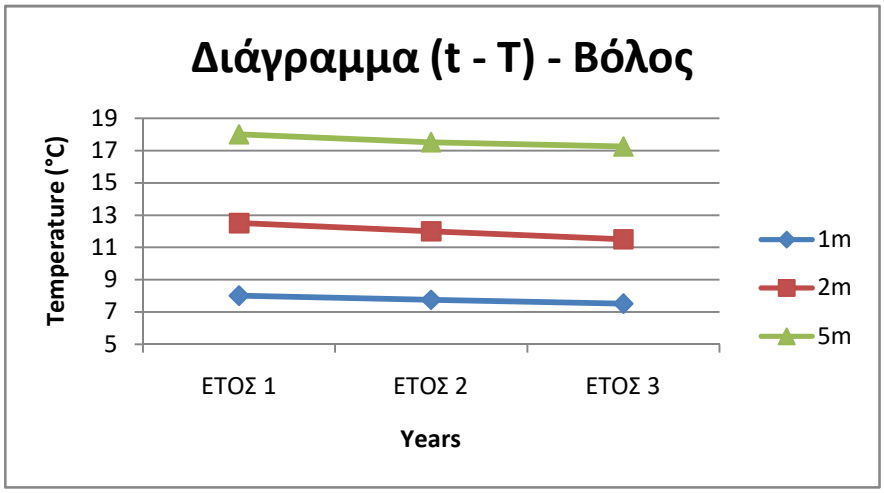
Διάγραμμα 3: *Διάγραμμα t – T για τη Λάρισα για ξηρά πετρώματα (5 εναλλάκτες / 100m)*



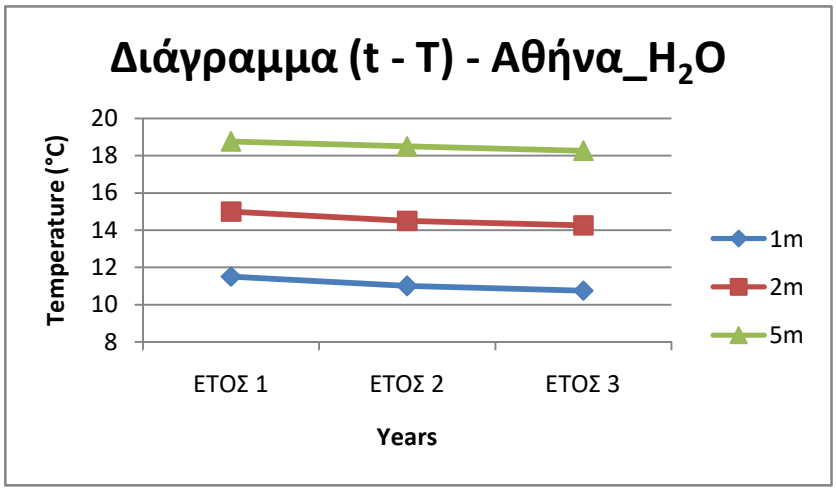
Διάγραμμα 4: *Διάγραμμα t – T για την Πάτρα για ξηρά πετρώματα (5 εναλλάκτες / 100m)*



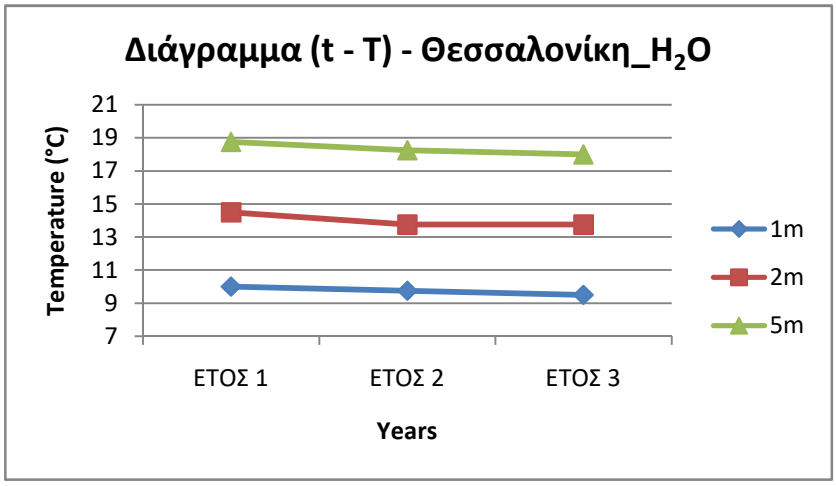
Διάγραμμα 5: *Διάγραμμα t – T για το Ηράκλειο για ξηρά πετρώματα (2 εναλλάκτες / 60m)*



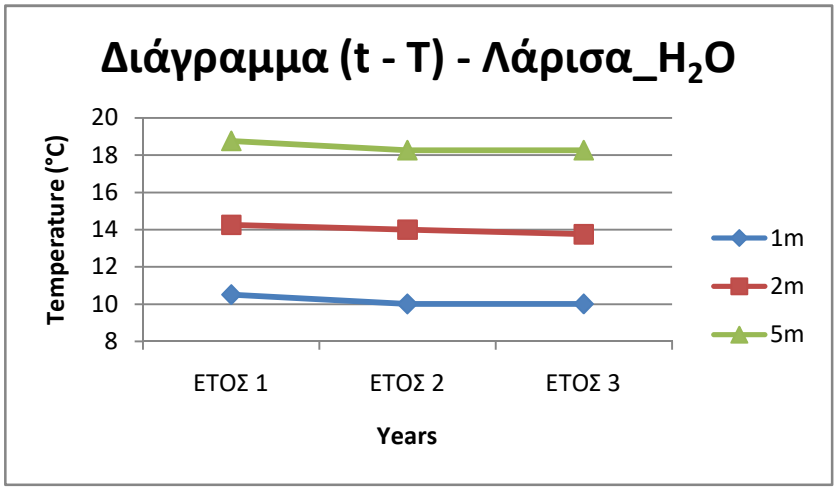
Διάγραμμα 6: *Διάγραμμα t – T για το Βόλο για ξηρά πετρώματα (2 εναλλάκτες / 60m)*



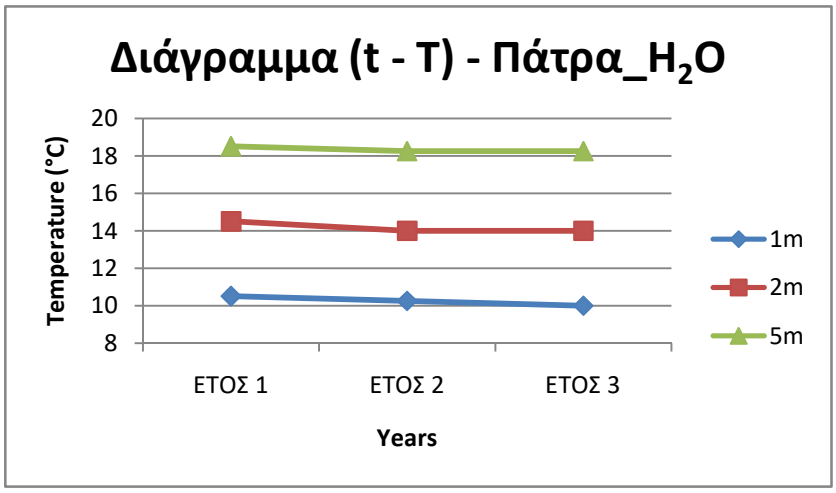
Διάγραμμα 7: *Διάγραμμα t – T για την Αθήνα για πετρώματα κορεσμένα με νερό(2 εναλλάκτες / 60m)*



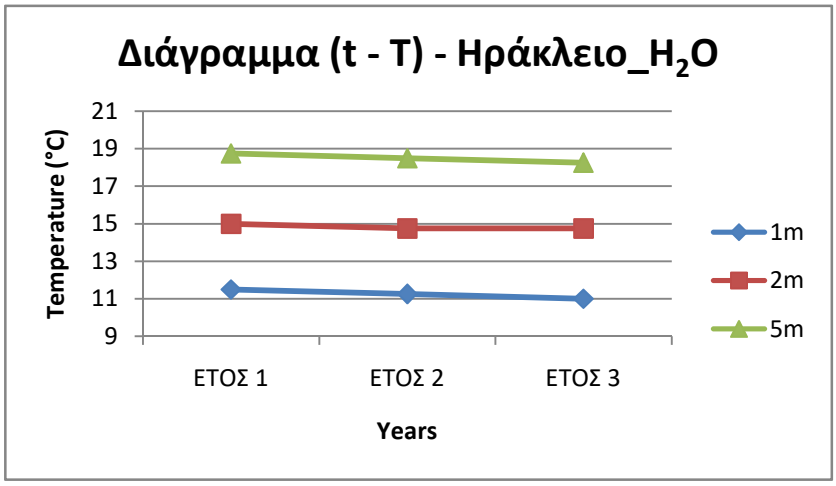
Διάγραμμα 8: *Διάγραμμα t – T για τη Θεσσαλονίκη για πετρώματα κορεσμένα με νερό (2 εναλλάκτες / 60m)*



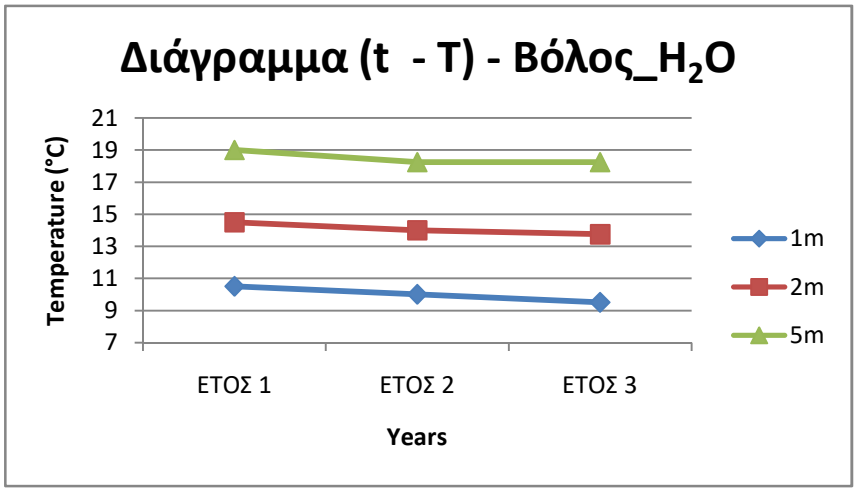
Διάγραμμα 9: *Διάγραμμα t – T για τη Λάρισα για πετρώματα κορεσμένα με νερό (2 εναλλάκτες / 60m)*



Διάγραμμα 10: *Διάγραμμα t – T για την Πάτρα για πετρώματα κορεσμένα με νερό (2 εναλλάκτες / 60m)*



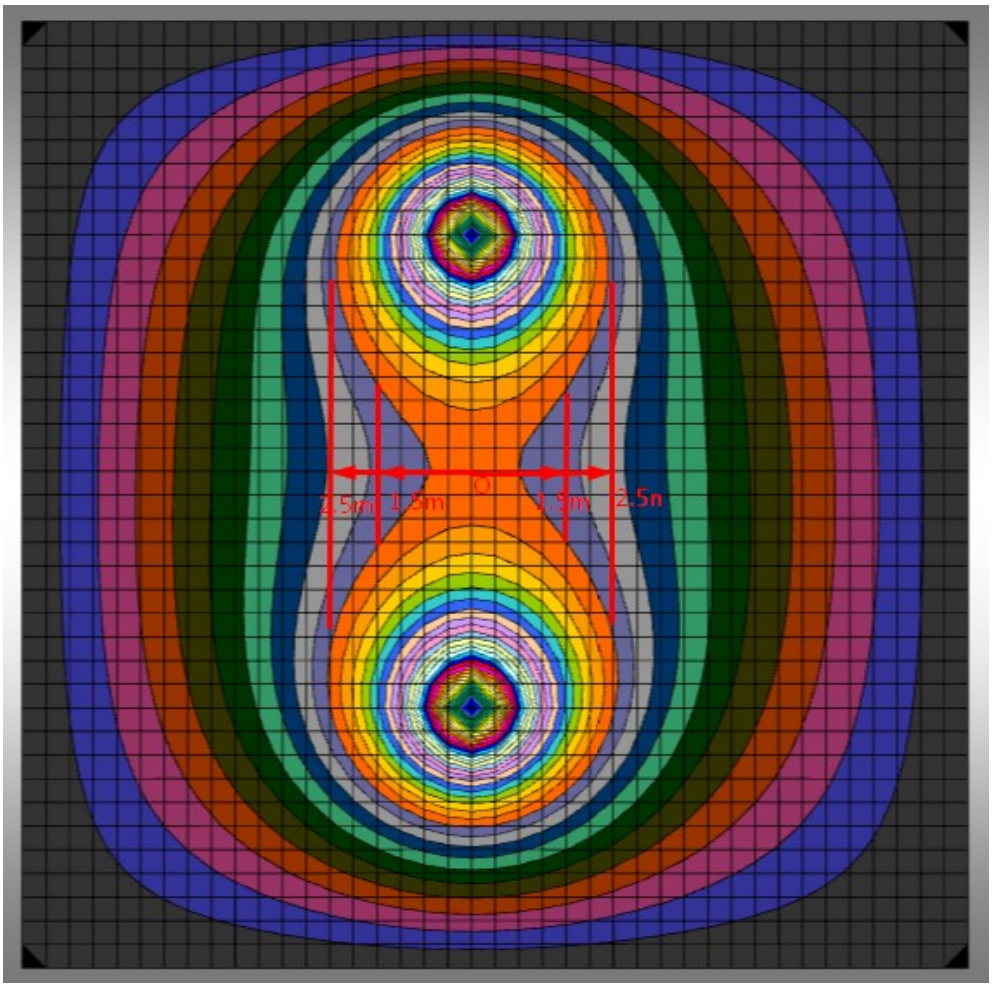
Διάγραμμα 11: *Διάγραμμα t – T για το Ηράκλειο για πετρώματα κορεσμένα με νερό (2 εναλλάκτες / 60m)*



Διάγραμμα 12: *Διάγραμμα t – T για το Βόλο για πετρώματα κορεσμένα με νερό (2 εναλλάκτες / 60m)*

Τα παραπάνω διαγράμματα αποτυπώνουν μια αναμενόμενη φθίνουσα τάση με την πάροδο του χρόνου κυρίως μεταξύ πρώτου και δεύτερου έτους. Επιπλέον διαπιστώνεται ότι οι τιμές θερμοκρασιών σε μεγαλύτερες αποστάσεις έχουν τιμές μεγαλύτερες συγκριτικά με τις τιμές πλησιέστερα στα κέντρα των γεωτρήσεων. Αυτό είναι αποτέλεσμα του ότι το εξωτερικό ημικύκλιο κάθε γεώτρησης δρα ουσιαστικά ανεξάρτητα με την άλλη γεώτρηση και το εύρος των θερμοκρασιών αναπτύσσεται μόνο συναρτήσει του περιβάλλοντος.

Στη συνέχεια θα παρατεθούν αντίστοιχοι πίνακες και διαγράμματα με παραπάνω, όπου θα βλέπουμε την εξέλιξη των θερμοκρασιακών τιμών σε σχέση με το χρόνο για την περιοχή αλληλεπίδρασης των δυο γεωτρήσεων. Για το λόγο αυτό επιλέγεται αρχικά η τιμή της θερμοκρασίας στο κέντρο των απεικονίσεων (σημείο Ο) που προκύπτουν από το πρόγραμμα δηλαδή την τιμή στο κέντρο του χώρου αλληλεπίδρασης των δυο γεωτρήσεων. Στη συνέχεια θα πάρουμε τις τιμές της θερμοκρασίας πάνω στο νοητό ευθύγραμμο τμήμα που περνά από το σημείο Ο και είναι κάθετο στο νοητό ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει τα κέντρα των δυο γεωτρήσεων, σε απόσταση 1.5m και 2.5m εκατέρωθεν του σημείου Ο. Έτσι πρακτικά προσδιορίζεται ένας χώρος αλληλεπίδρασης των γεωτρήσεων για συνολική απόσταση 5m όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.28**.



Εικόνα 4.28: *Χώρος θερμοκρασιακής αλληλεπίδρασης των δυο γεωτρήσεων*

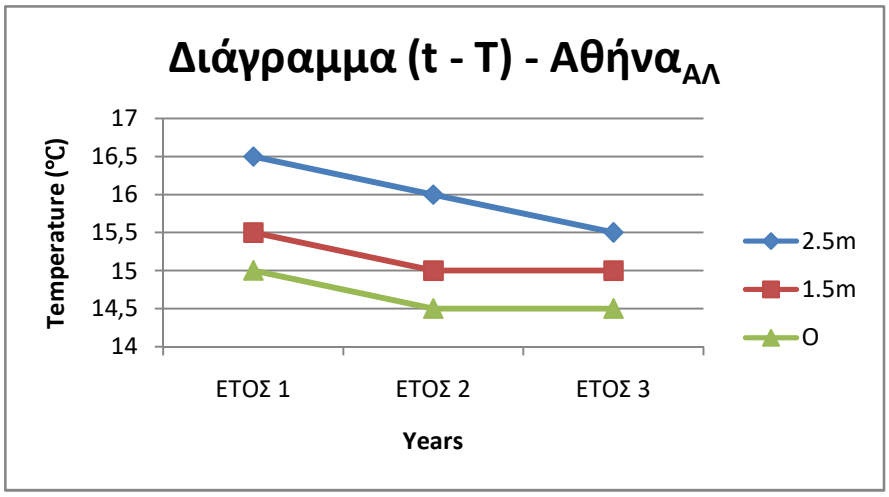
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι **Πίνακες 6** και **7** στους οποίους βλέπουμε τις τιμές θερμοκρασίας για το σημείο Ο και τα σημεία σε απόσταση 1.5mκαι 2.5m από αυτό. Έτσι θα προκύψουν συμπεράσματα για τις θερμοκρασιακές συνθήκες που δημιουργούνται μεταξύ των δυο γεωτρήσεων καθώς και τη μεταβολή αυτών σε σχέση με το χρόνο.

Πίνακας 6: *Απεικόνιση θερμοκρασιακών τιμών του χώρου αλληλεπίδρασης των για ξηρά πετρώματα*

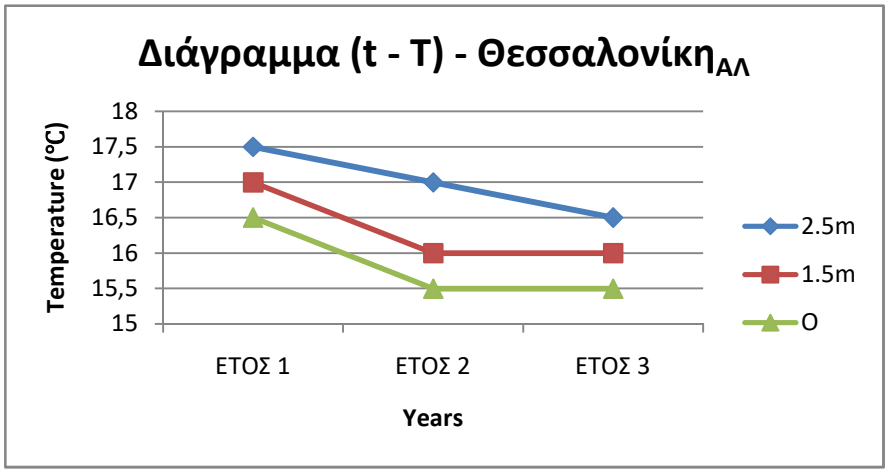
ΠΙΝΑΚΑΣ ΧΩΡΟΥ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΞΗΡΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ							
ΑΘΗΝΑ (2εναλλάκτες/60m)				ΠΑΤΡΑ (5εναλλάκτες/100m)			
	ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3		ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3
2.5m	16.5	16	15.5	2.5m	18	16	15.5
1.5m	15.5	15	15	1.5m	17.5	15.5	15
Ο	15	14.5	14.5	Ο	17	15	14.5
ΘΕΣ/ΝΙΚΗ (4εναλλάκτες/80m)				ΗΡΑΚΛΕΙΟ (2εναλλάκτες/60m)			
	ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3		ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3
2.5m	17.5	17	16.5	2.5m	16.5	16	16
1.5m	17	16	16	1.5m	16	15.5	15.5
Ο	16.5	15.5	15.5	Ο	15.5	15	15
ΛΑΡΙΣΑ (5εναλλάκτες/100m)				ΒΟΛΟΣ (2εναλλάκτες/60m)			
	ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3		ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3
2.5m	17	16	15.5	2.5m	16	15	15
1.5m	16	15.5	15	1.5m	15	14.5	14
Ο	15.5	15	14.5	Ο	14.5	13.5	13.5

Πίνακας 7: *Απεικόνιση θερμοκρασιακών τιμών του χώρου αλληλεπίδρασης των για κορεσμένα με νερό πετρώματα*

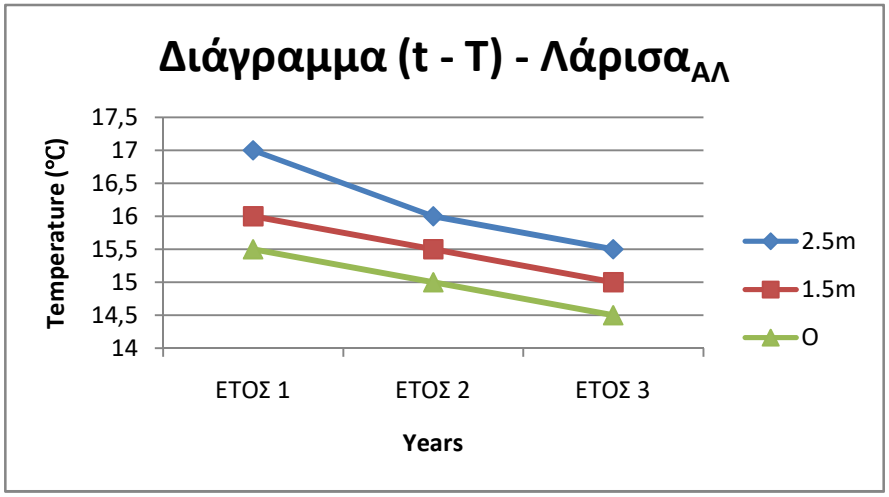
ΠΙΝΑΚΑΣ ΧΩΡΟΥ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΜΕ ΝΕΡΟ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ							
ΑΘΗΝΑ (2εναλλάκτες/60m)				ΠΑΤΡΑ (2εναλλάκτες/60m)			
	ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3		ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3
2.5m	17	16.5	16.5	2.5m	17	16.5	16
1.5m	16.5	16	16	1.5m	16	15.5	15.5
Ο	16	15.5	15.5	Ο	15.5	15	15
ΘΕΣ/ΝΙΚΗ (2εναλλάκτες/60m)				ΗΡΑΚΛΕΙΟ (2εναλλάκτες/60m)			
	ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3		ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3
2.5m	16.5	16	16	2.5m	17.5	17	17
1.5m	15.5	15	15	1.5m	16.5	16	16
Ο	15	14.5	14.5	Ο	16	15.5	15.5
ΛΑΡΙΣΑ (2εναλλάκτες/60m)				ΒΟΛΟΣ (2εναλλάκτες/60m)			
	ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3		ΕΤΟΣ 1	ΕΤΟΣ 2	ΕΤΟΣ 3
2.5m	16.5	16	16	2.5m	17	16.5	16
1.5m	16	15.5	15.5	1.5m	16	15.5	15.5
Ο	15.5	15	15	Ο	15.5	15	15



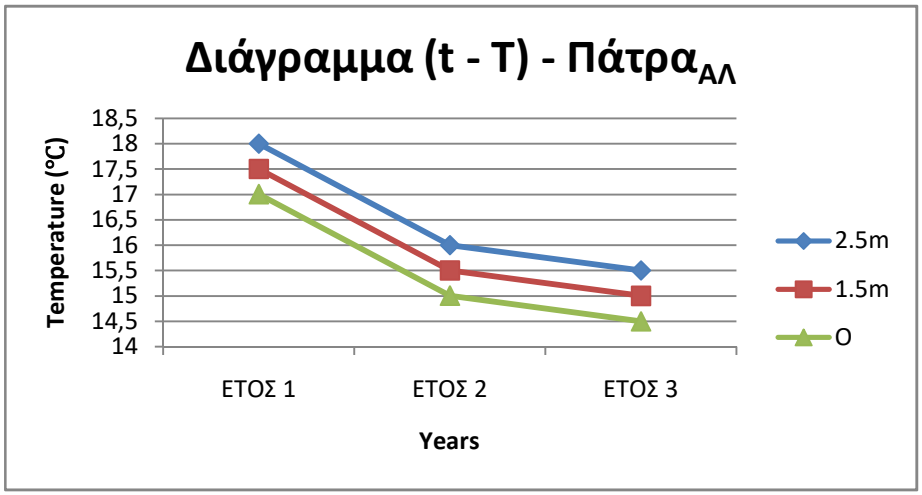
Διάγραμμα 13: *Διάγραμμα t – T για την Αθήνα για ξηρά πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)*



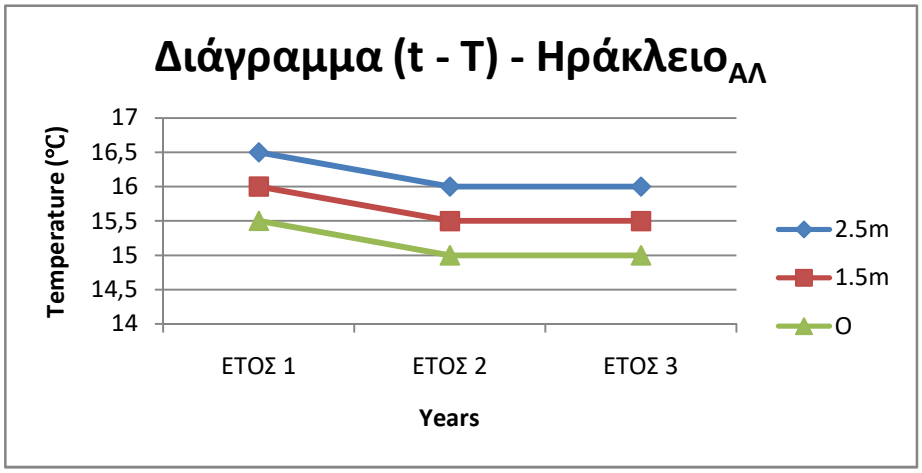
Διάγραμμα 14: *Διάγραμμα t – T για τη Θεσσαλονίκη για ξηρά πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (4 εναλλάκτες / 80m)*



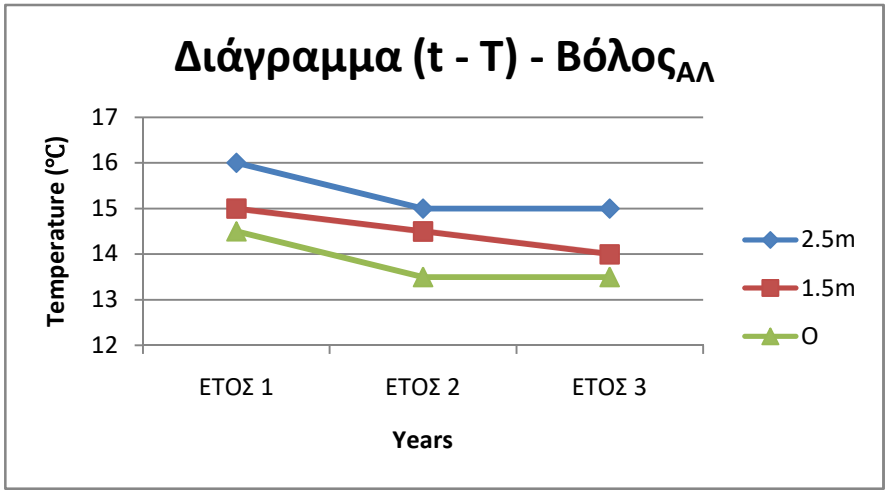
Διάγραμμα 15: *Διάγραμμα t – T για τη Λάρισα για ξηρά πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (5 εναλλάκτες / 100m)*



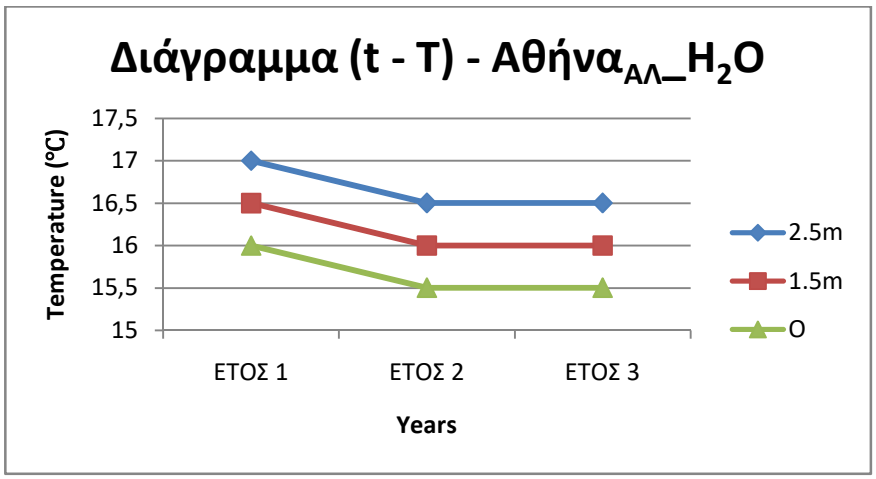
Διάγραμμα 16: *Διάγραμμα t – T για την Πάτρα για ξηρά πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (5 εναλλάκτες / 100m)*



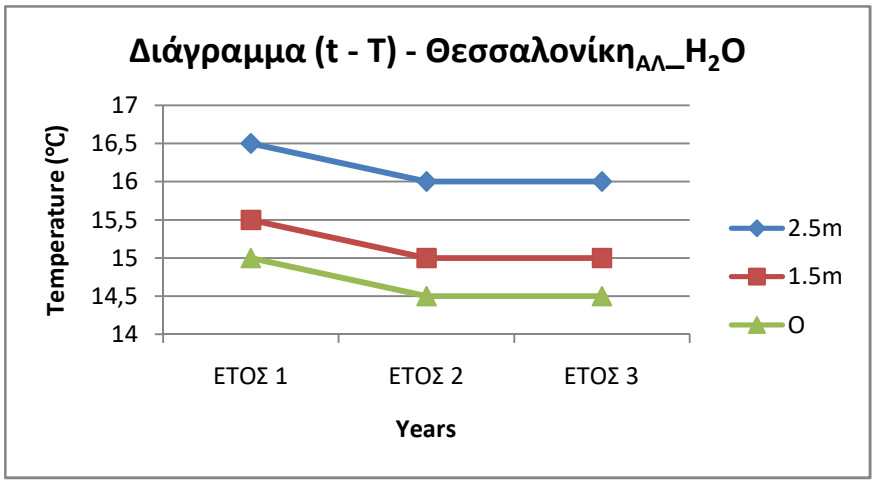
Διάγραμμα 17: *Διάγραμμα t – T για το Ηράκλειο για ξηρά πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)*



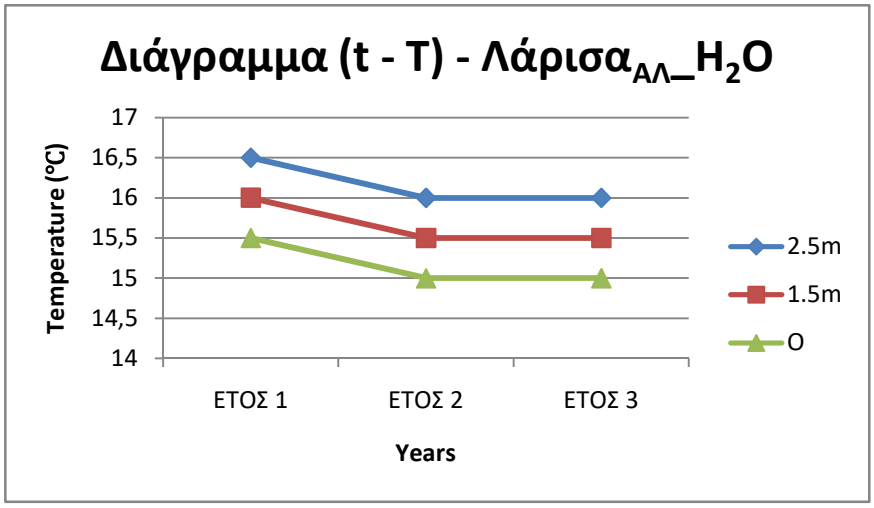
Διάγραμμα 18: *Διάγραμμα t – T για το Βόλο για ξηρά πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)*



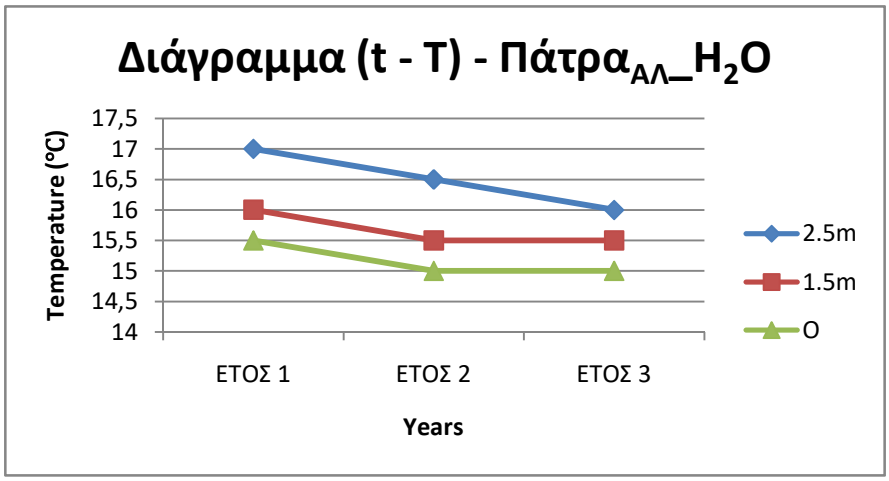
Διάγραμμα 19: *Διάγραμμα t – T Αθήνας για κορεσμένα με νερό πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)*



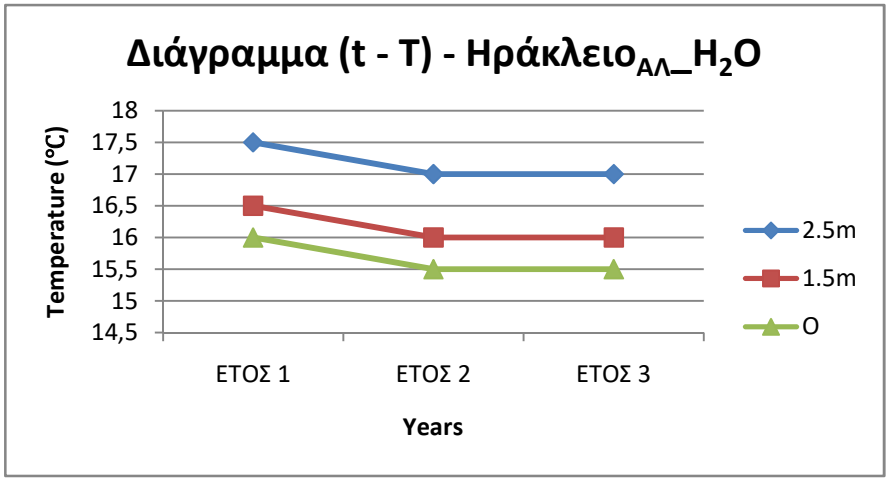
Διάγραμμα 20: *Διάγραμμα t – T Θεσ/νίκης για κορεσμένα με νερό πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)*



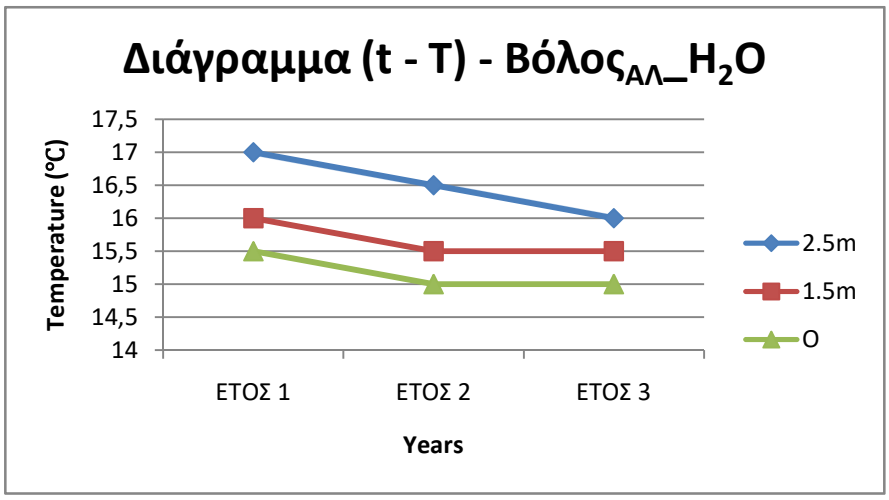
Διάγραμμα 21: *Διάγραμμα t – T Λάρισας για κορεσμένα με νερό πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)*



Διάγραμμα 22: *Διάγραμμα t – T Πάτρας για κορεσμένα με νερό πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)*



Διάγραμμα 23: *Διάγραμμα t – T Ηρακλείου για κορεσμένα με νερό πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)*



Διάγραμμα 24: *Διάγραμμα t – T Βόλου για κορεσμένα με νερό πετρώματα στο χώρο αλληλεπίδρασης (2 εναλλάκτες / 60m)*

Από τα παραπάνω διαγράμματα (**Διάγραμμα 13 – 24)** προκύπτουν οι ακόλουθες πληροφορίες. Αρχικά όπως συνέβη και στην περίπτωση των θερμοκρασιακών διαβαθμίσεων των ημικυκλίων, έτσι κι εδώ τα διαγράμματα δείχνουν μια φθίνουσα τάση των θερμοκρασιών με την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον σε κάθε διάγραμμα, η γραμμή Ο, ουσιαστικά αποτυπώνει τη μέγιστη δυνατή θερμοκρασία που εμφανίζεται στο νοητό ευθύγραμμο τμήμα μεταξύ των δυο γεωτρήσεων.

Προχωρώντας εξωτερικά οι θερμοκρασίες αυξάνονται σταδιακά, σχηματίζοντας ένα χώρο αλληλεπίδρασης των δυο γεωτρήσεων όπου οι θερμοκρασίες είναι αρκετά υψηλές για κάθε περιοχή. Οι θερμοκρασίες αυτές όπως είναι αναμενόμενο είναι υψηλότερες στην περίπτωση που έχουμε πετρώματα πληρωμένα με νερό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έχοντας ολοκληρώσει όλη την παραπάνω διαδικασία, μπορεί να γίνει σύνοψη σημαντικών συμπερασμάτων.

Αρχικά αναφέρεται ότι η επίλυση έγινε με βάση την ικανοποίηση της απαιτούμενης θερμότητας η οποία προέρχεται από την ανάγκη ων εν γένει απαιτήσεων ενός κτηρίου. Αυτή η προϋπόθεση δημιουργεί ένταση του θερμοκρασιακού δυναμικού μέχρι την ικανοποίηση. Έτσι προσδιορίζεται κάθε φορά η δυνατότητα λειτουργίας και οι συνθήκες λειτουργίας του γεωεναλλάκτη.

Στη συνέχεια ως στόχος είναι η απόδοση του συνολικού συστήματος για τα δεδομένα που έχουν επιλεγεί αρχικά για τον κώδικα. Επιδιώκεται η καλύτερη δυνατή απόδοση και παράλληλα όσο πιο οικονομική επιτρέπεται. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να εκτιμηθούν τα αποτελέσματα του κώδικα, να διαπιστωθούν προβληματικά αποτελέσματα και να προταθούν λύσεις βελτιστοποίησης του συστήματος, δηλαδή η μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά των τιμών που προκύπτουν από τον κώδικα σε σχέση με την αρχική θερμοκρασία του εδάφους, σε οικονομικά συμφέροντα πλαίσια.

Μελετώντας χαρακτηριστικά διαφορετικές περιοχές, με πετρώματα διαφορετικών θερμικών ιδιοτήτων διαπιστώθηκε η σημασία των τιμών τους, αφού παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερες τιμές έχουν οι θερμικές ιδιότητες (και κυρίως η θερμική αγωγιμότητα), οδηγεί σε βέλτιστες θερμοκρασίες (για την περίοδο του χειμώνα μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασιών) που επηρεάζουν θετικά τα τελικά αποτελέσματα.

Επιπλέον, διαπιστώνεται κάτι που εξ αρχής αναμένεται, ότι είναι σημαντική η παρουσία του νερού στα πετρώματα των περιοχών. Προέκυψε ότι επειδή η εμφάνιση του νερού αυξάνει σημαντικά τις τιμές θερμικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων, αυξάνει κατά συνέπεια το απαγόμενο ποσό θερμότητας, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση του συνολικού συστήματος. Γι' αυτό και σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές των θερμοκρασιών που προκύπτουν από πετρώματα κορεσμένα σε νερό, οδηγούν σε αποτελέσματα ικανοποιητικής απόδοσης. Σημειώνεται εδώ ότι δεν έχει ληφθεί υπόψη η εν δυνάμει κίνηση του νερού είτε ως ροή είτε ως φυσική συναγωγή.

Μέσω των απεικονίσεων που προκύπτουν από τον κώδικα προκύπτουν συμπεράσματα σε ότι αφορά στις θερμοκρασιακές διαβαθμίσεις γύρω από τα κέντρα των γεωτρήσεων. Μελετώντας το ανεξάρτητο ημικύκλιο κάθε γεώτρησης εμφανίζεται η θερμοκρασιακή σχέση των γεωτρήσεων με το έδαφος σε επιλεγμένες αποστάσεις. Κατά τη χειμερινή περίοδο με αύξηση της απόστασης διαπιστώνεται αύξηση και της θερμοκρασίας. Το περιβάλλον της γης και η αρχική κατάσταση λήφθηκε κοινό και ενιαίο στους 20 ^{o}C, τιμή που μπορεί με ακρίβεια να θεωρηθεί μέση για την περιοχή της Ελλάδας.

Αντιθέτως μεταξύ των δυο γεωτρήσεων υπάρχει αλληλεπίδραση των θερμοκρασιακών τιμών με τη μέγιστη επίδραση να βρίσκεται στο κέντρο του νοητού ευθύγραμμου τμήματος μεταξύ των γεωτρήσεων.

Στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των θερμοκρασιών που δημιουργήθηκαν από την λειτουργία του κατακόρυφου γεωθερμικού συστήματος για σειρά ετών κατά την 1η ημέρα του έτους (31η Δεκεμβριου-1η Ιανουαρίου).

Όπως προκύπτει από την ανάλυση των θερμοκρασιακών απεικονίσεων και των διαγραμμάτων, κατά την 1^{η} ημέρα κάθε έτους μια περιοχή ξηρού πετρώματος οδηγεί σε τελικές θερμοκρασιακές

διαφορές για την περίοδο του Ιανουαρίου της τάξης μεγέθους των 8-10K(^oC), ενώ οι αντίστοιχες θερμοκρασιακές διαφορές του κεκορεσμένου σε νερό πετρώματος είναι της τάξης των 6-8K(^oC). Από αυτό προκύπτει ότι η συμπεριφορά του κεκορεσμένου πετρώματος είναι κατά πολύ πιο αποδοτική από αυτή του ξηρού, εφόσον για τις ίδιες συνθήκες και τις ίδιες ενεργειακές απαιτήσεις οδηγεί σε μικρότερες θερμοκρασιακές διαφορές. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται και από τα βάθη των απαιτούμενων γεωτρήσεων, όπως είδαμε στα παραδείγματα της Θεσσαλονίκης, της Πάτρας και της Λάρισας. Σε αντίθεση με τα κεκορεσμένα πετρώματα όπου το βάθος 60 μέτρων των γεωτρήσεων έδινε ικανοποιητικά αποτελέσματα, τα ξηρά πετρώματα οδήγησαν σε κάποιες περιοχές σε προβληματικά αποτελέσματα, απαιτώντας γεωτρήσεις που έφταναν τα 80 ή και τα 100 μέτρα βάθος για να κριθούν αποδοτικά.Αυτό προφανώς συνεπάγεται με πιο ακριβές εγκαταστάσεις λόγω σημαντικής αύξησης του κόστους των γεωτρήσεων.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε ότι αφορά τον κώδικα, αυτός λαμβάνει υπόψη τους τις θερμικές και ψυκτικές απαιτήσεις του κτιρίου για το οποίο γίνεται η μελέτη. Έχοντας προσαρμόσει τι ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου στα ελληνικά δεδομένα (μέσες τιμές κλιματολογικών συνθηκών), παρατηρούνται θερμικές απαιτήσεις μεγαλύτερες από τις ψυκτικές κατά τη διάρκεια του έτους. Αυτό συνεπάγεται ετησίως απαγωγή θερμότητας (τη διάρκεια χειμερινών μηνών για θέρμανση) μεγαλύτερη από την πρόσδοση θερμότητας (τη διάρκεια θερινών μηνών για ψύξη).

Σε ότι αφορά τη συμπεριφορά του γεωθερμικού εναλλάκτη, πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο η ηλιακή ακτινοβολία, όσο και η θερμική ροή από κάτω προς τα πάνω, έχουν αμελητέα επίδραση, γι αυτό και μπορούν να αμεληθούν. Έτσι η συμπεριφορά του γεωθερμικού εναλλάκτη προσδιορίζεται από την υπάρχουσα ενεργειακή διαφορά μεταξύ του θερμικού και του ψυκτικού φορτίου στη διάρκεια του έτους.

Ως αποτέλεσμα, διαπιστώνεται η μείωση των θερμοκρασιών συναρτήσει του χρόνου κατά κάποιους βαθμούς, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4. Αυτό μπορεί να δώσει μια εικόνα της εξέλιξης σε βάθος χρόνου των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων και να επιτρέψει εκτιμήσεις για το μέχρι πότε το γεωθερμικό σύστημα θα είναι αποδοτικό υπό τις υπάρχουσες συνθήκες. Έτσι δίνεται η δυνατότητα προτάσεων αύξησης της απόδοσης σε τέτοιες περιπτώσεις, ή ακόμα και εγκατάλειψης του συστήματος αν η αύξηση της απόδοσης του είναι οικονομικά ασύμφορη.

Επιπλέον πρέπει να τονιστεί ότι ο κώδικας μπορεί να δώσει πληροφορίες και για άλλα δεδομένα. Θα μπορούσε παραδείγματος χάρη να μελετηθεί κάθε περιοχή σε μηνιαία βάση, να παρατηρηθούν οι προκύπτουσες θερμοκρασιακές διαβαθμίσεις σε γεωθερμικά σημαντικούς μήνες, όπως το Μάρτη όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες απαιτήσεις σε θέρμανση, ως τέλος της χειμερινής περιόδου, ή το Σεπτέμβρη που αποτελεί το τέλος της θερινής περιόδου.

Τέλος σε ότι αφορά τις προοπτικές και την εξέλιξη της παρούσας εργασίας, αρχικά θα μπορούσε να εξελιχθεί σε μεγαλύτερη ανάλυση ως προς τις περιόδους λειτουργίας και την ετήσια μεταβολή των θερμοκρασιών σε διάφορες αποστάσεις από τις γεωτρήσεις. Αντιστοίχως, στα πλαίσια βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων για τη συμπεριφορά των γεωεναλλακτών, θα μπορούσε να μεταβάλει την μορφή του ετησίου φορτίου.

Επιπλέον θα μπορούσαν να παραμετροποιηθούν στην κατασκευή του κώδικα και ενδιάμεσες τιμές κορεσμού ή να ληφθεί υπόψη και η ποσότητα του αέρα εντός ενός πετρώματος.

Ίσως σε επίπεδο διδακτορικής διατριβής θα ήταν ενδιαφέρουσα η παραμετροποίηση και της ροής των υδάτων ή η διαμόρφωση συνθηκών ύγρανσης των γεωτρήσεων για περεταίρω βελτίωση των μεγεθών και η συνεισφορά της αναπτυσσόμενης συναγωγής στο περιβάλλον των γεωθερμικών εναλλακτών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Τσιλιγκιρίδης, Γ.** *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.* 2007. ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ.

2. **Moomaw, W., Burgherr, G., Heath, G., Lenzen, M., Nyboer, J., Verbruggen, A.** *Annex II: Methodology in IPCC: Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.* 2011.

3. **Davies, J. H., Davies, D. R.** *Earth's surface heat flux.* 2010.

4. **Dickson M., Fanelli M.** *Geothermal energy: utilization and technology.* 2003. ISBN 92-3-103915-6.

5. **Τζάνης, Α.** *ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ.* 2010.

6. **Lubimova, E. A.** *Thermal history of the Earth.* 1968.

7. **Korenaga, J.** *Earth's heat budget: Clairvoyant geoneutrinos.* 2011.

8. **Sanders, R.** *Radioactive potassium may be major heat source in Earth's core.* 2003.

9. **Arevalo R., McDonough W., Luong M.** *The K/U ratio of the silicate Earth: Insights into mantle composition, structure and thermal evolution.* 2009.

10. **Βραχόπουλος Μ., Κούκου Μ., Καρύτσας Κ.** *ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ - ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.* 2015. ISBN: 978-960-603-270-7.

11. **Φύτικας, Μ., Ανδρίτσος, Ν.** *Γεωθερμία.* 2004.

12. **Antics, M., Bertani, R., Sanner, B.** *Summary of EGC 2013 Country Update Reports on Geothermal Energy in Europe, Proceedings, European Geothermal Congress 201.*

13. **Βραχόπουλος, Μ.** *Γεωθερμία, Σημειώσεις στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα Παραγωγή και Διαχείρηση Ενέργειας.* Αθήνα : ΕΜΠ, 2004.

14. Ευρωπαϊκή Οδηγία 2009/28/ΕΚ σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/ΕΚ και 2003/30/ΕΚ.

15. **Hochstein, M. P.** *Classification and assessment of geothermal resources.* 1990.

16. **Βραχόπουλος, Μ., Κούκου, Μ.** *Definition of horizontal geothermal heat exchanger behaviour, presented at 9th National Conference Energy Sources.* 2010.

17. **Παπανικολάου, Δ. Ι.** *Γεωλογία της Ελλάδας.* Αθήνα : s.n., 1986.

18. **Παπανικολάου, Δ., Λόζιος, Σ., Καροτσιέρης, Ζ.** *Τεκτονική Γεωλογία.* Αθήνα : s.n., 2012.

19. **Παπανικολάου, Δ., Σίδερης, Χ.** *Γεωλογία, Η Επιστήμη της Γης.* Αθήνα : s.n., 2007.

20. **Αντωνόπουλος, Κ.** *ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.* Αθήνα : s.n., 2008.