



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ

Ανάλυση Γεωθερμικών Πεδίων

Χρήστος Αναγνωστόπουλος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Επιβλέπων
Γεώργιος Σταμούλης

Λαμία, 2017



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF SCIENCE
INFORMATICS AND COMPUTATIONAL BIOMEDICINE

Geothermal Fields Analysis

Christos Anagnostopoulos

Master thesis

Georgios Stamoulis

Lamia, 2017



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ
«ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ,
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΜΕΓΑΛΟΥ ΟΓΚΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ»**

Ανάλυση Γεωθερμικών Πεδίων

Χρήστος Αναγνωστόπουλος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επιβλέπων
Γεώργιος Σταμούλης**

Λαμία, 2017

«Υπεύθυνη Δήλωση μη λογοκλοπής και ανάληψης προσωπικής ευθύνης»

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, και γνωρίζοντας τις συνέπειες της λογοκλοπής, δηλώνω υπεύθυνα και ενυπογράφως ότι η παρούσα εργασία με τίτλο [«τίτλος εργασίας»] αποτελεί προϊόν αυστηρά προσωπικής εργασίας και όλες οι πηγές από τις οποίες χρησιμοποίησα δεδομένα, ιδέες, φράσεις, προτάσεις ή λέξεις, είτε επακριβώς (όπως υπάρχουν στο πρωτότυπο ή μεταφρασμένες) είτε με παράφραση, έχουν δηλωθεί κατάλληλα και ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο ΔΗΛΩΝ

Ημερομηνία

Υπογραφή

Ανάλυση Γεωθερμικών Πεδίων

Χρήστος Αναγνωστόπουλος

Τριμελής Επιτροπή:

Γεώργιος Σταμούλης,

Αθανάσιος Λουκόπουλος

Ελευθέριος Τσουκαλάς

Επιστημονικός Σύμβουλος:

Αντώνιος Δαδαλιάρης

Ευχαριστίες

Αποτελεί προσωπική επιθυμία και υποχρέωση να εκφράσω την ειλικρινή ευγνωμοσύνη μου στον υπεύθυνο της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας, καθηγητή κο Δαδαλιάρη Αντώνιο για την εμπιστοσύνη, την υπομονή και τη στήριξή του σε αυτή την προσπάθεια!

Επίσης, είμαι ευγνώμων στα μέλη της επιτροπής μου για την υπομονή και την υποστήριξή τους καθ 'όλη τη διάρκεια της έρευνάς μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στο προσωπικό του Τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, όπου βρήκα ένα οικείο περιβάλλον από σπουδαίους ερευνητές.

Τέλος, και πάνω από όλους, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για όλα όσα είναι δύσκολο να περιγράψω με λόγια!

“Η παρούσα εργασία αφιερώνεται εξαιρετικά στους γονείς μου”

Περιεχόμενα

Abstract

Περίληψη

Εισαγωγή

Κεφάλαιο 1^ο: Η Γεωθερμική Ενέργεια

1.1. Γενικά.....	15
1.2. Ιστορική Αναδρομή.....	15
1.3. Μετάδοση της Γήινης Θερμότητας.....	17
1.3.1. Γεωθερμική βαθμίδα.....	19
1.4. Περιοχές Γεωθερμικού Ενδιαφέροντος.....	21
1.5. Το Γεωθερμικό Πεδίο.....	23
1.5.1. Η πηγή θερμότητας.....	24
1.5.2. Η τροφοδοσία με νερό.....	24
1.5.3. Ο γεωθερμικός ταμιευτήρας.....	24
1.5.4. Το κάλυμμα.....	25
1.6. Ορισμοί.....	25
1.7. Ταξινόμηση των Γεωθερμικών Πεδίων.....	27
1.7.1. Γεωθερμικά πεδία ζεστού νερού.....	27
1.7.2. Γεωθερμικά πεδία υγρού ατμού.....	28
1.7.3. Γεωθερμικά πεδία ξηρού ατμού.....	28
1.7.4. Γεωπιεσμένα συστήματα.....	28
1.7.5. Μαγματικοί θάλαμοι.....	29
1.7.6. Ξηρά γεωθερμικά πεδία.....	29
1.8. Επιφανειακές Εκδηλώσεις Ενός Γεωθερμικού Πεδίου.....	31
1.8.1. Θερμές πηγές.....	31
1.8.2. Θερμοπίδακες.....	32
1.8.3. Λασποπηγές.....	33
1.8.4. Ατμίδες.....	33
1.8.5. Ατμίζοντα εδάφη.....	34
1.9. Η Γεωθερμική Έρευνα.....	35
1.9.1. Γεωλογικές και υδρογεωλογικές μελέτες.....	36
1.9.2. Γεωχημικές μελέτες.....	36
1.9.3. Γεωφυσικές μελέτες.....	37
1.9.4. Διάνοιξη ερευνητικών γεωτρήσεων.....	37

Κεφάλαιο 2^ο: Χρήσεις της Γεωθερμικής Ενέργειας

2.1. Τρόποι Αξιοποίησης της Γεωθερμικής Ενέργειας.....	39
2.2. Χρήσεις των Γεωθερμικών Ρευστών Υψηλής Ενθαλπίας.....	40
2.2.1. Ξηρού ατμού.....	40

2.2.2. Στρόβιλοι υγρού ατμού.....	40
2.2.3. Δυναμικός κύκλος με πτητικό ρευστό ή κύκλος Rankine οργανικό ρευστό..	41
2.3. Χρήσεις των Γεωθερμικών Ρευστών Χαμηλής Ενθαλπίας.....	42
2.3.1. Άμεση θέρμανση χώρων.....	42
2.3.2. Αντλίες θερμότητας συνδεδεμένες στο έδαφος.....	43
2.3.3. Τηλεθέρμανση.....	44
2.3.4. Θέρμανση θερμοκηπίων.....	45
2.3.5. Γεωργία και κτηνοτροφία.....	46
2.3.6. Υδατοκαλλιέργειες και ιχθυοκαλλιέργειες.....	46
2.3.7. Βιομηχανικές εφαρμογές.....	47
2.3.8. Θέρμανση πισινών και ιατρικές εφαρμογές.....	48
2.3.9. Αφαλάτωση θαλασσινού νερού.....	49
2.3.10. Άλλες χρήσεις.....	49
2.4. Ανταγωνιστικότητα της Γεωθερμικής Ενέργειας.....	51
2.5. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις.....	52
2.5.1. Εκπομπές αερίων.....	53
2.5.2. Υδάτινη ρύπανση.....	54
2.5.3. Απόθεση στερεών αποβλήτων.....	54
2.5.4. Καθίζηση.....	55
2.5.5. Σεισμικότητα.....	55
2.5.6. Χρήση γης και οπτική ρύπανση.....	55
2.5.7. Θόρυβος.....	55
2.6. Κριτήρια Χωροθέτησης Εγκαταστάσεων.....	56
2.7. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Εκμετάλλευσης της Γεωθερμίας.....	57

Κεφάλαιο 3^ο: Η Γεωθερμική Ενέργεια στην Ελλάδα και Παγκοσμίως

3.1. Γενικά.....	59
3.2. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) στην Ελλάδα.....	59
3.3. Η Γεωθερμία στην Ευρώπη και Παγκοσμίως.....	63
3.4. Τα Γεωθερμικά Πεδία στην Ελλάδα.....	65
3.5. Ισχύουσα Νομοθεσία.....	73

Κεφάλαιο 4^ο: Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS)

4.1. Ορισμός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (G.I.S.) και ΑΠΕ.....	76
4.2. Ιστορική Αναδρομή των GIS.....	77
4.3. Πορεία των GIS στην Ελλάδα.....	81
4.4. Γενικές Επισημάνσεις.....	82
4.5. Εφαρμογές των GIS.....	83
4.6. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των GIS.....	85
4.7. Δομικά Μέρη ενός GIS.....	86
4.7.1. Μηχανικά μέρη (υλικό) - Hardware.....	87
4.7.2. Λογισμικό - Software.....	87
4.7.3. Δεδομένα - Data.....	89
4.7.4. Χρήστες - Users.....	93
4.8. Βασικές Λειτουργίες ενός GIS.....	94
4.8.1. Συλλογή, κωδικοποίηση και εισαγωγή δεδομένων.....	94

4.8.2. Αποθήκευση και ανάκτηση δεδομένων.....	94
4.8.3. Επεξεργασία, ανάλυση και μοντελοποίηση δεδομένων.....	95
4.8.4. Παρουσίαση δεδομένων και αποτελεσμάτων.....	96

Κεφάλαιο 5^ο: Εντοπισμός Γεωθερμικών Πεδίων με Χρήση του GIS

5.1. Μεθοδολογία της Γεωθερμικής Έρευνας σε Περιβάλλον GIS.....	98
5.2. Ανάλυση με Δυαδική Λογική.....	98
5.2.1. Βασικές διαδικασίες της Δυαδικής Λογικής.....	98
5.2.2. Διαμόρφωση κριτηρίων και δεδομένα εισόδου.....	99
5.2.3. Ανάπτυξη μοντέλου χωρικής ανάλυσης.....	101
5.2.4. Δημιουργία ζωνών επιρροής.....	102
5.2.5. Ομαδοποίηση κριτηρίων.....	104
5.2.6. Εξαγωγή αποτελέσματος.....	106
5.3. Ανάλυση με τη Λογική της Ασάφειας.....	108
5.3.1. Απεικόνιση ενός φυσικού προβλήματος με σύστημα Ασάφειας.....	109
5.3.2. Η έννοια της συνάρτησης συμμετοχής και οι μορφές της.....	110
5.3.3. Λεκτικές μεταβλητές και Ασαφείς κανόνες.....	112
5.3.4. Απασαφοποίηση του αποτελέσματος του συστήματος Ασάφειας.....	113
5.3.5. Υλοποίηση μοντέλου ασάφειας.....	113
5.3.6. Ασασοποίηση των δεδομένων εισόδου.....	114
5.3.7. Ανάπτυξη και επεξεργασία των κανόνων ασάφειας.....	116
5.3.8. Απασαφοποίηση.....	121

Κεφάλαιο 6^ο: Γενικά Συμπεράσματα

6.1. Συμπεράσματα.....	124
------------------------	-----

Βιβλιογραφία

Abstract

The contamination of the environment, an increase in energy demand over the last few years, as well as the disadvantages of fossil fuels, which are used extensively from the beginning of the 20th century, have led the world in search of new forms of energy. As is evident, the importation of renewable sources of global energy is one of the most important solutions to the above mentioned problems.

The geothermal energy is inexhaustible, though is very scattered, whilst it is rarely concentrated in one place, and can be often found at depths too large to be exploitable. An important advantage of geothermal energy is that it does not have the intermittent qualities of other renewable energy sources. The exploitation of geothermal energy in Greece is limited to isolated direct uses.

Geographic information systems (GIS) have become a useful tool for the formation of energy and environment policies. The existing RES dependence on the specific characteristics of each site and the total cost dependence on the spatial characteristics of a region, makes GIS a necessary tool in RES energy planning.

In this degree term paper is the study of geothermal energy and its applications in everyday life. Also aims to analyze the current situation and potentiality of larger geothermal fields in Greece. To conclude, in GIS environment and using different analytical methodologies attempt was made to identify areas of Greece with an increased probability of identifying geothermal fields, based on a series of criteria.

Initially in the first chapter, the definition of geothermal energy and some general information is given. Presented a historical overview, how is the standard of a geothermal field and how they are classified. It also describes the surface manifestations of a geothermal field.

In the second chapter, described and in detail, are the uses and applications of each geothermal energy form. All the technologies that are used for the exploitation of geothermal energy for electricity generation and for direct use are described in detail. Finally presenting the impact of geothermal energy use on the environment, as well as the advantages and disadvantages of geothermal energy and its applications.

In the third chapter, the evolution of the exploitation of geothermal energy in Greece and the world is recorded. Moreover, all geothermal fields of Greece are mentioned.

In the fourth chapter, reference is made to the Geographic Information System and how these can be used for the formation of energy and environment policies. Also a brief reference to the GIS applications as well as the advantages and disadvantages. Then the technology of GIS, their basic components and their basic functions are described.

In the fifth chapter, the theoretical basis of the different analytical methodologies for determining areas of Greece with an increased probability of identifying geothermal fields is presented. These methods are Boolean Logic and Fuzzy Logic.

Finally, in the sixth chapter, the conclusions that emerged from the analysis above are presenting.

Περίληψη

Η μόλυνση του περιβάλλοντος, η αύξηση της ενεργειακής ζήτησης τα τελευταία χρόνια, καθώς και τα μειονεκτήματα των ορυκτών καυσίμων, τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κόρον από τις αρχές του 20ου αιώνα, έχουν οδηγήσει την ανθρωπότητα στην αναζήτηση νέων μορφών ενέργειας. Όπως είναι προφανές, η εισαγωγή των ανανεώσιμων πηγών στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο αποτελεί μια από τις σημαντικότερες λύσεις στα παραπάνω προβλήματα.

Η γεωθερμική ενέργεια βρίσκεται σε αφθονία, αλλά είναι πολύ διεσπαρμένη, σπάνια συγκεντρώνεται και συχνά βρίσκεται σε βάθη πολύ μεγάλα για να μπορεί να αξιοποιηθεί. Σημαντικό πλεονέκτημα της γεωθερμίας, είναι ότι δεν παρουσιάζει τον διαλείποντα χαρακτήρα των άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας στην Ελλάδα, περιορίζεται σε μεμονωμένες άμεσες χρήσεις.

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) έχουν γίνει ένα χρήσιμο εργαλείο για την χάραξη ενεργειακής και περιβαλλοντικής πολιτικής. Η εξάρτηση των ΑΠΕ από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της κάθε τοποθεσίας και η ολική εξάρτηση του κόστους από τα χωρικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής, καθιστούν το GIS ένα απαραίτητο εργαλείο όσον αφορά τον ενεργειακό σχεδιασμό των ΑΠΕ.

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά τη γεωθερμική ενέργεια και τις εφαρμογές της στην καθημερινή ζωή. Επίσης αναλύεται η υπάρχουσα κατάσταση και οι δυνατότητες των μεγαλύτερων γεωθερμικών πεδίων της Ελλάδας. Τέλος, σε περιβάλλον γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και με την χρήση διαφορετικών αναλυτικών μεθοδολογιών έγινε προσπάθεια για τον προσδιορισμό περιοχών του Ελλαδικού χώρου με αυξημένη πιθανότητα εντοπισμού γεωθερμικών πεδίων, με βάση μια σειρά κριτηρίων.

Αρχικά στο πρώτο κεφάλαιο, δίνεται ο ορισμός της γεωθερμίας και κάποιες γενικές πληροφορίες. Παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή, πως είναι το πρότυπο ενός γεωθερμικού πεδίου και πως αυτά ταξινομούνται. Επίσης, περιγράφονται οι επιφανειακές εκδηλώσεις ενός γεωθερμικού πεδίου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφονται αναλυτικά οι χρήσεις και οι εφαρμογές της κάθε μορφής γεωθερμικής ενέργειας. Περιγράφονται λεπτομερώς όλες οι τεχνολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση της γεωθερμίας για ηλεκτροπαραγωγή και για άμεση χρήση. Τέλος παρουσιάζονται οι επιπτώσεις της χρήσης γεωθερμίας στο περιβάλλον καθώς επίσης και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της γεωθερμίας και των εφαρμογών της.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται μία καταγραφή της εξέλιξης της εκμετάλλευσης της γεωθερμίας στην Ελλάδα και τον κόσμο. Στην συνέχεια αναφέρονται όλα τα γεωθερμικά πεδία της Ελλάδας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και στο πως αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την χάραξη ενεργειακής και περιβαλλοντικής πολιτικής. Επίσης γίνεται μια σύντομη αναφορά στις εφαρμογές των GIS καθώς επίσης και στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους. Στην συνέχεια περιγράφεται η τεχνολογία των GIS, τα βασικά δομικά τους μέρη και οι βασικές λειτουργίες τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η θεωρητική βάση των διαφορετικών αναλυτικών μεθοδολογιών για τον προσδιορισμό περιοχών του Ελλαδικού χώρου με αυξημένη πιθανότητα εντοπισμού γεωθερμικών πεδίων. Οι μέθοδοι αυτοί είναι της Δυαδικής Λογικής και της Λογικής της Ασάφειας.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που βγήκαν από την ανάλυση των παραπάνω.

Εισαγωγή

Η ενέργεια είναι άμεσα συνδεδεμένη με κάθε πτυχή της ζωής του ανθρώπου. Είναι απαραίτητη για τη θέρμανση, τον κλιματισμό, το φωτισμό, τις μετακινήσεις, τις βιομηχανίες κ.α..

Στη σημερινή εποχή, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας προέρχεται από την εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων, όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Όμως από το τέλος της δεκαετίας του 1960 άρχισαν να αναγνωρίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της καύσης των ορυκτών καυσίμων και ο άνθρωπος άρχισε να ευαισθητοποιείται στο θέμα της προστασίας του περιβάλλοντος. Η ευαισθητοποίηση αυτή σε συνδυασμό με τις ενεργειακές κρίσεις της δεκαετίας του 1970 οδήγησαν στην ανάπτυξη τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας μέσω της εκμετάλλευσης ενεργειακά ανανεώσιμων πηγών. Η πτώση όμως των τιμών του πετρελαίου τη δεκαετία του 1980 και του 1990 λειτούργησε ανασταλτικά στην ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών, καθώς συνέχισε να προωθείται για οικονομικούς λόγους η εκμετάλλευση των συμβατικών πηγών ενέργειας.

Στη σημερινή εποχή, τα ορυκτά καύσιμα καλύπτουν περίπου το 81% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης. Το πετρέλαιο κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό με 35% και ακολουθεί ο άνθρακας με 25% και το φυσικό αέριο με 21%. Το υπόλοιπο μερίδιο αντιστοιχεί στις ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ) και την πυρηνική ενέργεια με ποσοστά 13% και 6% αντίστοιχα.

Η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση τετραπλασιάστηκε από το 1950. Το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης, τον τελευταίο αιώνα, έγινε στις αναπτυγμένες βιομηχανικά χώρες, που αποτελούν μόνο το 20% του παγκόσμιου πληθυσμού. Καθώς όλο και μεγαλύτερο τμήμα του πληθυσμού της γης βελτιώνει το βιοτικό του επίπεδο, η ενεργειακή ζήτηση συνεχίζει να αυξάνεται με υψηλούς ρυθμούς.

Έχοντας ως δεδομένο την ολοένα αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση, προβλέπεται να παρουσιαστούν μια σειρά από προκλήσεις και προβλήματα για την ανθρωπότητα, αν συνεχίσει να στηρίζει το ενεργειακό μέλλον της στην εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων. Τα κυριότερα από αυτά, είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η ατμοσφαιρική ρύπανση, οι κίνδυνοι ασφαλείας, τα υψηλά κόστη, η μείωση των αποθεμάτων και η άνιση κατανομή των ορυκτών καυσίμων. Μια λύση στα παραπάνω προβλήματα είναι η εισαγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη με όσο το δυνατόν υψηλότερο ποσοστό. Μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας αποτελεί και η γεωθερμία.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μία ήπια και πρακτικά ανεξάντλητη μορφή ενέργειας, η οποία αποτελεί φυσικό εγχώριο πλούτο που με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα μπορεί να καλύψει σημαντικό ποσοστό από τις ενεργειακές ανάγκες των κρατών. Η αξιοποίηση της για την παραγωγή ενέργειας παρουσιάζει ορισμένες ενδιαφέρουσες ιδιαιτερότητες και πλεονεκτήματα.

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) έχουν γίνει ένα χρήσιμο εργαλείο για την χάραξη ενεργειακής και περιβαλλοντικής πολιτικής. Η εξάρτηση των ΑΠΕ από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της κάθε τοποθεσίας και η ολική εξάρτηση του κόστους από τα χωρικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής, καθιστούν το GIS ένα απαραίτητο εργαλείο όσον αφορά τον ενεργειακό σχεδιασμό των ΑΠΕ.

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται με την χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, ο προσδιορισμός των περιοχών του Ελλαδικού χώρου με αυξημένη την πιθανότητα εντοπισμού γεωθερμικών πεδίων.

Κατά καιρούς, έχουν εφαρμοστεί σε ανάλογα προβλήματα και σε συνδυασμό με τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών διάφορες μεθοδολογίες. Τα αποτελέσματα τα οποία εξάγονται από τις περισσότερες μεθόδους υπακούουν στη δυαδική λογική (Boolean logic). Υπάρχει όμως και μια νέα μαθηματική λογική για τη δημιουργία μοντέλων απεικόνισης φυσικών προβλημάτων, αυτή της ασαφούς λογικής (Fuzzy logic), η οποία ανταποκρίνεται με μεγαλύτερη ευκολία στην ανακρίβεια και την απροσδιοριστία που υπάρχει στα φυσικά προβλήματα.

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει την εφαρμογή δύο μεθοδολογιών χωρικής ανάλυσης σε περιβάλλον γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών:

- Ανάλυση με βάση τη δυαδική λογική.
- Ανάλυση με τη λογική της ασάφειας.

Αναπτύσσεται η θεωρητική βάση των δύο αυτών μεθοδολογιών χωρικής ανάλυσης και παρουσιάζεται αναλυτικά η εφαρμογή και η αξιολόγησή τους.

Κεφάλαιο 1^ο

Η Γεωθερμική Ενέργεια

1.1. Γενικά

Η επιφάνεια της Γης είναι εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία και τις κλιματικές συνθήκες, επομένως και η θερμοκρασία της επηρεάζεται από τους παράγοντες αυτούς. Πέρα από ένα βάθος της τάξης των 10-20 m η θερμοκρασία αυξάνει προχωρώντας προς το κέντρο της Γης. Το εσωτερικό της Γης δηλαδή διαθέτει ποσότητες θερμότητας, γεγονός εξάλλου που επιβεβαιώνεται και από τη δράση των ηφαιστειών και την ύπαρξη θερμών πηγών και άλλων παρόμοιων εκδηλώσεων στην επιφάνεια της.

Η φυσική γηγενής θερμότητα, δηλαδή η θερμική ενέργεια που περικλείεται στο εσωτερικό της Γης, λέγεται **Γεωθερμία** ή **γεωθερμική ενέργεια** (geothermal energy).

Η Γεωθερμία είναι ο εφαρμοσμένος επιστημονικός κλάδος της Γεωφυσικής, που εξετάζει τη ροή και την κατανομή θερμότητας στο εσωτερικό της Γης, καθώς και την κυκλοφορία και την εκμετάλλευση υπόγειων θερμών ρευστών.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια **εναλλακτική, ήπια και ανανεώσιμη μορφή ενέργειας**. Συγκαταλέγεται στις εναλλακτικές μορφές (alternative energy form) σε αντιδιαστολή με τις συμβατικές ενεργειακές πηγές (άνθρακας, πετρέλαιο), που αποτελούν κατά κάποιον τρόπο τα παραδοσιακά καύσιμα. Ο όρος ήπια αναφέρεται τόσο στον χαμηλό συντελεστή απόδοσης κατά τη μετράτοπή της γεωθερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική, όσο και στη φιλικότητα της (μη μολύνουσα) προς το περιβάλλον. Κατά μια άποψη η γεωθερμική ενέργεια είναι ανανεώσιμη (renewable), γιατί σύμφωνα με τα ανθρώπινα μέτρα είναι πρακτικά ανεξάντλητη. Αναφέρεται χαρακτηριστικά, ότι αν ήταν δυνατή η ψύξη του στερεού φλοιού της Γης μόνο κατά 1°C, θα εκλυόταν ποσότητα ενέργειας ικανή να καλύψει τις ανάγκες της ανθρωπότητας για 27.000 χρόνια!

1.2. Ιστορική Αναδρομή

Όπως είναι γνωστό οι θερμές πηγές θεωρούνταν από την αρχαιότητα ότι είχαν θεραπευτικές και υπερφυσικές ιδιότητες, και γι' αυτό το λόγο τα Ασκληπιεία αλλά και άλλοι ιεροί χώροι, βρίσκονταν κοντά σε θερμές πηγές, αυτό διαπιστώνετε από τα πρώτα κείμενα της αρχαίας Ελλάδας. Υπάρχουν επίσης πολλές παραστάσεις κυρίως σε αγγεία, όπου συνδέουν τις θερμές πηγές με τη χρήση του νερού για ιαματικούς αλλά και θρησκευτικούς σκοπούς.

Η χρήση των φυσικών θερμών ρευστών ήταν γνωστή ακόμα και στους αρχαίους ανατολικούς λαούς με πληθώρα μαρτυριών στη μυθολογία αλλά και στην ιστορία τους. Υπάρχουν επίσης μαρτυρίες για «γεωθερμικά» θερμοκήπια όπου ο Γαληνός παρήγαγε φρούτα εκτός εποχής και τα πρόσφερε στους καλεσμένους του τον 2ο αιώνα μ.Χ.

Τον 1ο αιώνα όταν οι Ρωμαίοι κατέκτησαν τις περιοχές κοντά στη σημερινή πόλη Bath της Αγγλίας χρησιμοποίησαν τις θερμές πηγές για τα δημόσια λουτρά αλλά και για επιδαπέδια θέρμανση. Το κόστος χρήσης των συγκεκριμένων λουτρών θεωρητικά είναι η πρώτη εμπορική χρήση της γεωθερμικής ενέργειας.

Κατά την περίοδο μεταξύ 16ου και 17ου αιώνα, δηλαδή την περίοδο που κατασκευάστηκαν τα πρώτα μεταλλεία που ήταν σε βάθος μερικών εκατοντάδων μέτρων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, οι άνθρωποι με την βοήθεια κάποιων απλών φυσικών παρατηρήσεων, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία της γης αυξάνετε με το βάθος. Οι πρώτες μετρήσεις με θερμόμετρο έγιναν κατά πάσα πιθανότητα το 1740, σε ένα ορυχείο κοντά στο Belfort της Γαλλίας. Ήδη από το 1870 για την μελέτη της θερμικής κατάστασης του εσωτερικού της γης χρησιμοποιούνταν κάποιες προχωρημένες για την εποχή επιστημονικές μέθοδοι, ενώ η θερμική ισορροπία και εξέλιξη της κατανοήθηκαν καλύτερα τον 20ο αιώνα, με την ανακάλυψη του ρόλου της «ραδιενεργής θερμότητας».

Στο Larderello της Ιταλίας στις αρχές του 19ου αιώνα πραγματοποιήθηκε η πρώτη βιομηχανική αξιοποίηση της γεωθερμίας. Εκεί λειτουργούσε μια χημική βιομηχανία για την παραγωγή βορικού οξέος από τα βοριούχα θερμά νερά που ανέβλυζαν από τις φυσικές πηγές ή αντλούνταν από ρηχές γεωτρήσεις. Η παραγωγή του βορικού οξέος γίνονταν με εξάτμιση των βοριούχων νερών μέσα σε σιδερένιους λέβητες, χρησιμοποιώντας ως καύσιμη ύλη ξύλα. Το 1827, ο Francesco Larderel, ιδρυτής αυτής της βιομηχανίας, προτίμησε αντί για καύση ξύλων, την ανάπτυξη ενός συστήματος προκειμένου να μπορεί να γίνει η χρήση της θερμότητας των βοριούχων ρευστών στην διαδικασίας εξάτμισης. Περίπου την ίδια εποχή ξεκίνησε και η εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του φυσικού αερίου, ο γεωθερμικός ατμός χρησιμοποιήθηκε για την ανέλκυση των ρευστών, αρχικά με κάποιους πρωτόγονους αέριους ανυψωτήρες και στη συνέχεια με παλινδρομικές και φυγοκεντρικές αντλίες και βαρούλκα.

Μεταξύ 1910 και 1940 στην ίδια περιοχή ο χαμηλής πίεσης ατμός άρχισε να χρησιμοποιείται για θέρμανση βιομηχανικών κτιρίων, κατοικιών και θερμοκηπίων. Στη συνέχεια ολοένα και περισσότερες χώρες άρχισαν να αναπτύσσουν τους γεωθερμικούς πόρους σε βιομηχανική κλίμακα. Το 1892 το πρώτο γεωθερμικό σύστημα τηλε-θέρμανσης τέθηκε σε λειτουργία στο Boise του Άινταχο των Η.Π.Α η Ισλανδία το 1928 ξεκίνησε την εκμετάλλευση των γεωθερμικών ρευστών (κυρίως θερμών νερών) για την θέρμανση κατοικιών.

Το 1904, έγινε η πρώτη απόπειρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικό ατμό και πάλι στο Larderello της Ιταλίας. Αυτή η πειραματική προσπάθεια σημειώθηκε με επιτυχία και έδωσε μια ξεκάθαρη ένδειξη μιας μορφής εκμετάλλευσης, που επρόκειτο έκτοτε να αναπτυχθεί σημαντικά.

Το 1942 η εγκατεστημένη γεωθερμο-ηλεκτρική ισχύς ανερχόταν στα 127.650kWe. σύντομα πολλές χώρες ακολούθησαν το παράδειγμα της Ιταλίας. Το 1919 κατασκευάστηκαν οι πρώτες γεωθερμικές γεωτρήσεις στο Βερρυ της Ιαπωνίας, το 1921 ακολούθησαν εκείνες στο The Geysers της Καλιφόρνιας των Η.Π.Α το 1958 ένα μικρό εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τέθηκε σε λειτουργία στη Νέα Ζηλανδία, ένα άλλο στο Μεξικό το 1959, στις Η.Π.Α το 1960 και ακολούθησαν πολλά άλλα σε διάφορες χώρες.

Η ανταγωνιστικότητα της γεωθερμίας σε σχέση με άλλες μορφές ενέργειας έγινε εντονότερη μετά το 2ο παγκόσμιο Πόλεμο. Επιπλέον, η ενέργεια αυτή δε

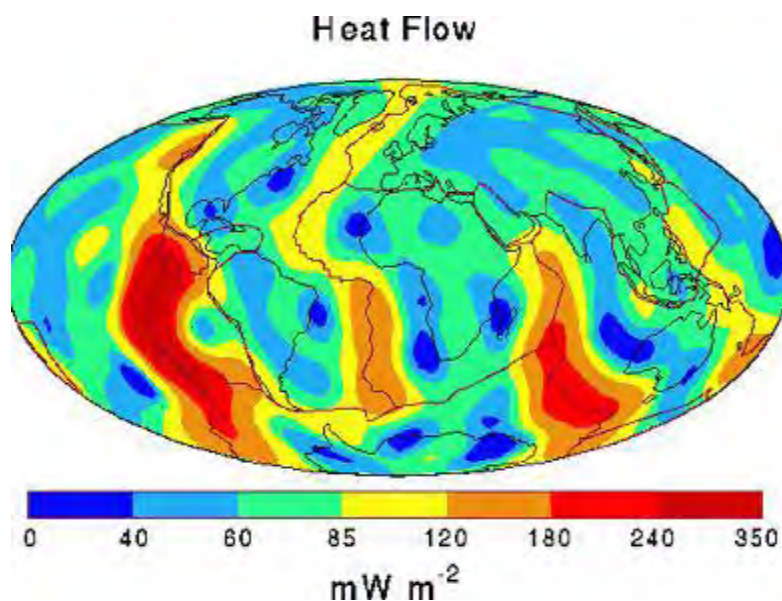
χρηιαζόταν να εισαχθεί από άλλες χώρες, όπως συμβαίνει με τα ορυκτά καύσιμα ενώ σε πολλές περιπτώσεις αποτελούσε τον μοναδικό διαθέσιμο εγχώριο ενεργειακό πόρο. Στη δεκαετία του 1970, λόγω της πετρελαϊκής κρίσης, δόθηκε σημαντική ώθηση στην ανάπτυξη της γεωθερμίας, ακόμα και σε περιοχές με σχετικά χαμηλή γεωθερμική βαθμίδα, όπως είναι η λεκάνη του Παρισιού. Το 2015 παγκοσμίως η ηλεκτροπαραγωγή ανέρχεται στα 12.600 MW και η παραγωγή θερμότητας είναι πολλαπλάσια.

1.3. Μετάδοση της Γήινης Θερμότητας

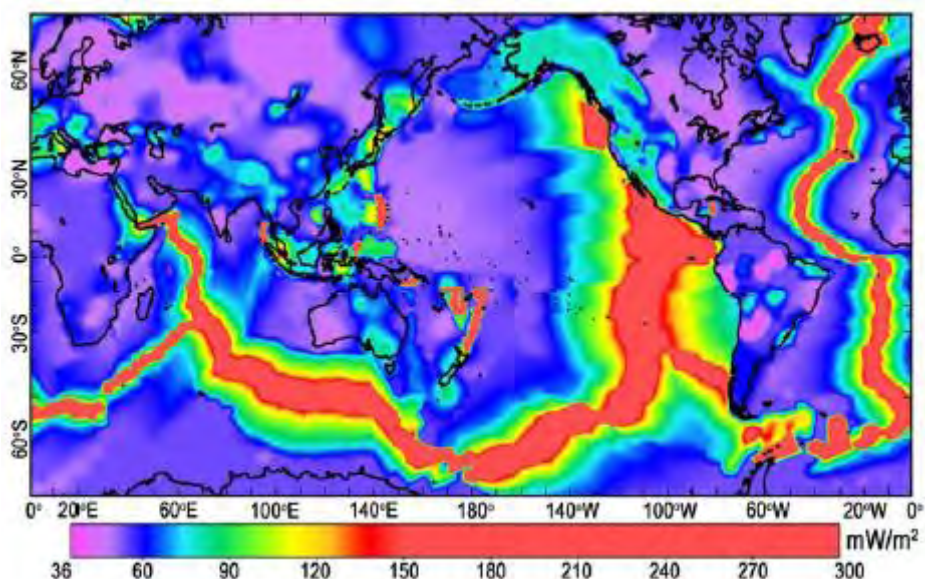
Ανεξάρτητα από την πηγή προέλευσης, γεγονός είναι ότι μια ποσότητα θερμότητας μεταδίδεται από το εσωτερικό της Γης προς την επιφάνειά της. Η ποσότητα αυτή ανηγμένη στη μονάδα του χρόνου λέγεται **παροχή** ή **ροή θερμότητας** (heat flow). Μονάδες μέτρησης της γήινης θερμικής ροής είναι το $1 \text{ mcal/cm}^2 \cdot \text{sec} = 1 \text{ hfu}$ (heat flow unit) και το 1 mW/m^2 ($1 \text{ hfu} = 41,868 \text{ mW/m}^2$). Η μέση τιμή για όλη τη γη είναι $1,4 \text{ mcal/cm}^2 \cdot \text{sec}$.

	Παροχή ενέργειας (hfu)
Ηλιακή ενέργεια	32.250
Γεωθερμία	1,4
Μείωση ταχύτητας περιστροφής	0,03
Ηφαίστεια, θερμοπίδακες	0,013
Σεισμική δραστηριότητα	0,001
Κοσμική ακτινοβολία	0,0001

Πίνακας 1.1: Στην επιφάνεια της Γης. (Πηγή: Lee W.H.K. & Ueda S, 1965).

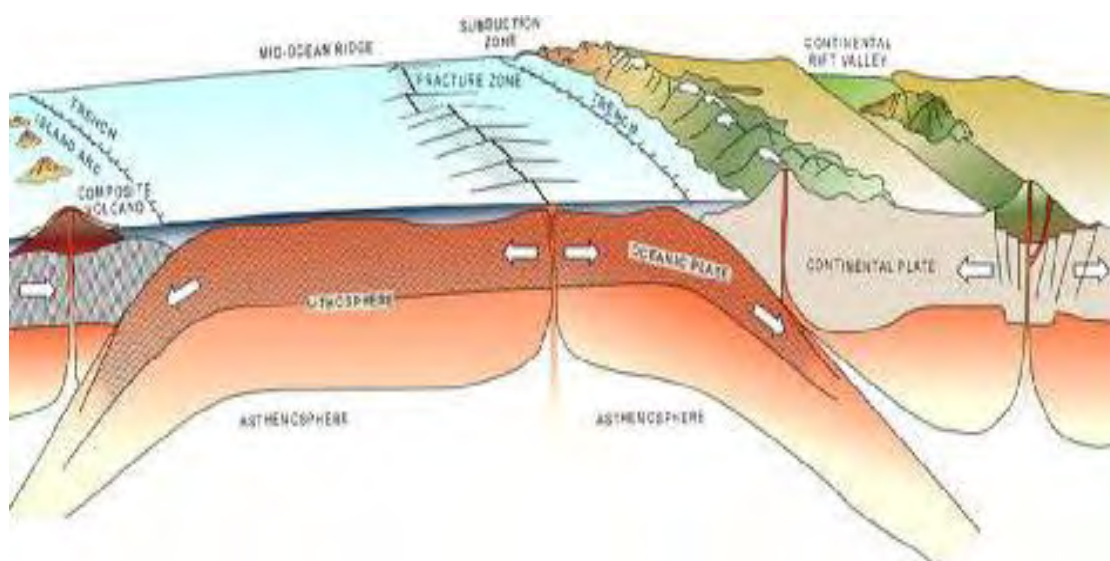


Εικόνα 1.1: Γήινη θερμική ροή (heat flow unit).



Εικόνα 1.2: Γήινη θερμική ροή (heat flow unit). (Πηγή: Bird P., Liu Z. & Rucker W.K., 2008).

Η γηγενής θερμότητα δεν μπορεί να προέρχεται από χημικές αντιδράσεις κοντά στην επιφάνεια, αλλά οπωσδήποτε πρέπει να υπάρχει μια άλλη πηγή θερμότητας (η ραδιενέργεια) ικανή να παράγει και να διατηρεί την παρατηρούμενη ροή μέσα στο γεωλογικό χρόνο. Η θερμική ροή σε μια περιοχή εξαρτάται από την τεκτονική και τη μαγματική δραστηριότητα, καθώς και από την ηλικία των σχηματισμών. Πολύ χαμηλές τιμές είναι συνήθεις στους ωκεανούς λίγες 100-ντάδες km μακριά από τις ωκεάνιες ράχες. Οι ηπειρωτικές ασπίδες παρουσιάζουν χαμηλές τιμές. Υψηλές τιμές απαντώνται στα περιθώρια σύγχρονων οροσειρών, στις ωκεάνιες ράχες και στα νησιωτικά τόξα, ενώ πολύ υψηλές τιμές απαντώνται σε ηφαιστειογενείς περιοχές.



Εικόνα 1.3: Η θερμική ροή εξαρτάται: γεωτεκτονικό πλαίσιο, μαγματική δραστηριότητα, ηλικία πετρωμάτων.

	Θερμική ροή (hfu)
Ηπειρωτικές ασπίδες	0,6 – 1,1
Ωκεάνιες λεκάνες	1,3 – 1,6
Περιοχές παλιάς ορογένεσης	1,3 – 1,7
Περιοχές πρόσφατης ορογένεσης	1,7 – 2,0
Μεσοωκεάνιες ράχες	2,5 – 3,0
Περιοχές ενεργής ηφαιστειότητας	2,0 - 20

Πίνακας 1.2: Γεωθερμική Ροή. (Πηγή: Lee W.H.K. & Ueda S, 1965).

Η μετάδοση της θερμότητας γίνεται από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σημείο. Η μετάδοση αυτή γίνεται:

- Με αγωγή.
- Ρεύματα μεταφοράς ή συναγωγή.
- Με την ακτινοβολία.

Η μετάδοση της γήινης θερμότητας από το εσωτερικό της Γης προς την επιφάνειά της γίνεται με τους δύο πρώτους τρόπους, με την αγωγή και με τα ρεύματα μεταφοράς.

Γεωθερμική Βαθμίδα.

Είναι γνωστό από την Φυσική, ότι η θερμότητα μεταδίδεται με αγωγή στα στερεά, μεταφορά στα ρευστά και ακτινοβολία στο κενό. Η μετάδοση της θερμότητας της γεωθερμικής ενέργειας γίνεται με **αγωγή** (conduction) στα πετρώματα και με **μεταφορά** (convection) στα υπόγεια νερά.

Στην περίπτωση της μετάδοσης της θερμότητας μέσω αγωγής στα πετρώματα, η ροή θερμότητας Q μεταξύ δύο σημείων που βρίσκονται στην ίδια κατακόρυφη ευθεία είναι:

Μετάδοση με αγωγή

$$Q = k \frac{T_1 - T_2}{\Delta x}$$

όπου:

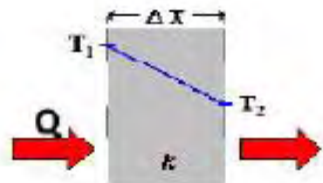
Q θερμική ροή

k συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

$T_1 - T_2$ διαφορά θερμοκρασίας 2 σημείων

Δx απόσταση 2 σημείων

$\frac{T_1 - T_2}{\Delta x}$ **γεωθερμική βαθμίδα**



Ο λόγος dT/dx λέγεται **γεωθερμική βαθμίδα** (geothermal gradient) και εκφράζει την αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος από την επιφάνεια της Γης. Πολλές φορές ονομάζεται και **γεωθερμίδα** ή **θερμοβαθμίδα**. Μετριέται συνήθως σε $^{\circ}\text{C}$ ή K ανά 100m ή 1km ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$). Πολλές φορές χρησιμοποιείται και το αντίστροφο της γεωθερμικής βαθμίδας (σε $\text{m}/^{\circ}\text{C}$), δηλαδή το βάθος που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία κατά 1°C . Αυτό καμιά φορά προκαλεί σύγχυση, ιδιαίτερα όταν ονομάζεται εσφαλμένα γεωθερμική βαθμίδα.

Η μέση γεωθερμική βαθμίδα στον φλοιό της Γης είναι περίπου $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (κανονική γεωθερμική βαθμίδα). Σε περιοχές με γεωθερμική βαθμίδα αρκετά διαφορετική από την μέση τιμή υπάρχει **γεωθερμική ανωμαλία** (geothermal anomaly). Η γεωθερμική ανωμαλία μπορεί να είναι **θετική** ($>3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) ή **αρνητική** ($<3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$). Για παράδειγμα θετική ανωμαλία διαπιστώνεται στη Σαντορίνη ($12^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) και στη Μήλο ($30^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) και αρνητική στην Καναδική ασπίδα ($0,7^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) και στην Ν. Αφρική ($1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$). Η γεωθερμική βαθμίδα μετριέται σε γεωτρήσεις και υπόγεια μεταλλεία.

Γεωθερμική Βαθμίδα.

- Μέση τιμή $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ κανονική
- Αρνητική γεωθερμική ανωμαλία $<$ κανονικής
- Θετική γεωθερμική ανωμαλία $>$ κανονικής

Ο συντελεστής **θερμικής αγωγιμότητας K** (thermal conductivity) εξαρτάται από την ορυκτολογική σύσταση, το πορώδες και την υγρασία των πετρωμάτων. Θεωρώντας ότι η θερμική ροή είναι κατά προσέγγιση σταθερή στα περισσότερα σημεία του πλανήτη (εκτός των περιοχών με γεωθερμικές ανωμαλίες), αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας σημαίνει μείωση της γεωθερμικής βαθμίδας, δηλαδή όσο πιο αγωγίμο είναι ένα πέτρωμα, τόσο μικρότερες θερμοκρασιακές διαφορές υπάρχουν μέσα στην μάζα του.

γρανίτης	6 – 9	δολομίτης	9 – 14
δολερίτης	7 – 8	ψαμμίτης	4 – 11
γνεύσιος	5 – 11	σχίστης	3 – 6
Χαλαζίτης	7 – 19	εβαπορίτης	13 – 17
ασβεστόλιθος	4 – 7	χαλαρά ιζήματα	1,7 – 2,4

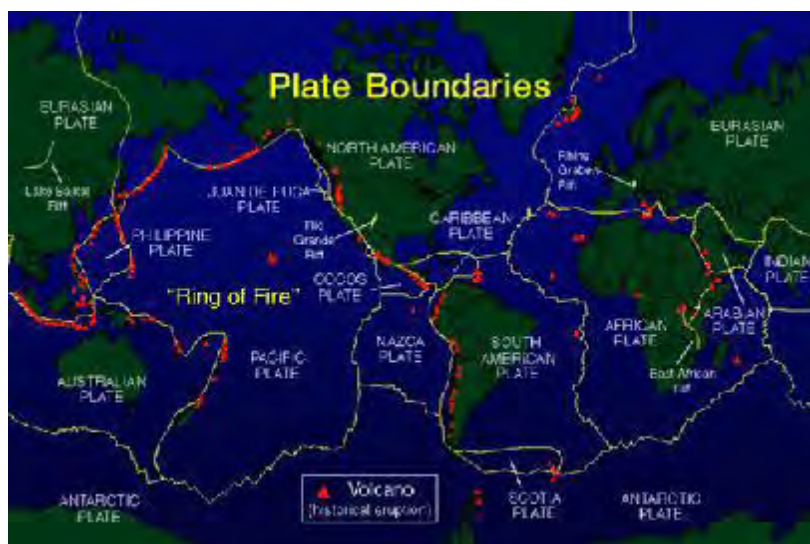
(για σύγκριση: φελιζόλ 0,083 και άργυρος 1,000)

Πίνακας 1.3: Θερμική αγωγιμότητα των πετρωμάτων (σε mcal/cm·sec·°C). (Πηγή: Armstead et al, 1973).

Η γεωθερμική βαθμίδα δεν παραμένει σταθερή με το βάθος. Αν συνέβαινε κάτι τέτοιο, τότε με κανονική γεωθερμική βαθμίδα η θερμοκρασία στο κέντρο της Γης (σε βάθος 6.371 km) θα έφτανε τους 200.000 °C. Επομένως η γεωθερμική βαθμίδα πρέπει να μειώνεται προς το εσωτερικό της Γης.

1.4. Περιοχές Γεωθερμικού Ενδιαφέροντος

Περιοχές με αυξημένη θερμική ροή, επομένως με θετική γεωθερμική ανωμαλία, είναι οι περιοχές που χαρακτηρίζονται από μαγματική δραστηριότητα.



Εικόνα 1.4: Μαγματική δραστηριότητα.

Έντονη μαγματική δραστηριότητα παρατηρείται κυρίως στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών. Οι πιο σημαντικές περιοχές βρίσκονται σε μεσσοκεάνιες ράχες (mid-oceanic ridge), εκεί δηλαδή όπου δύο ωκεάνιες πλάκες αποκλίνουν και σχηματίζεται νέος ωκεάνιος φλοιός. Η γεωθερμική ροή είναι περίπου 5 φορές μεγαλύτερη της μέσης τιμής αλλά οι περιοχές αυτές δεν έχουν σχεδόν κανένα πρακτικό γεωθερμικό ενδιαφέρον, γιατί βρίσκονται συνήθως στον πυθμένα των

ωκεανών. Μόνο σε λίγα σημεία εμφανίζονται πάνω από την στάθμη της θάλασσας, όπως π.χ. σε ορισμένα νησιά του Ατλαντικού ωκεανού (Ισλανδία, Αζόρες).

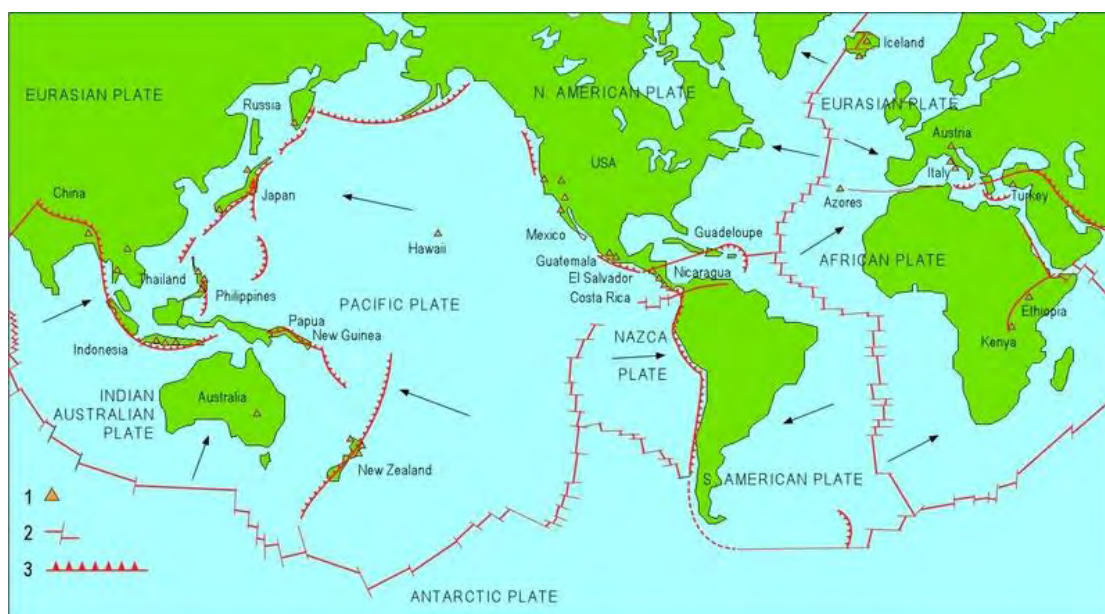
Μαγματική δράση εμφανίζεται κατά την σύγκλιση των λιθοσφαιρικών πλακών, σε ζώνες βύθισης (subduction zone). Πρόκειται για τις περιοχές των νησιωτικών και ηφαιστειακών τόξων και κορδιλλιέρων. Μεγάλες ποσότητες μάγματος ανεβαίνουν από τον μανδύα στις περιοχές αυτές. Οι γεωθερμικές ανωμαλίες έχουν τιμές 3 περίπου φορές μεγαλύτερες από την μέση τιμή της θερμικής ροής. Χαρακτηριστικά γεωθερμικά πεδία βρίσκονται στην Ινδονησία, Χιλή, Ιαπωνία, Νότιο Αιγαίο.

Αυξημένη θερμική ροή παρατηρείται και στα ηπειρωτικά βυθίσματα (continental rift valley), που οφείλεται στην άνοδο του μάγματος σε περιοχές διάρρηξης των ηπειρωτικών πλακών, όπως είναι η τεκτονική τάφρος του Άνω Ρήνου στη Γερμανία, η Παννονική πεδιάδα στην Ουγγαρία, το Ρίο Γκράντε στο Νέο Μεξικό.

Θερμικές ανωμαλίες διαπιστώνονται και στο εσωτερικό των λιθοσφαιρικών πλακών. Γνωστές ανωμαλίες στο εσωτερικό ωκεάνιων πλακών αποτελούν οι θερμές κηλίδες (hot spot), όπως είναι το σύμπλεγμα των νησιών της Χαβάης στο εσωτερικό της πλάκας του Ειρηνικού. Επίσης στο εσωτερικό των ηπειρωτικών πλακών δημιουργούνται διογκώσεις του φλοιού (swellings) με αυξημένες θερμικές ροές όπως σε περιοχές στην Αλγερία, Νίγηρας, Νιγηρία και Ιταλία.

Περιοχές γεωθερμικού ενδιαφέροντος:

- Απόκλιση λιθοσφαιρικών πλακών
- Σύγκλιση λιθοσφαιρικών πλακών
- Τεκτονικές τάφρους
- Περιοχές θερμών κηλίδων
- Περιοχές διογκώσεων



Εικόνα 1.5: Οι κυριότερες γεωθερμικές περιοχές. (Πηγή: Mary H. Dickson and Mario Fanelli, What is Geothermal Energy?, 2004).

Τεκτονικές πλάκες, μεσωκεάνιες ράχες, ωκεάνιες τάφροι, ζώνες καταβύθισης και γεωθερμικά πεδία. Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών προς τις ζώνες καταβύθισης.

1. Γεωθερμικά πεδία όπου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια
2. Μεσωκεάνιες ράχες που τέμνονται από μεγάλα ρήγματα μετασχηματισμού
3. Ζώνες καταβύθισης, όπου η βυθιζόμενη πλάκα κάμπτεται προς τα κάτω και λιώνει μέσα στην ασθενόσφαιρα.

1.5. Το Γεωθερμικό Πεδίο

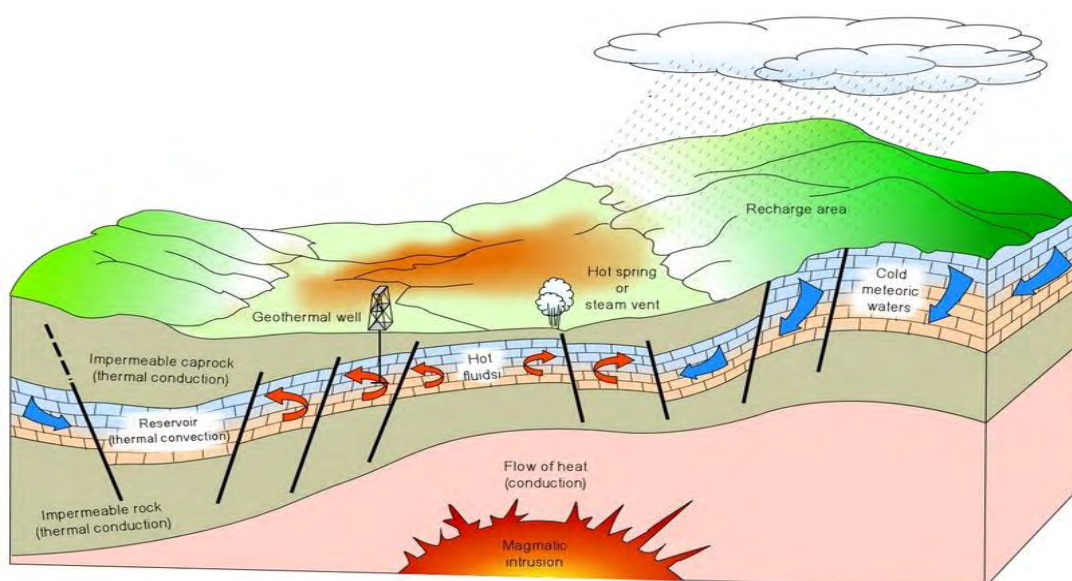
Ο συγκεκριμένος χώρος ο οποίος παρουσιάζει θετική γεωθερμική ανωμαλία καλείται **γεωθερμικό πεδίο** (geothermal field).

Ωστόσο ακόμα και σε περιοχές με πολύ μεγάλες θετικές ανωμαλίες, η φυσική ροή της γήινης θερμότητας προς την επιφάνεια μπορεί να είναι πολύ μικρή, ώστε να είναι δυνατή η εκμετάλλευσή της. Απαιτείται πολύ μεγαλύτερη ροή θερμότητας, που εξασφαλίζεται μόνο με μεταφορά θερμότητας, δηλαδή με τη μετακίνηση μαζών θερμών ρευστών. Όπως ακριβώς συμβαίνει και σε μια εγκατάσταση κεντρικής θέρμανσης όπου η θερμική ενέργεια μεταφέρεται με το νερό, έτσι και εδώ φορέας της γήινης θερμικής ενέργειας είναι το υπόγειο νερό.

Το Πρότυπο του Γεωθερμικού Πεδίου.

Οι προϋποθέσεις για την ύπαρξη ενός γεωθερμικού πεδίου είναι:

- Η πηγή θερμότητας.
- Η τροφοδοσία με νερό.
- Ο γεωθερμικός ταμιευτήρας.
- Το κάλυμμα.



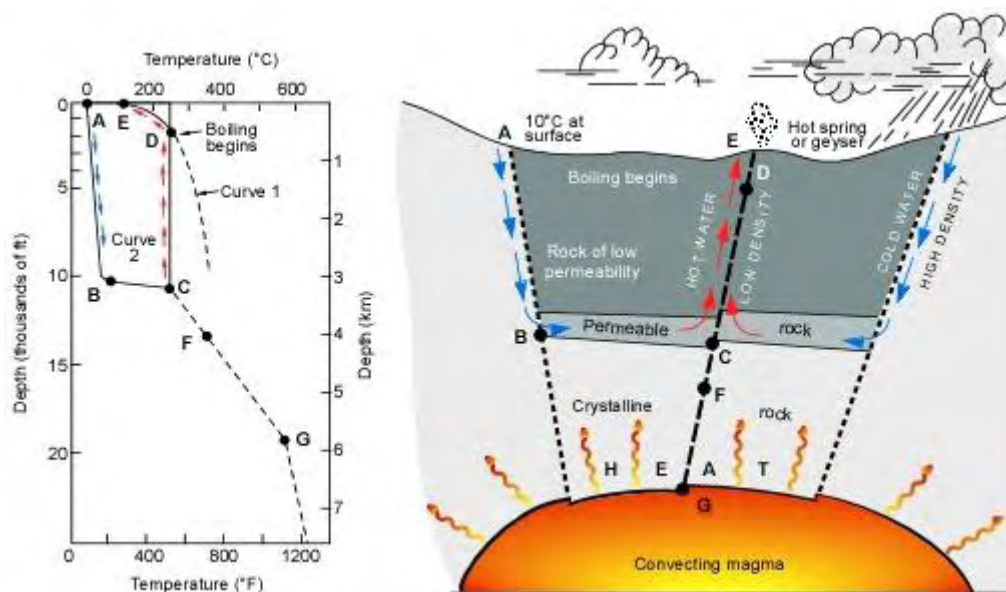
Εικόνα 1.6: Πρότυπο γεωθερμικό πεδίο. (Πηγή: Mary H. Dickson and Mario Fanelli, What is Geothermal Energy?, 2004).

1. Η πηγή θερμότητας.

Η πηγή θερμότητας είναι μια μαγματική διείσδυση στον γήινο φλοιό, η οποία έχει θερμοκρασία της τάξης των 600-900 °C περίπου και βρίσκεται σε βάθη μεταξύ 5-15 km. Εστίες θερμότητας μπορούν να αποτελέσουν μόνο πρόσφατες μαγματικές διεισδύσεις. Οι παλαιότερες διεισδύσεις έχουν ήδη ψυχθεί.

2. Η τροφοδοσία με νερό.

Σύμφωνα με παλιότερες απόψεις τα θερμά ρευστά σε ένα γεωθερμικό πεδίο έχουν μαγματική προέλευση. Μετέπειτα γεωχημικές αναλύσεις ισοτόπων όμως έδειξαν ότι σε ένα γεωθερμικό πεδίο τουλάχιστον το 90% του νερού προέρχεται από μετεωρικά κατακρημνίσματα ή/και θαλάσσιο νερό. Στο παρακάτω σχήμα, νερό μετεωρικής προέλευσης κατεισδύει μέσω ρηγμάτων σε βαθύτερους ορίζοντες, παραλαμβάνει θερμότητα από τα πετρώματα κι ενδεχομένα μικρές ποσότητες μαγματικού ατμού και αερίων, που διεισδύουν μέσω ρηγμάτων και ρωγμών από το υπόβαθρο και στη συνέχεια ανέρχεται στην επιφάνεια.



Εικόνα 1.7: Μηχανισμός υδροθερμικού συστήματος ενδιάμεσης θερμοκρασίας (Πηγή: White D.E., 1973).

Η γραμμή (1) είναι η καμπύλη αναφοράς του σημείου ζέσεως του καθαρού νερού. Η καμπύλη (2) δείχνει τη θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος μια τυπικής διαδρομής κυκλοφορίας του ρευστού από το σημείο A (τροφοδοσία) προς το σημείο E (αποφόρτιση).

3. Ο γεωθερμικός ταμιευτήρας.

Ο **γεωθερμικός ταμιευτήρας** (geothermal reservoir) είναι ο λιθολογικός σχηματισμός που αποτελεί την υπόγεια αποθήκη νερού ή/και ατμού. Ο ταμιευτήρας πρέπει να διαθέτει σημαντικό πορώδες, για να επιτρέπει την κίνηση

του υπογείου νερού, ώστε να είναι δυνατή μια ικανοποιητική παραγωγή γεωθερμικού ρευστού στην επιφάνεια μέσω γεωτρήσεων.

Μια καλή γεωθερμική γεώτρηση πρέπει να παράγει τουλάχιστον 20 t/h ατμού. Υπάρχουν γεωτρήσεις που παράγουν μερικές εκατοντάδες t/h διαφασικού ρευστού. Η διατήρηση των υψηλών αυτών παροχών απαιτείται υψηλή διαπερατότητα του υδροφόρου. Σύμφωνα με αυτό, κάθε διαπερατό πέτρωμα μπορεί να αποτελεί έναν καλό γεωθερμικό ταμιευτήρα.

Από γεωλογική άποψη οι γεωθερμικοί ταμιευτήρες διακρίνονται σε δυο κατηγορίες:

- Ταμιευτήρες σε ιζηματογενή πετρώματα, που υπόκεινται αργιλικών στεγανών σχηματισμών, όπως π.χ. Kizildere/Τουρκία, Cerro Prieto/Μεξικό, Larderello/Ιταλία, Imperial Valley/Η.Π.Α.
- Ταμιευτήρες σε ηφαιστειακά και ηφαιστειο-ιζηματογενή πετρώματα, όπως π.χ. στην Έλλαδα, Ιαπωνία, Κόστα Ρίκα, Ελ Σαλβαδόρ, Νέα Ζηλανδία.

Με τα σημερινά τεχνικά δεδομένα, ένας γεωθερμικός ταμιευτήρας για να είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμος, δεν πρέπει να βρίσκεται σε βάθη μεγαλύτερα από 2000 m για την περίπτωση παραγωγής ζεστού νερού (θέρμανση) και 3000 m για την περίπτωση παραγωγής ατμού (ηλεκτροπαραγωγή).

4. Το κάλυμμα.

Το **κάλυμμα** (cap rock) είναι ένας λιθολογικός σχηματισμός πολύ χαμηλής διαπερατότητας, ο οποίος υπέρκειται του ταμιευτήρα. Αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία αρτεσιανών συνθηκών, αλλά και για την παραγωγή ατμού, γιατί αλλιώς ο ατμός που παράγεται στον ταμιευτήρα διαφεύγει προς την επιφάνεια.

Το κάλυμμα αποτελείται από αδιαπέρατα πετρώματα, όπως οι σχηματισμοί φλύσχη στο Larderello, τα λιμναία ιζήματα στο Wairakei, οι δελταικές άργιλοι στο Imperial Valley. Σε μερικές περιπτώσεις ενδεχομένως το κάλυμμα να ήταν αρχικά διαπερατό, αλλά με την πάροδο του χρόνου να στεγανοποιήθηκε λόγω της γεωθερμικής δράσης, όπως για παράδειγμα στα πεδία The Geysers και Otake όπου τα πετρώματα του καλύμματος είναι έντονα ρωγματωμένα. Η στεγανοποίηση μπορεί να συμβεί είτε εξαιτίας της απόθεσης ορυκτών (π.χ. πυριτικά) από τα γεωθερμικά ρευστά είτε εξαιτίας της υδροθερμικής εξαλλοίωσης του πετρώματος (π.χ. καολινιτίωση).

1.6. Ορισμοί

Ο Νόμος 3175/2003 (ΦΕΚ Α' 207) υπό τον τίτλο «Αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού, τηλεθέρμανση και άλλες διατάξεις», ορίζει τις βασικές έννοιες της γεωθερμικής ενέργειας, όπως φαίνονται παρακάτω:

- **Γεωθερμία ή Γεωθερμική ενέργεια** ονομάζεται η ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης με μορφή νερών, ατμών, αερίων ή μειγμάτων αυτών ή ακόμη και ως ενέργεια από τα πετρώματα και αποτελεί μία σημαντική Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας (Α.Π.Ε.) Είναι η φυσική ενέργεια της γης που διαρρέει το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια.
- **Γεωθερμικό δυναμικό** είναι το σύνολο των γηγενών φυσικών ατμών, των θερμών νερών, επιφανειακών ή υπόγειων, και της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών, που υπερβαίνουν τους είκοσι πέντε βαθμούς Κελσίου (25 °C).
- **Γεωθερμικό πεδίο** είναι ο ενιαίος μεταλλευτικός χώρος μέσα στον οποίο εντοπίζεται αυτοτελές γεωθερμικό δυναμικό.
- **Προϊόν του γεωθερμικού πεδίου** θεωρείται το αξιοποιήσιμο θερμοενεργειακό του περιεχόμενο.
- **Παραπροϊόντα** θεωρούνται άλλα προϊόντα που συμπαραάγονται εκτός από το θερμοενεργειακό περιεχόμενο του πεδίου.
- **Υποπροϊόν** θεωρείται το γεωθερμικό ρευστό που απομένει, ύστερα από την απόληψη των κατά τα ανωτέρω προϊόντων και παραπροϊόντων.

Τα γεωθερμικά πεδία διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- **Χαμηλής θερμοκρασίας** όταν η θερμοκρασία του προϊόντος κυμαίνεται από 25 °C-90 °C.
- **Μέσης θερμοκρασίας** για θερμοκρασίες 90 °C - 150 °C.
- **Υψηλής θερμοκρασίας** όταν η θερμοκρασία του προϊόντος υπερβαίνει τους 150 °C.
- **Βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο** είναι το πεδίο του οποίου τα χαρακτηριστικά είναι πιστοποιημένα με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας με ερευνητικές εργασίες. Με απόφαση του Υπουργού Ανάπτυξης καθορίζονται τα χαρακτηριστικά και ο βαθμός αξιοπιστίας των εκτιμήσεων προκειμένου ένα γεωθερμικό πεδίο να χαρακτηριστεί βεβαιωμένο.
- **Πιθανό γεωθερμικό πεδίο** είναι το πεδίο, του οποίου τα χαρακτηριστικά εκτιμώνται από προκαταρκτικά ερευνητικά έργα. Με την υπουργική απόφαση της προηγούμενης περιπτώσεως καθορίζονται τα χαρακτηριστικά και ο βαθμός αξιοπιστίας των εκτιμήσεων προκειμένου ένα γεωθερμικό πεδίο να χαρακτηριστεί πιθανό.
- **Διαχείριση του γεωθερμικού πεδίου** είναι το σύνολο των δραστηριοτήτων που αποσκοπούν στην παραγωγική εξόρυξη του γεωθερμικού ρευστού, την ορθολογική αξιοποίηση προϊόντος και παραπροϊόντων, τη διανομή και ελεύθερη διάθεσή του σε τρίτους για κάθε είδους εφαρμογές και την περιβαλλοντικά συμβατή διάθεση των υποπροϊόντων.

1.7. Ταξινόμηση των Γεωθερμικών Πεδίων

Τα γεωθερμικά πεδία μπορούν να θεωρηθούν και μεταλλευτικά έργα. Εξάλλου συχνά η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας αναφέρεται ως εξόρυξη θερμότητας (heat mining). Ανάλογα με το είδος του παραγόμενου προϊόντος στην επιφάνεια τα γεωθερμικά πεδία κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

Σήμερα εμπορικά εκμεταλλεύσιμοι τύποι:

- Πεδία ζεστού νερού.
- Πεδία υγρού ατμού.
- Πεδία ξηρού ατμού.

Αξίζει να αναφερθεί η ύπαρξη τριών ακόμα κατηγοριών, που με τα σημερινά δεδομένα τα πεδία αυτά δεν είναι εκμεταλλεύσιμα, παρουσιάζουν όμως επιστημονικό και τεχνικό, στο μέλλον λογικά και οικονομικό ενδιαφέρον.

Μελλοντικά εκμεταλλεύσιμοι τύποι:

- Γεωπιεσμένα συστήματα.
- Μαγματικοί θάλαμοι.
- Θερμά ξηρά πετρώματα (Hot Dry Rock).

1. Γεωθερμικά πεδία ζεστού νερού.

Τα γεωθερμικά πεδία ζεστού νερού (hot water field) παράγουν νερό θερμοκρασίας $<100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η θερμοκρασία του ταμιευτήρα στο ανώτερο σημείο του δεν υπερβαίνει το σημείο βρασμού σε ατμοσφαιρική πίεση, εν μέρη γιατί το νερό που έρχεται επάνω με μεταφορά ρευμάτων από το βάθος χάνει την πίεση και τη θερμοκρασία του καθώς ανεβαίνει και εν μέρη γιατί αναμιγνύεται με ψυχρό υπόγειο νερό.

Τα γεωθερμικά πεδία ζεστού νερού είναι αρκετά συνήθη και κατάλληλα για ήπια εκμετάλλευση. Πιο κατάλληλα για εκμετάλλευση είναι αυτά που:

- Βρίσκονται σε περιοχές με θερμική ροή $>2,2\text{ }\mu\text{cal/cm}^2\text{-sec}$ (50% πάνω από την παγκόσμια μέση τιμή).
- Διαθέτουν μεγάλο υδροταμιευτήρα με θερμοκρασία $>60\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε βάθη $<2000\text{ m}$.
- Η παροχή νερού ανά γεώτρηση είναι μεγάλη.

Τα πεδία ζεστού νερού είναι χρήσιμα για τηλεθέρμανση, δηλαδή για μαζική θέρμανση πολεοδομικών συγκροτημάτων, για γεωργικές και βιομηχανικές χρήσεις.

Παραδείγματα τέτοιων πεδίων είναι η Παννονική πεδιάδα ($50\text{-}70\text{ }^{\circ}\text{C/km}$), η λεκάνη Arzac στη Ν. Γαλλία ($60\text{ }^{\circ}\text{C/km}$).

2. Γεωθερμικά πεδία υγρού ατμού.

Στα πεδία υγρού ατμού (wet steam field) ο ταμιευτήρας περιέχει νερό σε θερμοκρασία $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$ και αυξημένη πίεση. Πρόκειται για τη συνηθέστερη κατηγορία γεωθερμικών πεδίων.

Καθώς το ζεστό νερό ανέρχεται μέσα στην γεώτρηση προς την επιφάνεια, μειώνεται η πίεση του και κάποια ποσότητα νερού εκτονώνεται σε ατμό, έτσι το παραγώμενο ρευστό είναι ένα μείγμα ζεστού νερού και ατμού σε κορεσμένες συνθήκες.

Τα πεδία υγρού ατμού προσφέρονται για ηλεκτροπαραγωγή, αλλά και για μη ηλεκτρικές εφαρμογές.

Σημαντικά πεδία της κατηγορίας αυτής βρίσκονται στο Wairakei/ Νέα Ζηλανδία, Cerro Prieto/ Μεξικό, στην περιοχή του Reykjavik/ Ισλανδία, Otake/ Ιαπωνία. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και τα Ελληνικά γεωθερμικά πεδία της Μήλου και της Νίσυρου.

3. Γεωθερμικά πεδία ξηρού ατμού.

Τα πεδία ξηρού ατμού (dry steam field) παράγουν μόνο ατμό, είναι αυτά που στην κεφαλή της γεώτρησης σε πιέσης μεγαλύτερες από την ατμοσφαιρική δίνουν ξηρό ή υπέρθερμο ατμό. Ο βαθμός υπερθέρμανσης ποικίλει από $0-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Σε μερικές περιπτώσεις πεδία υγρού ατμού μετά από κάποιο χρόνο εκμετάλλευσης μετατράπηκαν σε πεδία ξηρού ατμού.

Τα πεδία ξηρού ατμού απαντώνται σπάνια και είναι τα καταλληλότερα για ηλεκτροπαραγωγή.

Παραδείγματα τέτοιων γεωθερμικών πεδίων είναι το Larderello, Travale και Monte Amiata/ Ιταλία, The Geysers/ Καλιφόρνια, Onikobe και Matsukawa/ Ιαπωνία.

4. Γεωπιεσμένα συστήματα.

Τα γεωπιεσμένα συστήματα (geopressured systems) ή συστήματα υπό πίεση ανακαλύφθηκαν σε μεγάλα βάθη κατά την πετρελαϊκή έρευνα. Πρόκειται για μεγάλους υδροφόρους μέσα σε ιζηματογενή πετρώματα, οι οποίοι περιέχουν θερμό νερό με μεγάλη περιεκτικότητα σε αλάτι και διαλυμένο φυσικό αέριο. Το νερό αυτό παγιδεύτηκε στα ιζήματα κατά την απόθεση τους σε εκταταμένες λεκάνες, που στην συνέχεια βυθίστηκαν σε μεγάλα βάθη με σχετικά γρήγορο ρυθμό. Το νερό στον ταμιευτήρα βρίσκεται υπό υψηλή πίεση και υψηλή θερμοκρασία.

Τα συστήματα αυτά είναι τεράστιοι σε έκταση ταμιευτήρες με ζεστά νερά και αέρια όπου είναι δύσκολη η άντληση τους λόγω υψηλών πιέσεων και διάβρωσης.

Το σημαντικότερο γνωστό σύστημα ανακαλύφθηκε κατά την αναζήτηση υδρογονανθράκων στις ακτές του Κόλπου του Τέξας και της Λουιζιάνα. Το κοίτασμα καταλαμβάνει έκταση 135.000 Km^2 με θερμά νερά $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε βάθος 3.300 m . Τα νερά είναι έντονα αλατούχα και περιέχουν σημαντικές ποσότητες CH_4 . Δεν υφίσταται εκμετάλλευση λόγω της διαβρωτικής ικανότητας του νερού, της αναγκαιότητας διαχωρισμού του μεθανίου και της υψηλής πίεσης στην κεφαλή της

γεώτρησης, που απαιτούν υψηλή τεχνολογία και επομένως συνεπάγονται μεγάλο κόστος. Τον τελευταίο καιρό τα κοιτάσματα αυτά αντιμετωπίζονται με αισιοδοξία.

5. Μαγματικοί θάλαμοι.

Οι μαγματικοί θάλαμοι (magma chamber) διαθέτουν τεράστιες ποσότητες ενέργειας, αλλά η αξιοποίησή τους απαιτεί τεχνικές τελείως διαφορετικές από αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα για την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας.

Οι μαγματικοί θάλαμοι αναφέρονται στην απόληψη θερμότητας με κατάλληλες γεωτρήσεις κοντά σε μαγματικές διεισδύσεις, που βρίσκονται σε μικρό βάθος σχετικά. Εισπιέζεται νερό στις γεωτρήσεις και επιστρέφει ατμός. Υπάρχουν προβλήματα με διάβρωση και υψηλές θερμοκρασίες.

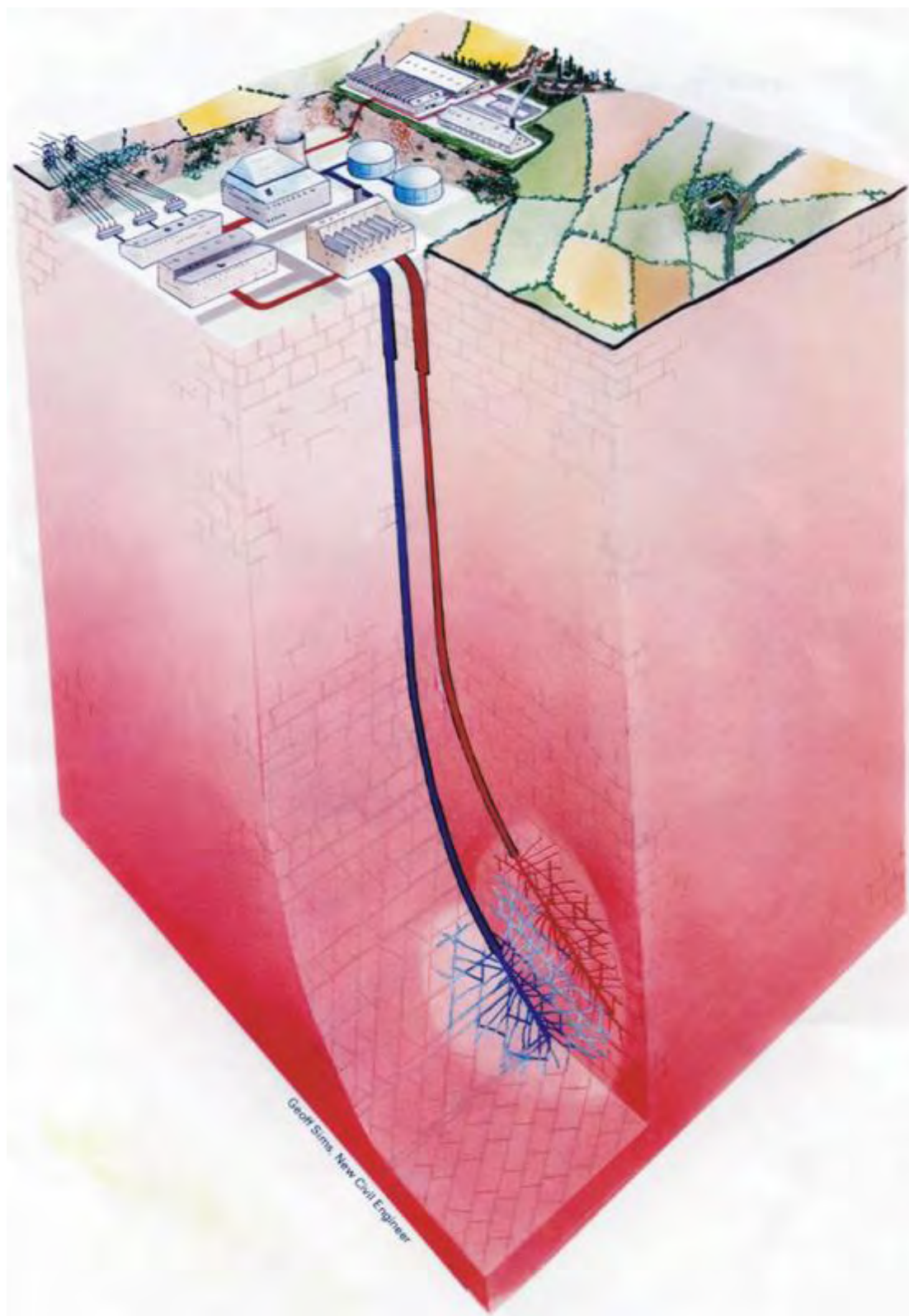
6. Ξηρά γεωθερμικά πεδία.

Πρόκειται για πεδία που δεν διαθέτουν υπόγεια νερά, αλλά θερμά ξηρά πετρώματα (hot dry rock) σε μεγάλα βάθη (μέχρι 3000 m). Η διαπερατότητα των πετρωμάτων είναι περιορισμένη. Ορύσσονται δυο βαθιές γεωτρήσεις και προκαλείται ελεγχόμενη ρωγμάτωση των σχηματισμών σε βάθος (π.χ. με υδραυλική θραύση). Στη συνέχεια εισπιέζεται ψυχρό νερό από την μια γεώτρηση, που παραλαμβάνει θερμότητα από τα πετρώματα κατά την διέλευσή του μέσω του συστήματος ρωγμών, θερμαίνεται και ανέρχεται από την άλλη γεώτρηση.

Η επιτυχία εξαρτάται από τη δυνατότητα:

- Να συνδεθούν οι δυο γεωτρήσεις με ελεγχόμενο σύστημα ρωγμών, το οποίο να παρουσιάζει μικρή υδραυλική αντίσταση.
- Να αποφευχθεί η διεύρυνση κάποιας ρωγμής, γιατί τότε οδηγεί στη διέλευση του κρύου νερού από εκεί με αποτέλεσμα να ψύχεται γρήγορα το σύστημα.
- Να αποφευχθεί η δημιουργία ανεπιθύμητων ρωγμών, που οδηγούν σε απώλειες νερού.

Η διαδικασία απόληψης θερμότητας από θερμά ξηρά πετρώματα για πρώτη φορά εφαρμόσθηκε πειραματικά στο Εθνικό Εργαστήριο Los Alamos, στο Νέο Μεξικό των ΗΠΑ το 1970. Επίσης στο Camborne στην Αγγλία και στο Soultz sous Foret στη Γαλλία. Η εμπορική εκμετάλλευση αυτών των συστημάτων αναμένεται σύντομα.



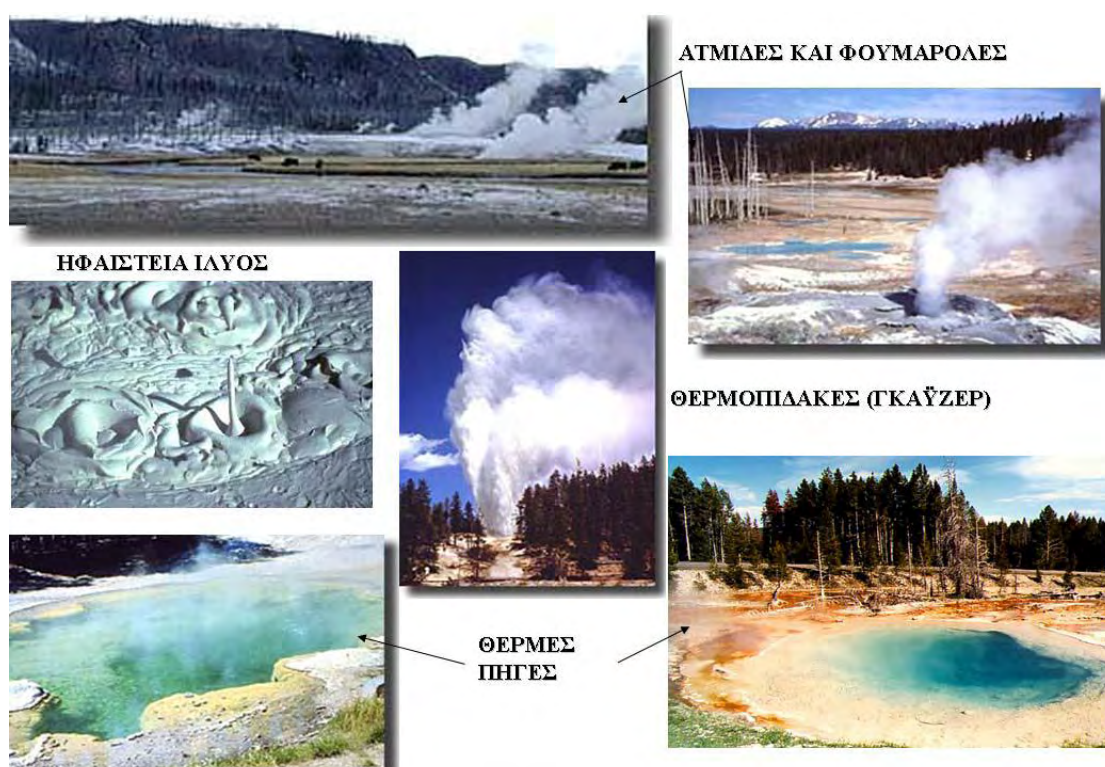
Εικόνα 1.8: Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος Θερμών Ξηρών Πετρωμάτων σε οικονομική κλίμακα (Πηγή: Richards et al., 1994).

1.8. Επιφανειακές Εκδηλώσεις ενός Γεωθερμικού Πεδίου

Η παρουσία ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα γίνεται συχνά αισθητή στην επιφάνεια του εδάφους με ορισμένες υδροθερμικές εκδηλώσεις (surface manifestation).

Πρόκειται για:

- Θερμές πηγές.
- Θερμοπίδακες.
- Λασποπηγές.
- Ατμίδες.
- Ατμίζοντα εδάφη.



Εικόνα 1.9: Επιφανειακές εκδηλώσεις γεωθερμικών συστημάτων. (Πηγή: Τζάνη Α., 2010).

1. Θερμές πηγές.

Οι θερμές πηγές (hot spring) δημιουργούνται από υπόγεια νερά που θερμαίνονται:

- ο επειδή κατεισδύουν σε μεγάλα βάθη σε περιοχές με κανονική ή περίπου κανονική θερμική ροή και στη συνέχεια ανέρχονται μέσω ρηγμάτων,
- ο από τοπικά εξώθερμα γεωχημικά φαινόμενα, όπως ενυδάτωση του ανυδρίτη σε γύψο ή οξείδωση θειούχων ενώσεων,
- ο από την επαφή με πρόσφατες λάβες που ακόμα δεν έχουν ψυχθεί,
- ο από ανώμαλα υψηλή γεωθερμική ροή, που οφείλεται σε μαγματικές διεισδύσεις.



Εικόνα 1.10: Θερμή πηγή.

Οι θερμοπηγές της πρώτης κατηγορίας είναι ενδεικτικές ενός πεδίου χαμηλής ενθαλπίας, της δεύτερης και τρίτης κατηγορίας γενικά δεν είναι άξιες λόγου από οικονομική άποψη. Αντίθετα οι θερμοπηγές της τελευταίας κατηγορίας αποτελούν ενδείξεις για σημαντικούς γεωθερμικούς ταμιευτήρες υψηλής ενθαλπίας.

2. Θερμοπίδακες.

Οι θερμοπίδακες (geyser) είναι θερμοπηγές, από τις οποίες εκτοξεύονται περιοδικά και για σύντομο χρονικό διάστημα ατμοί και νερά. Το νερό του ταμιευτήρα βρίσκεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες του σημείου βρασμού, παραμένει όμως σε υγρή φάση εξαιτίας της μεγάλης υδροστατικής πίεσης που επικρατεί. Σε κάποια στιγμή η πίεση του παραγόμενου ατμού υπερνικά την υδροστατική, τότε εκτινάσσεται ατμός και ποσότητα νερού σχηματίζοντας τον θερμοπίδακα. Στην συνέχεια μειώνεται η πίεση στον ταμιευτήρα και το φαινόμενο επαναλαμβάνεται. Από τους πιο γνωστούς θερμοπίδακες βρίσκονται στην Ισλανδία, Νέα Ζηλανδία και στο Yellowstone στις Η.Π.Α..



Εικόνα 1.11: Το μεγαλύτερο γκείζερ της κοιλάδας Χαουκανταλούρ, το οποίο είναι και το παλαιότερο γνωστό στον κόσμο.

3. Λασποπηγές.

Οι λασποπηγές (mud pot) είναι θερμοπηγές μικρής παροχής, στις οποίες το νερό περιέχει αργιλικά και άλλα υλικά, που αποθέτει κατά την εκτόνωση του στην επιφάνεια δημιουργώντας λάσπες. Συνήθως μέσα από τις λάσπες διαφεύγουν αέρια και ατμοί με την μορφή φουσαλίδων.



Εικόνα 1.12: Θερμές πηγές μικρής παροχής, που αποθέτουν λάσπες.

4. Ατμίδες.

Οι ατμίδες (fumarole) είναι εκλύσεις υδρατμών και αερίων (CO_2 , H_2S , HCl), σε διάφορες θερμοκρασίες από ρωγμές του εδάφους. Ανάλογα με το είδος των εκλυόμενων αερίων οι ατμίδες διακρίνονται σε ανθρακικές ή ανθρακωνιές (CO_2 , mofette), θειούχες ή θειωνιές (H_2S , solfatara).



Εικόνα 1.13: Αποθέσεις θείου σε ατμίδα στην Νέα Ζηλανδία.



Εικόνα 1.14: Όταν η θερμοκρασία στις ατμίδες είναι αρκετά υψηλή το θείο τήκεται.

5. Ατμίζοντα εδάφη.

Τα ατμίζοντα εδάφη (steaming ground) δημιουργούνται σε περιοχές, όπου σε μικρό βάθος υπάρχει θερμός υδροφόρος ορίζοντας με νερά κοντά στο σημείο βρασμού.



Εικόνα 1.15: Σε μικρό βάθος γεωθερμικός ταμιευτήρας με νερά υψηλής θερμοκρασίας.

Οι παραπάνω επιφανειακές εκδηλώσεις συνήθως αποτελούν τα κυριότερα κριτήρια, τους σημαντικότερους οδηγούς για τον εντοπισμό γεωθερμικών πεδίων. Ωστόσο από την παροχή ρευστών και θερμότητας στην επιφάνεια δεν είναι δυνατό να γίνει μια πρώτη προσέγγιση του μεγέθους και της δυναμικότητας ενός γεωθερμικού συστήματος. Υπάρχουν γεωθερμικά πεδία που διαθέτουν πολύ περιορισμένες επιφανειακές θερμικές εκδηλώσεις σε σύγκριση με τις ποσότητες ενέργειας που διαπιστώθηκαν με τις γεωτρήσεις όπως είναι τα μεγάλα γεωθερμικά συστήματα των The Geysers και Salton Sea, το Larderello και το Matsukawa.

Σε άλλες περιπτώσεις όπως αποδεικνύεται με τις γεωτρήσεις, ο παραγωγικός ορίζοντας μπορεί να εκτείνεται πολλά km μακριά από μια επιφανειακή εκδήλωση. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε γεωλογικούς, υδρογεωλογικούς και τεκτονικούς παράγοντες όπου αλλοιώνουν τα χαρακτηριστικά των επιφανειακών αυτών εκδηλώσεων, δηλαδή την θέση, την παροχή και την θερμοκρασία τους, με αποτέλεσμα να παραπλανούν τον ερευνητή.

Ένα τέτοιο παραδειγμα είναι το γεωθερμικό σύστημα του Ahuachapán στο Ελ Σαλβαδορ. Οι αδιαπέρατοι λιθολογικοί σχηματισμοί που αποτελούν το κάλυμμα αυτού του συστήματος, αναγκάζουν την προς τα άνω ροή του νερού να παρεκκλίνει αρκετά km πλευρικά, με αποτέλεσμα το πλησιέστερο σημείο στο οποίο σημειώνεται εκροή νερού να βρίσκεται 7 km μακριά από τον παραγωγικό ταμιευτήρα.

Ένα άλλο παράδειγμα υδρογεωλογικών συνθηκών όπου αλλοιώνουν τις επιφανειακές εκδηλώσεις είναι όταν τα γεωθερμικά ρευστά κατά την άνοδο τους συναντούν ένα ψυχρό υδροφόρο ορίζοντα, με αποτέλεσμα η περιεχόμενη θερμότητα να μειώνεται. Η θερμότητα είτε διαχέεται έτσι όπου δεν γίνεται αντιληπτή στην επιφάνεια ή ύπαρξη του θερμού ταμιευτήρα, είτε θερμαίνεται ο ψυχρός υδροφόρος και εκφορτίζεται σε κάποιο σημείο με μορφή θερμών πηγών, μακριά όμως από την πηγή θερμότητας.

1.9. Η Γεωθερμική Έρευνα

Σκοπός και στόχος της έρευνας επί των γεωθερμικών πεδίων είναι η ανίχνευση και εντοπισμός συγκεντρώσεων θερμότητας σε περιοχές προσπελάσιμες και αξιοποιήσιμες με τα σημερινά τεχνικά μέσα. Τα αντικείμενα μιας γεωθερμικής έρευνας είναι (Lumb, 1981):

- i. Ο προσδιορισμός των γεωθερμικών φαινομένων.
- ii. Η επιβεβαίωση της ύπαρξης ενός ωφέλιμου παραγωγικού γεωθερμικού πεδίου.
- iii. Η εκτίμηση του μεγέθους του ενεργειακού πόρου.
- iv. Ο καθορισμός του τύπου του γεωθερμικού πεδίου (π.χ. ξηρού ατμού, υγρού ατμού, ΘΞΠ κ.λ.π.).
- v. Ο εντοπισμός των παραγωγικών ζωνών.
- vi. Ο καθορισμός του θερμικού περιεχομένου των γεωθερμικών ρευστών που θα παραχθούν από το γεωθερμικό πεδίο μέσω των παραγωγικών γεωτρήσεων.
- vii. Η συλλογή των βασικών δεδομένων, πάνω στα οποία θα βασιστούν τα αποτελέσματα της μελλοντικής παρακολούθησης του πεδίου.
- viii. Η εκτίμηση και αξιολόγηση της πιθανής επιβάρυνσης του περιβάλλοντος από την εκμετάλλευση.
- ix. Η συλλογή πάσης φύσεως πληροφορίας και γνώσης για κάθε χαρακτηριστικό στοιχείο που θα μπορούσε να προκαλέσει προβλήματα κατά την ανάπτυξη του πεδίου (π.χ. πιθανότητα κατολισθήσεων ή επαγόμενης σεισμικότητας, περιεκτικότητα σε οξειδωτικά αέρια κ.ά.).

Η σχετική σπουδαιότητα από τα παραπάνω εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι περισσότεροι από τους οποίους συνδέονται με τον ενεργειακό πόρο, και περιλαμβάνουν το είδος της αναμενόμενης εκμετάλλευσης, τη διαθέσιμη τεχνολογία, τα οικονομικά μεγέθη, τη γεωγραφική θέση και τη χρονική περίοδο. Όλα τα παραπάνω επηρεάζουν άμεσα τον προγραμματισμό και την έκβαση μιας γεωθερμικής έρευνας. Για παράδειγμα, οι προκαταρκτικές αναγνωριστικές έρευνες των εκδηλώσεων επιφανείας αποκτούν ιδιαίτερη σημασία όταν αφορούν μια απομακρυσμένη και μη μελετημένη περιοχή, σε σχέση με μια γνωστή και εκτενώς μελετημένη, ευπροσπέλαστη ή κατοικημένη ή τουριστική περιοχή. Επίσης, εάν η γεωθερμική ενέργεια πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τηλεθέρμανση μιας περιοχής ή σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλού βαθμού θερμότητα, τότε η εύρεση ρευστών υψηλής θερμοκρασίας δεν αποτελεί απαραίτητα τον αντικειμενικό σκοπό της γεωθερμικής έρευνας (Lumb, 1981).

Μέθοδοι έρευνας.

Για την πραγματοποίηση των στόχων μιας γεωθερμικής έρευνας υπάρχουν και εφαρμόζονται πολλές μέθοδοι και τεχνικές. Πολλές από αυτές χρησιμοποιούνται επίσης και σε άλλους τομείς έρευνας π.χ. ορυκτών, πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Τεχνικές στην έρευνα πετρελαίου μπορεί να αποδειχθούν ιδανικά εργαλεία στον τομέα της αναζήτησης φυσικής γήινης θερμότητας (Combs & Muffler, 1973).

1. Γεωλογικές και υδρογεωλογικές μελέτες.

Οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές μελέτες αποτελούν την αφετηρία κάθε ερευνητικού προγράμματος. Η βασική τους συνεισφορά αφορά στον προσδιορισμό της θέσης και της έκτασης των περιοχών που θα πρέπει να ερευνηθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, καθώς και στην υπόδειξη των καταλληλότερων μεθόδων έρευνας για τις συγκεκριμένες περιοχές. Παρέχουν τις βασικές πληροφορίες για την εκτίμηση του δυναμικού του γεωθερμικού πόρου και, τελικά, την κατασκευή ενός ρεαλιστικού προτύπου (μοντέλου) του γεωθερμικού συστήματος. Η γεωλογική έρευνα εστιάζει στην τεκτονική και τη στρωματογραφία της περιοχής, την κατανομή και την ηλικία των πρόσφατων ηφαιστειακών πετρωμάτων και τη θέση και τον χαρακτήρα των θερμικών εκδηλώσεων στην επιφάνεια. Η υδρογεωλογική έρευνα περιλαμβάνει μετρήσεις θερμοκρασίας και παροχής σε ψυχρές και θερμές πηγές, προσδιορισμό της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και εκτίμηση της επιφανειακής και υπόγειας απορροής. Η αεροφωτογραφία, η θερμουπέρυθρη εικόνα και η εικόνα του radar προσφέρουν σημαντική βοήθεια στον εντοπισμό ενεργών ρηγμάτων που αποτελούν τις καταλληλότερες θέσεις για γεωτρήσεις.

2. Γεωχημικές μελέτες.

Οι γεωχημικές μελέτες περιλαμβάνουν δειγματοληψίες, χημικές και/ή ισοτοπικές αναλύσεις του νερού και των αερίων των γεωθερμικών επιφανειακών εκδηλώσεων (θερμές πηγές, ατμίδες, κλπ.) ή των γεωτρήσεων στην υπό μελέτη

περιοχή. Αποτελούν αξιόλογα εργαλεία για τον καθορισμό της φύσης του γεωθερμικού συστήματος (υγρό ή ατμός), την εκτίμηση της ελάχιστης αναμενόμενης θερμοκρασίας στο βάθος και της ομοιογένειας στην παροχή των ρευστών, την έμμεση εκτίμηση των χημικών χαρακτηριστικών των ρευστών που βρίσκονται στο βάθος καθώς και για τον προσδιορισμό της πηγής τροφοδοσίας του ταμειυτήρα. Επιπλέον, παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για το είδος των προβλημάτων που ενδέχεται να προκύψουν κατά την επανεισαγωγή των ρευστών στον ταμειυτήρα και κατά την παραγωγική διαδικασία (π.χ. αλλαγές στη σύσταση των ρευστών, διάβρωση στις σωληνώσεις και τις εγκαταστάσεις, περιβαλλοντικές επιπτώσεις), καθώς και για τον τρόπο αντιμετώπισης ή αποφυγής τους.

3. Γεωφυσικές μελέτες.

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις σκοπεύουν στην έμμεση απόκτηση γνώσης για τις φυσικές παραμέτρους των γεωλογικών σχηματισμών που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη. Οι παράμετροι αυτές περιλαμβάνουν τα εξής:

- ο Θερμοκρασία (θερμική έρευνα).
- ο Ηλεκτρική αγωγιμότητα (γεωηλεκτρική και ηλεκτρομαγνητική μέθοδος).
- ο Ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων (σεισμική μέθοδος).
- ο Πυκνότητα (βαρυτομετρική μέθοδος).
- ο Μαγνητική επιδεκτικότητα (μαγνητική μέθοδος).

Μερικές από τις παραπάνω μεθόδους, όπως η σεισμική, η βαρυτομετρική και η μαγνητική, οι οποίες κατά παράδοση εφαρμόζονται στην έρευνα πετρελαίου, έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για το σχήμα, το μέγεθος, το βάθος και άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά βαθιών γεωλογικών δομών, οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελούν ένα γεωθερμικό ταμειυτήρα. Όμως, οι μέθοδοι αυτές παρέχουν λίγα έως καθόλου στοιχεία για την ύπαρξη ή όχι ρευστών, κάτι που αποτελεί τον πρωταρχικό στόχο της γεωθερμικής έρευνας. Πληροφορίες για την παρουσία γεωθερμικών ρευστών στις βαθιές γεωλογικές δομές μπορούν να αποκτηθούν με τη βοήθεια των γεωηλεκτρικών και των ηλεκτρομαγνητικών διασκοπήσεων, οι οποίες είναι πιο ευαίσθητες από τις άλλες γεωφυσικές μεθόδους στην ύπαρξη τέτοιων ρευστών καθώς και στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Πράγματι, οι δύο αυτές τεχνικές έχουν ευρεία εφαρμογή στη γεωθερμική έρευνα και δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Οι θερμικές τεχνικές (μετρήσεις θερμοκρασίας, προσδιορισμός της γεωθερμικής βαθμίδας και της γήινης θερμικής ροής) συχνά παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού, με καλή προσέγγιση, της θερμοκρασίας στην οροφή του ταμειυτήρα.

Όλες γενικά οι μέθοδοι γεωφυσικών διασκοπήσεων έχουν μεγάλο κόστος, κάποιες μάλιστα ιδιαίτερα υψηλό. Για το λόγο αυτό, δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αδιακρίτως και υπό οποιεσδήποτε καταστάσεις και συνθήκες.

4. Διάνοιξη ερευνητικών γεωτρήσεων.

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

προσδιορισμό των πραγματικών χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα και την εκτίμηση του δυναμικού του (Combs & Muffler, 1973). Τα στοιχεία που προκύπτουν από τις ερευνητικές γεωτρήσεις θα πρέπει λογικά να είναι τέτοια, ώστε να επαληθεύουν όλες τις αρχικές υποθέσεις και τα μοντέλα που είχαν αναπτυχθεί κατά τα προηγούμενα στάδια της έρευνας, καθώς και να επιβεβαιώνουν ότι ο ταμιευτήρας είναι πράγματι παραγωγικός και περιέχει αρκετή ποσότητα ρευστών, με χαρακτηριστικά κατάλληλα για τη χρήση που προορίζονται. Καθίσταται λοιπόν φανερό πως η επιλογή της σωστής θέσης των ερευνητικών γεωτρήσεων είναι ένα κρίσιμο και δύσκολο εγχείρημα, το οποίο προϋποθέτει μεγάλη εμπειρία, γνώσεις και λεπτούς χειρισμούς.

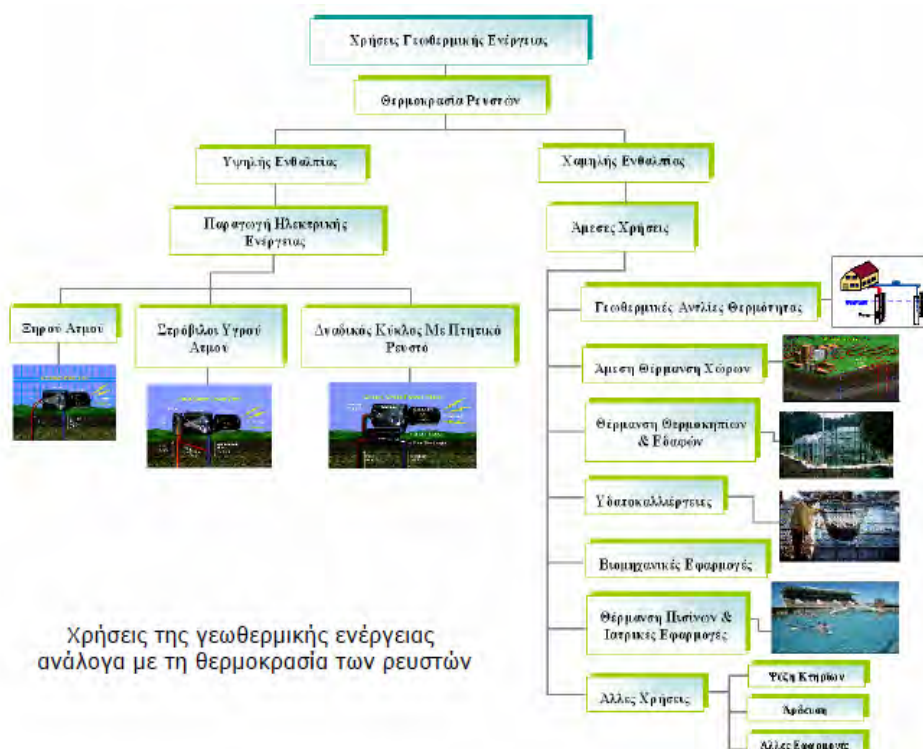
Κεφάλαιο 2°

Χρήσεις της Γεωθερμικής Ενέργειας

2.1. Τρόποι Αξιοποίησης της Γεωθερμικής Ενέργειας

Οι τρόποι αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στις άμεσες και στις ηλεκτροπαραγωγικές. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται οι εφαρμογές στις οποίες ο άνθρωπος εκμεταλλεύεται τη θερμότητα του γεωθερμικού ρευστού άμεσα και χωρίς περίπλοκες διεργασίες και διατάξεις, αξιοποιώντας τη για διάφορες χρήσεις. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν τη γεωθερμία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, πράγμα το οποίο επιτυγχάνεται με διάφορων ειδών διατάξεις. Επίσης η αξιοποίηση της σταθερής θερμοκρασίας του εδάφους σε μικρά βάθη με συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας καλύπτει ανάγκες θέρμανσης και ψύξης. Ο τρόπος εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού. Έτσι λοιπόν, κάθε εφαρμογή αξιοποίησης της γεωθερμίας αντιστοιχεί με ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών, για το οποίο η εφαρμογή αυτή καθίσταται τεχνικά εφικτή και οικονομικά συμφέρουσα. Οι δυνατότητες αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας λοιπόν, είναι σε άμεση συνάρτηση με τη θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών, τα οποία ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες :

- Υψηλής Ενθαλπίας (θερμοκρασίες ρευστών $> 90^{\circ}\text{C}$)
- Χαμηλής Ενθαλπίας ($25^{\circ}\text{C} < \text{θερμοκρασίες ρευστών} < 90^{\circ}\text{C}$)



Εικόνα 2.1: Χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας ανάλογα με τη θερμοκρασία των ρευστών. (Πηγή: Διακογιάννης Γ., 2014).

2.2. Χρήσεις των Γεωθερμικών Ρευστών Υψηλής Ενθαλπίας

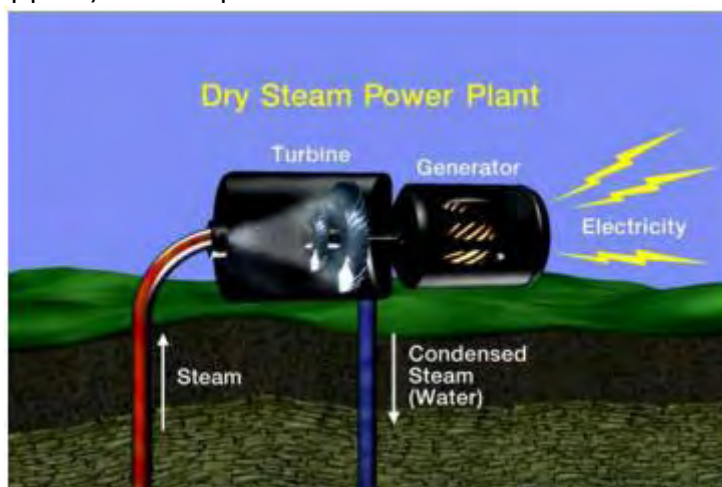
Ο πλέον συνήθης και τεchnικοοικονομικά συμφέρον τρόπος αξιοποίησης των γεωθερμικών ρευστών υψηλής ενθαλπίας είναι η χρήση τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (E.T. Eliasson 2001). Ο τύπος μετατροπής που χρησιμοποιείται εξαρτάται από την κατάσταση του ρευστού (είτε είναι ατμός είτε νερό), τη θερμοκρασία του, την πίεση και την παροχή.

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται είναι τρεις:

- Ξηρού ατμού (Θερμοκρασία ρευστών $>180^{\circ}\text{C}$).
- Στρόβιλοι υγρού ατμού (Θερμοκρασία ρευστών $>150^{\circ}\text{C}$).
- Δυναμικός κύκλος με πτητικό ρευστό ή κύκλος Rankine με οργανικό ρευστό (Θερμοκρασία ρευστών $>90^{\circ}\text{C}$).

1. Ξηρού ατμού (Θερμοκρασία ρευστών $>180^{\circ}\text{C}$).

Ο ατμός οδηγείται σε στρόβιλο, ο οποίος θέτει σε λειτουργία μια γεννήτρια που παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Αυτός είναι ο παλαιότερος τύπος γεωθερμικών εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιήθηκε αρχικά στο Larderello στην Ιταλία το 1904 και εξακολουθεί να είναι πολύ αποτελεσματικός. Η τεχνολογία ατμού χρησιμοποιείται σήμερα σε γεύζερ στη βόρεια Καλιφόρνια, που εξακολουθεί να παραμένει το μεγαλύτερο γεωθερμικό πεδίο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο.

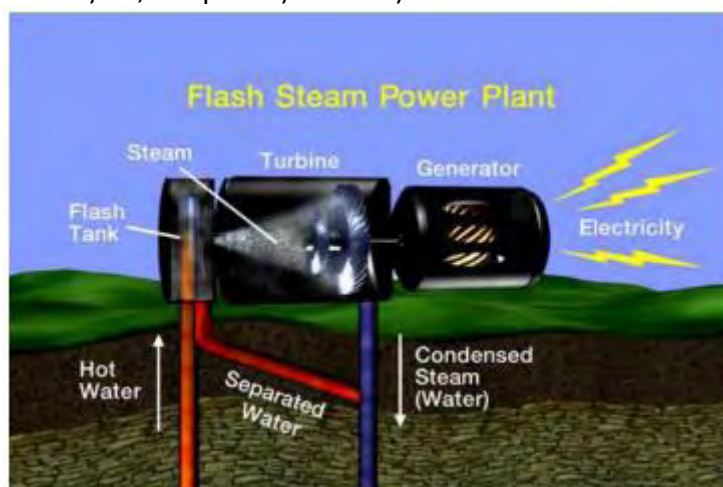


Εικόνα 2.2: Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ξηρό ατμό. (Πηγή: Riva G., Forraparedretti E., Carolis de C., Γιακουμέλος E, Μαλαματένιος X., Signanini P., Crema G., Fazio Di M., Gajdos J., Rucinsky R., (2005).

2. Στρόβιλοι υγρού ατμού (Θερμοκρασία ρευστών $>150^{\circ}\text{C}$).

Το γεωθερμικό ρευστό είτε διέρχεται ως διφασική ροή από τη γεώτρηση είτε εκτονώνεται σε πίεση χαμηλότερη από την πίεση που επικρατεί στην κεφαλή της γεώτρησης και μετατρέπεται σε διφασικό μίγμα. Το διφασικό μίγμα διαχωρίζεται σε κατακόρυφο διαχωριστή και ο ατμός οδηγείται στο στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Εάν η θερμοκρασία και η πίεση του γεωθερμικού υγρού το

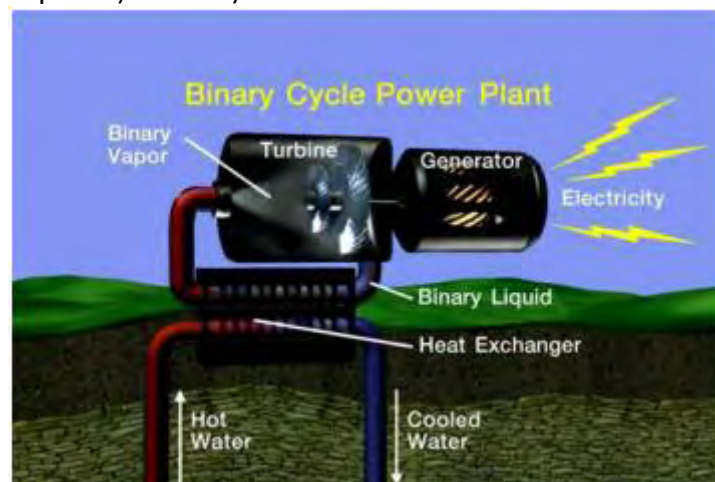
επιτρέπουν, τότε το υγρό μπορεί να εκτονωθεί για δεύτερη φορά ή και περισσότερες φορές, ώστε να παραχθεί επιπλέον ατμός, που θα αυξήσει σημαντικά την απόδοση της μονάδας. Τέτοια εγκατάσταση λειτουργεί στο Imperial Valley, στην Καλιφόρνια (Φυτίκας Μ., Ανδρίτσος Ν. 2005).



Εικόνα 2.3: Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με στρόβιλο υγρού ατμού. (Πηγή: Riva G., Forpparedretti E., Carolis de C., Γιακουμέλος Ε, Μαλαματένιος Χ., Signanini P., Crema G., Fazio Di M., Gajdos J., Rucinsky R., (2005).

3. Δυναμικός κύκλος με πτητικό ρευστό ή κύκλος Rankine με οργανικό ρευστό (Θερμοκρασία ρευστών >90°C).

Το γεωθερμικό ρευστό χρησιμοποιείται για τη θέρμανση και εξάτμιση σε έναν εναλλάκτη του δευτερεύοντος ρευστού (νερό & αμμωνία, ισοβουτάνιο, ισοπεντάνιο, CO₂ κ.λπ.) το οποίο έχει μικρότερο σημείο ζέσεως σε σχέση με το νερό. Οι ατμοί του δευτερεύοντος ρευστού οδηγούνται αρχικά στο στρόβιλο και εν συνεχεία στο συμπυκνωτή. Τέλος το ρευστό από το συμπυκνωτή συμπιέζεται και επανεισάγεται πάλι στον εναλλάκτη μέσω της αντλίας ανακυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου. Μία τέτοια εγκατάσταση λειτουργεί στο Soda Lake, στη Νεβάδα (Φυτίκας Μ., Ανδρίτσος Ν. 2005).



Εικόνα 2.4: Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δυναμικού κύκλου με πτητικό μέσο. (Πηγή: Riva G., Forpparedretti E., Carolis de C., Γιακουμέλος Ε, Μαλαματένιος Χ., Signanini P., Crema G., Fazio Di M., Gajdos J., Rucinsky R., (2005).

2.3. Χρήσεις των Γεωθερμικών Ρευστών Χαμηλής Ενθαλπίας

Εξίσου σημαντική παγκοσμίως είναι και η άμεση χρήση της γεωθερμικής ενέργειας, συχνά σε θερμοκρασίες ταμειωτήρων μικρότερες των 100°C. Η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται άμεσα για θέρμανση κτιρίων (ανεξάρτητες κατοικίες, συγκροτήματα διαμερισμάτων, μέχρι ολόκληρες κοινότητες), ψύξη κτιρίων (με χρήση μονάδων απορρόφησης βρωμιούχου λιθίου), θέρμανση θερμοκηπίων και εδαφών για καλλιέργειες, και για την παροχή ζεστού ή χλιαρού νερού για οικιακή χρήση, επεξεργασία προϊόντων (π.χ. την παραγωγή χαρτιού), καλλιέργεια οστρακοειδών και ψαριών, θέρμανση κολυμβητικών δεξαμενών και θεραπευτικούς σκοπούς (ιαματικά λουτρά, spa), και για θερμικές διεργασίες (π.χ. ξήρανση προϊόντων).

Οι πιο διαδεδομένες, άμεσες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας είναι:

- Άμεση θέρμανση χώρων.
- Αντλίες θερμότητας συνδεδεμένες στο έδαφος.
- Τηλεθέρμανση.
- Θέρμανση θερμοκηπίων.
- Γεωργία και κτηνοτροφία.
- Υδατοκαλλιέργειες και ιχθυοκαλλιέργειες.
- Βιομηχανικές εφαρμογές.
- Θέρμανση πισινών και ιατρικές εφαρμογές.
- Αφαλάτωση θαλασσινού νερού.

1. Άμεση θέρμανση χώρων.

Η άμεση θέρμανση χώρων είναι η παλαιότερη μορφή χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας και η πλέον διαδεδομένη στην Ευρώπη. Περιλαμβάνει επίσης την παραγωγή ζεστού νερού για οικιακές χρήσεις. Η τεχνολογία που υιοθετείται είναι απλή. Το γεωθερμικό ρευστό από μία ή δύο γεωτρήσεις αποδίδει θερμότητα στο σύστημα θέρμανσης του ενεργειακού χρήστη, είτε άμεσα, είτε μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Γι' αυτή την εφαρμογή απαιτούνται γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασία μεγαλύτερη των 45°C.

Ένα τυπικό σύστημα θέρμανσης χώρων (κατοικιών, βιομηχανιών ή θερμοκηπίων) αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- ο Τμήμα στο πεδίο. Συνίσταται από σειρά γεωτρήσεων, σωληνώσεων συλλογής ρευστών και αν είναι απαραίτητο από αντλίες και εναλλάκτες θερμότητας υγρού-υγρού.
- ο Σωληνώσεις μεταφοράς των ρευστών. Αφορά στις σωληνώσεις μεταφοράς των ρευστών ή των νερών που θερμαίνονται από αυτά, από το πεδίο μέχρι την περιοχή όπου βρίσκονται οι χώροι που πρόκειται να θερμανθούν.
- ο Σύστημα διανομής στην περιοχή ή στην μεμονωμένη οικία.
- ο Σύστημα θέρμανσης. Η θέρμανση των χώρων στα κτίρια επιτελείται με τη διέλευση του γεωθερμικού νερού (ή του υγρού που θερμάνθηκε από γεωθερμικό ρευστό) μέσω των εναλλακτών αέρα-υγρού.

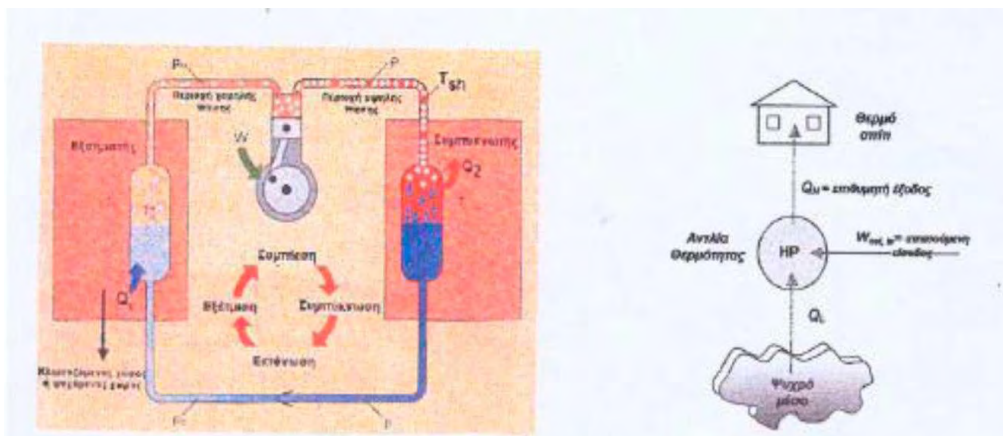
- ο Βοηθητική εγκατάσταση. Εγκατάσταση που θα ικανοποιεί τις αυξημένες ανάγκες για κάποιο χρονικό διάστημα (δεξαμενές, αύξηση της θερμοκρασίας με χρήση συμβατικών καυσίμων) και σύστημα ελέγχου.
- ο Δίκτυο σύνδεσης. Δίκτυο αγωγών για σύνδεση με τις κατοικίες, τις βιομηχανίες ή τα θερμοκήπια.
- ο Σύστημα διάθεσης των γεωθερμικών ρευστών στον ταμιευτήρα από όπου έγινε η άντληση αρχικά.



Εικόνα 2.5: Τραϊανούπολη.

2. Αντλίες θερμότητας συνδεδεμένες στο έδαφος.

Πρόκειται για συσκευές που έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν θερμότητα από ένα μέσο με χαμηλή θερμοκρασία σε ένα άλλο μέσο με υψηλότερη θερμοκρασία. Αυτό πραγματοποιείται με απορρόφηση θερμότητας από μια πηγή χαμηλής σχετικά θερμοκρασίας (όπως είναι το υπόγειο ή επιφανειακό νερό, ο εξωτερικός αέρας και το υπέδαφος) προμηθεύοντας τη θερμότητα αυτή σε ένα θερμότερο μέσο, όπως είναι για παράδειγμα ένα σπίτι. Τα βασικά εξαρτήματα μιας αντλίας θερμότητας είναι τα ίδια με τα κοινά κλιματιστικά και περιλαμβάνουν τον συμπιεστή, το συμπυκνωτή, τον εξατμιστήρα, τη βαλβίδα εκτόνωσης και βέβαια μια πηγή ενέργειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις η αντλία θερμότητας είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να αντιστρέφει την ψυκτική και θερμαντική λειτουργία, επιτρέποντας τη χρήση της ίδιας συσκευής για ψύξη και θέρμανση.



Εικόνα 2.6: Η αρχή λειτουργίας μιας αντλίας θερμότητας. (Πηγή: Θύμιος Δ., Κατινάς Ν., 2014).

3. Τηλεθέρμανση.

Η περιφερειακή θέρμανση οικισμών και πόλεων βρίσκει εφαρμογή σε πολλές χώρες. Με την εφαρμογή τηλεθέρμανσης με γεωθερμική ενέργεια δύναται να δημιουργηθούν ιδιαίτερα ευνοϊκές συνθήκες εκμετάλλευσης διότι η παραγωγή θερμικής ενέργειας εξασφαλίζεται από εγκαταστάσεις χαμηλού κόστους κατασκευής, συντηρήσεως και κυρίως λειτουργίας.

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

Τα γεωθερμικά συστήματα τηλεθέρμανσης είναι έντασης κεφαλαίου, δηλαδή απαιτούν μεγάλα αρχικά κεφάλαια. Το κύριο κόστος αφορά την αρχική επένδυση για την κατασκευή των γεωτρήσεων παραγωγής και επανεισαγωγής, την αγορά των συστημάτων άντλησης και μεταφοράς των ρευστών, την κατασκευή των δικτύων και των σωληνώσεων, την προμήθεια του εξοπλισμού ελέγχου και παρακολούθησης των εγκαταστάσεων, την κατασκευή των σταθμών διανομής και των δεξαμενών αποθήκευσης. Παρόλα αυτά, τα λειτουργικά έξοδα, τα οποία αφορούν στην ενέργεια που καταναλώνεται για την άντληση των ρευστών, τη συντήρηση του συστήματος και η διαχείριση της εγκατάστασης, είναι σημαντικά μικρότερα σε σύγκριση με αυτά μιας συμβατικής μονάδας. Ένας κρίσιμος παράγοντας για τον υπολογισμό του αρχικού κόστους του συστήματος είναι η πυκνότητα του θερμικού φορτίου ή αλλιώς, οι απαιτήσεις σε θέρμανση δια την επιφάνεια που καλύπτει η περιοχή που πρόκειται να θερμανθεί.

Η υψηλή θερμική πυκνότητα καθορίζει την οικονομική βιωσιμότητα του έργου τηλεθέρμανσης, αφού το δίκτυο διανομής απορροφά μεγάλα κεφάλαια. Οικονομικά οφέλη θα μπορούσαν να προκύψουν από το συνδυασμό θέρμανσης και ψύξης σε μέρη όπου οι κλιματικές συνθήκες επιτρέπουν τέτοιες εφαρμογές.



Εικόνα 2.7: Οικισμός στην Ιταλία που Θερμαίνεται με τηλεθέρμανση.

4. Θέρμανση θερμοκηπίων.

Τα θερμαινόμενα θερμοκήπια χρησιμοποιούνται για την αύξηση της παραγωγής και την πρωίμιση καλλιεργειών. Η εκτός εποχής καλλιέργεια κηπουρικών, οπωρικών και ανθοκομικών προϊόντων ή η ανάπτυξη τους σε περιοχές με μη ευνοϊκές κλιματολογικές συνθήκες, μπορεί σήμερα να βασιστεί σε μια ευρέως εφαρμοσμένη τεχνολογία. Οι χρήσεις και το μέγεθος των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων εξαρτώνται από τη διαθέσιμη γεωθερμική ενέργεια, από τις κλιματολογικές συνθήκες, από τα υλικά κατασκευής των θερμοκηπίων και από το είδος της καλλιέργειας. Οι απαιτούμενες ποσότητες ενέργειας όμως, είναι μεγάλες, με αποτέλεσμα η γεωθερμία να αποτελεί την ιδανική μορφή ενέργειας για αγροτικές εφαρμογές, λόγω του μικρού κόστους της. Τα θερμοκήπια απαιτούν την παρουσία γεωθερμικών ρευστών σε θερμοκρασία που υπερβαίνει τους 30°C. Μια πάρα πολύ κοινή περίπτωση, για τα δεδομένα του ελληνικού χώρου είναι η θέρμανση γυάλινων θερμοκηπίων με ντομάτα και με θερμαντικό μέσο γεωθερμικά ρευστά 40-55°C.

Ο χώρος ενός θερμοκηπίου μπορεί να θερμανθεί με πέντε τρόπους:

- ο Με εναέριους, επιδαπέδιους σωλήνες ή με σωλήνες τοποθετημένους μέσα στο χώμα (σε βάθος 5-20cm).
- ο Με εναλλάκτη αέρα - γεωθερμικού νερού ή νερού λειτουργίας (αερόθερμο).
- ο Με τοποθέτηση θερμαντικών σωμάτων στα πλευρικά τοιχώματα του θερμοκηπίου.
- ο Με ψεκασμό της οροφής του θερμοκηπίου με γεωθερμικό υγρό ή διέλευση υγρού στα διπλά τοιχώματα της οροφής (κυρίως για αντιπαγετική προστασία).
- ο Με συνδυασμό των προηγούμενων τρόπων (Φυτίκας Μ., Ανδρίτσος Ν. 2005).



Εικόνα 2.8: Γ/Θ θερμοκήπιο στο Σιδηρόκαστρο Ν. Σερρών.



Εικόνα 2.9: Γ/Θ θερμοκήπιο κηπευτικών στα Ελαιοχώρια Ν. Χαλκιδικής.

(Πηγή: Αρβανίτης Απ., 2008).

5. Γεωργία και Κτηνοτροφία.

Οι αγροτικές εφαρμογές της γεωθερμίας συνίστανται κυρίως στις ανοικτές καλλιέργειες. Το θερμό νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις ανοικτές καλλιέργειες για την άρδυσή τους και/ή τη θέρμανση του εδάφους. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της άρδευσης με χλιαρό νερό εντοπίζεται στο γεγονός ότι, για να επιτευχθεί κάποια αξιόλογη μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους θα πρέπει οι μεγάλες ποσότητες νερού να έχουν θερμοκρασία τόσο χαμηλή ώστε να μην προκαλούν ζημιές στις αρδευόμενες καλλιέργειες. Η βέλτιστη λύση φαίνεται ότι είναι ο συνδυασμός θέρμανσης εδάφους και άρδευσης.

Η χημική σύσταση των γεωθερμικών νερών που χρησιμοποιούνται για άρδευση θα πρέπει να εξετάζεται και να παρακολουθείται προσεκτικά, ώστε να αποφεύγονται τυχόν βλαβερές συνέπειες στα φυτά.

Σε πολλές περιπτώσεις τα γεωθερμικά νερά θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν ακόμη επικερδέστερα, μέσα από τη συνδυασμένη χρήση τους και σε κτηνοτροφικές μονάδες.

Η εκτροφή ζώων σε ένα περιβάλλον ελεγχόμενης θερμοκρασίας συνεισφέρει στη βελτίωση της υγείας τους, ενώ η χρήση των θερμών ρευστών θα μπορούσε να επεκταθεί στον καθαρισμό και την εξυγίανση των χώρων τους, αλλά και στην ξήρανση των αποβλήτων τους.



Εικόνα 2.10: Θέρμανση χώματος για πρωϊμηση σπαραγγιών. (Πηγή: Αρβανίτης Απ., 2008).

6. Υδατοκαλλιέργειες και Ιχθυοκαλλιέργειες.

Οι υδατοκαλλιέργειες, οι οποίες στην ουσία αποτελούν την ελεγχόμενη εκτροφή υδρόβιων οργανισμών, αποκτούν σήμερα ολοένα και μεγαλύτερη σπουδαιότητα σε παγκόσμιο επίπεδο, λόγω της αυξημένης ζήτησής τους στην αγορά. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας εκτροφής των ειδών αυτών είναι πολύ πιο σημαντικός σε σχέση με τα είδη που αναπτύσσονται στην ξηρά.

Η γεωθερμία μπορεί να προσφέρει με οικονομικό τρόπο στη θέρμανση του νερού σε υδατοκαλλιέργειες ψαριών (χέλια, λαβράκια, τσιπούρες, πέστροφες, σολομούς, γατόψαρα κ.α.), θαλάσσιων μαλακόστρακων (π.χ. γαρίδας) και ερπετών με εμπορική αξία (π.χ. αλιγάτορες). Η θέρμανση πραγματοποιείται είτε άμεσα, με

την απευθείας εισαγωγή του γεωθερμικού νερού στις δεξαμενές ή λιμνούλες ανάπτυξης, είτε έμμεσα, ύστερα από τη θέρμανση γλυκού ή θαλασσινού νερού.

Για την άμεση χρήση του γεωθερμικού νερού απαιτείται να μην υπάρχουν τοξικά συστατικά στο νερό (π.χ. βαρέα μέταλλα, υδρόθειο, αρσενικό κλπ.). Οι υδατοκαλλιέργειες απαιτούν την παρουσία γεωθερμικού ρευστού σε θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 20°C (Φυτίκας Μ., Ανδρίτσος Ν. 2005). Το μέγεθος των εγκαταστάσεων εξαρτάται από την αρχική θερμοκρασία των ρευστών, τη θερμοκρασία που απαιτείται στις δεξαμενές εκτροφής και από τις θερμικές απώλειες των τελευταίων. Η απαραίτητη θερμοκρασία στο νερό της δεξαμενής της ιχθυοκαλλιέργειας κυμαίνεται από 14 έως 30°C ανάλογα με το είδος της. Στην Ελλάδα μονάδες ιχθυοκαλλιέργειας βρίσκονται στο Πόρτο Λάγος και στο Ν. Εράσμιο - Μάγνανα Ξάνθης.



Εικόνα 2.11: Καλλιέργεια μικροφύκους *Spirulina* στα Θερμά Νιγρίτας του Ν. Σερρών.



Εικόνα 2.12: Μονάδα για αντιπαγετική προστασία και θέρμανση τεχνητών λιμνών στο Πόρτο Λάγος του Ν. Ξάνθης.

(Πηγή: Αρβανίτης Απ., 2008).

7. Βιομηχανικές εφαρμογές.

Η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να είναι οικονομικώς αποδοτική και αξιόπιστη στις βιομηχανικές εφαρμογές. Συγκεκριμένα παραδείγματα βιομηχανικών εφαρμογών είναι η λεύκανση λαχανικών, η προπαρασκευή κονσερβοποιημένων τροφών, η εμφιάλωση νερού και ανθρακούχων ποτών, η ξήρανση αγροτικών προϊόντων, η παραγωγή χαρτιού, τμημάτων αυτοκινήτων, η ανάκτηση λαδιού, η παστερίωση γάλακτος, η χρήση στη βυρσοδεψία, η χημική ανάκτηση προϊόντων, η παραγωγή με διαχωρισμό του CO₂, η χρήση σε πλυντήρια, η ξήρανση γης διατόμων, η επεξεργασία πολτού και χαρτιού και η παραγωγή βορικών αλάτων και βορικού οξέος.

Στις περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών είναι μικρότερη από την απαιτούμενη, είναι δυνατή η χρησιμοποίηση ρευστών σε διαδικασίες προθέρμανσης ή η ανύψωση της θερμοκρασίας τους με τη χρήση αντλιών θερμότητας ή με συμπληρωματική θέρμανση (με συμβατικά καύσιμα). Απαραίτητη προϋπόθεση για τη χρησιμοποίηση των γεωθερμικών ρευστών από υφιστάμενη βιομηχανική μονάδα είναι η γειτνίαση της τελευταίας με το γεωθερμικό πεδίο (Β. Líndal 1992).



Εικόνα 2.13: Πιλοτική μονάδα προξήρανσης βαμβακιού στο Ν. Ξάνθης.



Εικόνα 2.14: Γ/Θ ξηραντήριο τομάτας τύπου σήραγγας στο Εράσμιο Ν. Ξάνθης.

(Πηγή: Αρβανίτης Απ., 2008).

8. Θέρμανση πισίνων και ιατρικές εφαρμογές.

Μία από τις πλέον δημοφιλείς χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο είναι η θέρμανση πισίνων και οι ιατρικές εφαρμογές. Σήμερα, υπάρχει μία πληθώρα από λουτροπόλεις που χρησιμοποιούν το γεωθερμικό νερό είτε για θεραπεία είτε για αναζωογόνηση. Σε ότι αφορά τις θεραπευτικές εφαρμογές, οι δράσεις των γεωθερμικών νερών στον ανθρώπινο οργανισμό διαφέρουν ανάλογα με τη σύσταση τους (θερμοκρασία, μεταλλικά στοιχεία) αλλά και με τον τρόπο χρήσης τους. Οι κυριότερες εφαρμογές είναι: λουτροθεραπεία, ποσιθεραπεία, εισπνοθεραπεία και λασποθεραπεία. Σε ότι αφορά τις εφαρμογές αναζωογόνησης, πρόκειται για λουτροπόλεις με κέντρα υγείας και ομορφιάς, κύριος στόχος των οποίων είναι η ξεκούραση και η ανανέωση του ανθρώπινου οργανισμού (Φυτίκας Μ., Ανδρίτσος Ν. 2005).

Στην Ελλάδα η εφαρμογή αυτή είναι αρκετά διαδεδομένη, με λουτροθεραπευτικά κέντρα να υπάρχουν σχεδόν σε όλη τη χώρα, με πιο γνωστά αυτά των Θερμοπυλών, Καμ. Βούρλων και της Αιδηψού.



Εικόνα 2.15: Λουτράκι Αριδαίας Ν. Πέλλας.



Εικόνα 2.16: Λουτρά Αιδηψού.

(Πηγή: Αρβανίτης Απ., 2008).

9. Αφαλάτωση θαλασσινού νερού.

Ένα παράδειγμα βιομηχανικής χρήσης της γεωθερμίας είναι η αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Σε αυτή την περίπτωση τα γεωθερμικά ρευστά χρησιμοποιούνται σαν θερμαντικό μέσο και η αφαλάτωση δύναται να επιτευχθεί με τη μέθοδο της πολυσταδιακής εξάτμισης εν κενό (MES). Για να είναι οικονομικά συμφέρουσα η αφαλάτωση πρέπει η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών να είναι τουλάχιστον 60 °C. Η θερμοκρασία απόρριψης σχεδιάζεται να είναι 40-50 °C.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για περίπτωση αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με γεωθερμικά ρευστά θερμοκρασίας 75 °C και παροχής 100 m³/h επιτυγχάνεται αφαλάτωση 600 m³/h την ημέρα. Για να θεωρείται οικονομικά συμφέρουσα μία εκμετάλλευση αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας πρέπει το κόστος της γεωθερμικής ενέργειας να αντιστοιχεί το πολύ στο 60% του κόστους αφαλάτωσης με πετρέλαιο.



Εικόνα 2.17: Αφαλάτωση νερού στην Κίμωλο. (Πηγή: Φυτίκας Μ., Γεωθερμία, η μεγάλη αγνοούμενη ΑΠΕ στην Ελλάδα, 2014).

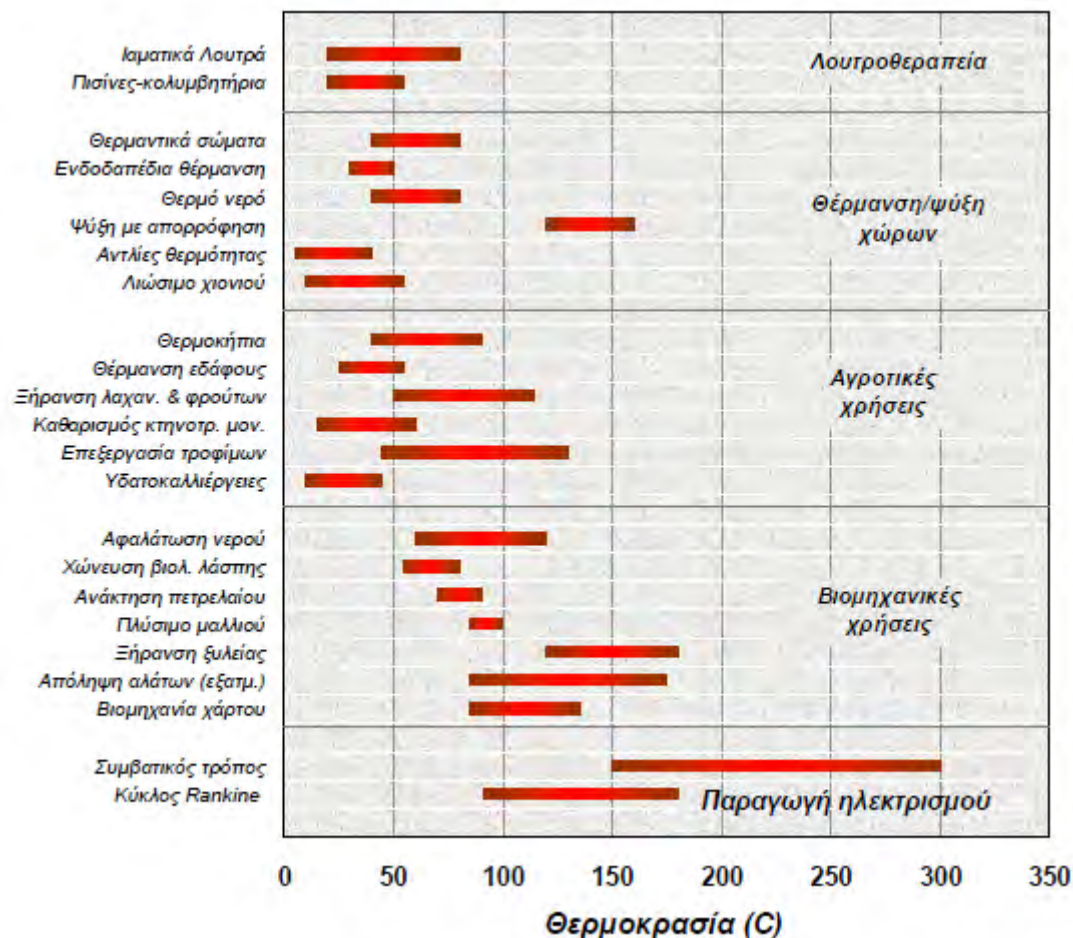
10. Άλλες χρήσεις.

Υπάρχουν επίσης εφαρμογές για χρήση των γεωθερμικών ρευστών χαμηλής θερμοκρασίας για λιώσιμο πάγου και αντιπαγετική προστασία πεζοδρομίων, δρόμων και πλατειών, ως και σχέδια για τη διάλυση της ομίχλης σε κάποια αεροδρόμια.

Ενδεικτικά, στον παρακάτω πίνακα φαίνονται θερμοκρασίες που απαιτούνται για διάφορες αγροτικές και βιομηχανικές διεργασίες:

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ ΙΣΧΥΟΣ	Παραγωγή ηλεκτρισμού (με ατμό) >140 °C Παραγωγή ηλεκτρισμού (κύκλος...) >90 °C Πλύσεις, , αποστειρώσεις, 21-130 °C παραγωγή πάγου, κλιματισμός, βιομηχανικά ψυγεία, 70-130 °C
ΧΗΜΙΚΕΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ	Αλουμίνες (μέθοδος BAYER) 140-150 °C Παραγωγή αλκοόλης (αιθανόλη) 90-150 °C Φαρμακευτικά 55-125 °C Συνθετικά καουτσούκ 25-36 °C Σάπωνες, απορρυπαντικά 30-55 °C
ΑΓΡΟ-ΖΩΟΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ	Ξηραντήρα (σανός, καπνός) 30-135 °C Θερμοκήπια 30-130 °C Εκτροφεία ζώων, εκκολαπτήρια 25-60 °C Καλλιέργεια 20-40 °C Θέρμανση εδάφους 20-25 °C Υδατοκαλλιέργειες 15-36 °C
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ	Απόσταξη 100-180 °C Κονσερβοποιία 90-140 °C Ζυθοποιία, ποτοποιία 75-150 °C Σπορέλαια 70-150 °C Αποφλοιώση, πατάτες κλπ. 80-200 °C Ζάχαρη (τεύτλα) 50-140 °C Ξηραντήρια δημητριακών 40-50 °C
	Παστερίωση 40-50 °C Σφαγεία & βιομηχανικό κρέας 40-55 °C
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ ΟΡΥΚΤΩΝ	Γύψος, τσιμέντο, καολίνης, τούβλα 50-150 °C Αφαλάτωση & ανάκτηση ορυκτών 110-120 °C Δευτερεύουσα ανάκτηση πετρελαίου (γεωτρήσεις) 90 °C
ΑΛΛΕΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ	Επεξεργασία ξύλου 55-150 °C Χαρτοποιία 50-150 °C Υφαντουργία (πλύσιμο- στέγνωμα) 90-134 °C Λουτροθεραπεία, πισίνες 20-80 °C

Πίνακας 2.1: Θερμοκρασίες που απαιτούνται για διάφορες αγροτικές και βιομηχανικές διεργασίες. (Πηγή: Ανδρίτσος Ν., Ενέργεια και Περιβάλλον, 2008).



Πίνακας 2.2: Το τροποποιημένο διάγραμμα Lindal. (Πηγή: Lindal B., 1973).

2.4. Ανταγωνιστικότητα της Γεωθερμικής Ενέργειας

Η γεωθερμική ενέργεια παράγεται εμπορικά σε μία κλίμακα εκατοντάδων MW για περισσότερο από τρεις δεκαετίες δεδομένου ότι διαθέτει διάφορα θετικά γνωρίσματα που την καθιστούν ανταγωνιστική προς τις συμβατικές πηγές ενέργειας και μερικές άλλες ΑΠΕ. Ειδικότερα:

- Αποτελεί έναν τοπικό ενεργειακό πόρο που μπορεί να μειώσει τη ζήτηση για εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα.
- Έχει σημαντική θετική επίδραση στο περιβάλλον με την αντικατάσταση της καύσης των ορυκτών καυσίμων.
- Είναι αποδοτική και ανταγωνιστική με τις συμβατικές πηγές ενέργειας.
- Οι γεωθερμικοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν συνεχώς, χωρίς εμπόδια που επιβάλλονται από τις καιρικές συνθήκες, αντίθετα από άλλες ΑΠΕ.
- Διαθέτει εγγενή ικανότητα αποθήκευσης και είναι καταλληλότερη για την κάλυψη της ζήτησης του φορτίου βάσης.
- Είναι μία αξιόπιστη και ασφαλής ενεργειακή πηγή που δεν απαιτεί αποθήκευση ή μεταφορά των καυσίμων.

Επιπλέον, η νεώτερη γενιά των γεωθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής εκπέμπει μόνο 136gr CO₂ / kWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατά μέσο όρο, έναντι των 453gr CO₂ / kWh μιας μονάδας με καύσιμο φυσικό αέριο ή των 1042gr / kWh CO₂ από ένα θερμικό σταθμό άνθρακα. Αυτή τη στιγμή, οι ΑΠΕ με το μέγιστο δυναμικό και τις χαμηλότερες εκπομπές στην Ευρώπη, βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα, είναι η υδραυλική και η γεωθερμική ενέργεια. Ο συντελεστής διαθεσιμότητας της γεωθερμικής ενέργειας, δηλαδή το ποσοστό του χρόνου που μπορεί να παράγεται η ονομαστική ενέργεια, εξαρτάται από τη φύση της πηγής και κατά δεύτερο λόγο από τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού.

2.5. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Από τα αρχικά στάδια κατασκευής μιας γεωθερμικής μονάδας παρατηρούνται οι πρώτες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και είναι συνδεδεμένες με τις γεωτρήσεις που πραγματοποιούνται στην περιοχή είτε κατά το στάδιο της έρευνας είτε κατά την παραγωγή. Οι εργασίες εγκατάστασης της εξέδρας της γεώτρησης αλλά και αυτές της διάνοιξης δρόμων ή η επιδιόρθωση αυτών που υπάρχουν ήδη, τροποποιούν λίγο την επιφανειακή μορφολογία της περιοχής, αλλά μπορούν να προκαλέσουν ακόμα και μικρές ζημιές στην πανίδα και τη χλωρίδα του τοπικού οικοσυστήματος. Ρύπανση των επιφανειακών υδάτων από την απότομη έξοδο των γεωθερμικών ρευστών αλλά και της ατμόσφαιρας από την διαφυγή αερίων, μπορεί να αποφευχθεί με τη χρήση του κατάλληλου εξοπλισμού.

Κατά τη λειτουργία της μονάδας, είναι δυνατό να προκύψουν περιβαλλοντικά προβλήματα από την διαφυγή αερίων όπως διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο, μεθάνιο, αμμωνία, βόρειο, αρσενικό και υδράργυρο, και άλλα, που μπορεί να αποτελέσουν πηγές ρύπανσης αν διατεθούν στο επιφανειακό περιβάλλον. Η βέλτιστη πρακτική για τον μηδενισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και για την αντιμετώπιση των υπόλοιπων επιβλαβών αερίων είναι η τεχνική της ολικής επανεισαγωγής των γεωθερμικών ρευστών στον αρχικό ταμιευτήρα. Η άντληση μεγάλων ποσοτήτων ρευστού από τον γεωθερμικό ταμιευτήρα, είναι πιθανό να προκαλέσει καθιζήσεις, επίπτωση, που επίσης προλαμβάνεται με την επανεισαγωγή των γεωθερμικών ρευστών στον αρχικό ταμιευτήρα. Η διαδικασία αυτή, όμως μπορεί να προκαλέσει μια μικρή αύξηση της σεισμικής δραστηριότητας της περιοχής σε κάποιες περιπτώσεις. Αυτό το ενδεχόμενο, μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο, καθώς τα σεισμικά φαινόμενα που έχουν παρατηρηθεί λόγω εκμετάλλευσης της γεωθερμίας είναι σπάνια αλλά και πολύ μικρής έντασης.

Οι περιβαλλοντικές αυτές επιπτώσεις είναι:

- Εκπομπές αερίων.
- Υδάτινη ρύπανση.
- Απόθεση στερεών αποβλήτων.
- Καθίζηση.
- Σεισμικότητα.
- Χρήση γης και οπτική ρύπανση.
- Θόρυβος.

1. Εκπομπές αερίων.

Τα μη συμπυκνώσιμα αέρια που εμπεριέχονται στον γεωθερμικό ατμό και μπορούν να απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα είναι κυρίως διοξείδιο του άνθρακα και υδρόθειο. Επίσης, υπάρχει περίπτωση να περιέχουν αμμωνία, υδρογόνο, άζωτο, μεθάνιο και ραδόνιο σε δευτερεύουσες ποσότητες, καθώς επίσης και πτητικά σωματίδια βορίου, αρσενικού και υδραργύρου (R. DiPippo 1991, A. Martzopoulou, Chr. Koroneos and N. Moussiopoulos 2002).

- ο Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) συμβάλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, οι συγκεντρώσεις όμως που εκπέμπονται είναι πολύ μικρότερες από εκείνες που παράγονται κατά την καύση των συμβατικών καυσίμων. Αν η συγκέντρωση του είναι αυξημένη, τότε υπάρχει η δυνατότητα του διαχωρισμού του και της χρησιμοποίησής του σε βιομηχανικές εφαρμογές, π.χ. παρασκευή ξηρού πάγου, βιομηχανία τροφίμων κ.α..
- ο Το υδρόθειο (H_2S) είναι κάκοσμο και σε μεγάλες συγκεντρώσεις τοξικό. Οξειδώνεται προς SO_2 και SO_3 , τα οποία με το νερό της βροχής μετατρέπονται σε H_2SO_4 και προκαλούν οξύνιση των εδαφών (όξινη βροχή). Αν τα γεωθερμικά ρευστά έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε H_2S , γίνεται αποθείωση και παραλαμβάνεται το θείο, όπου και χρησιμοποιείται στη βιομηχανία και τη γεωργία.
- ο Η αμμωνία (NH_3) ενώνεται με το περιεχόμενο διοξείδιο του άνθρακα και το νερό και δημιουργεί ανθρακικό αμμώνιο ($[\text{NH}_4]_2\text{CO}_3$), το οποίο αποτελεί λίπασμα για το έδαφος.
- ο Το υδρογόνο (H_2) δεν θεωρείται επιβαρυντικό για την ατμόσφαιρα. Εξάλλου λόγω του μικρού ειδικού του βάρους, διαφεύγει με αργό ρυθμό προς τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.
- ο Το άζωτο (N_2) υπάρχει σε μεγάλες ποσότητες στην ατμόσφαιρα, έτσι που οι μικρές εκπομπές μιας γεωθερμικής εγκατάστασης είναι αμελητέες.
- ο Το μεθάνιο (CH_4) είναι φυσικό προϊόν αναερόβιας σήψης και δεν περικλείει κινδύνους στις μικρές συγκεντρώσεις που περιέχεται στα γεωθερμικά ρευστά.
- ο Σε ορισμένες περιπτώσεις εκλύονται μικρές ποσότητες ραδονίου (Rn), το οποίο είναι αέριο προϊόν της φυσικής μεταστοιχείωσης του ουρανίου, συνήθως στην ατμόσφαιρα ηφαιστειογενών περιοχών.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση της γεωθερμίας είναι αρκετά μικρές και εύκολα ελεγχόμενες. Στην πραγματικότητα, η γεωθερμική ενέργεια παράγει ελάχιστες εκπομπές στην ατμόσφαιρα. Οι εκπομπές υποξειδίου του αζώτου, υδρόθειου, διοξειδίου του θείου, αμμωνίας, μεθανίου, αιωρούμενων σωματιδίων και διοξειδίου του άνθρακα είναι εξαιρετικά χαμηλές, ειδικά όταν συγκρίνονται με τις εκπομπές από τα συμβατικά καύσιμα, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 2.3: Εκπομπές επιβλαβών αερίων από διάφορες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (σε kg/MWh παραγόμενης ενέργειας). (Πηγή :Φυτίκας Μ., Ανδρίτσος Ν., Δρακούλης Ρ. 2008).

Μορφή ενέργειας	CO ₂	NO _x	SO _x
Άνθρακας	1042	4,4	11,8
Πετρέλαιο	839	12,4	1,6
Φυσικό αέριο	453	1,4	0,0
Γεωθερμική ενέργεια*	95	0,3	0,1
Φωτοβολταϊκά**	135	0,3	0,4
Βιομάζα	20	1,8	0,5

* μέση τιμή – οι μονάδες δυαδικού κύκλου έχουν μηδενικές εκπομπές

** περιλαμβάνει τις εκπομπές από τον κύκλο ζωής της τεχνολογίας

2. Υδάτινη ρύπανση.

Στο υδάτινο οικοσύστημα οι επιπτώσεις εμφανίζονται με τη μορφή φυσικής και χημικής ρύπανσης επιφανειακών νερών (λιμνών, ποταμών, θαλασσών) και υπόγειων υδροφόρων οριζόντων από απορριπτόμενες μεγάλες ποσότητες υγρών γεωθερμικών αποβλήτων (αλμόλοιπο).

Φυσική ρύπανση είναι δυνατό να προκληθεί από το θερμικό περιεχόμενο του αλμόλοιπου και τη διαφορετική οξύτητά του (pH) σε σχέση με αυτήν του υγρού αποδέκτη. Η χημική ρύπανση οφείλεται στους περιεχόμενους διαλυμένους στο αλμόλοιπο ρυπαντές, όπως είναι π.χ. το βόριο, λίθιο, αρσενικό, κάδμιο, νικέλιο, μόλυβδος, υδράργυρος, χλώριο, φθόριο κ.α..

Η επίδραση στο υδάτινο οικοσύστημα από τα υγρά απόβλητα είναι μηδενική, όταν αυτά επανεισάγονται σε βαθιά αποχετευτική γεώτρηση.

3. Απόθεση στερεών αποβλήτων.

Επιπτώσεις από τη γεωθερμία στο έδαφος ή στο υπέδαφος μπορεί να υπάρξουν και από την απόθεση στερεών αποβλήτων. Σε γεωθερμικές εγκαταστάσεις στερεά απόβλητα μπορεί να δημιουργηθούν από τις εξής πηγές: α) λάσπη γεωτρήσεων και θρύμματα των διατρυόμενων σχηματισμών κατά τη διάρκεια της διάτρησης, β) απόβλητα από τις τεχνολογίες δέσμευσης του υδρόθειου (π.χ. στοιχειακό θείο) και γ) στερεά άλατα από την απομάκρυνση των διαλυμένων αλάτων στο γεωθερμικό νερό (π.χ. πυριτικά άλατα) ή από τον καθαρισμό των σωληνώσεων από τις επικαθίσεις (ανθρακικό ασβέστιο, θειούχες ενώσεις βαρέων μετάλλων, πυριτικές ενώσεις).

Οι ποσότητες στερεών αποβλήτων δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες, ειδικά όταν συγκρίνονται με απόβλητα από μονάδες που λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα και τα περισσότερα από αυτά δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως τοξικά (Φυτίκας, Ν. Ανδρίτσος, 2004, Mary H. Dickson and Mario Fanelli 2004).

4. Καθίζηση.

Καθίζηση προκαλείται από μακρόχρονες εκτεταμένες εκμεταλλεύσεις, κατά τις οποίες αντλούνται τεράστιες ποσότητες (της τάξης των εκατομμύριων τόννων) γεωθερμικού ρευστού από σχετικά ρηχούς γεωλογικούς σχηματισμούς χωρίς να γίνεται επανεισαγωγή, με την οποία αναπληρώνεται ένα μέρος του αντλούμενου ρευστού.

5. Σεισμικότητα.

Σεισμικότητα είναι δυνατόν να προκληθεί κατά την επανεισαγωγή αντίστοιχα πολύ μεγάλων ποσοτήτων γεωθερμικού ρευστού με γρήγορους ρυθμούς σε αβαθείς σχηματισμούς χαμηλής σχετικά διαπερατότητας. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με κατάλληλο σχεδιασμό και διαρκή παρακολούθηση καθόλη τη διάρκεια της εκμετάλλευσης.

6. Χρήση γης και οπτική ρύπανση.

Το κύριο χαρακτηριστικό της γεωθερμικής ενέργειας είναι ότι τη συναντάμε σε ορισμένες μόνο περιοχές και η αξιοποίησή της γίνεται επιτόπου. Το θετικό σε αυτήν την περίπτωση είναι ότι ο «συνολικός κύκλος παραγωγής της ενέργειας» περιορίζεται σε μία μόνον περιοχή, κάτι που εξαλείφει την ανάγκη μεταφοράς των γεωθερμικών ρευστών σε αποστάσεις μεγαλύτερες από μερικά χιλιόμετρα. Η έκταση που απαιτείται για την αξιοποίηση της γεωθερμίας (π.χ. για την εγκατάσταση της μονάδας, το χώρο των γεωτρήσεων, τις σωληνώσεις μεταφοράς και τους δρόμους πρόσβασης) είναι γενικά μικρότερη από την έκταση της γης που απαιτούν άλλες μορφές ενέργειας, ιδιαίτερα αν συνυπολογίσει κανείς τις εκτάσεις που απαιτούνται για την εξόρυξη και την αποθήκευση των καυσίμων ή τη δημιουργία φραγμάτων και τεχνητών λιμνών. Το ίδιο ισχύει και για την οπτική ρύπανση από τις γεωθερμικές μονάδες. Το κυριότερο ορατό τμήμα μίας μονάδας είναι ο πύργος ψύξης.

7. Θόρυβος.

Κατά τη φάση λειτουργίας της γεωθερμικής μονάδας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχουν αρκετά υψηλά επίπεδα θορύβου, προερχόμενα κυρίως από τους ανεμιστήρες του πύργου ψύξης, τον εκτοξευτή ατμού και το βόμβο των ατμοστροβίλων. Αυτά τα επίπεδα θορύβου ελέγχονται από μόνιμες εγκαταστάσεις σιγαστήρων ή άλλων συσκευών μείωσης του θορύβου.

2.6. Κριτήρια χωροθέτησης εγκαταστάσεων

Η χωροθέτηση εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας είναι απόλυτα συνυφασμένη με την ύπαρξη γεωθερμικού πεδίου στο οποίο εντοπίζεται αυτοτελές γεωθερμικό δυναμικό υψηλής ενθαλπίας.

Σύμφωνα με το ειδικό χωροταξικό για τις ΑΠΕ, καθορίζονται οι περιοχές στις οποίες θα πρέπει να αποκλείεται η εγκατάσταση μονάδων παραγωγής ενέργειας από γεωθερμία. Αυτές οι περιοχές είναι:

- i. Τα κηρυγμένα διατηρητέα μνημεία της παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς και τα άλλα μνημεία μείζονος σημασίας της παρ. 5 ββ) του άρθρου 50 του ν. 3028/2002, καθώς και των οριοθετημένων αρχαιολογικών ζωνών προστασίας Α που έχουν καθορισθεί κατά τις διατάξεις του άρθρου 91 του ν. 1892/1991 ή καθορίζονται κατά τις διατάξεις του ν. 3028/2002.
- ii. Τις περιοχές απολύτου προστασίας της φύσης και προστασίας της φύσης που καθορίζονται κατά τις διατάξεις των άρθρων 19 παρ. 1 και 2 και 21 του ν. 1650/1986.
- iii. Τα όρια των Υγροτόπων Διεθνούς Σημασίας (Υγρότοποι Ραμσάρ).
- iv. Τους πυρήνες των εθνικών δρυμών και των κηρυγμένων μνημείων της φύσης και των αισθητικών δασών.
- v. Τους οικοτόπους προτεραιότητας περιοχών της Επικράτειας που έχουν ενταχθεί ως τόποι κοινοτικής σημασίας στο δίκτυο ΦΥΣΗ 2000 σύμφωνα με την απόφαση 2006/613/ΕΚ της Επιτροπής.
- vi. Τους εντός σχεδίων πόλεων και ορίων οικισμών προ του 1923 ή κάτω των 2.000 κατοίκων περιοχών.
- vii. Τους Π.Ο.Τ.Α. του άρθρου 29 του ν. 2545/97, των Περιοχών Οργανωμένης Ανάπτυξης Παραγωγικών Δραστηριοτήτων του τριτογενούς τομέα του άρθρου 10 του ν. 2742/99, των θεματικών πάρκων και των τουριστικών λιμένων.
- viii. Τους ατύπως διαμορφωμένους, στο πλαίσιο της εκτός σχεδίου δόμησης, τουριστικών και οικιστικών περιοχών. Ως ατύπως διαμορφωμένες τουριστικές και οικιστικές περιοχές για την εφαρμογή του παρόντος νοούνται οι περιοχές που περιλαμβάνουν 5 τουλάχιστον δομημένες ιδιοκτησίες με χρήση τουριστική ή κατοικία, οι οποίες ανά δύο βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των 100 μέτρων, και συνολική δυναμικότητα 150 κλίνες τουλάχιστον. Για τον υπολογισμό της δυναμικότητας κάθε δομημένη ιδιοκτησία με χρήση κατοικίας θεωρείται ισοδύναμη με 4 κλίνες ανεξαρτήτως εμβαδού. Οι ανωτέρω περιοχές θα αναγνωρίζονται στο πλαίσιο της οικείας Π.Π.Ε.Α.
- ix. Τις ακτές κολύμβησης που περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα παρακολούθησης της ποιότητας των νερών κολύμβησης που συντονίζεται από το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.
- x. Τα τμήματα των λατομικών περιοχών και μεταλλευτικών και εξορυκτικών ζωνών που λειτουργούν επιφανειακά.

Για τις περιοχές που ανήκουν στις κατηγορίες vi, vii και viii, ορίζεται ελάχιστη απόσταση από τα όριά τους τα 500μ.

Στις περιπτώσεις όμως που έχει ήδη εξακριβωθεί η ύπαρξη γεωθερμικού δυναμικού και λόγω της μοναδικής και σημειακής δυνατότητας χωροθέτησης εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας, δεν είναι εκ των προτέρων δυνατός ο καθορισμός άλλων κατηγοριών ζωνών αποκλεισμού (εκτός των πόλεων, οικισμών και κατοικημένων περιοχών). Στις περιπτώσεις αυτές, οι ειδικότερες προϋποθέσεις χωροθέτησης των ανωτέρω εγκαταστάσεων πρέπει να εξετάζονται στο πλαίσιο της περιβαλλοντικής αδειοδότησης του έργου.

2.7. Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα εκμετάλλευσης της γεωθερμίας

Η γεωθερμική ενέργεια αποτελεί μία καθαρή μορφή ενέργειας, φιλική προς το περιβάλλον, ιδιαίτερα όταν συγκρίνεται με τις συμβατικές μορφές ενέργειας, με ελάχιστες έως μηδαμινές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εκμετάλλευσή της. Ακόμη και όταν υπάρχουν κάποιες περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αυτές μπορούν πάντοτε να αντιμετωπισθούν με τη χρήση της τεχνολογίας. Τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της γεωθερμικής ενέργειας είναι:

Πλεονεκτήματα:

- Είναι διαθέσιμη μέρα και νύχτα όλο το χρόνο και δεν επηρεάζεται από καιρικές συνθήκες.
- Οικονομικά ελκυστική καθώς η τιμή της παραγόμενης KWh από ένα γεωθερμικό σταθμό είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την τιμή της KWh ενός συμβατικού ΑΗΣ.
- Εκτός από τη δυνατότητα ηλεκτροπαραγωγής, η γεωθερμική ενέργεια προσφέρεται έτοιμη ως θερμικό προϊόν.
- Μικρό λειτουργικό κόστος, αν και το κόστος εγκατάστασης είναι σημαντικά αυξημένο σε σχέση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας.
- Συνεχής παροχή γεωθερμικού ρευστού-συνεχής παραγωγή ενέργειας.
- Αξιόπιστη μορφή ενέργειας με ώριμη τεχνολογία (στροβίλους- εναλλάκτες κλπ).
- Ανανεώσιμη Μορφή Ενέργειας.
- Συνεισφέρει στην εξοικονόμηση στερεών καυσίμων.
- Συνεισφέρει στην περιφερειακή ανάπτυξη και στην αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας.
- Εγγύρια πηγή ενέργειας-ενεργειακή απεξάρτηση.
- Φιλική προς το περιβάλλον. Δεν παράγει επικίνδυνα αέρια καύσης (CO₂, NO_x, SO₂ κλπ), ούτε σωματίδια, ούτε τέφρα, ούτε καπνό.
- Απαιτεί την μικρότερη έκταση Γης σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας.
- Συμβολή στην επίτευξη των στόχων της Λευκής Βίβλου της Ε.Ε. και του πρωτόκολλου του Κιότο.

Μειονεκτήματα:

- Λόγω των αιτιών προέλευσης της, η γεωθερμία περιορίζεται γεωγραφικά. Δεν μπορούμε να κατασκευάσουμε γεωθερμικό σταθμό οπουδήποτε εμείς επιθυμούμε.
- Το γεωθερμικό ρευστό δεν μπορεί να μεταφερθεί. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση του και η παραγωγή ενέργειας πρέπει να γίνει εκεί όπου αυτό αντλείται.
- Ο σχηματισμός επικαθίσεων σε κάθε σχεδόν επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το γεωθερμικό ρευστό.
- Η διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών.
- Ορισμένες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, όπως διάθεση των ρευστών μετά τη χρήση τους και εκπομπές τοξικών αερίων κυρίως του υδρόθειου (H_2S).

Κεφάλαιο 3^ο

Η Γεωθερμική Ενέργεια στην Ελλάδα και Παγκοσμίως

3.1. Γενικά

Λόγω κατάλληλων γεωλογικών συνθηκών, ο Ελλαδικός χώρος διαθέτει σημαντικές γεωθερμικές πηγές και των τριών κατηγοριών (υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας) σε οικονομικά βάθη (100-1500 μ). Σε μερικές περιπτώσεις τα βάθη των γεωθερμικών ταμιευτήρων είναι πολύ μικρά, κάνοντας ιδιαίτερα ελκυστική, από οικονομική άποψη, τη γεωθερμική εκμετάλλευση.

Η χώρα μας είναι ιδιαίτερα ευνοημένη όσον αφορά στην ύπαρξη γεωθερμικής ενέργειας και τα τελευταία 30 περίπου χρόνια έχει πραγματοποιηθεί αξιολογή βασική έρευνα, εντοπίζοντας ένα σημαντικό αριθμό γεωθερμικών πεδίων και πλήθος γεωθερμικά ελπιδοφόρων περιοχών. Η Ελλάδα, μαζί με την Ιταλία και την Πορτογαλία, είναι οι μόνες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης στις οποίες υπάρχουν πεδία υψηλής ενθαλπίας (με θερμοκρασία ρευστών μεγαλύτερη των 150°C) και από τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν τα γεωθερμικά ρευστά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, η χώρα μας διαθέτει πληθώρα περιοχών, κυρίως στην Κεντρική και Βόρεια Ελλάδα και στα νησιά του Αιγαίου, με θερμοκρασίες ταμιευτήρων που φτάνουν και μερικές φορές ξεπερνούν τους 100°C. Τα ρευστά των ταμιευτήρων αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση σειράς εφαρμογών όπως θέρμανση χώρων, θέρμανση θερμοκηπίων, ιχθυοκαλλιέργειες κ.λπ..

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

3.2. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) στην Ελλάδα

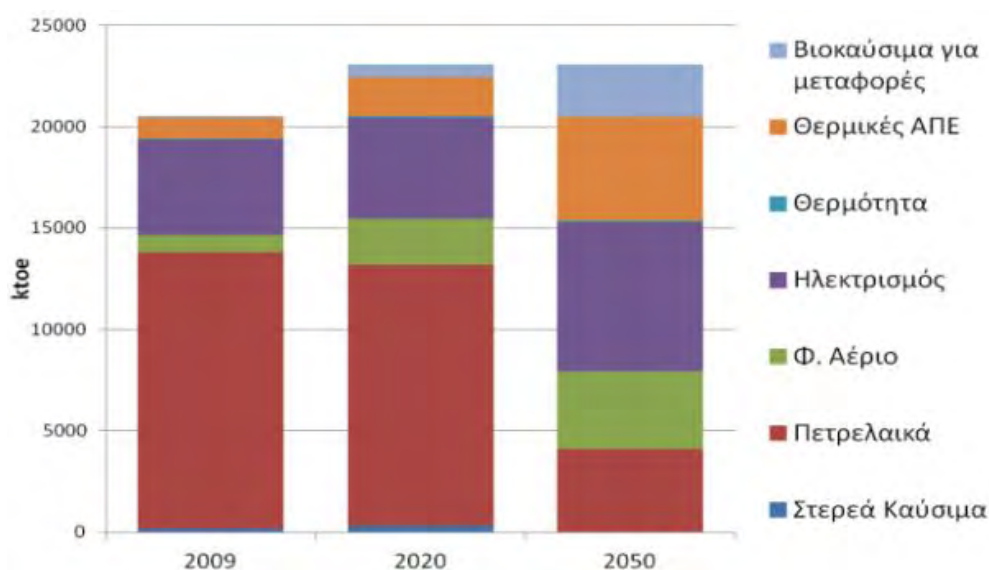
Η Ευρωπαϊκή ενεργειακή πολιτική έως το 2020 επικεντρώνεται στην επίτευξη τριών επιμέρους στόχων για το σύνολο των Κρατών-Μελών, οι οποίοι στόχοι αφορούν:

- Στη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 (Οδηγία 2009/29/ΕΚ).
- Στη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας κατά 20% στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας (Οδηγία 2009/28/ΕΚ).
- Στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και επίτευξη εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας κατά 20%.

Ειδικά για την Ελλάδα, για τις εκπομπές των αερίων ρύπων του θερμοκηπίου ο στόχος είναι η μείωση κατά 4% στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005 και η 18% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση.

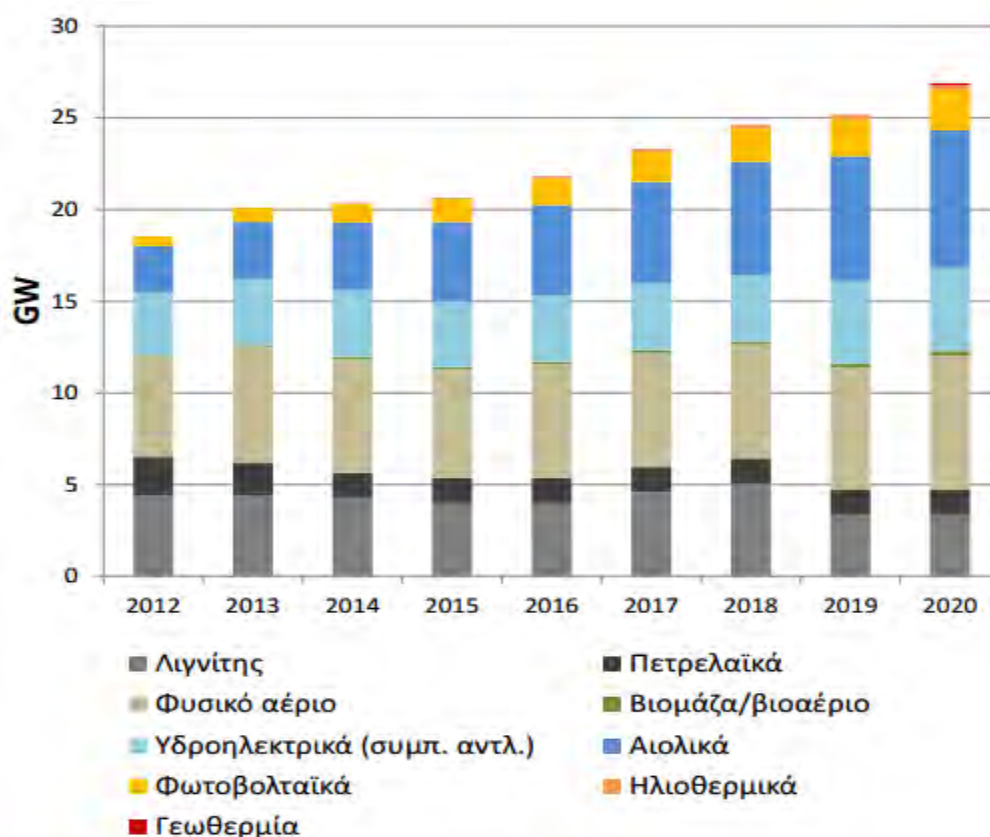
Η Ελληνική κυβέρνηση στο πλαίσιο υιοθέτησης συγκεκριμένων αναπτυξιακών και περιβαλλοντικών πολιτικών, με το Ν. 3851/2010 προχώρησε στην αύξηση του εθνικού στόχου συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20%. Συγκεκριμένα ο στόχος αυτός εξειδικεύεται σε 40% συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% σε θέρμανση και ψύξη και 10% στις μεταφορές. Η κατεύθυνση αυτή της εθνικής ενεργειακής πολιτικής, διαμορφώνεται τόσο από την ανάγκη αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, με τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, όσο και για τη διασφάλιση του ενεργειακού εφοδιασμού με τη βέλτιστη αξιοποίηση του εγχώριου δυναμικού για παραγωγή ενέργειας και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά την τελική χρήση.

Σύμφωνα με τον ενεργειακό σχεδιασμό για το 2050, οι βασικοί άξονες σχεδιασμού είναι η μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενη ενέργεια, που επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της μεγιστοποίησης της διείσδυσης των ΑΠΕ και της βέλτιστης αξιοποίησης των εγχώριων ενεργειακών πόρων τόσο στην ηλεκτροπαραγωγή, όσο και συνολικά, καθώς και η επίτευξη σημαντικής μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το 2050 σε σχέση με τις αντίστοιχες εκπομπές του 2005. Στην εικόνα 3.1 φαίνεται πώς προβλέπεται να εξελιχθεί η τελική κατανάλωση ενέργειας ανά καύσιμο το 2050.



Εικόνα 3.1: Εξέλιξη της τελικής κατανάλωσης ενέργειας ανά καύσιμο. (Πηγή: Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός για το 2050, 2012).

Στο διάγραμμα 3.2 φαίνεται πώς προβλέπεται να εξελιχθεί η παραγωγή ενέργειας μέχρι το 2020 για να επιτευχθούν οι στόχοι.



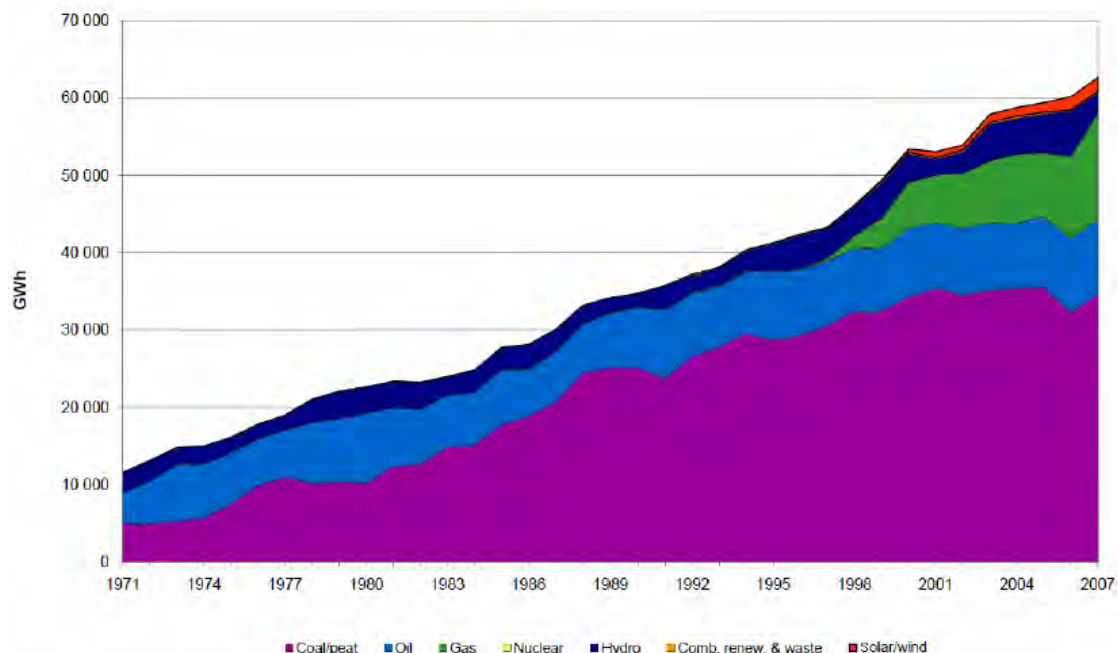
Εικόνα 3.2: Εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος Η/Π ανά καύσιμο για την επίτευξη των εθνικών στόχων έως το 2020. (Πηγή: Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός για το 2050, 2012).

Στην Ελλάδα έχουμε αφθονία σε πηγές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας. Η χώρα απολαμβάνει υψηλή ηλιακή ακτινοβολία καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου και στο μεγαλύτερο τμήμα της η ηλιοφάνεια διαρκεί περισσότερο από 2.700 ώρες το χρόνο. Σε αρκετές περιοχές της ηπειρωτικής και νησιωτικής Ελλάδας έχουμε σταθερούς και δυνατούς ανέμους σε συνεχή βάση. Λόγω της μορφολογίας του εδάφους, σε πολλά σημεία της ενδοχώρας, κυρίως στη Δυτική Ελλάδα, υπάρχουν κατάλληλες συνθήκες, που ευνοούν τη δημιουργία μικρών αλλά και μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων. Παράλληλα, η Ελλάδα ως χώρα κυρίως γεωργική, διαθέτει αρκετά αποθέματα βιομάζας κατάλληλα για την παραγωγή ενέργειας (π.χ. αιθανόλη από ζαχαρότευτλα). Τέλος, η Ελλάδα είναι προικισμένη και με την ενέργεια του υπεδάφους, τη γεωθερμία, εφόσον σε πολλές περιοχές της χώρας υπάρχουν εξακριβωμένα πεδία υψηλής αλλά και χαμηλής ενθαλπίας.

Για το έτος 2003, η συμμετοχή των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας (συμπεριλαμβανομένων της βιομάζας και των υδροηλεκτρικών) στην παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας ήταν 5,3%.

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΑΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ

ΕΛΛΑΔΑ



Εικόνα 3.3: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά ενεργειακή πηγή. (Πηγή: Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός για το 2050, 2012).

Βασικό εργαλείο για την υιοθέτηση και εφαρμογή των συγκεκριμένων στόχων αποτελεί ο Ν. 4001/2011 «για τη Λειτουργία Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου, για Έρευνα, Παραγωγή και δίκτυα μεταφοράς Υδρογονανθράκων και άλλες ρυθμίσεις», καθώς και το Εθνικό Σχέδιο δράσης και ο Ν. 3851/2010 για τις ΑΠΕ.

Η μελλοντική εικόνα του ενεργειακού συστήματος όπως προκύπτει από το σενάριο νέων ενεργειακών πολιτικών μπορεί να συνοψισθεί στα παρακάτω 10 σημεία (Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός για το 2050, 2012):

1. Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 60%-70% έως το 2050 σε σχέση με το 2005.
2. Ποσοστό 85%-100% ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, με την αξιοποίηση όλων των εμπορικά ώριμων τεχνολογιών.
3. Σταθεροποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης λόγω των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας.
4. Σχετική αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω εξηλεκτρισμού των μεταφορών και μεγαλύτερης χρήσης αντλιών θερμότητας στον οικιακό και τριτογενή τομέα.
5. Σημαντική μείωση της κατανάλωσης πετρελαιοειδών.
6. Αύξηση της χρήσης βιοκαυσίμων στο σύνολο των μεταφορών στο επίπεδο του 34%-39% μέχρι το 2050.
7. Κυρίαρχο μερίδιο του ηλεκτρισμού στις επιβατικές μεταφορές μικρής απόστασης (42%) και σημαντική αύξηση του μεριδίου των μέσων σταθερής

- τροχιάς τόσο στις επιβατικές (13%) όσο και εμπορευματικές μεταφορές (18%).
8. Συνολική διείσδυση ΑΠΕ σε ποσοστό 60%-70% στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας μέχρι το 2050.
 9. Σημαντικά βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση για το σύνολο του κτιριακού αποθέματος και μεγάλη διείσδυση των εφαρμογών ΑΠΕ στον κτιριακό τομέα.
 10. Ανάπτυξη μονάδων αποκεντρωμένης παραγωγής και έξυπνων δικτύων.

3.3. Η Γεωθερμία στην Ευρώπη και Παγκοσμίως

Η πρώτη βιομηχανική εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας έγινε στο Lardarello της Ιταλίας, όπου από τα μέσα του 18ου αιώνα χρησιμοποιήθηκε ο υπέρθερμος φυσικός ατμός για να εξατμίσει τα νερά που περιείχαν βορικό οξύ αλλά και για να θερμάνει διάφορα κτήρια. Το 1904 έγινε στο ίδιο μέρος η πρώτη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από τη γεωθερμία όπου σήμερα παράγονται εκεί 2,5 δισ. kWh/έτος. Η πρώτη συστηματική αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας έγινε στην Ισλανδία, όπου πλέον καλύπτεται πολύ μεγάλο μέρος των αναγκών της χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια και θέρμανση.

Κατά το 2005, 72 χώρες φαίνεται να έχουν αναπτύξει γεωθερμικές εφαρμογές χαμηλής-μέσης θερμοκρασίας, κάτι που δηλώνει σημαντική πρόοδο σε σχέση με το 1995, όταν είχαν αναφερθεί εφαρμογές μόνο σε 28 χώρες.

Στην Ευρώπη, η άμεση θέρμανση χώρων από τη γεωθερμία αντιστοιχεί στο 75% του συνόλου παγκοσμίως, με εγκατεστημένη ισχύ που ανέρχεται σε 3.339,45 MWth (στοιχεία του 2005). Πρώτη σε εγκατεστημένη ισχύ έρχεται η Ισλανδία με 1.375 MWth, όπου το 95% των κτιρίων της πόλης του Ρέικιαβικ θερμαίνονται με γεωθερμικό ρευστό και δεύτερη η Τουρκία με 901 MWth. Με μεγάλη διαφορά από τις δύο προηγούμενες ακολουθούν η Γαλλία με 243 MWth, η Ιταλία με 131,8 MWth, η Ρωσία με 110 MWth, η Γερμανία με 92,6 MWth, η Πολωνία με 59,2 MWth, και η Ρουμανία με 57,2 MWth. Ενώ υπάρχουν και άλλα κράτη, όπου η ισχύς για αυτή τη χρήση είναι πολύ μικρότερη.

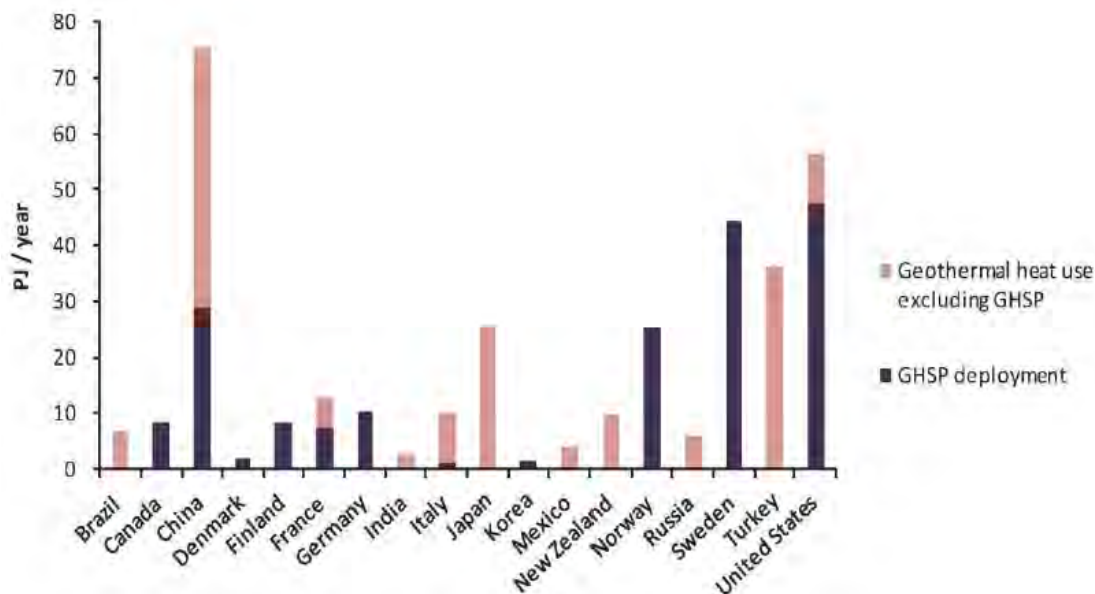
Η θέρμανση θερμοκηπίων από τη γεωθερμία στην Ευρώπη αντιστοιχεί σε 1.072,9 MWth, πάνω από το 75% του συνόλου παγκοσμίως. Η πλειοψηφία των εφαρμογών βρίσκεται στην Ουγγαρία (196,7 MWth), την Τουρκία (192 MWth), τη Γεωργία (165,7 MWth) και τη Ρωσία (160 MWth).

Η εγκατεστημένη ισχύς για υδατοκαλλιέργειες στην Ευρώπη κατά το 2005 ανήλθε σε 230 MWth. Πρώτη σε εγκατεστημένη ισχύ έρχεται η Ιταλία με 91,6 MWth και ακολουθεί η Ισλανδία με 65 MWth.

Οι βιομηχανικές εφαρμογές από τη γεωθερμία στην Ευρώπη αντιστοιχούν σε 120,3 MWth, περίπου το 25% του συνόλου παγκοσμίως. Η πλειοψηφία των εφαρμογών βρίσκεται στην Ισλανδία (60 MWth), τη Ρωσία (25 MWth), τη Ρουμανία (14,1 MWth), την Ιταλία (10,2 MWth) και τη Γεωργία (7,1 MWth).

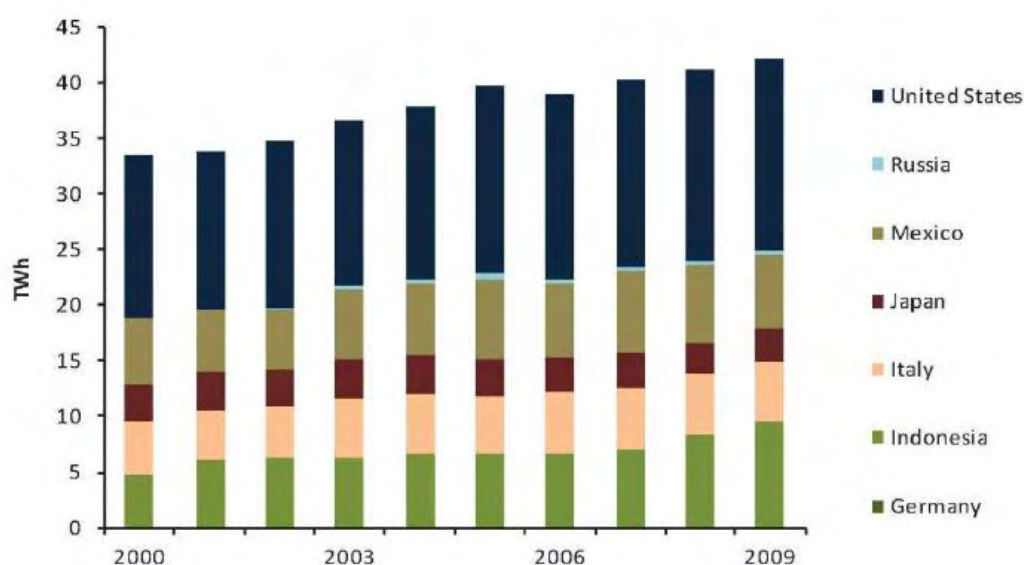
Η εγκατεστημένη ισχύς για θέρμανση πισινών και ιατρικές εφαρμογές στην Ευρώπη το 2005 ανήλθε σε 1.476,43 MWth. Πρώτη έρχεται η Τουρκία με 402 MWth και ακολουθεί η Ουγγαρία με 350 MWth.

Οι άλλες χρήσεις από τη γεωθερμία στην Ευρώπη αντιστοιχούν σε 290,3 MWth, περίπου το 45% του συνόλου αντίστοιχων εφαρμογών στον κόσμο. Η πλειοψηφία των εφαρμογών βρίσκεται στην Ισλανδία (215 MWth), την Ουγγαρία (42,9 MWth) και τη Βουλγαρία (17,1 MWth).



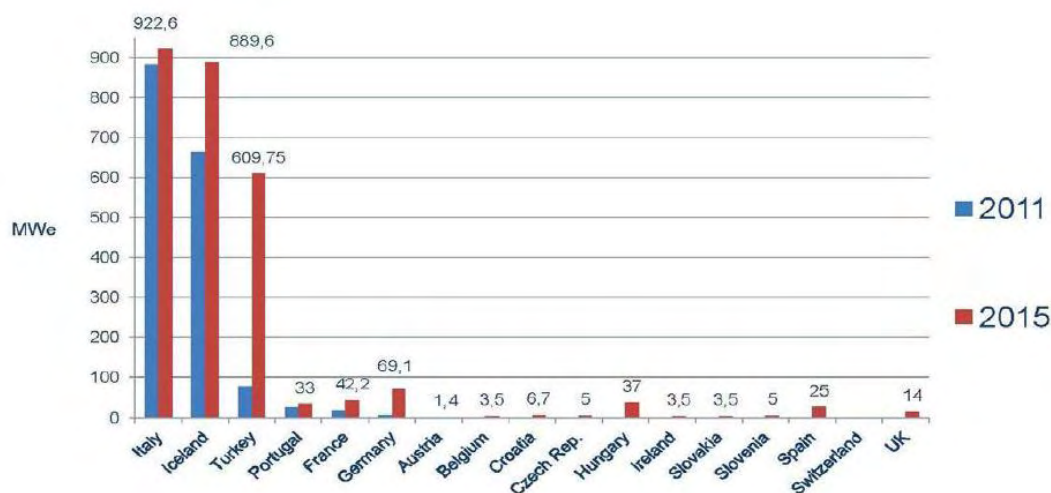
Εικόνα 3.4: Θερμική αξιοποίηση Γεωθερμίας και Γεωθερμικών Αντλιών θερμότητας. (Πηγή: IEA Clean energy Progress Report 2011).

Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής κατά το 2005, ανήλθε σε 8.927,63 MW. Οι 5 πρώτες χώρες στον τομέα αυτό είναι οι ΗΠΑ (2.564 MWe), οι Φιλιππίνες (1.930 MWe), το Μεξικό (953 MWe), η Ινδονησία (797 MWe) και η Ιταλία (791 MWe).



Εικόνα 3.5: Ηλεκτροπαραγωγή από Γεωθερμία. (Πηγή: IEA Clean energy Progress Report 2011).

Στην Ευρώπη η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι 1.124,43 MWe (2005). Πρώτη σε παραγωγή έρχεται η Ιταλία με ισχύ 791 MWe, κυρίως από το γεωθερμικό πεδίο ξηρού ατμού του Larderello, και ακολουθεί η Ισλανδία (202 MWe). Μικρότερες εγκαταστάσεις βρίσκονται στη Ρωσία (79 MWe στη χερσόνησο της Kamchatka), στην Τουρκία (20 MWe), στην Πορτογαλία (16 MWe στα νησιά των Αζόρων) και τη Γαλλία (15 MWe στο νησί της Γουαδελούπης). Επιπλέον οι νέες εξελίξεις περιλαμβάνουν τις εγκαταστάσεις δυαδικού κύκλου 1,25 MWe στην Αυστρία (στις περιοχές Altheim και Bad Blumau).



Εικόνα 3.6: Εγκατεστημένη ισχύς ηλεκτροπαραγωγής στην Ευρώπη. (Πηγή: EGEC Deep Geothermal Market Report 2011).

Η εγκατεστημένη θερμική ισχύς γεωθερμικών μονάδων μέσης και χαμηλής θερμοκρασίας ανήλθε το 2007 στα 28268 MWt, παρουσιάζοντας αύξηση 75% σε σχέση με το 2000, με μέση ετήσια αύξηση 12%. Αντίστοιχα, η χρήση ενέργειας αυξήθηκε κατά 43% σε σχέση με το 2000 και ανήλθε στα 273.372 TJ (75.940 GWh/έτος).

Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με γεωθερμική ενέργεια το 2008 γινόταν σε 24 χώρες. Το 2007 η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων παραγωγής ενέργειας στον κόσμο ανήλθε στα 9735 MWe, σημειώνοντας αύξηση περισσότερων από 800 MWe σε σχέση με το 2005.

3.4. Τα Γεωθερμικά Πεδία στην Ελλάδα

Το δυναμικό για την ανάπτυξη έργων ηλεκτροπαραγωγής από Γεωθερμία βασίζεται στη διαθεσιμότητα των φυσικών πόρων σε κάθε περιοχή καθώς και στο επίπεδο της έρευνας που έχει ήδη πραγματοποιηθεί ή είναι αναγκαία να χρηματοδοτηθεί στο μέλλον.

Τα υπό εκμετάλλευση πεδία περιλαμβάνουν:

- Πεδία στα οποία η μέχρι τώρα έρευνα εγγυάται ότι οι επενδύσεις μπορούν να προωθηθούν άμεσα, όπου περιλαμβάνονται τα πεδία της Μήλου και της Νισύρου.
- Πεδία στα οποία η έρευνα μπορεί να ολοκληρωθεί έτσι ώστε οι αναμενόμενες επενδύσεις να προωθηθούν μέσα στην επόμενη δεκαετία όπου περιλαμβάνονται τα περισσότερα υποψήφια πεδία των νήσων του Αιγαίου και της Θράκης
- Πεδία στα οποία υπάρχει ανάγκη αυξημένης έρευνας η εισαγωγής νέων μεθόδων και τεχνολογιών (enhanced geothermal systems- EGS) τα οποία μπορούν να προγραμματιστούν σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα.

Η Ελλάδα μαζί με την Ιταλία και την Πορτογαλία στις Αζόρες Νήσους είναι οι μόνες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης στις οποίες υπάρχουν πεδία υψηλής ενθαλπίας, δηλαδή περιοχές στις οποίες μπορούν να παραχθούν ρευστά με θερμοκρασία μεγαλύτερη των 150°C, τα οποία χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

Οι γεωλογικές συνθήκες στην Ελλάδα ευνόησαν γενικά τη δημιουργία ενός πολύ σημαντικού γεωθερμικού δυναμικού χαμηλής ενθαλπίας.

Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) τα γνωστά σήμερα αποθέματα γεωθερμικής ενέργειας, χαμηλής θερμοκρασίας, ανέρχονται σε 200.000 Τόνους Ισοδύναμου Πετρελαίου (Τ.Ι.Π.) ανά έτος.

Το εκτιμώμενο τεχνικό δυναμικό, το οποίο δύναται να είναι αξιοποιήσιμο σε βραχυπρόθεσμο, μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο ορίζοντα, είναι της τάξης των 2000MWe. Το συνολικό μερίδιο των γεωθερμικών σταθμών στην ηλεκτροπαραγωγή το 2050, θα κυμαίνεται περίπου μεταξύ 13% και 15%.

Τα γεωθερμικά πεδία υψηλής θερμοκρασίας (>130°C) εντοπίζονται στο ηφαιστειακό τόξο του Νότιου Αιγαίου που εκτείνεται από τη νήσο Νίσυρο μέχρι το Σουσάκι-Αγ. Θεοδώρους. Σημαντικότερα απ' αυτά είναι το πεδίο της νήσου Μήλου με απολήψιμο δυναμικό 120 MWe και της Νισύρου με 60 MWe. Τα δύο αυτά πεδία δεν αξιοποιούνται σήμερα στην ηλεκτροπαραγωγή λόγω αντίθεσης των κατοίκων των νησιών.

Σήμερα αξιοποιούνται μόνο τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής θερμοκρασίας (από 25 μέχρι 80°C περίπου) τα οποία είναι πολύ περισσότερο διαδεδομένα και βρίσκονται σχεδόν σ' όλη τη χώρα. Αν και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ηλεκτροπαραγωγή (εκτός από ειδικές περιπτώσεις) αξιοποιούνται όμως σε πολλές άλλες χρήσεις συνεισφέροντας στην εξοικονόμηση ενέργειας από συμβατικές πηγές και έμμεση μείωση των εκπομπών CO₂, στην ανάπτυξη νέων παραγωγικών δραστηριοτήτων όπως και των μειονεκτικών περιοχών της χώρας. Οι αντίστοιχες γεωθερμικές εφαρμογές έχουν συνολική θερμική ισχύ μόλις 70 MWth, και περιλαμβάνουν κυρίως θερμά και ιαματικά λουτρά (~45%), και θέρμανση θερμοκηπίων και εδαφών (~55%).



Στην Ελλάδα η εγκατεστημένη ισχύς για άμεση θέρμανση χώρων ανέρχεται μόλις σε 1,2 MWth, με τη μεγαλύτερη εγκατάσταση να βρίσκεται στα Λουτρά Τραϊανούπολης του νομού Έβρου.

Η Ελλάδα βρίσκεται στη 10η θέση των κρατών της Ευρώπης, με εγκατεστημένη ισχύ 22,2 MWth. Συνολικά καλλιεργούνται περίπου 229,7 στρέμματα με κηπευτικά και ανθοκομικά προϊόντα μέσα σε θερμοκήπια, τα οποία είναι καλυμμένα είτε με πλαστικό, είτε με γυαλί. Τα θερμοκήπια αυτά βρίσκονται κυρίως στη Βορειοανατολική Ελλάδα και τη Λέσβο.

Μονάδες ιχθυοκαλλιέργειας βρίσκονται στο Πόρτο Λάγος και στο Νέο Εράσμιο – Μάγγανα Ξάνθης, ενώ υπάρχει και μια μονάδα αφαλάτωσης στην Κίμωλο.

Σε 51 γεωθερμικά πεδία η θερμοκρασία των ρευστών κυμαίνεται από 25-90°C, είναι δηλαδή πεδία χαμηλής ενθαλπίας, ενώ μόνο σε 6 γεωθερμικά πεδία η θερμοκρασία των ρευστών είναι μεγαλύτερη από 90°C, είναι δηλαδή πεδία υψηλής ενθαλπίας. Σε 2 γεωθερμικά πεδία η θερμοκρασία των ρευστών είναι μεγαλύτερη από 150°C (325°C στη Μήλο και μεγαλύτερη από 350°C στη Νίσυρο), τα οποία μάλιστα είναι τα σημαντικότερα πεδία υψηλής ενθαλπίας στον ελληνικό χώρο.

Σε βάθη περίπου 5 km υπάρχουν στη Μήλο μαγματικοί θάλαμοι στη φάση της ψύξης, όπου δημιουργούν συνθήκες υψηλής θερμικής ροής. Η τεκτονική ρηγμάτων του μεταμορφωμένου υποβάθρου σε βάθη >500m δημιουργεί αυξημένης περατότητας γεωλογικούς σχηματισμούς (γεωθερμικός ταμιευτήρας). Υπάρχουν στο κεντρικό και στο ανατολικό τμήμα του νησιού ζεστά εδάφη, θερμές πηγές και ατμίδες με θερμοκρασία 75-102°C. Η ΔΕΗ το 1974 - 1981 εκτέλεσε 5 γεωτρήσεις σε βάθη 1000 -1400 m (κυρίως στην περιοχή της Ζεφυρίας), όπου εντοπίστηκαν γεωθερμικοί ταμιευτήρες με θερμοκρασίες 290 - 320°C. Μερικές από τις γεωτρήσεις αυτές μπορούν να παράγουν υγρό ατμό με απόδοση 40-120 tn/h και θερμοκρασία 180 - 240°C (στην έξοδο της κεφαλής της γεώτρησης). Το συνολικό δυναμικό του πεδίου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται άνω των 120MW.



Εικόνα 3.8: Γεωθερμική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 2MWe (Ζεφυρία-Μήλος 1985)- σήμερα είναι εκτός λειτουργίας. (Πηγή: Φυτίκας, Γεωθερμία, η μεγάλη αγνοούμενη ΑΠΕ στην Ελλάδα, 2014).

Στο Γεωθερμικό πεδίο Νισύρου, ύστερα από πολύπλευρες έρευνες στην περίοδο 1972-81, εντοπίστηκαν οι θέσεις για τις δύο πρώτες γεωτρήσεις έρευνας - παραγωγής. Οι γεωτρήσεις αυτές εκτελέστηκαν κατά το 1982-83. Η πρώτη, παρόλο που συνάντησε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες (400°C) αλλά και πολύ δύσκολες συνθήκες ρευστών παράγει σήμερα μικρές μόνο ποσότητες μίγματος ατμών και νερού από το "Ρηχότερο" ρεζερβουάρ των 1500m (Το βαθύτερο ρεζερβουάρ στα 1800m έχει εγκαταλειφθεί λόγω ανυπέρβλητων τεχνικών προβλημάτων κατά την κατασκευή της γεώτρησης). Η δεύτερη γεώτρηση παράγει από βάθος 1500m (όπου η θερμοκρασία είναι περίπου 350°C) μίγμα ατμού και νερού. Η παραγωγή ατμού

ανέρχεται περίπου στους 23 t/h και ισοδυναμεί με 3Mwe. Το συνολικό γεωθερμικό δυναμικό της Νισύρου κατά μία πρώτη εκτίμηση ανέρχεται σε 40 MWe περίπου.

Πιθανά πεδία υψηλής ενθαλπίας βρίσκονται στα νησιά Κίμωλος, Πολύαιγος, Σαντορίνη, Κως και Λέσβος. Οι πιθανότητες είναι πολύ μεγάλες στα δύο πρώτα νησιά και μικρότερες στα άλλα, για τα οποία αλλού υπάρχουν εντελώς ελλιπή στοιχεία (Κως) και αλλού πολλά, αλλά με μικρές πιθανότητες (Λέσβος). Περιοχές υψηλής ενθαλπίας με ελάχιστες πιθανότητες είναι αυτές του Σουσακίου Κορινθίας και των Μεθάνων Τροιζηνίας. Στα νησιά Κίμωλος και Πολύαιγος, οι γεωθερμικές έρευνες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι συνθήκες σε αυτά είναι εντελώς παρόμοιες με αυτές της Μήλου. Πρόκειται για πολύ πιθανά πεδία υψηλής ενθαλπίας.

Παρόμοιο γεωθερμικό ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο αβαθής υποθαλάσσιος χώρος μεταξύ των τριών νησιών όπως επίσης και αυτός του Όρμου Μήλου. Μελλοντικά σ' αυτούς τους χώρους μπορεί να γίνουν κεκλιμένες γεωτρήσεις από την παραλία ή και ακόμα στη θάλασσα. Στη Λέσβο, από τις μέχρι τώρα πολύπλευρες και εκτεταμένες γεωλογικές-γεωθερμικές έρευνες και τη συνθετική ερμηνεία των αποτελεσμάτων εντοπίστηκαν τρεις κύριες περιοχές ενδιαφέροντος: Πέτρας-Αργένου, Καλλονής-Στύψης και Πολιχνίτου. Οι πιθανές θερμοκρασίες των ρευστών στον ταμιευτήρα αναμένονται να είναι της τάξης των 100-140°C, χωρίς να αποκλείονται εντελώς και υψηλότερες. Η περιοχή που προτάθηκε για τις πρώτες βαθιές γεωτρήσεις έρευνας-παραγωγής βρίσκεται νότια του χώρου Στύψης.

Στη Σαντορίνη η γεωθερμική έρευνα προσδιόρισε σαν ενδιαφέρουσα την περιοχή που βρίσκεται μεταξύ των οικισμών Μεγαλοχωρίου, Εμπορίου και Ακρωτηρίου. Μερικές συμπληρωματικές βαθιές γεωφυσικές έρευνες θα βοηθήσουν ουσιαστικά στην επιλογή της καλύτερης θέσης για την πρώτη βαθιά γεώτρηση έρευνας-παραγωγής, η οποία θα δώσει και την οριστική απάντηση σχετικά με την κατηγορία των ρευστών (υψηλής ή μέσης ενθαλπίας).

Στην Κω η εντελώς προκαταρκτική διερεύνηση έδωσε ενθαρρυντικά στοιχεία. Η δυτική περιοχή του νησιού χρειάζεται συστηματική και πολύπλευρη γεωθερμική έρευνα.

Ακόμη στις Πηγές Καβασιλών κοντά στον ποταμό Σαραντάπορο, με θερμοκρασία νερού 28,1°C, στις Πηγές Αμάραντου στα βόρεια της Κόνιτσας, στην οροσειρά της Πίνδου, με θερμοκρασία ατμού στην έξοδό τους 32°C.

Επίσης στην Περιοχή Συκιών στην Άρτα, όπου πραγματοποιήθηκαν τέσσερις ερευνητικές και μία παραγωγική γεώτρηση βάθους 320 μέτρων, που έδειξε δυνατότητα άντλησης νερού, έως και 100 κυβικών μέτρων ανά ώρα, θερμοκρασίας 55°C περίπου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κανονική γεωθερμική βαθμίδα είναι 3,3°C /100 m, ενώ στην περιοχή ενδιαφέροντος η τιμή της υπολογίζεται στους 17 °C /100 m περίπου.

Στην Βόρεια Ελλάδα η γεωθερμία προσφέρεται για θέρμανση, θερμοκήπια, ιχθυοκαλλιέργειες κ.λ.π. Στην λεκάνη του Στρυμόνα έχουν εντοπισθεί τα πολύ σημαντικά πεδία Θερμών-Νιγρίτας, Λιθότροπου-Ηράκλειας, Θερμοπηγής-Σιδηρόκαστρου και Αγγίστρου. Πολλές γεωτρήσεις παράγουν νερά μέχρι 75°C, συνήθως αρτεσιανά και πολύ καλής ποιότητας και παροχής. Μεγάλα και μικρότερα γεωθερμικά θερμοκήπια λειτουργούν στην Νιγρίτα και το Σιδηρόκαστρο.

Στην πεδινή περιοχή του Δέλτα Νέστου έχουν εντοπισθεί δύο πολύ σημαντικά γεωθερμικά πεδία, στο Ερατεινό Χρυσούπολης και στο Ν. Εράσμιο

Μαγγάνων Ξάνθης. Νερά άριστης ποιότητας μέχρι 70 °C και σε πολύ οικονομικά βάθη παράγονται από γεωτρήσεις στις εύφορες αυτές πεδινές περιοχές. Στην Ν. Κεσσάνη και στο Πόρτο Λάγος Ξάνθης, σε μεγάλης έκτασης γεωθερμικά πεδία, παράγονται νερά θερμοκρασίας μέχρι 82 °C.

Στην λεκάνη των λιμνών Βόλβης και Λαγκαδά έχουν εντοπισθεί τρία πολύ ρηχά πεδία με θερμοκρασίες μέχρι 56 °C. Στην Σαμοθράκη υπάρχουν ενθαρρυντικά στοιχεία καθώς γεωτρήσεις βάθους μέχρι 100 μ. συνάντησαν νερά της τάξης των 100 °C.

Στη λεκάνη του Σπερχειού οι γεωθερμικές συνθήκες είναι πολύ ενθαρρυντικές. Η έρευνα δεν έχει ολοκληρωθεί. Στο Ληλάντιο Πεδίο στον Ν. Εύβοιας και στην Ανδραβίδα στον Ν. Ηλείας διαπιστώθηκαν σημαντικές υδροφορίες σε μικρά βάθη, που όμως έχουν χαμηλές θερμοκρασίες (32°C και 26°C αντίστοιχα). Στο Σουσάκι στον Ν. Κορινθίας εκτός από τα ρευστά μέσης ενθαλπίας εντοπίστηκε ένας ταμειευτήρας σε βάθος 60-150 m με θερμοκρασίες 50-75°C.

Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε την εγκατεστημένη ισχύς στην Ελλάδα από άμεσες χρήσεις για το 2013.

ΧΡΗΣΗ	Εγκατεστημένη Ισχύς (MWt) (Μάρτιος 2013)	Ετήσια χρήση ενέργειας (1012J)
Θέρμανση χώρων	1.4	16
Θέρμανση θερμοκηπίων και εδάφους	27	271
Ξήρανση αγροτικών προϊόντων	0.3	3
Υδατοκαλλιέργειες και Ιχθυοκαλλιέργειες	9.3	80
Ιαματικός Τουρισμός και Λουτροθεραπεία	42	230
Γεωθερμικές Αντλίες θερμότητας	100	480
ΣΥΝΟΛΟ	180	1080 (>100% αύξηση από 2004)

Πίνακας 3.1: Εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύς από άμεσες χρήσεις στην Ελλάδα. (Πηγή: Andritsos et al., 2013).

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται όλα τα καταγεγραμμένα γεωθερμικά πεδία που υπάρχουν στον Ελληνικό χώρο.

Πεδία χαμηλής ενθαλπίας.

ΠΕΡΙΟΧΗ	ΕΚΤΑΣΗ ΠΕΔΙΟΥ (km ²)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (°C)	ΒΑΘΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (m)	ΠΑΡΟΧΗ (m ³ /h)
Άγκιστρο Σερρών	1,5	40 - 48	100 - 300	80
Σιδηρόκαστρο Σερρών	4	40 - 75	30 - 500	200
Λιθότοπος Ηρακλείας	45	40 - 62	300 - 450	---
Θερμά Νιγρίτας Σερρών	10	40 - 64	70 - 500	1.000
Λαγκαδάς Θεσσαλονίκης	6	33 - 40	<210	300
Λεκάνη Ανθεμούντα Θεσ/νικης	13	25 - 40	>100	15
Ελαιοχώρια Χαλκιδικής	25	42	250	---
Σάνη - Άφυτος Κασσάνδρας	5	35 - 45	500	100
Αρίστηνο Αλεξανδρούπολης	20	30 - 90	150 - 450	200
Σάππες Ροδοπης	9	30 - 40	50 - 380	100
Λίμνη Μητρικού	7	30 - 40	350 - 500	---
Ν.Κεσσάνη Ξάνθης	25	40 - 83	160 - 500	>300
Ν.Εράσμιο-Μάγγανα Ξάνθης	16	27 - 68	350 - 500	250
Ερατεινό Καβάλας	14	65 - 70	650	300
Ακροπόταμος Καβάλας	6,9	45 - 90	100-185 / 240-515	415
Σουσάκι Κορινθίας	3	60 - 76 / <75	50-200 / 600-900	600
Συκιές Άρτας	10	32 - 51	>320	100
Άργεας Λέσβου	1	90	<150	300
Στύμη Λέσβου	20	90	150 - 200	---
Πολιχνίτος Λέσβου	10	65 - 95	50 - 200	300
Νένητα Χίου	5	78 - 82	300 - 500	60
Σαντορίνη	25	30 - 65	50 - 250	---
Μήλος	63	60 - 99	50 - 200	750

Σούδα Χανίων	—	32	—	—
Ιεράπετρα Λασιθίου	—	25	—	—
Κυλλήνη Ηλείας	—	35	—	—
Καϊάφας Ηλείας	—	35 - 40	—	—
Μέθανα Αττικής	—	32 - 38	—	—
Αντίρριο Αιτωλοακαρνανίας	—	38	—	—
Λουτράκι Κορινθίας	—	32	—	—
Θερμοπύλες Φθιώτιδας	—	37 - 39	—	1.000
Πλατύστομο Φθιώτιδας	—	25 - 35	—	10
Υπάτη Φθιώτιδας	—	32	—	—
Καμένα Βούρλα Φθιώτιδας	—	24 - 48	—	—
Αιδηψός Ευβοίας	—	72 - 85	—	240
Ληλάντιο Πεδίο Ευβοίας	—	29 - 31	—	—
Βούλα Αττικής	—	30	—	—
Κίμωλος	—	25 - 61	—	200
Αγ. Φωκάς	—	45	—	—
Αγ. Κήρυκος	—	50	—	—
Αμάραντος Ιωαννίνων	—	25	—	—
Ζάζαρη Χειμαδίτιδα Φλώρινας	—	29 - 33	—	15
Αλεξάνδρεια Ημαθίας	—	38	—	200
Σκύδρα Πέλλας	—	27 - 40	—	—
Αριδαία Πέλλας	—	24 - 40	—	200
Νυμφόπετρα Θεσσαλονίκης	—	39 - 40	—	200

Τβηρα Σεργίων	—	40	—	—
Αγ. Παρασκευή Χαλκιδικής	—	41	—	—
Τυχερό Θράκης	—	35	—	350
Θέρμη Λήμνου	—	44	—	—
Καλλονή Λέσβου	—	45	—	—
Γέρας Λέσβου	—	38	—	—
Λισβόρι Λέσβου	—	65	—	—
Αγιάσματα Χίου	—	38	—	—

Πίνακας 3.2: Πεδία χαμηλής ενθαλπίας.

Πεδία υψηλής ενθαλπίας.

ΠΕΡΙΟΧΗ	ΕΚΤΑΣΗ ΠΕΔΙΟΥ (km ²)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΒΑΘΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (m)	ΠΑΡΟΧΗ (m ³ /h)	ΠΙΕΣΗ (atm)
Μήλος	50	280 - 320	1.000 - 1.380	339	11 - 29
Νίσυρος	3,5	>350	1.400 - 1.900	75	12

Πίνακας 3.3: Πεδία υψηλής ενθαλπίας.

3.5. Ισχύουσα Νομοθεσία

Η ισχύουσα νομοθεσία που αφορά στην ενεργειακή χρήση της γεωθερμικής ενέργειας αποτελείται από τους κάτωθι νόμους, προεδρικά διατάγματα και υπουργικές αποφάσεις:

- Ν. 3175/03 ΦΕΚ 207 Α' 29-8-2003 «Αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού, τηλεθέρμανση, κ.α. διατάξεις»
- Ν. 3851/2010 (ΦΕΚ Α' 85/04.06.2010).
- Ν. 4001/2011 (ΦΕΚ Α' 179/22.08.2011).
- Υ. Α. Υπ. Αν. με αρ. Δ9Β/Φ166/οικ1508/ΓΔΦΠ374/10/27-1-2004, ΦΕΚ 208Β', «Χαρακτηρισμός των Γεωθερμικών Πεδίων».
- Υ. Α. Υπ. Αν. με αρ. Δ9Β,Δ/Φ166/ΟΙΚ18508/5552/207/19-10-2004, ΦΕΚ 1595Β', «Άδειες εγκατάστασης για ίδια χρήση ενεργειακών συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης χώρων μέσω της εκμετάλλευσης της θερμότητας των

γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό».

- Υ. Α. Υπ. Αν. με αρ. Δ9Β/Φ166/οικ8411/ΓΔΦΠ2373/117/6-5-2005, ΦΕΚ 635Β', «Όροι και διαδικασία εκμίσθωσης του δικαιώματος του Δημοσίου για έρευνα και διαχείριση του γεωθερμικού δυναμικού και της εν γένει διαχείρισης των γεωθερμικών πεδίων της χώρας».
- Υ. Α. Υπ. Αν. με αρ. Δ9Β/Φ166/12647/ΓΔΦΠ3557/193/8-7-2005, ΦΕΚ 1012Β', «Χαρακτηρισμός και υπαγωγή σε κατηγορίες των γεωθερμικών πεδίων της χώρας».
- Υ. Α. Υπ. Αν. με αρ. Δ9Β/Φ166/οικ20076/ΓΔΦΠ5258/329/24-10-2005, ΦΕΚ 1530Β', «Κανονισμός Γεωθερμικών Εργασιών».
- Π.Δ. με αρ. 78, ΦΕΚ 80Α'/13-4-2006, «Διάρθρωση, στελέχωση και αρμοδιότητες της Διεύθυνσης Ανάπτυξης των Νομαρχιακών Αυτοδιοικήσεων».
- Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού σχεδιασμού και αειφόρου ανάπτυξης για τις ΑΠΕ

Σε ότι αφορά στην ηλεκτροπαραγωγή ισχύουν τα παρακάτω :

- Ν. 3468/2006, ΦΕΚ 129 Α' «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης και λοιπές διατάξεις»
- Υ.Α. Υπ. Αν. Δ6/Φ1/οικ.18359/14-9-2006, ΦΕΚ 1442Β' «Τύπος και περιεχόμενο συμβάσεων αγοραπωλησίας ηλεκτρικής ενέργειας στο Σύστημα και το Διασυνδεδεμένο Δίκτυο σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 12 παρ. 3 του Ν.3468/2006».
- Υ.Α. Υπ.Αν. Δ6/Φ1/οικ.1725/25-1-2007, ΦΕΚ 148Β' «Καθορισμός τύπου και περιεχομένου συμβάσεων πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται με χρήση Α.Π.Ε. και μέσω Συμπαράγωγής ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης στο Δίκτυο των Μη Διασυνδεδεμένων Νήσων σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 12 παρ. 3 του Ν. 3468/2006».
- Υ.Α. Υπ. Αν. Δ6/Φ1/οικ.5707/13-3-2007 ΦΕΚ 448 Β' «Κανονισμός Αδειών Παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση Α.Π.Ε. αι μέσω Συμπαράγωγής ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης».
- Υ.Α. Υπ.Αν. Δ6/Φ1/οικ.13310/18-6-2007 ΦΕΚ 1153 Β' «Διαδικασία έκδοσης αδειών εγκατάστασης και λειτουργίας σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση Α.Π.Ε.».
- Ν. 3734/2009

Η διαδικασία εκμίσθωσης του γεωθερμικού δυναμικού απαρτίζεται από τους κάτωθι νόμους και υπουργικές αποφάσεις:

- Νόμος 3175/2003 (ΦΕΚ.207Α/29-8-2003) «Αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού, τηλεθέρμανσης και άλλες διατάξεις»

- Νόμος 1475/1984 (ΦΕΚ.131Α/11-9-1984) «Αξιοποίηση Γεωθερμικού Δυναμικού όπως τροποποιήθηκε με το Ν.2244/94 (άρθρο 8))ΦΕΚ.168Α/7-10-94)
- Μεταλλευτικός Κώδικας Υ.Α 2223 ΦΕΚ 122714/06/11
- Η Υ.Α Δ9Β/Φ166/οικ1508/ΓΔΦΠ374/10/27.1.2004 (ΦΕΚ.208Β) «Χαρακτηρισμός γεωθερμικών πεδίων»
- Η Υ.Α.Δ9Β/Φ166/12647/ΓΔΦΠ3557/193/19-7-2005 (ΦΕΚ. 1012Β) «Χαρακτηρισμός και υπαγωγή σε κατηγορίες των γεωθερμικών πεδίων της χώρας»
- Η Υ.Α. Δ9Β/Φ166/ΟΙΚ8411/ΓΔΦΠ2373/117/12-5-2005 (ΦΕΚ.635Β) «Όροι και διαδικασία εκμίσθωσης του δικαιώματος του Δημοσίου για έρευνα και διαχείριση του γεωθερμικού δυναμικού και της εν γένει διαχείρισης των γεωθερμικών πεδίων της Χώρας»
- Η Υ.Α. Δ9Β/Φ166/ΟΙΚ20076/ΓΔΦΠ5258/359/7-11-2005 (ΦΕΚ.1530Β) «Κανονισμός Γεωθερμικών Εργασιών»

Κεφάλαιο 4^ο

Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS)

4.1. Ορισμός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (G.I.S.) και ΑΠΕ

Ένας πλήρης ορισμός για τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών έχει δοθεί από την Παγκόσμια Ομοσπονδία Γεωμετρών (F.I.G.-Federation Internationale des Geometres, 1983):

«Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών είναι ένα εργαλείο για λήψη αποφάσεων νομικής, διοικητικής και οικονομικής υφής και ένα όργανο για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη, το οποίο αποτελείται από μία Βάση Δεδομένων που περιέχει για μία έκταση στοιχεία προσδιορισμένα στο χώρο και τα οποία σχετίζονται με τη γη, και από διαδικασίες και τεχνικές για τη συστηματική συλλογή, ενημέρωση, επεξεργασία και διανομή των στοιχείων. Η βάση ενός GIS είναι ένα ενιαίο σύστημα γεωγραφικής αναφοράς, το οποίο επίσης διευκολύνει τη σύνδεση των στοιχείων μεταξύ τους καθώς και με άλλα συστήματα που περιέχουν στοιχεία για τη γη».

Σύμφωνα με έναν άλλον ορισμό (Μανιάτης 1996): *«Ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών δεν είναι απλά ένα μέσο με το οποίο παράγονται χάρτες, διαγράμματα ή κατάλογοι ποιοτικών χαρακτηριστικών, αλλά μία νέα, ολοκληρωμένη τεχνολογία απαραίτητη για την ανάλυση και μελέτη του χώρου καθώς και τη λήψη αποφάσεων (Decision Making) που αφορούν τη γη, το περιβάλλον και τον άνθρωπο».*

Βασικές διαδικασίες που συγκροτούν ένα GIS και πραγματοποιούνται κατά την λειτουργία του είναι (Μανιάτης 1996):

- Συλλογή δεδομένων.
- Κωδικοποίηση και εισαγωγή δεδομένων.
- Αποθήκευση και διαχείριση δεδομένων.
- Ανάκτηση δεδομένων.
- Επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων.
- Απεικόνιση δεδομένων.

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών έχουν γίνει ένα χρήσιμο εργαλείο για την χάραξη ενεργειακής και περιβαλλοντικής πολιτικής. Διευκολύνουν τη χωρική ανάλυση χρησιμοποιώντας τις εσωτερικές γεωεπεξεργασίες ή χαρτογραφικά συναρτησιακά μοντέλα, όπως επικάλυψη χάρτη, επιλογή SQL (structured query language) και θεματική ανάλυση (Muselli et al 1999). Ανάμεσα στις διάφορες γεωδιαδικαστικές συναρτήσεις, η χαρτογραφική επικάλυψη είναι η πιο χρήσιμη όπου τα διάφορα επίπεδα μπορεί να αναπαραστήσουν μεταξύ άλλων το ανάγλυφο μιας περιοχής, το ηλεκτρικό δίκτυο, τις απομακρυσμένες περιοχές.

Τα GIS έχουν φανεί χρήσιμα σε πολλές περιπτώσεις όπως στον αγροτικό και αστικό σχεδιασμό, εισαγωγή δεδομένων για περιφερειακή ανάπτυξη, και για την επιλογή συγκεκριμένων θέσεων ενεργειακών έργων. Ο Yara (1991) ξεκίνησε πρώτος να χρησιμοποιεί τα GIS για την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων ενεργειακών συστημάτων με μια έρευνα πάνω στο αιολικό δυναμικό. Πιο πρόσφατα οι Perez και Seals (1995) χαρτογράφησαν το δυναμικό των συνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο

ενεργειακών συστημάτων. Άλλες πρόσφατες έρευνες εφάρμοσαν τα GIS στην αφαλάτωση του νερού (Alexoroulou 1995), για την οικοδόμηση κατεστραμμένης περιοχής (Thomas 2002), για τη διαχείριση γης με τη βοήθεια πολυκριτηριακών μεθόδων (Joerin, Musy 2000) και στις εφαρμογές ΑΠΕ (Clarke et al 1996, Rylatt, Lomas 2001, Krewitt, Nitsh 2003).

Η χωρική κατανομή του δυναμικού των ΑΠΕ, η ενυπάρχουσα εξάρτηση των ΑΠΕ από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της κάθε τοποθεσίας και η ολική εξάρτηση του κόστους από τα χωρικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής καθιστούν τα GIS ένα απαραίτητο εργαλείο όσον αφορά τον ενεργειακό σχεδιασμό ΑΠΕ καθώς χωρικά, κοινωνικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα τέτοιο πλαίσιο (Voionontas et al 1998). Τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης GIS είναι η ευκολία στη διαχείριση διαθέσιμων δεδομένων στα διάφορα επίπεδα της χωρικής ανάλυσης και η ικανότητα τους να δίνεται έμφαση στις χωρικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα διάφορα σύνολα δεδομένων.

Πιο συγκεκριμένα, τα GIS είναι ένα χρήσιμο εργαλείο που παρέχει τα μέσα για την αναγνώριση και ποσοτικοποίηση των επιδράσεων και του αμοιβαίου δυναμικού που προέρχονται από τοπικούς περιορισμούς. Ακόμη, παρέχουν την ευχρηστία στο να εμπλουτίζεται η βάση δεδομένων, πάνω στην οποία βασίζονται οι αποφάσεις, με χωρικά δεδομένα που δίνουν επιπρόσθετους περιορισμούς για τις ΑΠΕ, ή μη χωρικά δεδομένα που παρέχουν άλλες τεχνολογικές εναλλακτικές.

Επιπλέον, τα GIS έχουν την ικανότητα να διαχειρίζονται και να προσομοιώνουν τους φυσικούς, οικονομικούς, κοινωνικούς και περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Συνεπώς, τα GIS μπορούν να παίξουν έναν σημαντικό ρόλο σαν εργαλείο Συστήματος Υποστήριξης Απόφασης όσον αφορά τη βέλτιστη χωροθέτηση μονάδων παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ (Baban, Parry 2001).

4.2. Ιστορική Αναδρομή των GIS

Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών αναπτύχθηκαν και εξελίχθηκαν μέσα στους αιώνες μέσω της δημιουργίας χαρτών, της συλλογής γεωγραφικών πληροφοριών και της αποθήκευσής τους σε καταχωρητές. Οι πρώτοι γνωστοί χάρτες σχεδιάστηκαν πάνω σε περγαμηνές για να δείξουν τα χρυσωρυχεία των Κοπτών κατά τη διάρκεια της βασιλείας του Ραμσού II της Αιγύπτου (1292-1225 π.Χ.). Ίσως νωρίτερα, οι Βαβυλώνιοι να περιγράφουν τον τότε γνωστό κόσμο με επιγραφές σφηνοειδούς γραφής.

Αργότερα, γύρω στο 300 π.Χ., οι Αρχαίοι Έλληνες συνέταξαν τους πρώτους πραγματικούς χάρτες, χρησιμοποιώντας ένα ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων. Περίπου 100 χρόνια αργότερα, ο Έλληνας μαθηματικός, αστρολόγος και γεωγράφος Ερατοσθένης (276-194 π.Χ.) έβαλε τα θεμέλια της επιστημονικής χαρτογραφίας. Οι Ρωμαίοι έδωσαν μεγαλύτερο βάρος στην καταγραφή και την καταχώρηση γεωγραφικών δεδομένων. Οι όροι *cadastre* (επίσημος καταχωρητής ιδιοκτησίας) και *cadastral* (χάρτης ή έρευνα που δείχνει τα σύνορα ιδιοκτησίας) προέρχονται από τα ελληνικά «κατά στίκον» που σημαίνει «γραμμικός». Οι Ρωμαίοι ήταν οι πρώτοι που εισήγαγαν την έννοια της καταγραφής των ιδιοκτησιών, στο *capitum registra* (καταχωρητή γης). Καθώς οι κοινωνίες οργανώνονταν, πχ. με την εισαγωγή

συστημάτων φορολογίας, η καταχώρηση των ιδιοκτησιών συστηματοποιήθηκε εξ αρχής προκειμένου να διασφαλιστεί το ετήσιο κρατικό εισόδημα.

Η Ευρωπαϊκή χαρτογραφία αναγεννήθηκε με την πτώση της Βυζαντινής αυτοκρατορίας και τη μετάφραση στα Λατινικά, τον 15ο αιώνα, του έργου *Κοσμογραφία (Geographia)* του Κλαούντιου Πτολεμαίου όπου παρότι γράφτηκε το 2ο αιώνα μ.Χ. διατηρήθηκε και μετά την Αναγέννηση και έγινε η τότε υπάρχουσα εικόνα του κόσμου. Παρόλο που η χαρτογραφία παραμελήθηκε, σε πολλές χώρες η καταχώρηση ιδιοκτησιών ευδοκίμησε. Γνωστότερο παράδειγμα είναι αυτό του Μεγάλου Κτηματολογίου των περιοχών της Αγγλίας που συντάχθηκε το 1086 από τον πρώτο Νορμανδό βασιλιά, Ουίλιαμ τον κατακτητή.

Οι εξερευνήσεις του Μάρκο Πόλο, του Χριστόφορου Κολόμβου, του Βάσκο Ντε Γκάμα κ.ά. είχαν σαν αποτέλεσμα, πέραν της ανάπτυξης του εμπορίου, τη δημιουργία νέων χαρτών. Οι επιτελικοί χάρτες αποτέλεσαν τους καθοδηγητές, τόσο για τοπογραφικούς χάρτες ξηράς, όσο και για χάρτες πλοήγησης. Μέχρι το 19ο αιώνα, η γεωγραφική πληροφορία χρησιμοποιούνταν κυρίως στο εμπόριο, στις εξερευνήσεις, για συλλογή φόρων και από το στρατό. Καθώς οι κοινωνίες έγιναν πολυπλοκότερες, νέες εφαρμογές αναπτύχθηκαν για τις επερχόμενες υποδομές (τηλεφωνικές γραμμές, σιδηροδρόμους κλπ).

Το 1609, ο Γαλιλαίος ανακαλύπτει τους δορυφόρους του πλανήτη Δία και συλλαμβάνει την ύπαρξη ενός γεωκεντρικού σύμπαντος, ενώ ιδρύεται το 1675 το Βασιλικό Παρατηρητήριο στο Greenwich της Αγγλίας. Το 1859 ο Gaspard Felix Tournachon κάνοντας χρήση φωτογραφικής μηχανής και ενός αερόστατου, θέτει τις αρχές της Τηλεπισκόπησης, στην προσπάθειά του να κάνει παρατηρήσεις μέσω αεροφωτογραφιών. Το 1878 ιδρύεται η Παγκόσμια Συνομοσπονδία Τοπογράφων (F.I.G.-Federation Internationale des Geometres) στο Παρίσι. Το 1891, στο Διεθνές Γεωγραφικό Συνέδριο της Βέρνης, ο καθηγητής Albrecht Penck, προωθεί την ιδέα για την δημιουργία ενός Παγκόσμιου Χάρτη σε κλίμακα 1:1.000.000. Το 1908 ο Willbur Wright ήταν ο πρώτος πιλότος που με την βοήθεια του L.P. Bonwillan τράβηξε φωτογραφίες από αεροπλάνο. Το 1910 ιδρύεται η Διεθνής Κοινότητα Φωτογραμμετρίας. Κατά τη διάρκεια του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου (1914 – 1918) αναγνωρίζεται η σπουδαιότητα της χρήσης των αεροφωτογραφιών για λόγους πολεμικής τακτικής. Το 1922 ιδρύεται στις Βρυξέλλες η Διεθνής Γεωγραφική Ένωση και το ίδιο έτος. Ακολουθεί ο Β΄ Παγκόσμιος Πόλεμος (1940 – 1945). Εκείνη την περίοδο και συγκεκριμένα το 1941 ο Γερμανός μηχανικός Kohrad Zuse κατασκεύασε μια μηχανή-εργαλείο (υπολογιστής) ο οποίος λειτουργούσε με τον δυαδικό κώδικα (0-1). Αυτή ήταν η αρχή των υπολογιστών και από τότε οι ραγδαίες εξελίξεις αναφέρονται πλέον στις νέες υπολογιστικές περιόδους ή στις λεγόμενες γενιές των υπολογιστών.

Τα GIS με τη μορφή που έχουν σήμερα, άρχισαν να εμφανίζονται στη δεκαετία του '60. Η δημιουργία τους στηρίχθηκε κυρίως στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των Η/Υ, της Χαρτογραφίας και της Φωτογραμμετρίας στις προηγούμενες δεκαετίες του '40 και του '50. Η ανάπτυξη των GIS είναι στενά συνδεδεμένη με την πρόοδο των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Από τα μέσα της δεκαετίας του '80, οι εξελίξεις στις τιμές, στην ταχύτητα και στην αποθηκευτική ικανότητά τους, σε συνδυασμό με τη σημαντική πρόοδο στο λογισμικό των GIS, κατέστησε τα παραπάνω συστήματα διαθέσιμα, τόσο από τεχνολογική, όσο και από οικονομική άποψη, σε μια μεγάλη γκάμα χρηστών.

Ωστόσο, η ιστορία των GIS ξεκινά από το 1960, όταν το πρώτο πραγματικό GIS αναπτύχθηκε στον Καναδά για τις ανάγκες του υπουργείου γεωργίας, υπό το όνομα CGIS (Canadian Geographic Information System 1965), από τον βρετανό Roger Tomlinson ο οποίος και θεωρείται πατέρας των εν λόγω συστημάτων. Στα πρώτα χρόνια, η ανάπτυξη των GIS οφειλόταν αποκλειστικά σε κυβερνητικούς και στρατιωτικούς οργανισμούς.

Το ίδιο σχεδόν χρονικό διάστημα (1964) η Δασική Υπηρεσία στο Berkeley ανέπτυξε ένα πιο προωθημένο σύστημα, το MIADS. Εκτός των λειτουργιών αποθήκευσης και ανάκτησης δεδομένων σε μορφή ψηφίδων (grid), το σύστημα επέτρεπε τη δημιουργία σύνθετων απεικονίσεων (overlay), την εκτέλεση μαθηματικών υπολογισμών και τη δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης χρόνου. Επίσης, ένα από τα πιο σύγχρονα και επιτυχημένα GIS είναι το DIME (Dual Independent Map Encoded file system) που δημιουργήθηκε από τη Στατιστική Υπηρεσία των ΗΠΑ και περιλαμβάνει κωδικοποιημένους τους δρόμους στη βάση των ονομάτων τους και γεωγραφικών κωδικών. Παρά το γεγονός ότι από τον τρόπο δόμησής του θα μπορούσε να χαρακτηριστεί περισσότερο ως αρχείο δεδομένων παρά ως ολοκληρωμένο GIS, είναι από τα συστήματα με τη μεγαλύτερη χρήση.

Η δεκαετία του '70 είναι εκείνη η οποία σηματοδοτεί τη μεγάλη ανάπτυξη των GIS. Η ανάπτυξη του οικολογικού κινήματος και η επιθυμία των κυβερνητικών οργανισμών για όλο και περισσότερο έλεγχο στη χρήση γης, οδήγησε στην απαίτηση για την ανάπτυξη συστημάτων, τα οποία, όχι μόνο θα αποθήκευαν δεδομένα, αλλά θα τα διαχειρίζονταν και θα τα ανέλυαν σε έναν αξιοπρεπή χρόνο. Την εποχή αυτή εμφανίζονται και οι πρώτες εμπορικές επιχειρήσεις κατασκευής λογισμικού (ESRI, INTERGRAPH), οι οποίες προχωρούν στην ανάπτυξη και διάθεση στην αγορά των πρώτων "off-the-shelf" GIS λογισμικών. Το 1969 ιδρύεται η εταιρία INTERGRAPH και η εταιρία ESRI (Environmental Systems Research Institute). Και οι δύο εταιρείες πρωταγωνιστούν μέχρι σήμερα στον χώρο των GIS. Στα χρόνια της δεκαετίας του '70 ο αριθμός των εν λειτουργία γεωγραφικών συστημάτων, αυξήθηκε σημαντικά. Στα 1977 μόνο στις Η.Π.Α. υπήρχαν εν χρήση τουλάχιστον 54 διαφορετικά συστήματα.

Ταυτόχρονα, υπό την αιγίδα της διεθνούς γεωγραφικής ένωσης και της UNESCO, λαμβάνουν χώρα, στην Οτάβα του Καναδά, τα δυο πρώτα συνέδρια για τα GIS. Είναι χαρακτηριστικό ότι στο πρώτο συνέδριο έλαβαν μέρος μόλις 40 σύνεδροι, οι οποίοι ήταν και το σύνολο των επιστημόνων από όλο τον κόσμο που εκείνη την εποχή ασχολούνταν με τα GIS. Οι παραπάνω σύνεδροι ανέλαβαν την υποχρέωση να συγγράψουν το πρώτο βιβλίο για τα GIS, το οποίο και παρουσιάστηκε στο συνέδριο του 1972. Αυτό είναι και το κομβικό σημείο της ανάπτυξης των GIS. Από το 1972, πανεπιστήμια σε Ευρώπη και Βόρειο Αμερική εισάγουν τα παραπάνω συστήματα στα προγράμματα σπουδών τους, παράγοντας την πρώτη γενιά εξειδικευμένων σε αυτά στελεχών.

Στην Ευρώπη, ένα από πιο ενδιαφέροντα συστήματα δημιουργήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '70 και τις αρχές της δεκαετίας του '80 στη Σουηδία, στα πλαίσια της αυτοματοποίησης των καταγραφών του παραδοσιακού Κτηματολογίου, αλλά και άλλων διοικητικών καταγραφών για τη γη, όπως π.χ. των οικοδομικών αδειών.

Στις αρχές της δεκαετίας του '80 οι εταιρείες M&S Computing (γνωστή αργότερα ως Intergraph), Environmental Systems Research Institute (ESRI) και

CARIS, ανέπτυξαν εμπορικές εφαρμογές GIS με πολλά στοιχεία δανεισμένα από το CGIS και συνδύασαν στοιχεία από την πρώτη και δεύτερη γενιά GIS, οργανώνοντας τα δεδομένα σε βάσεις δεδομένων. Παράλληλα, το 1982 το U.S. Army Corp of Engineering Research Laboratory (USA-CERL) δημιούργησε τον πρόγονο του GRASS, ένα δωρεάν πρόγραμμα ανοικτού κώδικα. Σ' αυτήν τη δεκαετία, ο Αμερικάνικος Στρατός αναπτύσσει το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης γνωστό ως Global Positioning System (G.P.S.) που αποτελείται από ένα δίκτυο δορυφόρων γύρω από τη Γη για τον εντοπισμό θέσης, ταχύτητας και διανομής χρόνου, και χρησιμοποιείται αρχικά για στρατιωτικούς σκοπούς (προσδιορισμό στρατιωτικών στόχων, καθοδήγηση αεροπλάνων, πλοίων, πυραύλων σε παγκόσμια κλίμακα) και στη συνέχεια για εφαρμογές σε μετρήσεις Γεωδαισίας, Γεωδυναμικής (παρακολούθηση μετακινήσεων στερεού φλοιού της Γης), Υδρογραφίας κ.λ.π..

Τα περισσότερα προγράμματα στις αρχές του 80 λειτουργούσαν σε περιβάλλον UNI, κάτι το οποίο, από το 2000 και έπειτα έχει αλλάξει άρδην. Στην πλειονότητά τους, τα προγράμματα GIS ανταποκρίνονται σε όλα σχεδόν τα λειτουργικά περιβάλλοντα με έμφαση στα Windows.

Στα πρώτα χρόνια της εμφάνισης και χρήσης των GIS, το μεγάλο χρηματικό κόστος και οι τεχνικές δυσκολίες, επέτρεπαν την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος μόνον στις κρατικές υπηρεσίες.

Στην τελευταία δεκαετία όμως έχει αναπτυχθεί κυρίως στις Η.Π.Α., ένας μεγάλος αριθμός GIS, τόσο από κρατικές υπηρεσίες, όσο και από ιδιωτικές εταιρίες. Τα συστήματα αυτά εξυπηρετούν κυρίως χρήσεις γης, φυσικά διαθέσιμα, σχεδιασμό κ.λπ. για όλα τα επίπεδα της τοπικής αυτοδιοίκησης ενός κράτους ή εξυπηρετούν τις ανάγκες ιδιωτικών επιχειρήσεων.

Δεν είναι όμως λίγες και οι περιπτώσεις, ειδικά στα τελευταία χρόνια, όπου η χρήση των GIS βρίσκει εφαρμογές σε περιοχές τελείως διαφορετικές από αυτές που πιο πάνω αναφέρθηκαν. Για παράδειγμα, ένα GIS είναι εκείνο που δίνει απαντήσεις σε προβλήματα ναυσιπλοΐας, κίνησης και διαδρομής οχημάτων ή αυτόματου εντοπισμού της θέσης οχημάτων (Automatic Vehicle Location, AVL). Παράλληλα σήμερα στις Η.Π.Α., σχεδόν σε όλες τις πόλεις με πληθυσμό πάνω από 100.000 κατοίκους, λειτουργούν GIS για τον καθορισμό της θέσης «συμβάντων» μέσα στην πόλη σε ελάχιστο χρόνο. Τα συστήματα αυτά (dispatch systems), που στηρίζονται σε μια χαρτογραφική βάση της περιοχής, εξυπηρετούν και χρησιμοποιούνται πολύ για την άμεση λήψη αποφάσεων από υπηρεσίες άμεσης επέμβασης, όπως είναι η αστυνομία ή η πυροσβεστική. Έτσι οι υπηρεσίες αυτές έχουν τη δυνατότητα σε πραγματικό χρόνο (real time) και σε χάρτη που εμφανίζεται σε οθόνη γραφικών, να βλέπουν την ακριβή θέση στην οποία βρίσκεται ο κατάλληλος εξοπλισμός για την αντιμετώπιση π.χ. μιας πυρκαγιάς, για την επέμβαση της αστυνομίας, την κίνηση των ασθενοφόρων, κ.λπ.

Φτάνοντας στο σήμερα, μελέτη της γνωστής εταιρείας αναλύσεων Frost & Sullivan προσδιορίζει το μέγεθος της βιομηχανίας GIS στα 3 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ (USD) και προβλέπει αύξηση της αξίας της αγοράς κατά 5% ετησίως, ενώ μελέτες εταιρειών συμβούλων, όπως της Anderson Consulting και της IBM, περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο τα GIS θα είναι σημαντικός παράγοντας αλλαγών σε πολλούς τύπους οργανισμών τα επόμενα χρόνια.

Στις μέρες μας, σχεδόν 55 χρόνια μετά, τα GIS χρησιμοποιούνται ως τεχνολογία για τη διαχείριση γεωγραφικών δεδομένων σε ψηφιακή μορφή. Πλέον,

ο τυπικός χρήστης ενός λογισμικού GIS, αναμένει να μπορεί να καθορίζει τις απαιτήσεις του από το σύστημα και να αλληλοεπιδρά με αυτό, μέσω ενός φιλικού περιβάλλοντος με εικονίδια και γραφικές αναπαραστάσεις. Σήμερα, υπάρχουν στην αγορά GIS, που έχουν αναπτυχθεί από διαφορετικές εταιρείες, όμως όλα λειτουργούν με βάση την ίδια φιλοσοφία και τις ίδιες αρχές, έχουν παρόμοιες δυνατότητες και τηρούν συγκεκριμένα πρότυπα που υπαγορεύονται από τη διεθνή οργάνωση "Open G.I.S.". Επίσης, η αλματώδης ανάπτυξη και διάδοση των έξυπνων κινητών τηλεφώνων (smartphones) καθώς και των cloud υπηρεσιών έδωσε τη δυνατότητα εξάπλωσης των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών όχι μόνο σε όλες τις συσκευές, φορητές ή μη, αλλά και στο ευρύ κοινό, με αποτέλεσμα τη συνεχή προσπάθεια αναβάθμισης των δυνατοτήτων τους λόγω της αυξανόμενης ζήτησής τους.



Εικόνα 4.1: Χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών μέσω σταθερών, κινητών ή cloud εφαρμογών. (Πηγή: Αντωνίου Β., Παπασπυρόπουλος Κ., 2016).

4.3. Πορεία των GIS στην Ελλάδα

Η Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (ΓΥΣ) αποτελεί τον πρώτο δημόσιο φορέα που εγκατέστησε γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών στην Ελλάδα, γύρω στα 1985. Κατόπιν ακολούθησαν και άλλες δημόσιες υπηρεσίες (ΥΠΕΧΩΔΕ, Οργανισμός Κτηματολογίου και Χαρτογράφησης της Ελλάδας, ΙΓΜΕ, Δημόσιες Υπηρεσίες ΟΤΑ, κ.λ.π.) και πανεπιστήμια (Α.Π.Θ., Ε.Μ.Π., Πανεπιστήμιο Πατρών, κ.λ.π.). Το 1989 δημιουργούνται οι πρώτες ιδιωτικές εταιρίες και γραφεία με αντικείμενά τους την υποστήριξη χρηστών GIS.

Εμφανίζονται σταδιακά από τις αρχές της δεκαετίας του '90 Μη Κυβερνητικοί Οργανισμοί (Non Governmental Organizations – NGOs) με σκοπό την

ενεργή συμμετοχή και ευαισθητοποίηση των πολιτών σε διάφορους τομείς προστασίας της φύσης (της άγριας πανίδας και χλωρίδας) και της διατήρησης του φυσικού περιβάλλοντος, εισάγοντας τα GIS. σαν απαραίτητο εργαλείο ανάλυσης περιβαλλοντικών θεμάτων και υποστήριξης λήψης αποφάσεων και μέτρων διαχείρισης (WWF, EKBV, MOM, Αρκτούρος, κ.ά.).

Το 1992 το Ελληνικό Δημόσιο σε πρόσκληση εκδήλωσης ενδιαφέροντος για την εκπόνηση Ειδικής Χωροταξικής Μελέτης, αναφέρει την απαραίτητη συνεργασία με εξειδικευμένους επιστήμονες στα GIS. Την ίδια χρονιά, η Γ.Υ.Σ.. ανακοινώνει τη διάθεση ψηφιακών δεδομένων σε κατάλληλο format για εισαγωγή σε GIS.

Το 1995 ο Ο.Κ.Χ.Ε. ξεκινά την υλοποίηση του Εθνικού Κτηματολογίου όπου βασική σημασία για την επιτυχή εφαρμογή του αποτελεί η ανάπτυξη ενός GIS. Το 1996 ξεκινά η ανάπτυξη GIS που θα εξυπηρετεί τις ανάγκες του Οργανισμού Αποχέτευσης της Θεσσαλονίκης και προβλέπεται η δημιουργία ενός ψηφιακού υποβάθρου κλίμακας 1:500 για το Πολεοδομικό Συγκρότημα της Θεσσαλονίκης. Πολλά ερευνητικά προγράμματα υλοποιήθηκαν και υλοποιούνται συνεχώς, κυρίως από ΑΕΙ, συγχρηματοδοτούμενα από την Ευρωπαϊκή Ένωση προσθέτοντας πολύτιμη εμπειρία και γνώσεις στους έλληνες ερευνητές και μελετητές.

Με την εμφάνιση του Internet δημιουργήθηκαν οι πρώτοι Ελληνικοί Δικτυακοί Εξυπηρετητές (Servers) με χρήση περιορισμένων αλληλεπιδραστικών (interactive) εφαρμογών GIS.

4.4. Γενικές Επισημάνσεις

Η ιστορική αναδρομή της πορείας των GIS θα λέγαμε ότι οριοθετεί την εξέλιξή τους σε 5 περιόδους:

- I. Την περίοδο της μη χρήσης υπολογιστών (18ου αιώνα έως τα τέλη του 19ου αιώνα), όπου έχουμε τη χρήση υπέρθεσης επιφανειών πάνω από ένα βασικό χάρτη (Base Map) για να δειχθούν κινήσεις στρατευμάτων, πληθυσμών, αλλαγές ροής ποταμών, στοιχεία γεωλογίας, τοπογραφίας κ.λ.π..
- II. Από αρχές του '50 έως αρχές '70, τις πρώτες προσπάθειες εφαρμογής τους όπου σημαντικό ρόλο έπαιξαν κάποιοι πρωτοπόροι σε διάφορους τομείς με μειωμένο αριθμό εισαγωγής δεδομένων και ύπαρξη αρκετών προβλημάτων στη λειτουργικότητά τους.
- III. Από αρχές '70 έως αρχές '80, όπου ήταν η περίοδος πρώτης ανάπτυξης, συμμετοχής Δημοσίων και Ερευνητικών Οργανισμών.
- IV. Από αρχές '80 έως αρχές '90, όπου υπήρξε η ανάπτυξη των σχεσιακών βάσεων δεδομένων και η αύξηση της διάθεσης μέσω εμπορίου.
- V. Από αρχές '90 έως και σήμερα, όπου έγινε εφικτή η χρήση τους σχεδόν από κάθε χρήστη PC (Personal Computer), αυξήθηκαν οι παροχές των εργαλείων μέσα στα ίδια τα συστήματα, υπήρξε η μεσολάβηση του Internet και διάθεση εφαρμογών GIS και πλέον έγινε περισσότερο προσωποκεντρικός ο τρόπος χρήσης τους καθώς η φιλικότητα και η ανάλυση των διαθέσιμων πακέτων έχουν σαν πρώτο στόχο να ικανοποιήσουν το χρήστη και κατόπιν να επιλύσουν ζητήματα που άπτονται του αντικειμένου τους.

Η μελλοντική εξέλιξη τους σίγουρα είναι άγνωστη σε όλους, αλλά υπάρχει μια δυνατότητα εκτίμησης της πορείας τους σε συνάρτηση με τις εξελίξεις στις συμπληρωματικές τεχνολογίες που συμμετέχουν στο σύστημα (π.χ. Ασύρματα Δίκτυα – Wireless Networks) καθώς και η συμμετοχή των GIS και σε άλλους τομείς παροχών που προκύπτουν ως επεκτάσεις εφαρμογών του διαδικτύου (π.χ., ανάπτυξη λογισμικού για την εξ' αποστάσεως εκπαίδευση – e-Learning).

4.5. Εφαρμογές των GIS

Σήμερα, η χρήση των GIS βρίσκει εφαρμογή σε πλήθος επιστημών και σε κάθε είδους δραστηριότητα που επεξεργάζεται χωρική ή γεωγραφική πληροφορία, όπως:

- Ανίχνευση και διαχείριση κοιτασμάτων.
- Διαχείριση φυσικών πόρων.
- Μοντέλα υδρολογικών λεκανών και κατανομής νερού.
- Σχεδίαση και ανάλυση πληθυσμού και αναγκών.
- Διαχείριση και μοντελοποίηση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων.
- Ανάλυση πεδίου.
- Χαρτογραφία.
- Γεωλογία - ορυκτολογία (καταγραφή ενεργών ρηγμάτων, κατολισθήσεων, ανίχνευση βιομηχανικών ορυκτών - υδροθερμικών εξαλλοιώσεων).
- Γεωμορφολογία.
- Εγκληματολογία.
- Επιδημιολογικές έρευνες.
- Ιστορία – αρχαιολογία.
- Πωλήσεις – μάρκετινγκ.
- Θεματικές ταξινομήσεις πολυφασματικών δορυφορικών δεδομένων για παραγωγή χαρτών μεταβολής της κάλυψης του εδάφους και των χρήσεων γης.
- Παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους, ορθοφωτοχαρτών και τρισδιάστατων απεικονίσεων.
- Αντικειμενοστραφή εξαγωγή χαρακτηριστικών για αστικές εφαρμογές.
- Μελέτη, παρακολούθηση περιβάλλοντος και ανίχνευση αλλαγών.
- Διαχείριση φυσικών και τεχνολογικών καταστροφών (πλημμύρες, πυρκαγιές, κλπ.) με εκτίμηση του κινδύνου από αυτές σε μία περιοχή, όπως και τον υπολογισμό του κόστους των ζημιών, αλλά και του χρόνου απόκρισης του κρατικού μηχανισμού.
- Ενεργειακό ισοζύγιο και μικροκλιματικές εφαρμογές.
- Ανάλυση υπέρυθρων δορυφορικών απεικονίσεων στα πλαίσια έρευνας και εφαρμογής στα πεδία της φυσικής του περιβάλλοντος και της ατμόσφαιρας
- Θέματα μεταφορών.
- Κατασκευές, όπως: οικοδομικές, βιομηχανικές, υδραυλικές, λιμενικές, έργα υποδομής, έργα περιβάλλοντος και περιβαλλοντικού σχεδιασμού, έργα λατομείων και ανάλυση δικτύων.

- Υπηρεσίες, όπως: σχεδιασμός κατασκευών, logistics, οικονομική εκτίμηση και ασφάλεια εγκαταστάσεων.
- Διαχείριση υπηρεσιών εγκαταστάσεων (facilities management), όπως καθαριότητα, συντήρηση, κλπ. μεγάλου μεγέθους εγκαταστάσεων, όπως λιμάνια, νοσοκομεία και αεροδρόμια.
- Κτηματομεσιτική (real estate).
- Διαχείριση και λειτουργία έργων υποδομής (project management), όπως ηλεκτρικό δίκτυο, δίκτυο ύδρευσης και άρδευσης, δίκτυο φυσικού αερίου, καύσιμων, κ.λπ.) παρέχοντας τη δυνατότητα παρακολούθησης και αποτύπωσης όλων των πληροφοριών που σχετίζονται με τα έργα, επιτρέποντας την σωστή διαχείριση και κατανομή των κατασκευαστικών εργασιών, επιθεωρήσεων και λοιπών εργασιών.
- Έργα σχετιζόμενα με την ενέργεια (αιολικά πάρκα, φωτοβολταϊκά κλπ.).

Από τα παραπάνω παραδείγματα, γίνεται φανερό η σημασία και η εξάπλωση που έχουν αποκτήσει τα GIS σήμερα για πλήθος επιστημών, κάνοντας τη μελέτη και εφαρμογή αυτών ξεχωριστή επιστήμη.

Τομέας δραστηριότητας	Εφαρμογές
Επιχειρήσεις	Τράπεζες και Ασφάλειες
	MME
	Real Estate
	Retail Business
Επικοινωνίες	Υπηρεσίες προσδιορισμού Θέσης
	Σχεδίαση και ανάλυση δικτύων
Στρατός- Άμυνα	Βελτιστοποίηση Επιχειρήσεων
	Προγραμματισμός Προμηθειών
	Συστήματα Διοίκησης & Ελέγχου (C4ISR)
Δημόσια Διοίκηση	Κυβερνητικές υπηρεσίες (ΥΠΕΧΩΔΕ, Υπ. Υγείας κ.ά.)
	Πολιτική Προστασία (Διαχείριση Πυρκαγιών, σχέδια εκκενώσεως περιοχών, άμεση επέμβαση και βοήθεια κ.ά.)
Επιχειρήσεις Κοινής Ωφέλειας	Διαχείριση δικτύων νερού, ηλεκτρικού, φυσικού αερίου και τηλεφώνου
	Ανάλυση μολυσμένων χώρων
	Ανάλυση περιβαλλοντικού κινδύνου
Περιβάλλον – Διαχείριση Φυσικών Πόρων	Διαχείριση δασών, αγροτικών περιοχών, υδροβιότοπων
	Διαχείριση ορυχείων μεταλλείων
	Κτηματολόγιο – Χρήση Γης
	Εφαρμογές κτηματολογίου (ιδιοκτησία και δικαιώματα γης, φορολογία, εκτίμηση γης, μεγιστοποίηση χρήσης γης κτλ.
Μεταφορές	Δρομολόγηση και διαχείριση στόλου οχημάτων
	Ανάλυση κίνησης, επιλογή δρομολογίων κτλ

Πίνακας 4.1: Εφαρμογές των GIS ανά τομέα δραστηριότητας (Κίκιρας Π., 2006).

4.6. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των GIS

Τα GIS παρουσιάζουν διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Αυτά είναι τα εξής (Καρτέρης, 1994):

Πλεονεκτήματα:

- Τα δεδομένα διατηρούνται σε ψηφιακή μορφή (π.χ. δισκέτες, μαγνητικές ταινίες (tapes), σκληροί δίσκοι (Hard Disks), CD-ROM, DVD-ROM, κ.λπ.).
- Οι γεωγραφικές βάσεις δεδομένων είναι ποσοτικές πληροφορίες οι οποίες είναι δυνατόν να καταχωρούνται κατά οποιαδήποτε γεωγραφική μονάδα ή διάταξη π.χ. κατά νομό, κατά κοινοτική ή δημοτική περιφέρεια, κατά δασαρχείο, κατά δασικό σύμπλεγμα, κατά τοπογραφικό χάρτη, κατά εκτάριο, κατά συγκεκριμένο δίκτυο καννάβου κ.λπ.
- Γεωγραφικές βάσεις δεδομένων είναι δυνατόν να δημιουργηθούν για οποιαδήποτε αντικείμενο, χαρακτηριστικό, ιδιότητα ή συνδυασμός αυτών. Υπάρχοντα δεδομένα (π.χ. από διαχειριστικές μελέτες των δασών) είναι δυνατόν να ενσωματωθούν, με ή χωρίς αλλαγές και επεξεργασία, στη βάση δεδομένων εφόσον είναι κατά χώρο προσανατολισμένα.
- Τα υπάρχοντα ηλεκτρονικά όργανα και λογισμικά επιτρέπουν διάφορες μορφές επεξεργασίας, όπως μετρήσεις, χαρτογραφικές επικαλύψεις, μετατροπές κ.λπ.
- Γρήγορος και επαναλαμβανόμενος έλεγχος ή εξέταση θεωρητικών μοντέλων για την εκτίμηση επιστημονικών κριτηρίων.
- Οι διάφορες μορφές εξαγόμενων αποτελεσμάτων παράγονται πολύ γρήγορα, αποτελούνται από μεμονομένα ή σύνθετα θέματα, για οποιαδήποτε γεωγραφική θέση της βάσης δεδομένων και σε οποιαδήποτε κλίμακα.
- Εύκολη ενημέρωση της βάσης δεδομένων η οποία επιτρέπει τον αποτελεσματικό εντοπισμό και ανάλυση των αλλαγών που έγιναν σε δύο ή περισσότερες περιόδους.
- Πολλές μορφές ανάλυσης πραγματοποιούνται με πολύ μικρότερο κόστος απ'ότι με τις κλασικές μεθόδους. Π.χ. στην περίπτωση συνδυασμού πολλών θεματικών χαρτών ή του υπολογισμού των εκθέσεων και κλίσεων από έναν τοπογραφικό χάρτη.
- Όλες οι αναλύσεις γίνονται κατά αντικειμενικό τρόπο, τα δε αποτελέσματα παράγονται αυτόματα.

Μειονεκτήματα:

- Το αρχικό κόστος απόκτησης του συστήματος καθώς και της τεχνικής υποστήριξης και συντήρησης αυτού είναι αρκετά υψηλό.
- Η αποτελεσματική χρήση του συστήματος προϋποθέτει την άρτια εκπαίδευση του κατάλληλου προσωπικού.
- Υπάρχουν προβλήματα κατά τη μετατροπή και καταχώρηση ορισμένων προϋπαρχόντων δεδομένων σε συγκεκριμένη βάση δεδομένων.

4.7. Δομικά Μέρη ενός GIS

Με τον όρο Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Geographic Information System - GIS) περιγράφεται μια οργανωμένη συλλογή μηχανικών υπολογιστικών συστημάτων, λογισμικών συστημάτων, χωρικών δεδομένων και ανθρώπινου δυναμικού, με σκοπό τη συλλογή, καταχώρηση, ενημέρωση, διαχείριση, ανάλυση και απόδοση κάθε μορφής πληροφορίας που αφορά στο γεωγραφικό περιβάλλον.



Εικόνα 4.2: Δυνατότητες ενός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών. (Πηγή: Αντωνίου Β., Παπασπυρόπουλος Κ., 2016).

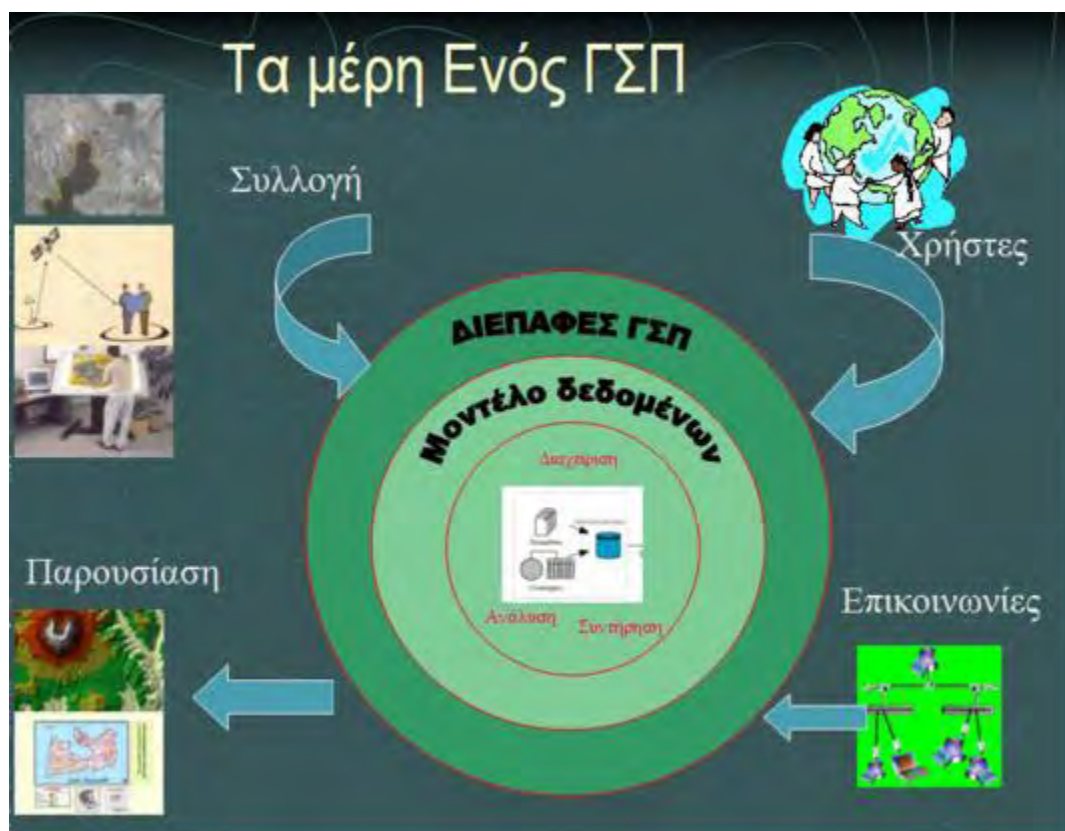
Με τη ευρεία έννοια του όρου, το GIS είναι ένα εργαλείο, το οποίο επιτρέπει στους χρήστες του να δημιουργούν ερωτήματα, να αναλύουν, να καταχωρούν, και να διορθώνουν χωρικά δεδομένα. Το τελικό αποτέλεσμα είναι πάντα η δημιουργία χαρτών έντυπων ή ηλεκτρονικών χαρτών όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραπάνω διαδικασιών.

Ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών συντίθεται από τέσσερα μέρη:

- τα μηχανικά μέρη (hardware),
- το λογισμικό (software),
- τα δεδομένα (data),
- τους χρήστες (users).

Τα μηχανικά μέρη και το λογισμικό έχουν ένα καθορισμένο κύκλο ζωής, επηρεάζονται στενά από τις τεχνολογικές εξελίξεις και αντικαθίστανται συχνά από νεότερα και πιο σύγχρονα προϊόντα. Από την άλλη πλευρά, τα δεδομένα αποτελούν το πλέον δαπανηρό κομμάτι των GIS, καθώς η συλλογή τους απαιτεί πολύ χρόνο και

προσπάθεια. Επιπλέον, τα περισσότερα γεωγραφικά δεδομένα είναι δυναμικά και απαιτούν συνεχείς ενημερώσεις.



Εικόνα 4.3: Τα μέρη ενός GIS. (Πηγή: Αντωνίου Β., Παπασπυρόπουλος Κ., 2016).

1. Μηχανικά μέρη (υλικό) - Hardware.

Τα μηχανικά μέρη (hardware) τα αποτελούν οι υπολογιστές, τα δίκτυα και οι διάφορες περιφερειακές συσκευές, όπως σχεδιαστές, εκτυπωτές, σαρωτές, ψηφιοποιητές, κλπ. Η απόκτηση ενός workstation είναι σχετικά ακριβή, λόγω των υψηλών απαιτήσεων σε επιδόσεις. Η δικτύωσή τους διευκολύνει την κατακόρυφη και οριζόντια ενσωμάτωση των δεδομένων και επιτρέπει την καλύτερη και οικονομικότερη χρήση λογισμικού και περιφερειακών.

2. Λογισμικό - Software.

Το λογισμικό ενός GIS εκμεταλλεύεται και αξιοποιεί τις δυνατότητες του υλικού. Το λογισμικό, σαν συστατικό των GIS, περιβάλλει το υλικό σε τρία επίπεδα (Antenucci et al, 1992): i) λειτουργικό σύστημα, ii) ειδικά προγράμματα υποστήριξης του συστήματος, και iii) λογισμικό εφαρμογής.

- I. Το λειτουργικό σύστημα αποτελείται από μια σειρά προγραμμάτων που επιβλέπουν και κατευθύνουν τις βασικές λειτουργίες του συστήματος και ελέγχουν την επικοινωνία των μονάδων του υλικού (Windows, Unix, Linux).

- II. Τα ειδικά προγράμματα υποστήριξης εκτελούν ορισμένες λειτουργίες που ζητούν συχνά οι χρήστες του συστήματος. Περιλαμβάνουν μεταγλωττιστές, διαχειριστές αρχείων, ειδικούς οδηγούς για την επικοινωνία με περιφερειακές μονάδες, και μια σειρά άλλων προγραμμάτων για την υποστήριξη καθημερινών αναγκών των χρηστών και του διαχειριστή του συστήματος (αντιγραφές ασφαλείας, εργαλεία συμπίεσης, λογισμικά επικοινωνίας, κλπ).
- III. Το λογισμικό εφαρμογής χρησιμοποιείται συχνά για την εκτέλεση των λειτουργιών σε ένα GIS. Προμηθεύεται με τη μορφή πακέτων λογισμικού τα οποία παρέχουν ολοκληρωμένες δυνατότητες απεικόνισης (χαρτογράφησης), επεξεργασίας και ανάλυσης των γεωγραφικών δεδομένων. Γνωστά λογισμικά GIS είναι τα: ArcGIS, ArcInfo, ArcView της εταιρίας ESRI και τα Geomedia, MGE της εταιρίας Intergraph. Το λογισμικό εφαρμογής για πακέτα GIS αποτελείται από δύο μέρη (Antenucci et al, 1992): i) τον πυρήνα του πακέτου, ο οποίος παρέχει τις βασικές δυνατότητες χαρτογραφικής απεικόνισης και διαχείρισης των δεδομένων, και ii) το λογισμικό ειδικών εφαρμογών με τα εργαλεία ανάπτυξης εφαρμογών.

Ο πυρήνας του πακέτου συνήθως περιλαμβάνει τα ακόλουθα συστατικά:

- ο Λειτουργίες γραφικής επεξεργασίας: περιλαμβάνουν συναρτήσεις που επιτρέπουν στο χρήστη του συστήματος να εισαγάγει χαρτογραφικά χαρακτηριστικά και σχετικά σχόλια και να δημιουργεί ψηφιακούς ή αναλογικούς χάρτες.
- ο Λειτουργίες διαχείρισης βάσεων δεδομένων: περιλαμβάνουν δυνατότητες για αποθήκευση, δόμηση και ανάκτηση δεδομένων με γεωγραφική αναφορά (γραφικά και μη-γραφικά στοιχεία). Το πακέτο GIS κάνει χρήση ειδικά σχεδιασμένων ρουτινών λογισμικού διαχείρισης βάσεων δεδομένων και εμπορικά διαθέσιμων Συστημάτων Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων (Microsoft SQL, Oracle, DB2).
- ο Εργαλεία βασικής χαρτογραφικής και γεωγραφικής ανάλυσης: περιλαμβάνουν μια σειρά ειδικών εργαλείων για την εκτέλεση βασικών λειτουργιών χαρτογραφικής και γεωγραφικής ανάλυσης. Τα εργαλεία αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα σε απλές εφαρμογές, ή σε συνδυασμό.

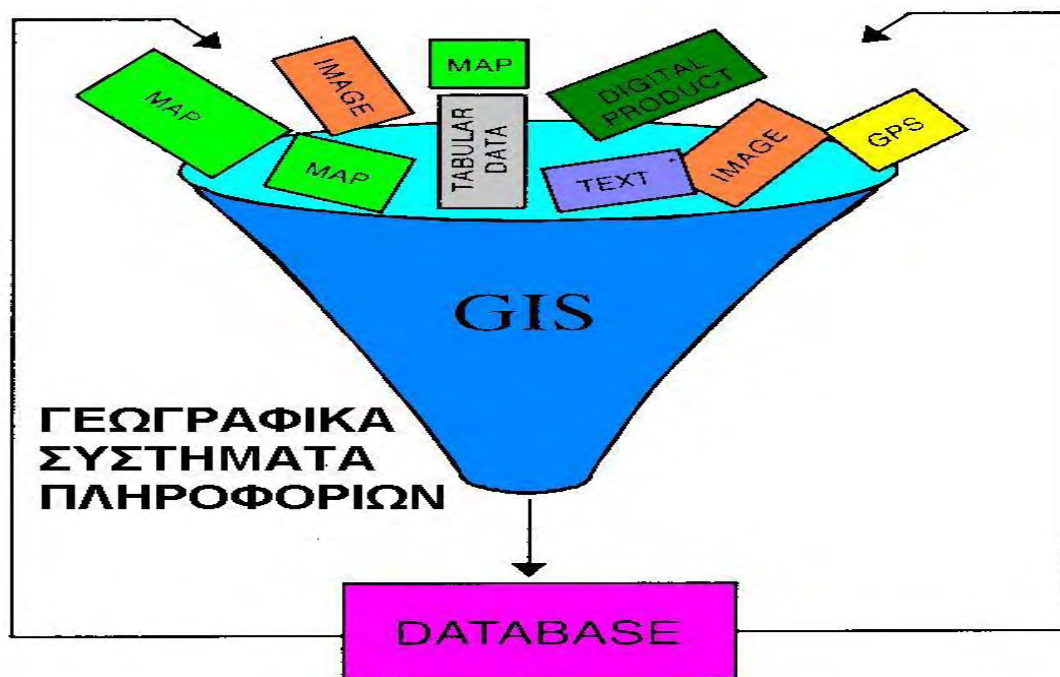
Τα σύγχρονα GIS παρέχουν τα ακόλουθα λογισμικά ειδικών εφαρμογών.

- ο Λογισμικό ειδικών εφαρμογών: υποστηρίζει ειδικές εφαρμογές όπως: ανάλυση δικτύων, δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους, θεματική χαρτογράφηση, κλπ.
- ο Διαπροσωπείες χρηστών: παρέχουν ένα φιλικό περιβάλλον (μέσω γλώσσας εντολών, πινάκων επιλογής, ή γραφικές διαπροσωπείες) για την κλήση συναρτήσεων από το λειτουργικό σύστημα, την υποστήριξη προγραμμάτων και την εκτέλεση του λογισμικού εφαρμογής.

- Προγραμματισμός με μακρο-εντολές: ένα μακρο-πρόγραμμα αποτελείται από μια σειρά εντολών λογισμικού, οι οποίες σε συνδυασμό εκτελούν μια σύνθετη λειτουργία.
- Προγραμματισμός σε εξωτερικές γλώσσες προγραμματισμού: τα περισσότερα συστήματα παρέχουν τη δυνατότητα ολοκλήρωσης προγραμμάτων που είναι γραμμένα σε διάφορες γλώσσες προγραμματισμού, όπως C, C++, Pascal ή Fortran. Με τον τρόπο αυτό, επιτρέπεται η ανάπτυξη σύνθετων λειτουργιών για την υποστήριξη των αναγκών ειδικών εφαρμογών.

3. Δεδομένα - Data.

Τα δεδομένα (data) αποτελούν το βασικό συστατικό ενός GIS. Σύμφωνα με έναν γενικό ορισμό τα γεωγραφικά δεδομένα είναι ένα σύνολο από καταγραφές - μετρήσεις που σχετίζονται με αντικείμενα και φαινόμενα του χώρου. Πρόκειται για το σύνολο των στοιχείων για την περιοχή ενδιαφέροντος.



Εικόνα 4.4: Στους τύπους δεδομένων συμπεριλαμβάνονται χάρτες, εικόνες (δορυφορικές κλπ.), φωτογραφίες, ψηφιακά δεδομένα, σήματα/μετρήσεις GPS, κείμενα, πίνακες δεδομένων.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ένταξή τους σε ένα GIS, είναι να αναφέρονται σε οντότητες οι οποίες είναι χωρικά προσανατολισμένες. Ως προς τη φύση τους τα δεδομένα ενός GIS διακρίνονται σε *χωρικά* (spatial), στα οποία η βασική πληροφορία είναι η θέση τους στο χώρο με βάση κάποιο σύστημα αναφοράς, και στα *περιγραφικά* (descriptive), τα οποία αναφέρονται στις ιδιότητες κάποιων χωρικών θέσεων. Ένα γραμμικό στοιχείο σε ένα χάρτη, το οποίο παριστά ένα δρόμο, συνιστά χωρική πληροφορία, ενώ ο χαρακτηρισμός του ως “εθνικό” ή “επαρχιακό”, για παράδειγμα, αποτελεί περιγραφική πληροφορία. Τα *χωρικά*

δεδομένα (spatial data) διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες χωρικών αντικειμένων: σημεία, γραμμές, και πολύγωνα (περιοχές).



Εικόνα 4.5: Κατηγορίες χωρικών αντικειμένων. (Πηγή: Χαλκιάς Χ., 2011)

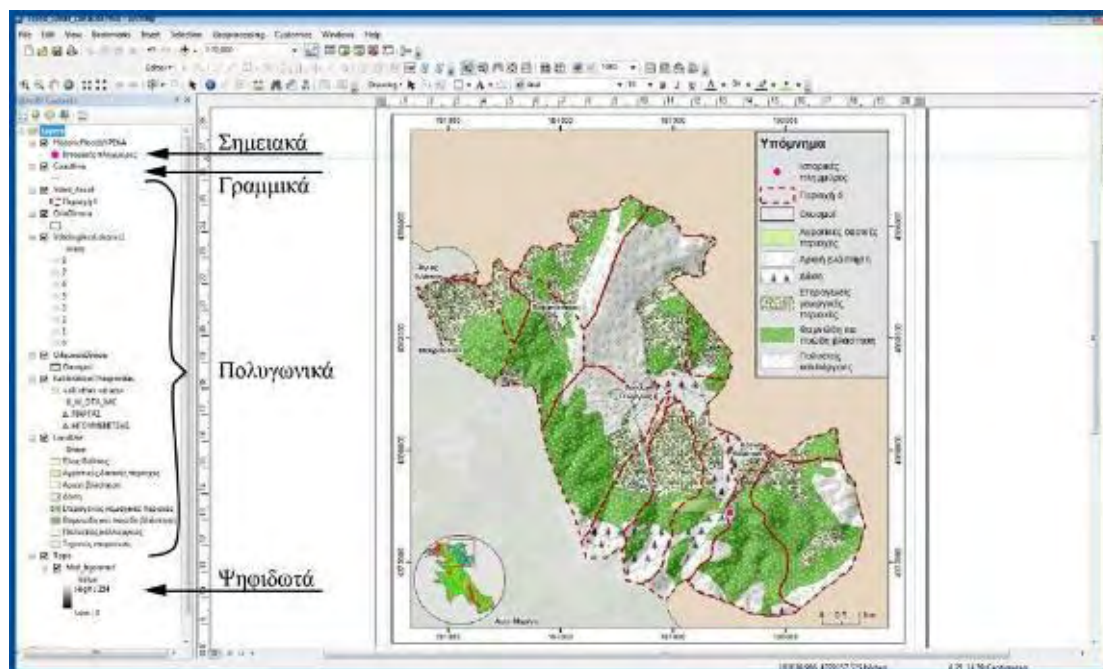
Σημεία: Αυτά αναφέρονται σε οντότητες οι οποίες παριστάνονται σαν σημεία. Η αναπαράσταση αυτή είναι συνάρτηση της κλίμακας παρατήρησης. Για παράδειγμα, ένας οικισμός μπορεί να σημειωθεί ως σημείο ή ως επιφάνεια ανάλογα με την κλίμακα παρατήρησης. Τα σημειακά δεδομένα ορίζονται με ζεύγη συντεταγμένων x, y . Άλλα παραδείγματα σημειακών δεδομένων είναι οι θέσεις δειγματοληψίας, τα ακραία σημεία ενός γραμμικού στοιχείου κλπ.

Γραμμές: Τα δεδομένα αυτά αφορούν γραμμικές οντότητες όπως δρόμους, ποταμούς, ρήγματα, διοικητικά όρια κ.τ.λ. Ένα κύριο χαρακτηριστικό των γραμμικών στοιχείων είναι ότι ο λόγος μήκος/πλάτος είναι πολύ μεγάλος. Τα γραμμικά δεδομένα αποτελούνται από μία απλή σειρά σημειακών δεδομένων τα οποία έχουν διαφορετική αρχή και τέλος. Τα γραμμικά δεδομένα έχουν καταγεγραμμένη σαν εσωτερική πληροφορία το μήκος τους, ενώ περιέχουν και πληροφορία για τη φορά τους.

Πολύγωνα : Είναι ένας συνηθισμένος τύπος δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά καταλαμβάνουν μια περιοχή η οποία περικλείεται και ορίζεται από γραμμικά δεδομένα. Σ' ένα πολυγωνικό επίπεδο πληροφορίας, το κάθε πολύγωνο θεωρείται ανεξάρτητη οντότητα. Τα επιφανειακά δεδομένα έχουν περίμετρο και έκταση. Η περίμετρος είναι το άθροισμα των μηκών των γραμμικών στοιχείων που περιγράφουν ένα πολυγωνικό σχήμα, ενώ έκταση του πολυγώνου είναι το εμβαδόν της κλειστής πολυγωνικής επιφάνειας που περιγράφουν οι γραμμικές αυτές οντότητες.

Τα *μη χωρικά ή περιγραφικά δεδομένα (attributes)* είναι ποιοτικά ή ποσοτικά. Αυτά αφορούν στις ιδιότητες των γεωγραφικών δεδομένων οι οποίες πρέπει να διαχειριστούν σ' ένα GIS. Η εισαγωγή όλων αυτών των δεδομένων επιτυγχάνεται με τη βοήθεια αριθμών, λέξεων, κωδικών συμβόλων, χρωμάτων κ.τ.λ. Για παράδειγμα, μια πολυγωνική οντότητα, η οποία αναπαριστά την επιφανειακή εξάπλωση ενός γεωλογικού σχηματισμού, διακρίνεται με τη χρήση χρώματος, διαγράμμισης ή συμβόλου.

Τα δεδομένα σε ένα GIS αναπαρίστανται μέσω επιπέδων πληροφορίας (information layers), τα οποία μπορούν να παρομοιαστούν με διαφανείς σελίδες, που περιέχουν διαφορετικό είδος πληροφορίας. Τα επίπεδα πληροφορίας τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο το ένα πάνω από το άλλο, ώστε να είναι εμφανές το σύνολο των χαρακτηριστικών των επιμέρους επιπέδων πληροφορίας. Συνήθως, πάνω-πάνω τοποθετούνται τα σημειακά επίπεδα πληροφορίας, από κάτω τα γραμμικά, πιο κάτω τα επιφανειακά και τέλος τα ψηφιδωτά.



Εικόνα 4.6: Στιγμιότυπο οθόνης του περιβάλλοντος εργασίας του λογισμικού ArcGIS της εταιρίας ESRI, όπου αποτυπώνονται τα επίπεδα πληροφορίας που συνιστούν τον παραγόμενο χάρτη. Τα επιμέρους επίπεδα πληροφορίας είναι σημαντικό να τοποθετούνται σε σωστή σειρά - ιεραρχικά (από πάνω προς τα κάτω: σημειακά, γραμμικά, πολυγωνικά, ψηφιδωτά), έτσι ώστε στον τελικό χάρτη να είναι ορατό το σύνολο των γεωγραφικών αντικειμένων. (Πηγή: Αντωνίου Β., Παπαστυρόπουλος Κ., 2016).

Τα γεωγραφικά δεδομένα αποτελούν μια κατηγορία δεδομένων, τα οποία κατανέμονται στο χώρο και μεταβάλλονται στο χρόνο. Η μεταβολή αυτή μπορεί να είναι τόσο αργή, ώστε να αγνοείται (πχ., αλλαγή της ακτογραμμής, του κλίματος ή της κατανομής ηλικιών μιας χώρας). Ωστόσο, μπορεί να είναι τόσο γρήγορη, ώστε ο ρυθμός αλλαγών να αποτελεί μια σημαντική διάσταση των γεωγραφικών οντοτήτων (πχ., ο φόρτος κυκλοφορίας μιας λεωφόρου, η θερμοκρασία, το μέτωπο μιας δασικής πυρκαγιάς).

Τα γεωγραφικά δεδομένα συχνά κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες (Maguire et al, 1991): i) φυσικά αντικείμενα (πχ., σπίτια, δρόμοι, λίμνες, δάση), ii) διοικητικές μονάδες (πχ., ιδιοκτησίες, νομοί, εθνικοί δρυμοί, στρατόπεδα), iii) γεωγραφικά φαινόμενα (πχ., θερμοκρασία, υγρασία, ατυχήματα, κατανομή θαλάσσιων πληθυσμών). Βέβαια είναι προφανές ότι από τις παραπάνω κατηγορίες γεωγραφικών δεδομένων μπορούν να προκύψουν και παραγόμενα δεδομένα (πχ., επίπεδο φτώχειας, καταλληλότητα εδάφους για καλλιέργειες, περιβαλλοντική επιβάρυνση).

Τα δεδομένα αυτά συγκεντρώνουν μια σειρά χαρακτηριστικών που τα διαφοροποιούν από τις οικείες λίστες και τους πίνακες δεδομένων που διαχειρίζονται τα πληροφοριακά συστήματα των παραδοσιακών εφαρμογών. Οι γεωγραφικές οντότητες (γεωγραφικά αντικείμενα, μονάδες ή φαινόμενα) σε ένα σύστημα, έχουν έξι διαστάσεις, στις οποίες αναθέτονται τιμές (Aronoff 1989, Laurini & Thompson 1992, Worboys 1995).

Οι διαστάσεις αυτές είναι οι ακόλουθες:

- I. Ταυτότητα: Παρέχει ένα μέσο αναφοράς στις γεωγραφικές οντότητες. Συνήθως χρησιμοποιούνται μοναδιαίοι κωδικοί (κλειδιά) οι οποίοι μπορεί να είναι αριθμοί, ονόματα ή συνδυασμοί τους και οι οποίοι ταυτοποιούν (μονοσήμαντη αντιστοιχία) κάθε οντότητα. Το σύστημα ανάθεσης ταυτοτήτων οφείλει να είναι ακριβές και συνεπές με την ιδιότητα της μοναδικότητας των ταυτοτήτων.
- II. Χωρικά δεδομένα: Περιγράφουν τα χωρικά χαρακτηριστικά των γεωγραφικών οντοτήτων. Τα χωρικά χαρακτηριστικά συντίθενται από:
 - ο Γεωγραφική θέση: Είναι απαραίτητη για την τοποθέτηση ή οριοθέτηση των γεωγραφικών οντοτήτων στη γήινη επιφάνεια. Οι ορισμοί θέσης μπορεί να είναι αρκετά σύνθετοι, καθώς τα γεωγραφικά δεδομένα χαρακτηρίζονται συνήθως από ακανόνιστη μορφή και ακολουθούν σύνθετα πρότυπα. Η θέση των γεωγραφικών δεδομένων καθορίζεται χρησιμοποιώντας τις: i) άμεση θέση (αναφορά σε ένα σύστημα συντεταγμένων), ii) έμμεση θέση (πχ., αριθμός οδού, ταχυδρομικός κωδικός), ή iii) σχετική θέση (πχ., βόρεια από, εντός).
 - ο Γεωμετρικά δεδομένα: Περιγράφουν τα βασικά χωρικά χαρακτηριστικά (το σχήμα, την περίμετρο, το εμβαδόν, τον όγκο) των γεωγραφικών οντοτήτων. Τα δεδομένα αυτά παράγονται από τις πληροφορίες θέσης των γεωγραφικών οντοτήτων και συχνά διαχειρίζονται παρόμοια με τα μη-χωρικά δεδομένα.
 - ο Γραφικά δεδομένα: Περιγράφουν τον τρόπο απεικόνισης (χαρτογράφησης) των γεωγραφικών οντοτήτων (πχ., τον τρόπο χαρτογράφησης μιας εκκλησίας σε διαφορετικές κλίμακες).
 - ο Χωρικές σχέσεις: Περιγράφουν τις συσχετίσεις των γεωγραφικών οντοτήτων οι οποίες πηγάζουν από τις σχετικές τους θέσεις (πχ., βόρεια από, παρακείμενος με, εντός) οι οποίες κωδικοποιούνται. Οι χωρικές σχέσεις (τοπολογικές, κατεύθυνσης, μετρητικές) είναι γενικά πολυάριθμες και σύνθετες (Egenhofer 1991, Paradias et al, 1997). Μπορούν να ορισθούν άμεσα, ή να υπολογιστούν, ανάλογα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών.
- III. Θεματικά δεδομένα: Περιγράφουν τα μη-χωρικά χαρακτηριστικά των γεωγραφικών οντοτήτων (πχ., τύπος βλάστησης, όνομα ιδιοκτήτη, κατηγορία οδού).
- IV. Χρονικά δεδομένα: Περιγράφουν τα χρονικά χαρακτηριστικά των γεωγραφικών οντοτήτων. Τα χρονικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν:
 - ο Χρονική θέση: Περιγράφει την εμφάνιση των γεωγραφικών οντοτήτων σε χρονικές στιγμές (πχ., ημερομηνία κατασκευής οδού), ή τη διάρκεια των γεωγραφικών οντοτήτων σε χρονικά διαστήματα (πχ., περίοδος ιδιοκτησίας αγροκτήματος).
 - ο Χρονική συμπεριφορά: Παρουσιάζει την εξέλιξη (συμπεριφορά) των γεωγραφικών οντοτήτων στο χρόνο (π.χ., τη διάβρωση του εδάφους).
 - ο Χρονικές σχέσεις: Περιγράφουν τις συσχετίσεις των γεωγραφικών οντοτήτων οι οποίες πηγάζουν από τις σχετικές τους χρονικές θέσεις

ή συμπεριφορές. Οι χρονικές σχέσεις είναι πολυάριθμες και σύνθετες. Βασίζονται στο ότι ο χρόνος ταξινομείται γραμμικά. Επομένως, για κάθε ζευγάρι γεγονότων, το ένα θα είναι σύγχρονο ή προγενέστερο του άλλου.

- ο Χρονική απεικόνιση: Παρουσιάζει το χρόνο, όπως αυτός παρουσιάζεται στους χρήστες του συστήματος (πχ., σε κινούμενες αναπαραστάσεις γεγονότων).

- V. Ποιότητα δεδομένων: Αποτελεί ένα μέτρο της ποιότητας των δεδομένων που συλλέγονται για να περιγράψουν τις γεωγραφικές οντότητες. Το μέτρο αυτό περιλαμβάνει (Christman, 1991), την ακρίβεια της θέσης και των άλλων χαρακτηριστικών των οντοτήτων, και την πληρότητα και λογική συνέπεια μεταξύ των δεδομένων.
- VI. Δεδομένα πολυμέσων: Αποτελούνται από ήχο, εικόνες, ή/και δεδομένα video, τα οποία συνοδεύουν τις γεωγραφικές οντότητες (πχ., η οντότητα Ελλάδα συνοδεύεται από τον εθνικό ύμνο).

4. Χρήστες - Users.

Οι ανάγκες των χρηστών λαμβάνονται πλέον όλο και περισσότερο υπόψη στο σχεδιασμό των GIS. Το τμήμα αλληλεπίδρασης με το χρήστη (User interface), πραγματοποιείται η επικοινωνία συστήματος – χρήστη, είτε μέσα από ένα περιβάλλον εντολών είτε μέσα από παραθυρικό περιβάλλον. Επιπρόσθετα παρέχονται δυνατότητες για ερωτήσεις (queries) που αφορούν στα δεδομένα. Η παρουσία ή απουσία εργονομικού και φιλικού προς το χρήστη λογισμικού αποτελεί σημαντικό παράγοντα στον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητας ενός GIS. Γενικά, τα κριτήρια που πρέπει να καλύπτονται είναι τα εξής:

- Οι πολύπλοκες λειτουργίες του GIS θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο απλές στη χρήση.
- Θα πρέπει να υπάρχει σταθερότητα στις μεθόδους και στις υπομονάδες του συστήματος.
- Θα πρέπει να υπάρχει πλήρης, κατανοητή και δομημένη on-line τεκμηρίωση των εννοιών και των λειτουργιών, αλλά και των μεθόδων και των μοντέλων (εσωτερική διαφάνεια μεθόδου).
- Θα πρέπει να έχει την ικανότητα να προσδιορίζει προφίλ χρηστών.
- Θα πρέπει να είναι ένα ανοιχτό γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών, με δυνατότητες επέκτασης και δημόσια τεκμηριωμένα δεδομένα, μοντέλα κλπ..

Εξαιτίας της πολύπλοκης δομής τους (γεωμετρία, τοπολογία, θεματικός χώρος και δυναμική των γεωαντικειμένων) και της ευρείας χρησιμότητάς τους, τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών είναι πολύπλοκα συστήματα. Οι μεθοδολογικές απαιτήσεις των χρηστών είναι επομένως σχετικά υψηλές.

4.8. Βασικές Λειτουργίες ενός GIS

Τα βασικά δομικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής του λογισμικού ενός GIS είναι: το γραφικό περιβάλλον χρήσης (GUI), η βάση δεδομένων, το σύστημα ανάλυσης και απεικόνισης των δεδομένων.

1. Συλλογή, κωδικοποίηση και εισαγωγή δεδομένων.

Τα δεδομένα που αποθηκεύονται σε ένα GIS προέρχονται από διάφορες πηγές (πχ. χάρτες, αεροφωτογραφίες, δορυφορικές εικόνες, πίνακες), αναφέρονται σε διαφορετικές θέσεις και χρονικές στιγμές και μπορεί να βρίσκονται σε αναλογική ή ψηφιακή μορφή. Εξυπακούεται, ότι κατά τη συλλογή δεδομένων καταβάλλεται προσπάθεια ώστε αυτά να είναι λεπτομερή και ακριβή, γιατί αυτό αποτελεί τη βάση για την αντικειμενικότητα και την ισχύ των πορισμάτων σε κάθε επιστημονικό κλάδο.

Οι λειτουργίες του GIS πρέπει να υποστηρίζουν τις πιο σημαντικές μεθόδους και τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή των πρωτευόντων δεδομένων από όλες τις απόψεις (γεωμετρία, τοπολογία, θεματικός χώρος και μεταδεδομένα). Παραδείγματα αποτελούν: η διανυσματική ψηφιοποίηση των ήδη υπαρχόντων χαρτών με τη χρήση μιας ποικιλίας τρόπων, η σάρωση των υπαρχόντων χαρτών σε διάφορες αναλύσεις και με διάφορα βάθη χρώματος, η χειροκίνητη εισαγωγή δεδομένων και μεταδεδομένων ή η συλλογή δεδομένων GPS για τον υπολογισμό της γεωμετρίας των γεωαντικειμένων.

Η διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων αρχίζει από τη στιγμή που τα πρωτογενή στοιχεία θα συλλεχθούν και θα πιστοποιηθούν ως προς την αξιοπιστία και την πληρότητά τους. Η πιστοποίηση λαμβάνει χώρα μέσω διαδικασιών τροποποίησης της μορφής τους, στην περίπτωση που έχουν διαφορετική δομή ή είναι καταγεγραμμένα σε διαφορετικά είδη αποθήκευσης, και μέσω εντοπισμού και διόρθωσης σφαλμάτων. Υπάρχουν πολλοί τρόποι εισαγωγής δεδομένων και η επιλογή του κατάλληλου εξαρτάται από το είδος των δεδομένων.

Η εισαγωγή και η εξαγωγή δεδομένων γίνεται ακόμα πιο δύσκολη, εξαιτίας της έλλειψης μια κοινής φόρμας δεδομένων και της ασυμβατότητας των δεδομένων.

2. Αποθήκευση και ανάκτηση δεδομένων.

Η αποθήκευση των δεδομένων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες διαδικασίες και θέλει σωστή οργάνωση, προκειμένου να είναι δυνατή η βέλτιστη διαχείριση της αποθηκευμένης πληροφορίας. Συνήθως, είναι προτιμότερη η αποθήκευση των δεδομένων κατά ομάδες όμοιων χαρακτηριστικών σε διαφορετικά επίπεδα πληροφορίας, με σκοπό την αποδοτικότερη και απρόσκοπτη περαιτέρω διαχείριση και ανάλυσή τους, είτε αυτή αφορά στην ανάκτησή τους σε μορφή χαρτών, είτε σε στατιστικές αναλύσεις. Τα δεδομένα μπορεί να αποθηκεύονται είτε σε εσωτερική (ενσωματωμένη στο λογισμικό) βάση δεδομένων, είτε σε εξωτερική βάση δεδομένων, γεγονός που επιτυγχάνεται με τη χρήση ειδικών λογισμικών

Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων (DBMS: Data Base Management Systems, RDBMS: Remote Data Base Management Systems), που μεταξύ άλλων προσφέρουν στους χρήστες αποτελεσματική αποθήκευση, ανάκτηση και ενημέρωση των δεδομένων τους, καθώς και αποφυγή πολλαπλών καταγραφών. Τέλος, πρέπει να εκτελεί ελέγχους ασφαλείας για την πρόσβαση στα δεδομένα και την προστασία της ακεραιότητας των δεδομένων.

Attributes of dian50 polygon

FID	Shape	AREA	PERIMETER	DIAN	DIAN50-ID	E_FX_NAME	L_FX_NAME	XMIN	YMIN	XMAX	YMAX
2	Polygon	578746620	97222,789	2	1	ΟΡΕΣΤΙΑΣ	ORESTIAS	707671,13	4596887	729345,56	4625281
3	Polygon	578624900	97212,609	3	2	ΡΙΖΙΑ	RIZIA	686882,81	4596313,5	708476,13	4624646,5
4	Polygon	578509700	97202,891	4	3	ΟΡΜΕΝΙΟΝ	ORMENION	666094,94	4595800,5	687607,25	4624072,5
5	Polygon	578104580	97168,859	5	4	ΣΜΟΛΓΙΑΝ	SMOLGIAN	541373,69	4593990	562401,44	4621897,5
6	Polygon	578081660	97166,977	6	5	ΝΤΕΒΙΝ	NTEBIN	520587,41	4593899,5	541534,56	4621746,5
7	Polygon	578071100	97166,094	7	6	ΝΤΟΣΠΑΤ	NTOSPAT	499801,16	4593869,5	520667,84	4621656
8	Polygon	580955520	97381,305	8	7	ΠΥΘΙΟΝ	PYUION	708476,13	4569128,5	730226,81	4597521
9	Polygon	580833470	97371,125	9	8	ΔΙΔΥΜΟΤΕΙΧΟΝ	DIDYMOTΕΙΧΟΝ	687607,25	4568555,5	709277,19	4596887
10	Polygon	580722820	97361,883	10	9	ΜΕΤΑΞΑΔΕΣ	METAJADES	666738,81	4568043	688328,06	4596313,5
11	Polygon	580623680	97353,578	11	10	ΒΥΡΣΙΝΗ	BYRSINH	645870,75	4567591	667379,44	4595800,5
12	Polygon	580531710	97345,789	12	11	ΚΑΡΔΑΜΟΣ	KARDAMOS	625003	4567199,5	646431,25	4595348
13	Polygon	580448580	97338,742	13	12	ΜΥΤΙΚΑΣ	MYTIKAS	604135,56	4566868	625483,38	4594955,5
14	Polygon	580388100	97333,695	14	13	ΚΑΣΤΑΝΟΥΣΣΑ	KASTANOYSSA	395066,44	4566596,5	416333,91	4594623,5
15	Polygon	580388100	97333,695	15	14	ΜΕΔΟΥΣΑ	MEDOYSA	583268,38	4566596,5	604535,88	4594623,5
16	Polygon	580343810	97330,047	16	15	ΠΟΡΟΙΑ	POROIA	416013,72	4566385,5	437200,91	4594352
17	Polygon	580343360	97330,016	17	16	ΕΧΙΝΟΣ	EXINOS	562401,44	4566385,5	583588,63	4594352
18	Polygon	580305730	97326,836	18	17	ΝΕΟΝ ΠΕΤΡΙΤΣΙΟΝ	NEON PETRITSION	436960,75	4566235	458067,75	4594141
19	Polygon	580305730	97326,836	19	18	ΠΑΡΑΝΕΣΤΙΟΝ	PARANESTION	541534,56	4566235	562641,56	4594141
20	Polygon	580277700	97324,469	20	19	ΑΧΛΑΔΟΧΩΡΙΟΝ	AXLADOXVRION	457907,66	4566144,5	478934,47	4593990
21	Polygon	580278140	97324,5	21	20	ΜΕΣΟΧΩΡΙΟΝ	MESOXVRION	520667,84	4566144,5	541694,69	4593990
22	Polygon	580266750	97323,563	22	21	ΚΑΤΩ ΝΕΥΡΟΚΟΠΙΟΝ	KATV NEYROKOPION	478854,44	4566114,5	499801,16	4593899,5
23	Polygon	580266750	97323,563	23	22	ΠΟΤΑΜΟΙ	POTAMOI	499801,16	4566114,5	520747,88	4593899,5
24	Polygon	583025150	97528,32	24	23	ΣΟΥΦΛΙΟΝ	SOYFLION	688328,06	4540799	710074,19	4569128,5
25	Polygon	582909440	97518,617	25	24	ΒΙΤΟΛΙΣΤΕ	BITOLISTE	310557,03	4540287	332222,88	4568555,5
26	Polygon	582909890	97518,648	26	25	ΜΕΓΑ ΔΕΡΕΙΟΝ	MEGA DEREION	667379,44	4540287	689045,31	4568555,5
27	Polygon	582809790	97510,297	27	26	ΠΡΟΜΑΧΟΙ	PROMAXOI	331585,44	4539835,5	353171,09	4568043
28	Polygon	582809340	97510,266	28	27	ΑΙΣΥΜΗ	AISYMH	646431,25	4539835,5	668016,88	4568043
29	Polygon	582726910	97503,43	29	28	ΣΚΡΑ	SKRA	352613,38	4539444	374118,94	4567591
30	Polygon	582727360	97503,461	30	29	ΣΑΠΑΙ	SAPAI	625483,38	4539444	646988,94	4567591
31	Polygon	582654530	97497,422	31	30	ΕΥΖΩΝΟΙ	EYZVNOI	373640,94	4539113	395066,44	4567199,5
32	Polygon	582654980	97497,453	32	31	ΚΟΜΟΤΗΝΗ	KOMOTHNH	604535,88	4539113	625961,38	4567199,5
33	Polygon	582589180	97491,914	33	32	ΧΕΡΣΟΝ	XERSON	394668,16	4538842	416013,72	4566868
34	Polygon	582587900	97491,82	34	33	ΙΑΣΜΟΣ	IASMOS	583588,63	4538842	604934,13	4566868

Record: 0 Show: All Selected Records (0 out of 393 Selected) Options

Πίνακας 4.7: Το Σύστημα Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων (Data Base Management Systems) δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης και διαχείρισης των χωρικών δεδομένων και των ιδιοτήτων τους. Η βάση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για είσοδο και έξοδο δεδομένων από και προς τις αντίστοιχες συσκευές ή προγράμματα (π.χ. Excel, συσκευή GPS).

Η ανάκτηση της περιγραφικής πληροφορίας για μια γεωγραφική οντότητα γίνεται απλά με την επιλογή αυτής. Εάν επιλεγούν περισσότερες οντότητες, το GIS μπορεί να επεξεργαστεί τις αντίστοιχες γραμμές της βάσης δεδομένων και να εξάγει δευτερογενείς πληροφορίες από το συνδυασμό αυτών. Ένα GIS μπορεί να διαχειρίζεται περισσότερες από μίας βάσεις δεδομένων, αλλά η δυσκολία και ο χρόνος επεξεργασίας και συσχετισμού αυτών αυξάνουν αναλογικά με το πλήθος αυτών και το πλήθος της πληροφορίας που είναι αποθηκευμένη σε καθεμία από αυτές.

3. Επεξεργασία, ανάλυση και μοντελοποίηση δεδομένων.

Οι μέθοδοι για την ανάλυση και την μοντελοποίηση των χωρικών δεδομένων αποτελούν την πιο σημαντική τάξη λειτουργιών ενός GIS. Εκεί βρίσκεται η πραγματική δύναμη του GIS και οι βασικές διαφορές του με άλλα συστήματα πληροφοριών. Η επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα εργασιών, μερικές από τις οποίες είναι οι αναταξινόμηση και ομαδοποίηση

ποιοτικών στοιχείων, γεωμετρικές επεξεργασίες (π.χ. μετατροπές κλίμακας, προβολικού συστήματος), μετρήσεις (π.χ. αποστάσεων, εμβαδών, περιμέτρων, κ.ά.), γεωγραφικές αναλύσεις (π.χ. δημιουργία θεματικών χαρτών, δημιουργία ζωνών επιρροής, κ.ά), κλπ.. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα εργαλεία ανάλυσης που περιλαμβάνει ένα τυπικό γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών:

- Γεωμετρικές αναλύσεις: Οι βασικές γεωμετρικές συναρτήσεις περιλαμβάνουν τον υπολογισμό: του μήκους ενός γεωαντικειμένου, της περιμέτρου, της έκτασης, των αποστάσεων και των κέντρων. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τους παραπάνω υπολογισμούς, ανάλογα με την διαστασιοποίηση του γεωαντικειμένου, ορισμένα γεωγραφικά χαρακτηριστικά μπορεί, είτε να μην προσδιοριστούν, είτε να προσδιοριστούν σαφώς, ενώ τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά μπορεί να έχουν διαφορετικές τιμές σε διανυσματικά και ψηφιδωτά μοντέλα.
- Τοπολογικές αναλύσεις: Μία πολύ σημαντική τοπολογική μέθοδος είναι ο υπολογισμός των πολυγώνων Voronoi, ως η περιοχή επιρροής σημειακών γεωαντικειμένων. Εξαιτίας της ευρείας χρήσης τους σε μία ποικιλία εφαρμογών, οι μέθοδοι εξουδετέρωσης έχουν ακόμα μεγαλύτερη πρακτική σημασία. Για να μπορέσει να αναλύσει την επίδραση ενός γεωαντικειμένου στην γειτονική περιοχή του, ή την επίδραση της γειτονικής περιοχής σε ένα αντικείμενο. ένα GIS πρέπει να έχει την ικανότητα δημιουργίας ουδέτερων ζωνών (ή ζωνών επιρροής) γύρω από όλων των ειδών τα γεωαντικείμενα. Τέλος, θα πρέπει να είναι δυνατή η δημιουργία νέων γεωαντικειμένων μέσω της επικάλυψης (overlay). Η επικάλυψη γεωαντικειμένων είναι ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία ενός GIS. Τέτοιες λειτουργίες επιτρέπουν την επιλογή των γεωαντικειμένων χρησιμοποιώντας τοπολογικά-θεματικά κριτήρια ή/και τη δημιουργία νέων γεωαντικειμένων, των οποίων οι γεωμετρικές σχηματίζονται από την γεωμετρική επικάλυψη δύο ή περισσότερων γεωαντικειμένων.
- Στατιστικές αναλύσεις: Στα δεδομένα ιδιοτήτων μπορεί να γίνουν συνήθεις στατιστικοί υπολογισμοί, όπως: ο υπολογισμός του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης, ο συσχετισμός και η ανάλυση παλινδρόμησης. Οι μέθοδοι παρεμβολής και οι μέθοδοι για τον υπολογισμό των κέντρων των πολυγώνων, χρησιμοποιούν τη γεωμετρία και την τοπολογία των γεωαντικειμένων.

4. Παρουσίαση δεδομένων και αποτελεσμάτων.

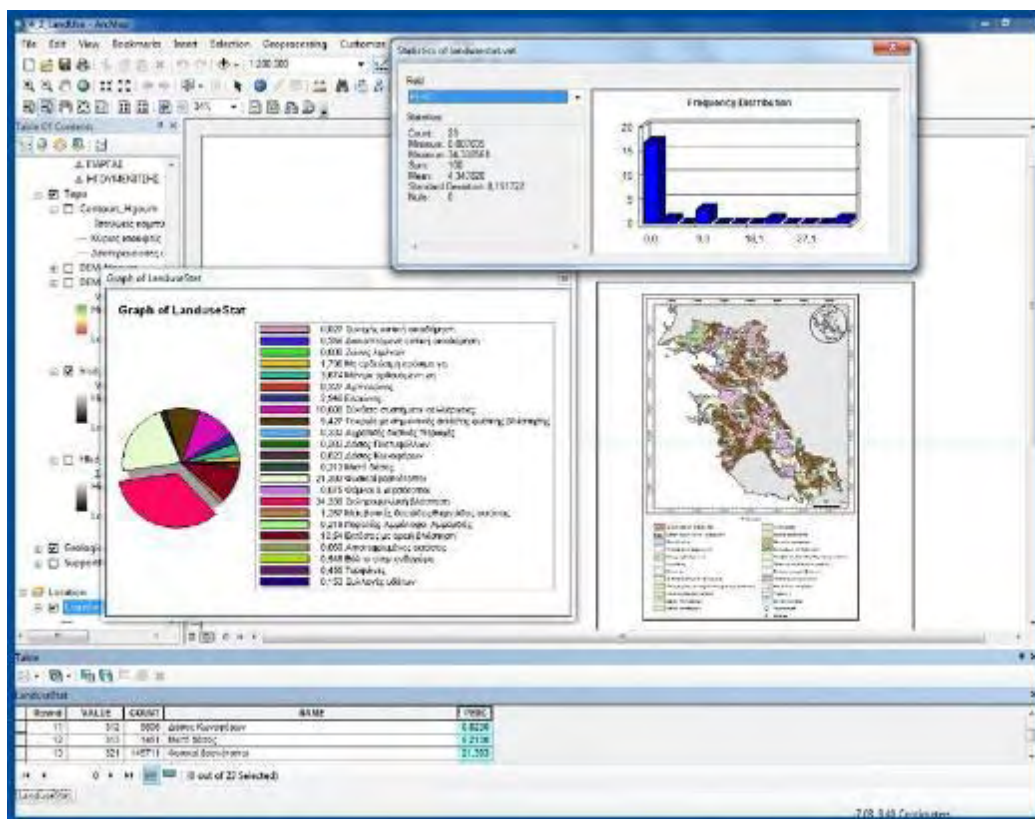
Ο χρήστης ενός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών πρέπει να μπορεί να οπτικοποιεί πρωτογενή και δευτερογενή δεδομένα, καθώς και τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιούνται στα πλαίσια του συστήματος, χρησιμοποιώντας μια ποικιλία μεθόδων. Αυτές μπορεί να είναι:

- Αλφαριθμητική παρουσίαση με τη μορφή κειμένων και πινάκων.
- Γραφική απεικόνιση χρησιμοποιώντας διαγράμματα.
- Χαρτογραφική απεικόνιση με τη μορφή στατικών, δυναμικών και animation χαρτών.

- Προσομοιωμένη απεικόνιση τρισδιάστατων αντικειμένων σε μέσο δύο διαστάσεων (πχ. οθόνη).
- Παρουσιάσεις multimedia (κείμενο, γραφικά, εικόνες, χάρτες, βίντεο, ήχος).
- Εικονική πραγματικότητα.

Η παρουσίαση των δεδομένων, χωρικών ή ποσοτικών, επιτυγχάνεται με ένα ευρύ φάσμα ενεργειών και εργαλείων, είτε απευθείας στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή, είτε μέσω άλλων μέσων όπως είναι οι εκτυπωτές (printers), οι σχεδιαστές για εκτυπώσεις μεγάλων μεγεθών, βιντεοπροβολές, διαδίκτυο, κ.ά..

Ένας από τους λόγους για τον οποίο έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια δημοφιλή, είναι η ικανότητά τους να αλληλεπιδρούν με περισσότερο προηγμένα υπολογιστικά συστήματα, όπως είναι τα συστήματα μοντελοποίησης, προσομοίωσης και λήψης αποφάσεων.



Εικόνα 4.8: Στιγμιότυπα οθόνης του περιβάλλοντος εργασίας του λογισμικού ArcGIS της εταιρίας ESRI, όπου αποτυπώνονται η βάση δεδομένων που περιέχει την περιγραφική πληροφορία σε μορφή πίνακα, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε μορφή χάρτη καθώς και διαγράμματα απλής στατιστικής επεξεργασίας πεδίων της βάσης δεδομένων. (Πηγή: Αντωνίου Β., Πατασφυρόπουλος Κ., 2016).

Κεφάλαιο 5°

Εντοπισμός Γεωθερμικών Πεδίων με Χρήση του GIS

5.1. Μεθοδολογία της Γεωθερμικής Έρευνας σε Περιβάλλον GIS

Σε αυτό το κεφάλαιο, περιγράφεται με την χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, ο προσδιορισμός των περιοχών του Ελλαδικού χώρου με αυξημένη την πιθανότητα εντοπισμού γεωθερμικών πεδίων. Η σκοπιμότητα της υλοποίησης ενός τέτοιου συστήματος γίνεται αντιληπτή, αν αναλογιστεί κανείς το οικονομικό όφελος που συνεπάγεται η εστίαση της γεωθερμικής έρευνας σε ένα περιορισμένο εύρος περιοχών.

Κατά καιρούς, έχουν εφαρμοστεί σε ανάλογα προβλήματα και σε συνδυασμό με τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών διάφορες μεθοδολογίες όπως: τα έμπειρα συστήματα, εμπειρικές μέθοδοι υλοποιημένες με προγραμματισμό και η πολυκριτηριακή ανάλυση. Ωστόσο, τα αποτελέσματα τα οποία εξάγονται από τις παραπάνω μεθόδους υπακούουν στη δυαδική λογική (Boolean logic), αδυνατώντας να αποδόσουν με έναν ευέλικτο τρόπο τη συνδυαστική επίδραση των παραμέτρων που διαμορφώνουν το εκάστοτε πρόβλημα.

Μια νέα μαθηματική λογική για τη δημιουργία μοντέλων απεικόνισης φυσικών προβλημάτων, αυτή της ασαφούς λογικής, ανταποκρίνεται με μεγαλύτερη ευκολία στην αναγκαιότητα της εισαγωγής, με μαθηματικό τρόπο, της ανακρίβειας και της απροσδιοριστίας που υπάρχει στα φυσικά προβλήματα.

Η αντιμετώπιση του προβλήματος περιλαμβάνει την εφαρμογή δύο μεθόδων χωρικής ανάλυσης, σε περιβάλλον γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών. Συγκεκριμένα, οι δύο μέθοδοι περιλαμβάνουν:

- Ανάλυση με βάση τη δυαδική λογική
- Ανάλυση με τη λογική της ασάφειας

Αναπτύσσεται η θεωρητική βάση των δύο αυτών μεθόδων χωρικής ανάλυσης και παρουσιάζεται αναλυτικά η εφαρμογή τους.

5.2. Ανάλυση με Δυαδική Λογική

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών παραδοσιακά βασίζονται στη Δυαδική Λογική, κατά την οποία τα αποτελέσματα που εξάγονται αφορούν σε ένα σύνολο περιοχών που ικανοποιούν ή δεν ικανοποιούν ένα σύνολο κριτηρίων.

1. Βασικές διαδικασίες της Δυαδικής Λογικής.

Οι βασικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται στην Δυαδική Λογική κατά τη διαδικασία της χωρικής ανάλυσης είναι: η επιλογή (*select*), η επικάλυψη (*overlay*), και η εγγύτητα (*proximity*).

Επιλογή: Είναι η χρήση των ιδιοτήτων ενός πεδίου για την ανάληψη πληροφορίας. Καθορίζεται ένα χαρακτηριστικό (ποσοτικό ή ποιοτικό) και επιλέγεται ένα υποσύνολο από τις πληροφορίες που συμπεριλαμβάνονται στη βάση δεδομένων, το οποίο εμπεριέχει το χαρακτηριστικό αυτό. Η διαδικασία αυτή ολοκληρώνεται συνήθως με χρήση των κανόνων της Boolean άλγεβρας και συγκεκριμένα των τεσσάρων βασικών πράξεων, με βάση τις οποίες καθορίζεται, αν μεταξύ δυο συνόλων A και B, μια συγκεκριμένη συνθήκη είναι αληθινή ή όχι. Η πράξη A AND B αποτελεί την τομή ανάμεσα στα δυο σύνολα, δηλαδή εκφράζει τις οντότητες που ανήκουν και στο A και στο B. Η πράξη A OR B αποτελεί την ένωση των δυο συνόλων A και B και εκφράζει τις οντότητες που ανήκουν είτε στο A, είτε στο B. Η πράξη A NOT B αναφέρεται στη διαφορά των δυο συνόλων και οριοθετεί τις οντότητες που ανήκουν στο A και όχι στο B. Και η πράξη A XOR B εκφράζει τις οντότητες που ανήκουν είτε στο A σύνολο, είτε στο B, αλλά όχι και στα δυο.

Επικάλυψη: Η επικάλυψη αποτελεί προέκταση των κανόνων της άλγεβρας Boolean, σε διαδικασίες που αναφέρονται στον τρόπο με τον οποίο οι οντότητες καλύπτουν το γεωγραφικό χώρο. Η επικάλυψη μπορεί να πάρει τρεις μορφές: i) Ένωση (union), η οποία αναφέρεται στην πράξη OR της άλγεβρας Boolean, ii) Ταυτότητα (identity), στην οποία το καινούργιο επίπεδο περιλαμβάνει όλα τα πολύγωνα και χαρακτηριστικά των αρχικών επιπέδων, και iii) Τομή (intersect), η οποία αναφέρεται στην πράξη AND της άλγεβρας Boolean.

Εγγύτητα: Η εγγύτητα αφορά στη δημιουργία μιας περιφέρειας (ενός νέου πολυγώνου), η οποία ορίζεται με βάση την εγγύτητά του σε μια υπάρχουσα οντότητα (σημείο, γραμμή, πολύγωνο). Η πιο διαδεδομένη ανάλυση εγγύτητας είναι η δημιουργία ζωνών επιρροής (buffer). Η δημιουργία ζωνών αναφέρεται σε μια βασική διαδικασία ανάλυσης, η οποία αποσκοπεί στο σχηματισμό νέων πολυγώνων γύρω από τα βασικά γεωγραφικά στοιχεία που υπάρχουν στη βάση δεδομένων. Αυτό το είδος του πολυγώνου ονομάζεται ζώνη επιρροής και χρησιμοποιείται στον καθορισμό της χωρικής εγγύτητας.

2. Διαμόρφωση κριτηρίων και δεδομένα εισόδου.

Σύμφωνα με το θεωρητικό πλαίσιο του πρώτου κεφαλαίου, το σύνολο των δεδομένων που χρειάζονται για την πιθανότητα εντοπισμού ενός γεωθερμικού πεδίου σε μια περιοχή, περιλαμβάνει μια σειρά στοιχείων που έχουν σχέση με τη γεωλογία, το γεωχημισμό, την τεκτονική και τη σεισμικότητά της περιοχής.

Το σύνολο των δεδομένων που συλλέχθηκαν έχουν οργανωθεί στα ακόλουθα θεματικά επίπεδα:

volcanoes	Ηφαίστεια	σημειακές οντότητες
springs	Θερμές πηγές	σημειακές οντότητες
microseismics	Επίκεντρα σεισμών (<3 Richter)	σημειακές οντότητες
macroseismics	Επίκεντρα σεισμών (>6 Richter)	σημειακές οντότητες
faults	Ρήγματα	γραμμικές οντότητες
volcanic	Ηφαιστειακά πετρώματα	επιφανειακές οντότητες
intrusive	Πυριγενή πετρώματα	επιφανειακές οντότητες

Πίνακας 5.1: Δεδομένα εισόδου.

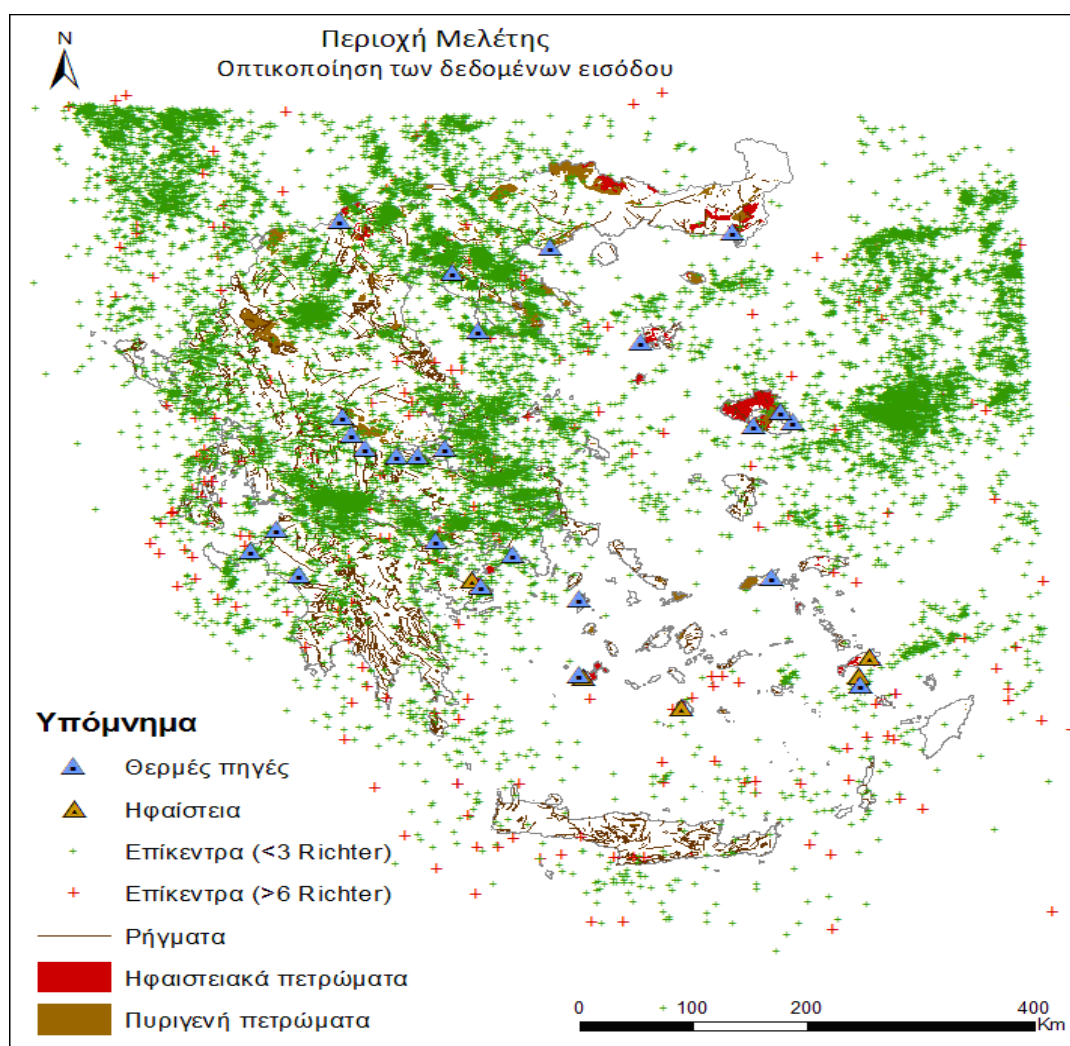
Τα δεδομένα αυτά έχουν προέλθει από ψηφιοποίηση υποβάθρων διαφόρων πηγών ή κωδικοποίηση αρχείων δεδομένων (.dat).

Τα θεματικά επίπεδα των volcanoes και springs, αφορούν στις θέσεις των ηφαιστειών και θερμών πηγών, ως ενδείξεις για την αυξημένη πιθανότητα εντοπισμού γεωθερμικού πεδίου.

Το θεματικό επίπεδο των ρηγμάτων (faults) κρίθηκε απαραίτητο, δεδομένου ότι η παρουσία τους ή μη σε μια περιοχή, καθορίζει άμεσα τις μετακινήσεις ρευστών στο υπέδαφος.

Τα θεματικά επίπεδα volcanic και intrusive αφορούν στις περιοχές όπου έχουμε επιφανειακές εμφανίσεις ηφαιστειακών και πλουτώνιων πυριγενών πετρωμάτων. Η ενσωμάτωσή τους στα δεδομένα εισόδου, αφορά στο ότι η ύπαρξη γεωθερμικού πεδίου σε μια περιοχή, συνήθως συνοδεύεται από τέτοιας δομής γεωλογικές εμφανίσεις στην επιφάνεια.

Τέλος τα θεματικά επίπεδα των επικέντρων μικροσεισμών και των επικέντρων μεγάλων σεισμών, αφορά στο ότι οι περιοχές στις οποίες εντοπίζονται τα γεωθερμικά πεδία χαρακτηρίζονται συνήθως από μικρό ή και μάκρο-σεισμική δραστηριότητα, δηλ. από σεισμούς εντάσεως <3 Richter ή και >6 Richter. Στην εικόνα 5.1, έχουμε την οπτικοποίησή των δεδομένων.



Εικόνα 5.1: Οπτικοποίηση των δεδομένων εισόδου στο περιβάλλον του ArcGIS της εταιρίας ESRI. (Πηγή: Παπαθεοδώρου Ν., 2007).

Για το σύνολο των θεματικών πεδίων οριοθετήθηκαν ζώνες επιρροής, εντός των οποίων και μόνο, είναι πιθανή η ύπαρξη γεωθερμικού πεδίου.

Η διαδικασία εξαγωγής του αποτελέσματος αφορά στην ομαδοποίηση των δεδομένων των θεματικών επιπέδων (κριτηρίων) σε τρεις βασικές κατηγορίες: i) γεωλογικά ii) γεωχημικά και iii) σεισμικά, και τον έλεγχο της συνδυαστικής εκπλήρωσής τους. Το θεματικό επίπεδο των ρηγμάτων δεν εντάχθηκε σε κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες. Η ενσωμάτωσή του στη χωρική ανάλυση έγινε στο στάδιο της συνδυαστικής εκπλήρωσης της ζώνης επιρροής του, ως κριτηρίου, με τις κατηγορίες γεωλογικών και σεισμικών δεδομένων.

Στον πίνακα 5.2, βλέπουμε αναλυτικά τις ζώνες επιρροής που επιλέχθηκαν για τα συγκεκριμένα επίπεδα (κριτήρια).

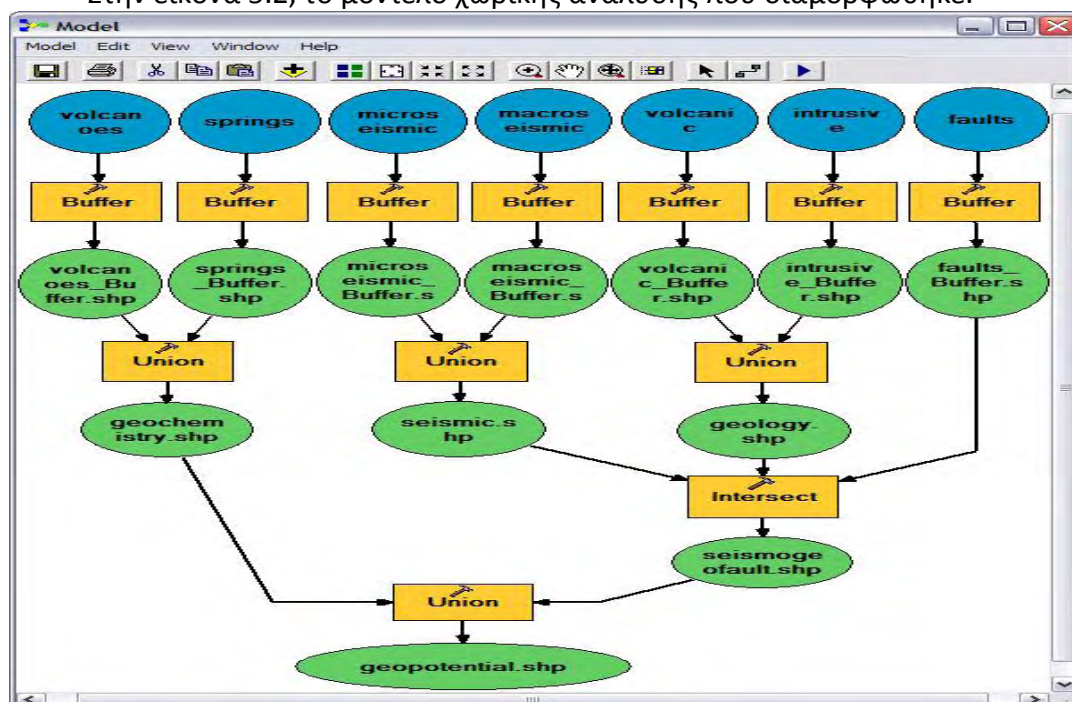
Κριτήριο	Ζώνη επιρροής
springs – θερμές πηγές	4 km
volcanoes – ηφαίστεια	5 km
microseismic – επίκεντρα μικροσεισμών (<3 Richter)	5 km
macroseismic – επίκεντρα μεγάλων σεισμών (>6 Richter)	40 km
faults – ρήγματα	6 km
volcanic – ηφαιστειακά πετρώματα	3 km
intrusive – πλουτώνια πυριγενή πετρώματα	5 km

Πίνακας 5.2: Κριτήρια και αντίστοιχες ζώνες επιρροής.

3. Ανάπτυξη μοντέλου χωρικής ανάλυσης.

Για να αρχίσουμε την υλοποίηση της ανάλυσης με βάση την Δυναμική Λογική, πρέπει να δημιουργήσουμε μια εργαλειοθήκη στο περιβάλλον του ArcGIS, στο παράθυρο εργασίας του ArcToolbox-> New Toolbox-> New-> Model..., για την υλοποίηση του μοντέλου εκτέλεσης των απαραίτητων αναλυτικών διαδικασιών.

Στην εικόνα 5.2, το μοντέλο χωρικής ανάλυσης που διαμορφώθηκε.



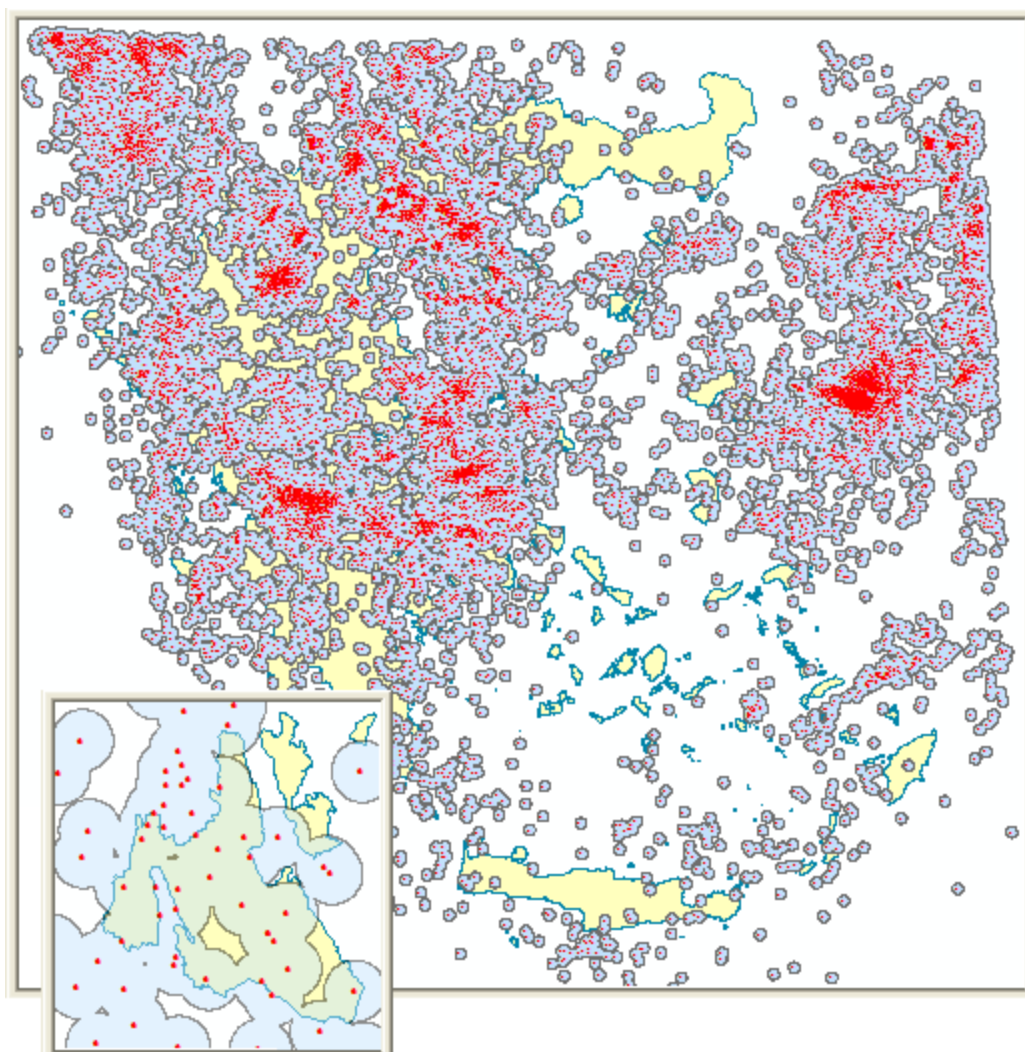
Εικόνα 5.2: Μοντέλο χωρικής ανάλυσης. (Πηγή: Παπαθεοδώρου Ν., 2007).

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου συνίσταται στην αυτοματοποίηση εκτέλεσης των αναλυτικών διαδικασιών της χωρικής ανάλυσης για εξαγωγή του αποτελέσματος.

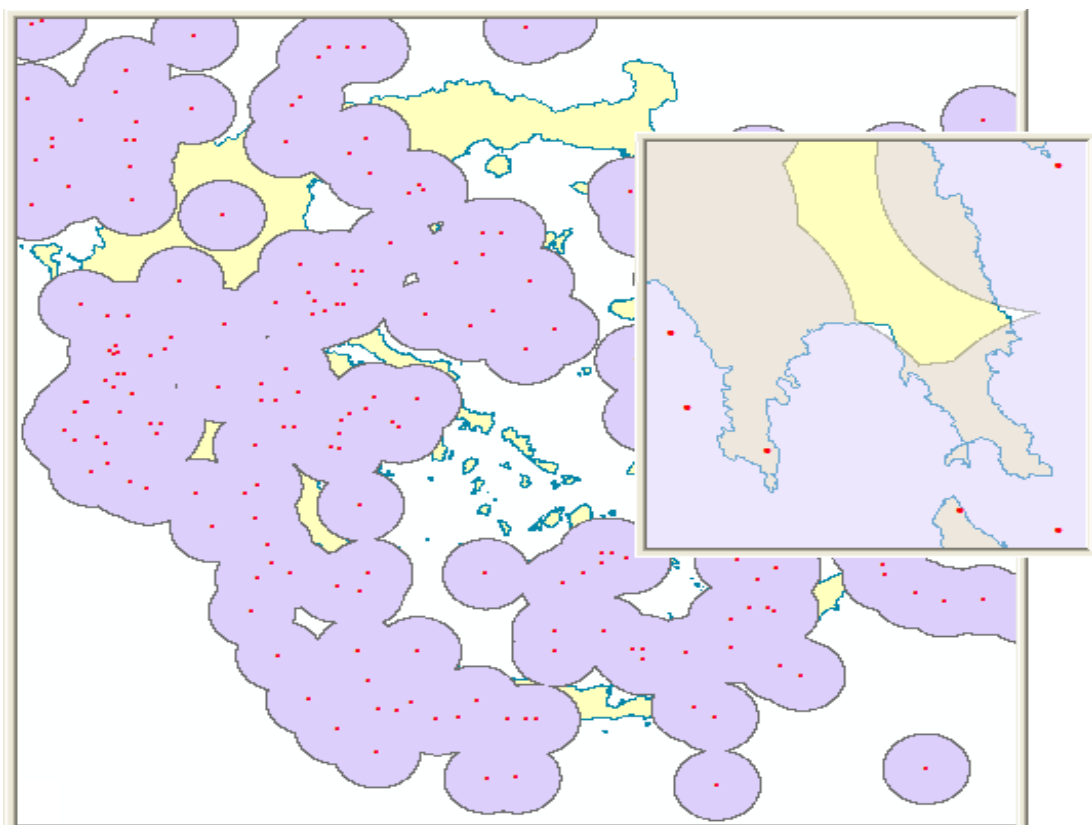
4. Δημιουργία ζωνών επιρροής.

Αρχικά, με τη διαδικασία drag and drop, έγινε εισαγωγή των θεματικών επιπέδων στο μοντέλο. Ακολουθεί η δημιουργία των ζωνών επιρροής, στο παράθυρο εργασίας του ArcToolbox-> Analysis Tools-> Proximity-> Buffer..

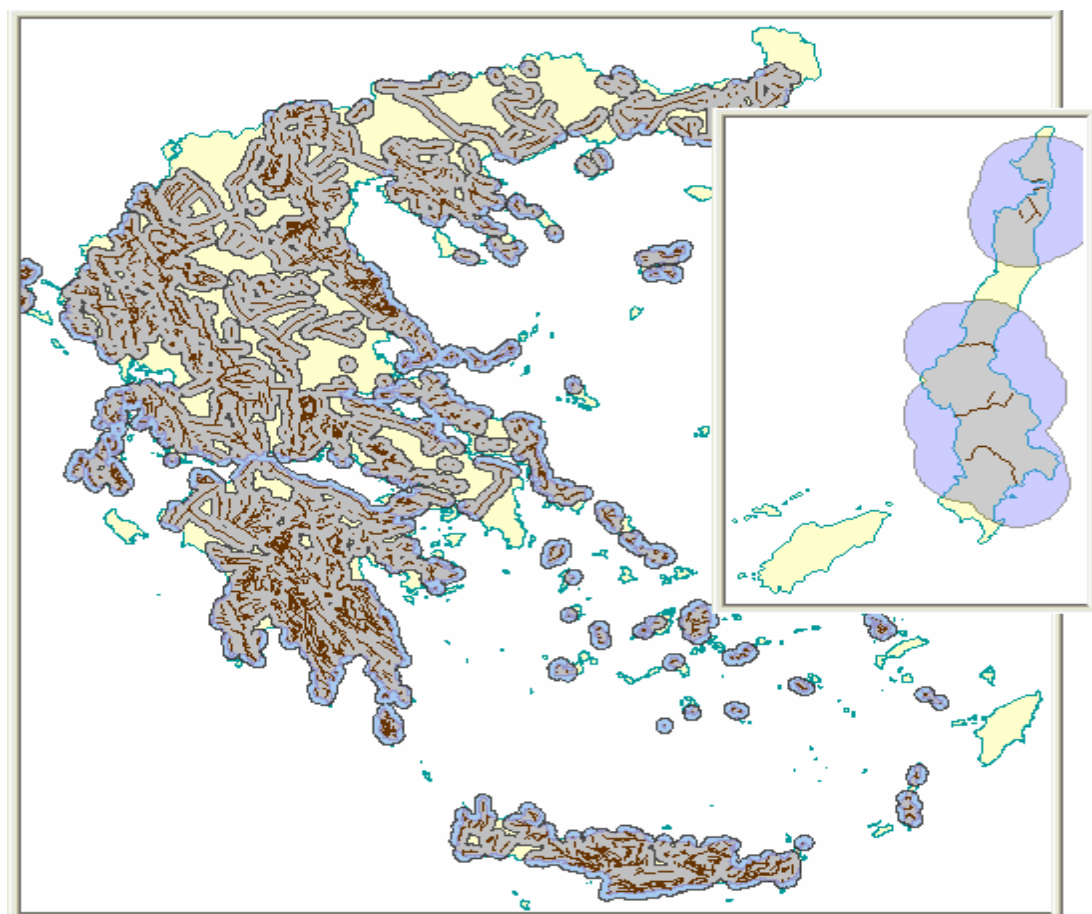
Στις παρακάτω εικόνες, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι ζώνες επιρροής για τα θεματικά επίπεδα των: επικέντρων μικροσεισμών (microseismic), επικέντρων μακροσεισμών (macroseismic), ρηγμάτων (faults) και ηφαιστειακών πετρωμάτων (volcanic).



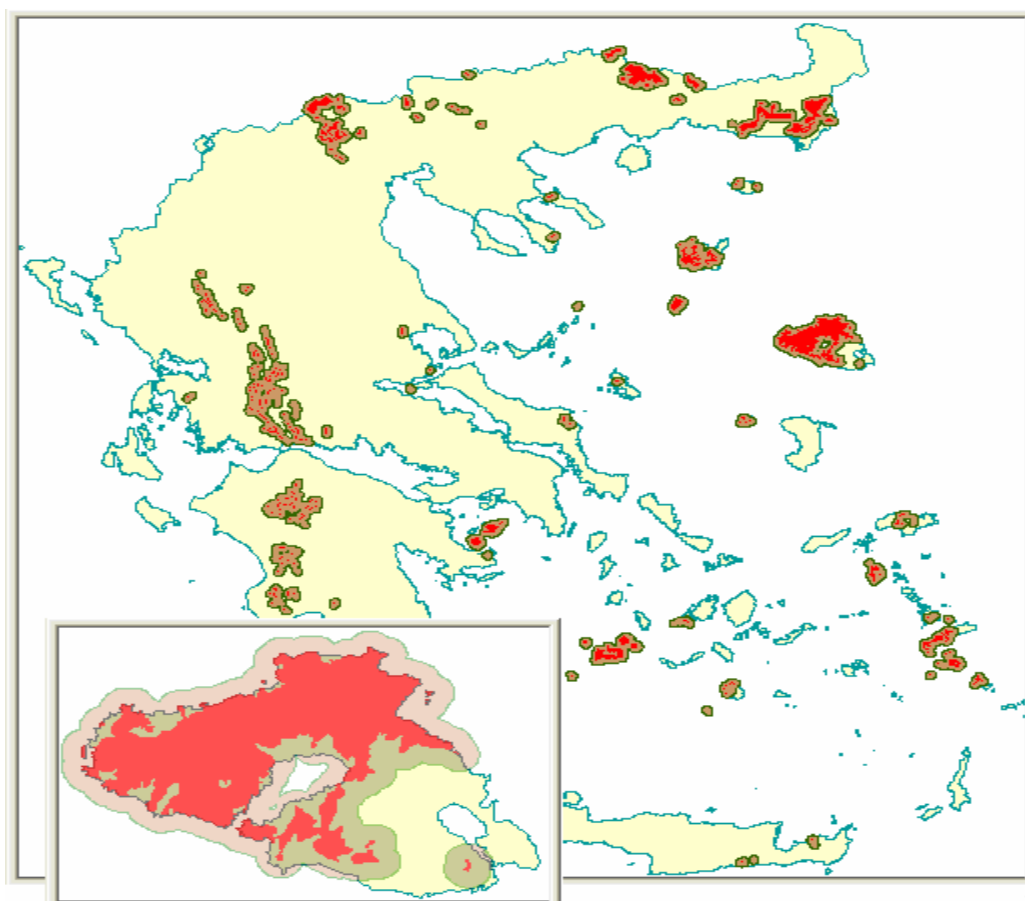
Εικόνα 5.3: Ζώνη επιρροής επικέντρων μικροσεισμών. (Πηγή: Παπαθεοδώρου Ν., 2007).



Εικόνα 5.4: Ζώνη επιρροής επικέντρων μακροσεισμών. (Πηγή: Παπαθεοδώρου Ν., 2007).



Εικόνα 5.5: Ζώνη επιρροής ρηγμάτων. (Πηγή: Παπαθεοδώρου Ν., 2007).



Εικόνα 5.6: Ζώνη επιρροής ηφαιστειακών πετρωμάτων. (Πηγή: Παπαθεοδώρου Ν., 2007).

5. Ομαδοποίηση κριτηρίων.

Η ομαδοποίηση των κριτηρίων έγινε με βάση την κοινή τους συμμετοχή στη διαμόρφωση του φυσικού προβλήματος. Αυτή η διαδικασία οδήγησε στη δημιουργία τριών βασικών κατηγοριών κριτηρίων: i) γεωλογικών ii) γεωχημικών και iii) σεισμικών, ενώ η ζώνη επιρροής των ρηγμάτων δεν εντάχθηκε σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες.

Στην κατηγορία των γεωλογικών κριτηρίων ενσωματώθηκαν οι ζώνες επιρροής των ηφαιστειακών και των πυριγενών πετρωμάτων, στην κατηγορία των γεωχημικών κριτηρίων ενσωματώθηκαν οι ζώνες επιρροής των θερμών πηγών και των ηφαιστειών, ενώ στην κατηγορία των σεισμικών κριτηρίων ενσωματώθηκαν οι ζώνες επιρροής των επικέντρων μικροσεισμών και των μεγάλων σεισμών.

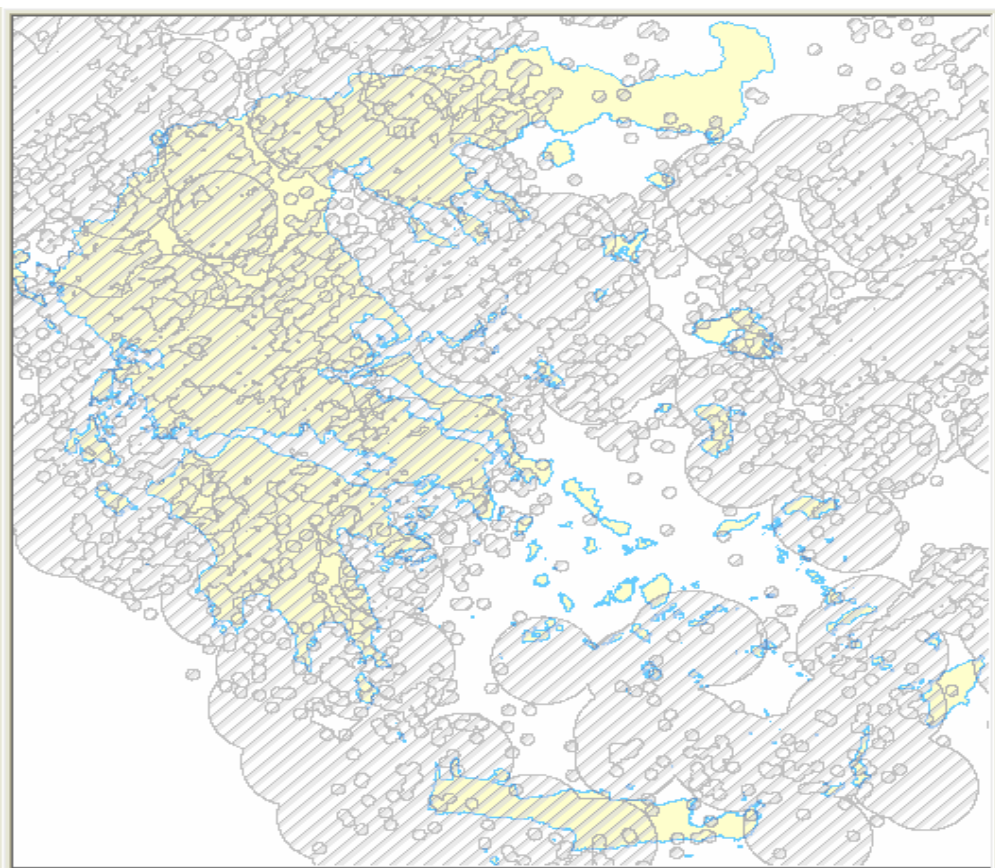
Μετά, προσδιορίστηκαν οι ζώνες καταλληλότητας ανά κατηγορία κριτηρίων. Προσδιορίστηκαν οι ζώνες γεωλογικής καταλληλότητας (*geology.shp*), μέσω του ArcToolbox-> Analysis Tools-> Overlay-> Union, εφαρμόζοντας την αναλυτική διαδικασία της ένωσης (union) των κριτηρίων *volcanic_buffer* και *intrusive_buffer*.

Αντίστοιχα, προσδιορίστηκαν οι ζώνες σεισμικής καταλληλότητας (*seismic.shp*) εφαρμόζοντας την ένωση των κριτηρίων *microseismic_buffer* και *macroseismic_buffer*. Οι ζώνες γεωχημικής καταλληλότητας (*geochemistry.shp*), προέκυψαν από την ένωση των κριτηρίων *volcanoes_buffer* και των *springs_buffer*.

Στις παρακάτω εικόνες 5.7 και 5.8, ενδεικτικά οι ζώνες γεωλογικής και σεισμικής καταλληλότητας.



Εικόνα 5.7: Ζώνες γεωλογικής καταλληλότητας. (Πηγή: Παπαθεοδώρου Ν., 2007).



Εικόνα 5.8: Ζώνες σεισμικής καταλληλότητας. (Πηγή: Παπαθεοδώρου Ν., 2007).

6. Εξαγωγή αποτελέσματος.

Στην Ανάλυση με τη Δυναμική Λογική η εξαγωγή του αποτελέσματος αφορά τον συνδυαστικό έλεγχο της εκπλήρωσης ή μη των εκάστοτε κριτηρίων του προβλήματος.

Σε αυτή την ανάλυση, οι περιοχές αυξημένης πιθανότητας εντοπισμού γεωθερμικών πεδίων, συνίσταται στην ταυτόχρονη (AND) εκπλήρωση γεωλογικών και σεισμικών κριτηρίων με συνύπαρξη ρηγμάτων, ή (OR) στην εμφάνιση συγκεκριμένων γεωχημικών κριτηρίων.

Στην θεωρητική ανάλυση των βασικών διαδικασιών της Δυναμικής Λογικής, η Τομή (intersect) αναφέρεται στην πράξη AND της άλγεβρας Boolean και η Ένωση (union) αναφέρεται στην πράξη OR της άλγεβρας Boolean.

Η αντίστοιχη επομένως έκφραση σε όρους άλγεβρας Boolean για την εξαγωγή του αποτελέσματος είναι η εξής:

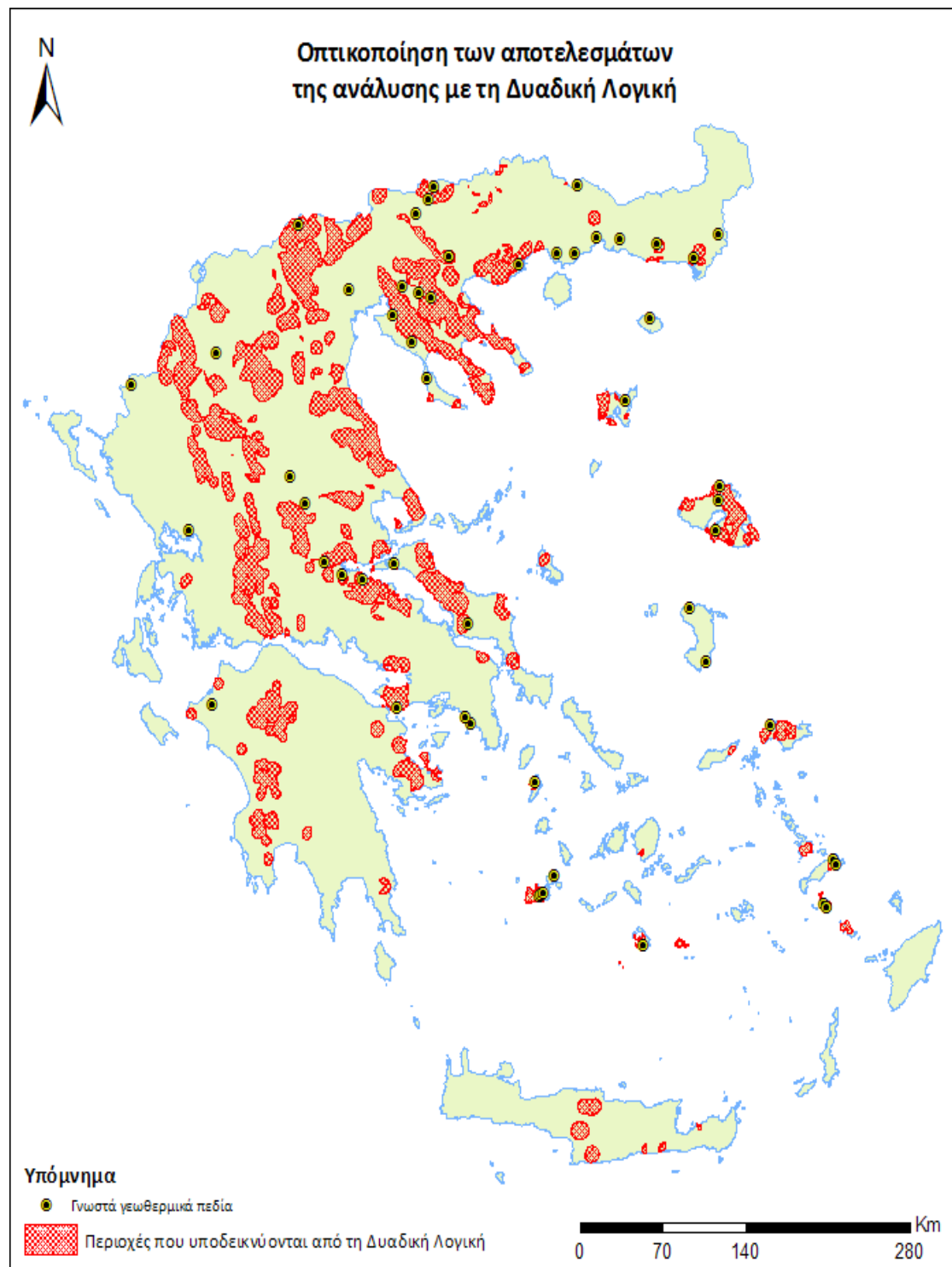
$geopotential = (seismic \text{ AND } geology \text{ AND } faults_buffer) \text{ OR } (geochemistry)$
= Intersect (seismic, geology, faults_buffer) OR (geochemistry)
Αν θεωρήσουμε Intersect (seismic, geology, faults_buffer) = seismogeofault
 $geopotential = \text{Union} (seismogeofault, geochemistry)$

Η παραπάνω έκφραση αποτελεί τη μαθηματική απεικόνιση των αναλυτικών διαδικασιών που αυτοματοποιούνται από το μοντέλο, στο τελικό στάδιο προσδιορισμού των ζητούμενων περιοχών όπου είναι το θεματικό επίπεδο *geopotential*. Το θεματικό επίπεδο *seismogeofault* αντιστοιχεί στις περιοχές ταυτόχρονης ικανοποίησης σεισμικών και γεωλογικών κριτηρίων στα όρια της ζώνης επιρροής ρηγμάτων, στην τομή δηλαδή των θεματικών επιπέδων *seismic*, *geology* και *faults_buffer*. Οι περιοχές αυξημένης πιθανότητας εντοπισμού γεωθερμικών πεδίων (*geopotential*) προκύπτουν από την ένωση του θεματικού πεδίου *seismogeofault* με τις περιοχές γεωχημικής καταλληλότητας (*geochemistry*).

Τελευταίο βήμα της διαδικασίας εξαγωγής του αποτελέσματος, αποτελεί η προσαρμογή των τελικών περιοχών στα όρια της ακτογραμμής.

Στην τελική εικόνα 5.9, βλέπουμε την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων της Ανάλυσης με Δυναμική Λογική.

Τα αποτελέσματα της Δυναμικής Λογικής, διαχωρίζουν την περιοχή μελέτης σε περιοχές ύπαρξης ή μη γεωθερμικών πεδίων. Αυτή η “δίχρωμη” αντίληψη του χώρου, συνιστά και την αδυναμία της μεθόδου να αποδόσει ρεαλιστικά την πολυπλοκότητα και την ασάφεια ενός πολυσύνθετου προβλήματος.



Εικόνα 5.9: Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με Δυναμική Λογική με το λογισμικό ArcGIS της εταιρίας ESRI. (Πηγή: Παπαθεοδώρου Ν., 2007).

5.3. Ανάλυση με τη Λογική της Ασάφειας

Για πρώτη φορά από τον Zadeh (1965) διατυπώθηκε μια νέα μαθηματική θεωρία η λογική της Ασάφειας. Η κεντρική ιδέα της θεωρίας αυτής είναι ότι τα στοιχεία ενός συνόλου, μπορούν να περιέχονται σ' αυτό με κάποιο βαθμό συμμετοχής (membership), που κυμαίνεται στο διάστημα 0-1. Η ασαφής λογική (fuzzy logic) είναι μια επέκταση της κλασσικής αριστοτέλειας λογικής. Μια πρόταση μπορεί να είναι αληθής "με κάποιο βαθμό αληθείας", και όχι απλά αληθής ή ψευδής. Με απλά λόγια, η ασαφής λογική λέει ότι τα πράγματα συχνά δεν είναι «άσπρο-μαύρο» αλλά «αποχρώσεις του γκρι». Η ιδέα αυτή απετέλεσε επανάσταση στη θεωρία της λογικής, γιατί ξέφυγε από το μοντέλο που κυριαρχούσε εδώ και 2500 χρόνια, δηλαδή το μοντέλο του «0-1», «αληθές-ψευδές». Έτσι, με τη θεωρία της Ασάφειας προσεγγίζεται η εφαρμοσμένη πρακτική αντιμετώπισης πολλών φυσικών ερωτημάτων και προβλημάτων, στα οποία οι απαντήσεις δεν είναι μονοσήμαντες.

Χαρακτηριστικό είναι το κλασσικό παράδειγμα του ορισμού του συνόλου των "ψηλών ανθρώπων" (Ξενίδης, 2006). Ο χαρακτηρισμός μιας ομάδας ανθρώπων με βάση το ύψος τους στην κλασσική δυαδική λογική, περιλαμβάνει ένα κατώτατο όριο προκειμένου να αποδοθεί το χαρακτηριστικό. Έτσι, σε ένα κλασσικό μαθηματικό μοντέλο, εφόσον η μεταβλητή (το άτομο) δεν υπερβαίνει την τιμή του ορίου (έστω το όριο των ψηλών είναι 180εκ.), δεν ανήκει στο συγκεκριμένο σύνολο. Στην πραγματικότητα όμως η κατάσταση είναι εντελώς διαφορετική καθώς δύο διαφορετικές τιμές που προσεγγίζουν την τιμή του ορίου τοποθετούν συνήθως τη μεταβλητή στο σύνολο. Έτσι, δύο άνθρωποι με ύψη 1,79 και 1,81, στην πραγματικότητα θεωρείται ότι ανήκουν εξίσου στο σύνολο των ψηλών ανθρώπων, ενώ στο κλασσικό μοντέλο της δυαδικής λογικής θα ανήκε μόνο ένας από τους δύο.

- Κλασσικά Σύνολα
 - Ένα στοιχείο είναι μέλος ή όχι
 - Αληθές ή ψευδές είναι οι μόνες δυνατότητες
- Ασαφή Σύνολα
 - Ένα αντικείμενο μπορεί να ανήκει μερικώς σε ένα σύνολο
 - Ο βαθμός συμμετοχής στο σύνολο ονομάζεται Συνάρτηση Συμμετοχής (membership function $f(x)$)
 - $f(x)=0$ το αντικείμενο δεν ανήκει στο σύνολο
 - $f(x)=1$ είναι σίγουρα μέλος του συνόλου
 - Οι υπόλοιπες τιμές για την $f(x)$ δείχνουν το βαθμό συμμετοχής

Κύριο χαρακτηριστικό της θεωρίας της Ασάφειας είναι ότι μπορεί να αξιοποιήσει δεδομένα που είναι: i) ελλιπή, ii) υποκειμενικά και iii) ποιοτικά. Οι χρησιμοποιούμενες πληροφορίες, ή δεδομένα, συχνά δεν καταγράφονται, αλλά διαχέονται προφορικά. Εφόσον υπάρξει καταγραφή δεδομένων, συνήθως αυτή δεν ακολουθεί καμία τυπική συστηματική μεθοδολογία. Σε μεγάλο βαθμό, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται, αποτελούν καταγραφές υποκειμενικού χαρακτήρα που διατυπώνονται συχνά με γλωσσολογική μορφή και όχι με ποσοτικά στοιχεία. Η θεωρία της ασάφειας παρέχει τη δυνατότητα χρήσης ανακριβών δεδομένων, επειδή

στηρίζεται εννοιολογικά στην ανοχή της ανακρίβειας (tolerance for imprecision) (Ross, 1995).

1. Απεικόνιση ενός φυσικού προβλήματος με σύστημα Ασάφειας.

Ένα μοντέλο είναι η αναπαράσταση ενός πραγματικού συστήματος. Σύμφωνα με τους Pascale et al. (1998), οι απαιτήσεις για τον σχεδιασμό ενός μοντέλου ανάλυσης είναι:

- Η σαφήνεια ως προς τις επιδιώξεις του μοντέλου.
- Η απλότητα της αρχιτεκτονικής και αλγοριθμικής δομής του, χαρη στην οποία εξασφαλίζει την ευκολία στη δημιουργία του, τη χρήση του, τον έλεγχό του και την πιθανή τροποποίησή του εάν αυτό είναι απαραίτητο.
- Η καλή ποιότητα των δεδομένων τα οποία πρέπει να αναζητούνται οπουδήποτε και να είναι επίκαιρα.
- Ο συνυπολογισμός όλων των παραμέτρων, ακόμα και αν ανάμεσά τους υπάρχουν κάποιες που φαίνονται αμελητέες.

Βασική προϋπόθεση προκειμένου να ικανοποιούνται οι παραπάνω απαιτήσεις, είναι η κατανόηση των διεργασιών του φυσικού προβλήματος. Η υιοθέτηση της θεωρίας της ασάφειας για τη δημιουργία μοντέλων απεικόνισης φυσικών προβλημάτων, ανταποκρίνεται με μεγαλύτερη ευκολία στην αναγκαιότητα της εισαγωγής με μαθηματικό τρόπο, της ανακρίβειας και της απροσδιοριστίας που υπάρχει στα φυσικά προβλήματα.

Η δημιουργία ενός συστήματος ασάφειας απαιτεί για την εκπλήρωση της, μιας ή περισσότερων από τις παρακάτω προϋποθέσεις (Babuska, 2000):

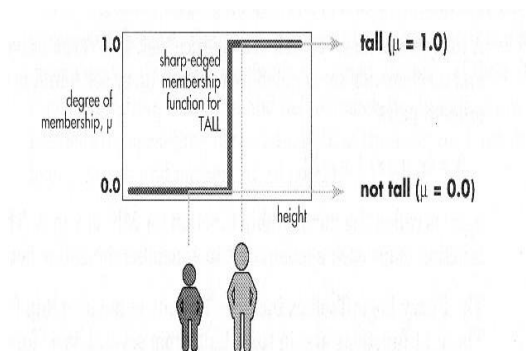
- Τη περιγραφή της λειτουργίας του φυσικού συστήματος με ένα σύνολο κανόνων ασάφειας.
- Την εισαγωγή συνόλων ασάφειας στον καθορισμό των παραμέτρων του φυσικού συστήματος. Οι παράμετροι μπορεί να περιγράφονται με μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες όμως υλοποιούνται μέσω αριθμών ασάφειας.
- Την περιγραφή των μεταβλητών εισόδου και εξόδου του φυσικού συστήματος με σύνολα ασάφειας.

Ένα σύνολο ασάφειας αποτελεί επέκταση των συνόλων των κλασικών μαθηματικών. Στα κλασσικά ή καθαρά (crisp) σύνολα, τα όρια είναι αυστηρώς καθορισμένα ώστε ένα στοιχείο να ανήκει, ή να μην ανήκει σε αυτό. Στα σύνολα ασάφειας, τα σύνολα επιτρέπουν τη μερική συμμετοχή ενός στοιχείου σε αυτά. Η μετατροπή των ξερών- crisp εισόδων σε ασαφείς, δηλαδή στους αντίστοιχους βαθμούς συμμετοχής, ονομάζεται *ασαφοποίηση (fuzzification)*.

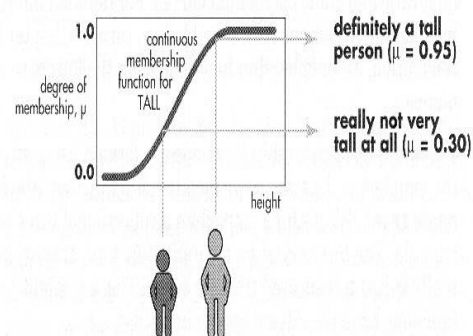
2. Η έννοια της Συνάρτησης Συμμετοχής και οι μορφές της.

Η Συνάρτηση Συμμετοχής (*membership function*) είναι μιά καμπύλη η οποία καθορίζει τον βαθμό στον οποίο κάθε σημείο του πεδίου ορισμού διαθέτει μιά συγκεκριμένη ιδιότητα. Η Συνάρτηση Συμμετοχής ορίζεται στο διάστημα $[0,1]$. Ένα κλασικό σύνολο C , ορισμένο σε ένα δεδομένο πεδίο ορισμού A , αποτελείται από μια ομάδα διακριτών στοιχείων, τα οποία ανήκουν στο A . Για όλα τα στοιχεία που ανήκουν στο A , υπάρχει μια χαρακτηριστική συνάρτηση απεικόνισης $fc(x)$, ορισμένη στο πεδίο ορισμού, η οποία εκφράζεται από τη σχέση (Tsoukalas & Uhrig, 1997):

$$fc(x) = \begin{cases} 1, & \text{αν και μόνο αν } x \in C \\ 0, & \text{αν και μόνο αν } x \notin C \end{cases}$$



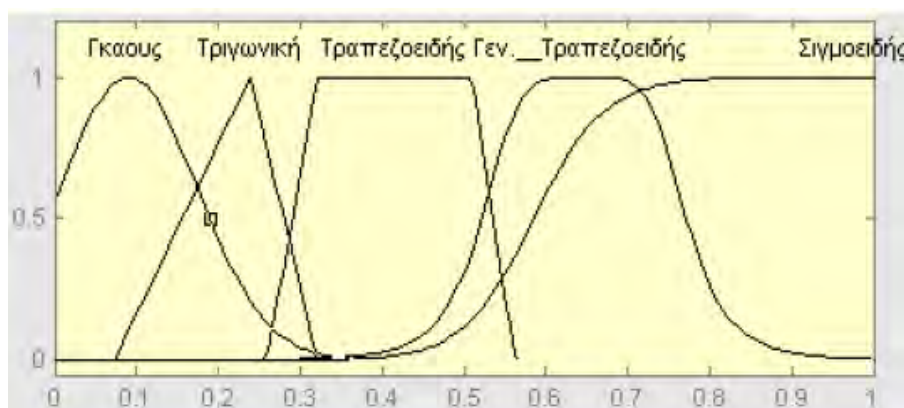
Εικόνα 5.10: Συνάρτηση Συμμετοχής στην Δυαδική Λογική.



Εικόνα 5.11: Συνάρτηση Συμμετοχής στην Λογική της Ασάφειας.

- Οριζόντιος άξονας: όλα τα πιθανά μέλη του συνόλου (ταξινομημένα αν είναι δυνατό).
- Κάθετος άξονας: τιμή συμμετοχής από 0 (καθόλου) έως 1 (πλήρως).

Τα σύνολα ασάφειας χαρακτηρίζονται από τη Συνάρτηση Συμμετοχής που αντιστοιχεί σε αυτά, με την οποία καθορίζεται ο βαθμός συμμετοχής των στοιχείων τους. Η Συνάρτηση Συμμετοχής δεν έχει μια καθορισμένη μορφή. Η εκλογή της κατάλληλης μορφής αποτελεί σημαντική παράμετρο της απεικόνισης οποιουδήποτε φυσικού προβλήματος.

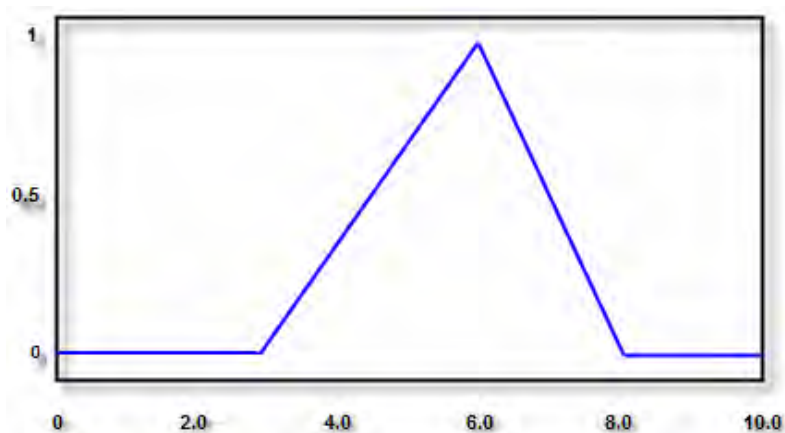


Εικόνα 5.11: Τύποι Συναρτήσεων Συμμετοχής.

Κάποιες μορφές συναρτήσεων συμμετοχής, οι οποίες εφαρμόζονται με μεγάλη συχνότητα στις διάφορες εφαρμογές, αποτελούν και τις πρώτες επιλογές των ερευνητών στην απεικόνιση φυσικών προβλημάτων. Τέτοιες συναρτήσεις συμμετοχής είναι:

- Η *τριγωνική Συνάρτηση Συμμετοχής*. Στη σχέση αυτή a, b , και c είναι οι κορυφές του τριγώνου.

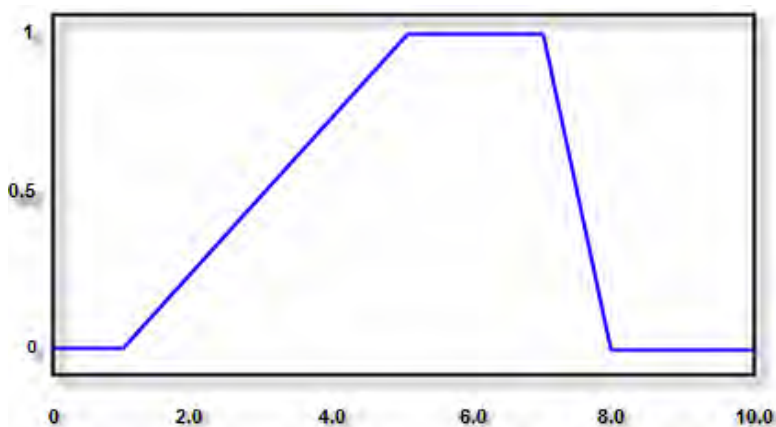
$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ (x-a)/(b-a), & a \leq x \leq b \\ (c-x)/(c-b), & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$$



Εικόνα 5.12: Μορφή μιας τριγωνικής Συνάρτησης Συμμετοχής.

- Η *τραπεζοειδής Συνάρτηση Συμμετοχής*. Στη σχέση αυτή a, b, c και d είναι οι κορυφές του τραπέζιου.

$$f(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ (x-a)/(b-a), & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ (d-x)/(d-c), & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}$$



Εικόνα 5.13: Μορφή μιας τραπεζοειδούς Συνάρτησης Συμμετοχής.

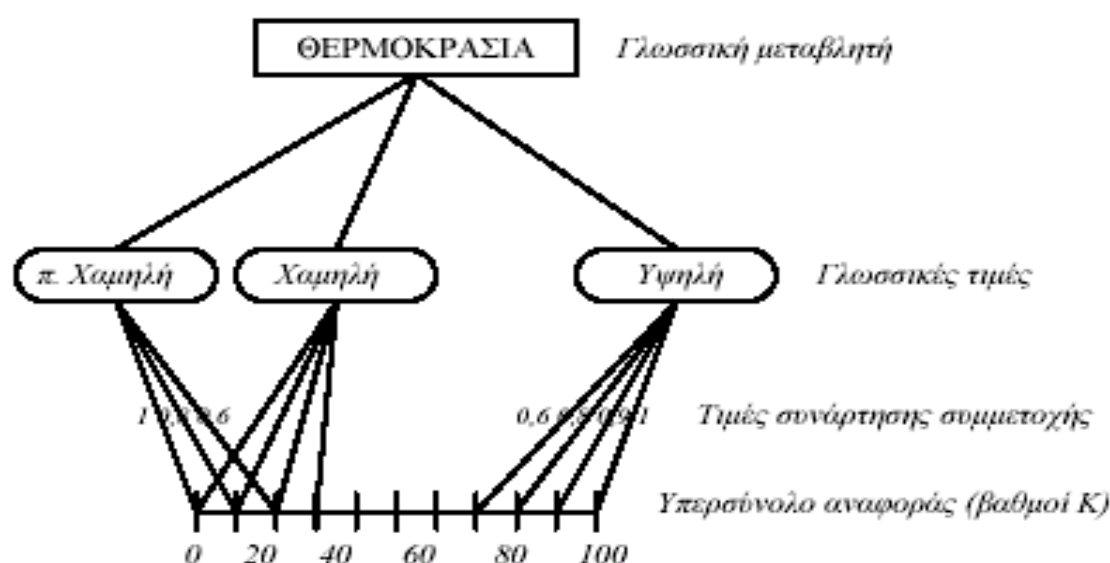
Στην περίπτωση της τριγωνικής Συνάρτησης Συμμετοχής, επισημαίνεται η απλή απεικόνιση εκτιμήσεων τριών σημείων (μικρή, μεσαία, μεγάλη πιθανότητα). Μεταξύ των ακραίων τιμών και της αναμενόμενης, οι υπόλοιπες τιμές αποτελούν ενδιάμεσες καταστάσεις που υποδεικνύουν την απόκλιση από τις εκτιμήσεις.

Στην περίπτωση της τραπεζοειδούς Συνάρτησης Συμμετοχής, η πιθανότητα εμφάνισης απεικονίζεται στη βάση της εκτίμησης δυο διαστημάτων, εκείνου που ορίζει το εύρος του συνόλου των ενδεχομένων (μεγάλη πλευρά τραπεζίου) και εκείνου που ορίζει το εύρος των πλέον αναμενόμενων ενδεχομένων (μικρή πλευρά τραπεζίου) (Ross, 1995). Οι υπόλοιπες πλευρές, όπως και στην τριγωνική συνάρτηση, αποτελούν ενδιάμεσες καταστάσεις που υποδεικνύουν την απόκλιση από τις εκτιμήσεις.

3. Λεκτικές μεταβλητές και Ασαφείς κανόνες.

Τα ασαφή σύνολα χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των λεκτικών μεταβλητών. Τα ασαφή σύνολα και οι λεκτικές μεταβλητές χρησιμοποιούνται για να εξηγήσουν ποσοτικά έννοιες της φυσικής γλώσσας, τα οποία μπορούμε στη συνέχεια να χειριστούμε.

Γενικότερα, οι τιμές μιας ασαφούς μεταβλητής μπορεί να είναι προτάσεις σε κάποια προδιαγεγραμμένη γλώσσα με συνδυασμό ασαφών μεταβλητών, λεκτικών περιγραμμάτων (linguistic descriptors) και υπεκφυγών (hedges). Οι τιμές της μεταβλητής ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ του παραδείγματος μπορούν έτσι να εκφραστούν ως Υψηλή, όχι_Υψηλή, σχετικά_Υψηλή, όχι_πολύ_Υψηλή, πάρα_πολύ_Υψηλή, αρκετά_Υψηλή κ.ά. δηλαδή με προτάσεις αποτελούμενες από την ετικέτα Υψηλή, την άρνηση όχι, τα συνδετικά και άλλα καθώς και τα περιγράμματα πολύ, σχετικά, αρκετά κ.ά. Κατά τον τρόπο αυτό η μεταβλητή ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ είναι μια λεκτική μεταβλητή (linguistic variable).



Εικόνα 5.14: Λεκτική Μεταβλητή- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ.

Η Ασαφής πρόταση είναι αυτή που θέτει μια τιμή σε μια ασαφή μεταβλητή. Για παράδειγμα στην ασαφή πρόταση "Το ύψος του Νίκου είναι μέτριο", το "ύψος" είναι η ασαφής μεταβλητή και το "μέτριο" είναι ένα ασαφές σύνολο που είναι η τιμή της μεταβλητής.

Ο Ασαφής κανόνας (*fuzzy rule*) είναι μια υπο συνθήκη έκφραση που συσχετίζει δύο ή περισσότερες ασαφείς προτάσεις.

Η διατύπωση ενός κανόνα έχει γενικά την ακόλουθη μορφή: "if x is A then y is B". Άλλο ένα παράδειγμα: "Εάν η ταχύτητα είναι μέτρια τότε η πίεση στα φρένα να είναι μέτρια". Τα "ταχύτητα" και "πίεση" είναι οι ασαφείς μεταβλητές. Το ασαφές σύνολο "μέτρια" είναι η τιμή των ασαφών συνόλων "ταχύτητα" και "πίεση".

4. Απασαφοποίηση του αποτελέσματος του συστήματος Ασάφειας.

Όπως αναφέραμε, για την υλοποίηση ενός μοντέλου ασάφειας απαιτείται η απόδοση ενός βαθμού από το χρήστη, για κάθε στοιχείο, στην κλίμακα από 0-1, ο οποίος, μέσω της συναρτήσεως συμμετοχής, αποδίδει το βαθμό συμμετοχής του στοιχείου στο σύνολο ασάφειας που εκφράζει την πιθανότητα διαμόρφωσης του προβλήματος.

Το αποτέλεσμα του υπολογισμού που διενεργείται από το μοντέλο πρέπει να έχει την ίδια μορφή (ξηρή- crisp τιμή), διότι στην αντίθετη περίπτωση, η ασυμβατότητα μεταξύ εισόδου (input) και εξόδου (output) μπορεί εύκολα να προκαλέσει σύγχυση και παρερμηνείες στην κατανόηση του τελικού αποτελέσματος. Η διαδικασία που απαιτείται για την μετατροπή των συνόλων ασάφειας που προκύπτουν από το σύστημα ασάφειας σε ξερές- crisp τιμές ονομάζεται *απασαφοποίηση (defuzzification)*.

5. Υλοποίηση μοντέλου ασάφειας

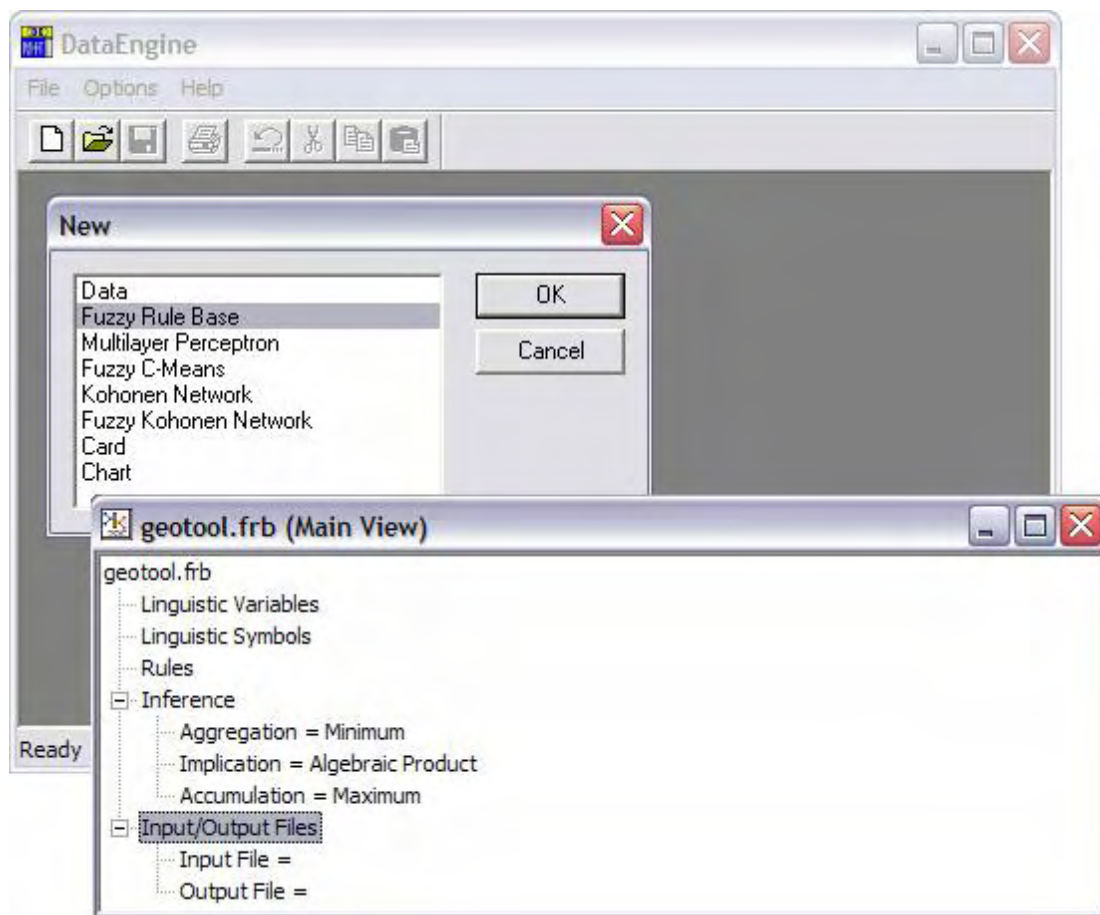
Προκειμένου να προσεγγιστεί το πρόβλημα με τη μέθοδο της Λογικής της Ασάφειας, τα δεδομένα πρέπει να είναι σε ψηφιδωτή δομή. Επειδή ο όγκος των δεδομένων ήταν απαγορευτικός για την ανάλυση στα πλαίσια της λογικής της Ασάφειας η έκταση της περιοχής μελέτης περιορίστηκε στα όρια της περιφέρειας του Νοτίου Αιγαίου, προκειμένου να μειωθεί ο αποθηκευτικός όγκος των δεδομένων και ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας τους.

Για να είναι δυνατή η ανάλυση με την λογική της Ασάφειας ακολούθησε η δημιουργία ενός ενιαίου θεματικού επιπέδου (*fuzzyset*) με τον υπολογισμό των αποστάσεων κάθε θεματικού επιπέδου και την αλληλεπίθεσή τους. Η υλοποίηση αυτή επετεύχθη με χρήση της εντολής *combine* στο παράθυρο του *raster calculator*, *ArcToolbox-> Spatial Analyst Tools-> Map Algebra-> Raster Calculator*.

Στην συνέχεια από τον πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών, μέσω της εντολής *calculate statistics*, έγινε ο υπολογισμός των μέγιστων και ελάχιστων τιμών κάθε θεματικού πεδίου.

Ακολούθησε η εισαγωγή του πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών σε φύλλο Excel και η αλλαγή του ονόματος κάθε μεταβλητής, στο όνομα του αρχικού θεματικού επιπέδου (κριτηρίου).

Η γεωγραφική βάση δεδομένων αποθηκεύτηκε σε μορφή dbf4. Στην συνέχεια μέσω του Data Engine δημιουργήθηκε ένα μοντέλο ασαφών κανόνων (Fuzzy Rule Base) με τίτλο geotool.frb για την εφαρμογή της μεθόδου της λογικής της ασάφειας.



Εικόνα 5.15: Δημιουργία μοντέλου ασαφών κανόνων (Fuzzy Rule Base). (Πηγή: Παπαθεοδώρου Ν., 2007).

Τα βασικά στοιχεία ενός ασαφούς συστήματος, όπως αυτο που δημιουργήθηκε, είναι:

- Ασαφοποίηση των δεδομένων εισόδου.
- Ανάπτυξη και επεξεργασία των κανόνων ασάφειας.
- Απασαφοποίηση των αποτελεσμάτων.

6. Ασαφοποίηση των δεδομένων εισόδου.

Ασαφοποίηση ονομάζουμε την διαδικασία μετατροπής των αρχικών αριθμητικών τιμών των μεταβλητών σε λεκτικές μεταβλητές (linguistic variables), με τη βοήθεια των συναρτήσεων συμμετοχής. Οι αριθμοί που αντιστοιχούν στα κριτήρια, αντικαθίστανται από λεκτικούς όρους (terms) και δημιουργούνται συναρτήσεις συμμετοχής αντίστοιχα για κάθε κριτήριο.

Σε αυτό το στάδιο προσδιορίζονται οι υποκλάσεις και η μεταξύ τους επικάλυψη, καθώς και η χρησιμοποιούμενη συνάρτηση. Έχουμε ορίσει δυο υποκλάσεις για κάθε συνάρτηση και έχουμε επιλέξει την τραπεζοειδής μορφή.

Απαραίτητο βήμα είναι ο προσδιορισμός κατάλληλων όρων, οι λεγόμενοι λεκτικοί συμβολισμοί (linguistic symbols), για το χαρακτηρισμό των αποτελεσμάτων. Στο σχετικό παράθυρο εντολών, όπως βλέπουμε στην εικόνα 5.16, για κάθε μια μεταβλητή ορίστηκαν: η ελάχιστη και μέγιστη τιμή (στατιστικά στοιχεία), ο αριθμός των λεκτικών όρων (υποκλάσεων) και ο τύπος της συνάρτησης συμμετοχής, η οποία για όλα τα κριτήρια επιλέχθηκε η τραπεζοειδής.

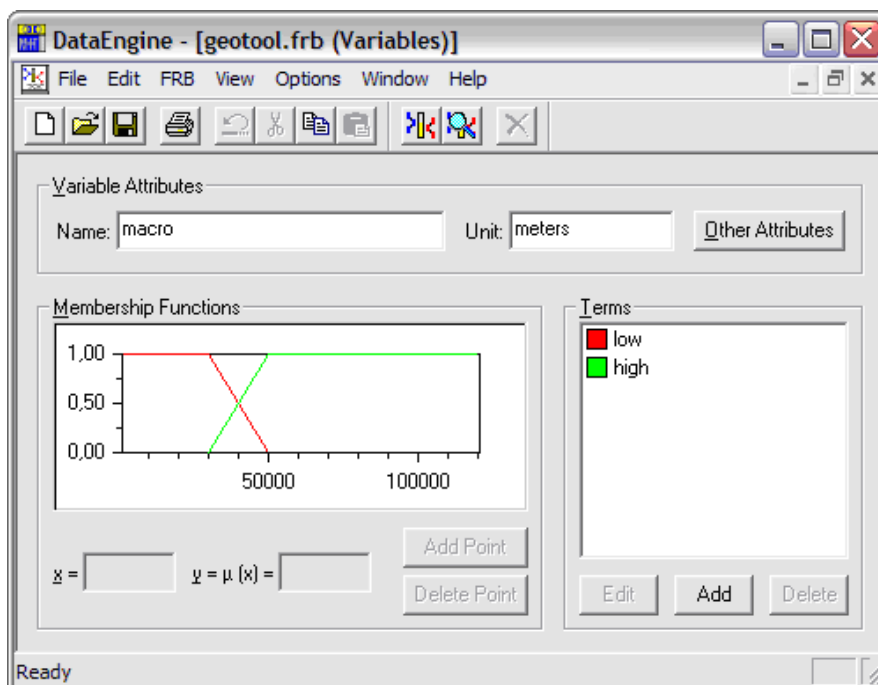
Εικόνα 5.16: Ορισμός της λεκτικής μεταβλητής faults (ρήγματα).

Στον πίνακα 5.3 παρατίθενται τα κριτήρια, οι αντίστοιχες λεκτικές μεταβλητές, οι υποκλάσεις και η μεταξύ τους επικάλυψη που επιλέχθηκαν.

Κριτήριο	Λεκτική Μεταβλητή	Συνάρτηση Συμμετοχής
volcanoes_euc	volcanoes: low(x) high(x)	$\text{high}(x) = \begin{cases} 0, & \text{αν } \text{volcanoes}(x) < 4000 \\ (\text{volcanoes}(x) - 4000) / 2000, & \text{αν } 4000 \leq \text{volcanoes}(x) \leq 6000 \\ 1, & \text{αν } \text{volcanoes}(x) > 6000 \end{cases}$
springs_euc	springs: low(x) high(x)	$\text{high}(x) = \begin{cases} 0, & \text{αν } \text{springs}(x) < 3250 \\ (\text{springs}(x) - 3250) / 1500, & \text{αν } 3250 \leq \text{springs}(x) \leq 4750 \\ 1, & \text{αν } \text{springs}(x) > 4750 \end{cases}$
micro_euc	micro: low(x) high(x)	$\text{high}(x) = \begin{cases} 0, & \text{αν } \text{micro}(x) < 4000 \\ (\text{micro}(x) - 4000) / 2000, & \text{αν } 4000 \leq \text{micro}(x) \leq 6000 \\ 1, & \text{αν } \text{micro}(x) > 6000 \end{cases}$
macro_euc	macro: low(x) high(x)	$\text{high}(x) = \begin{cases} 0, & \text{αν } \text{macro}(x) < 30000 \\ (\text{macro}(x) - 30000) / 20000, & \text{αν } 30000 \leq \text{macro}(x) \leq 50000 \\ 1, & \text{αν } \text{macro}(x) > 50000 \end{cases}$
volcanic_euc	volcanic: low(x) high(x)	$\text{high}(x) = \begin{cases} 0, & \text{αν } \text{volcanic}(x) < 3500 \\ (\text{volcanic}(x) - 3500) / 1500, & \text{αν } 3500 \leq \text{volcanic}(x) \leq 5000 \\ 1, & \text{αν } \text{volcanic}(x) > 5000 \end{cases}$
intrusive_euc	intrusive: low(x) high(x)	$\text{high}(x) = \begin{cases} 0, & \text{αν } \text{intrusive}(x) < 4000 \\ (\text{intrusive}(x) - 4000) / 2000, & \text{αν } 4000 \leq \text{intrusive}(x) \leq 6000 \\ 1, & \text{αν } \text{intrusive}(x) > 6000 \end{cases}$
faults_euc	faults: low(x) high(x)	$\text{high}(x) = \begin{cases} 0, & \text{αν } \text{faults}(x) < 4750 \\ (\text{faults}(x) - 4750) / 2500, & \text{αν } 4750 \leq \text{faults}(x) \leq 7250 \\ 1, & \text{αν } \text{faults}(x) > 7250 \end{cases}$

Πίνακας 5.3: Συναρτήσεις συμμετοχής.

Η απόδοση της συνάρτησης συμμετοχής αποτελεί καθαρά υποκειμενική διαδικασία η οποία αντικατοπτρίζει τη γνώση των ειδικών, μπορεί όμως να υποβοηθηθεί από διάφορες μεθόδους όπως είναι η μέθοδος του μέσου όρου ή η μέθοδος της απόστασης.



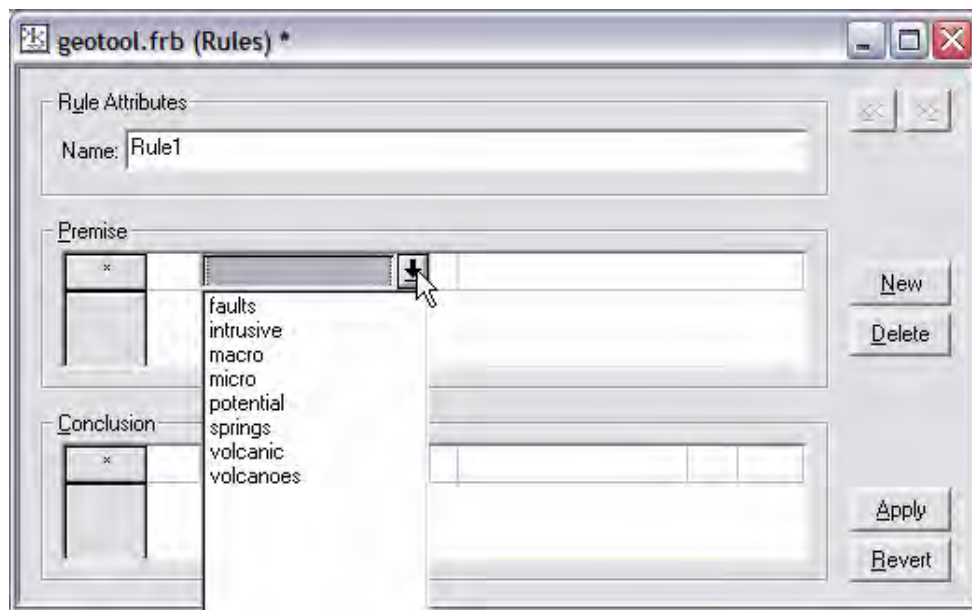
Εικόνα 5.17: Συνάρτηση συμμετοχής για την απόσταση για την λεκτική μεταβλητή macro.

Στη συνέχεια, για το χαρακτηρισμό των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας των δεδομένων, δημιουργήθηκε ο λεκτικός συμβολισμός της πιθανότητας εντοπισμού (potential).

7. Ανάπτυξη και επεξεργασία των κανόνων ασάφειας.

Ακολουθεί το στάδιο της ανάπτυξης των κανόνων ασάφειας για την επιλογή των ζητούμενων περιοχών. Οι κανόνες ασάφειας συνδέουν την είσοδο με τα αποτελέσματα και αντιπροσωπεύουν τη γνώση του μελετητή για το πρόβλημα. Ουσιαστικά, οι κανόνες ασάφειας συνδέουν τις λεκτικές μεταβλητές του κάθε κριτηρίου (πχ. απόσταση από ηφαίστεια) με το λεκτικό συμβολισμό της πιθανότητας εντοπισμού (μικρής ή μεγάλης), αποδίδοντας τη βεβαιότητα καθορισμού του κανόνα.

Στην εικόνα 5.18, απεικονίζεται το παράθυρο εντολών για τη ανάπτυξη των κανόνων ασάφειας. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα αναπτύχθηκαν δεκατέσσερις συνολικά κανόνες, επτά για κάθε κατηγορία πιθανότητας εντοπισμού.



Εικόνα 5.18: Επιλογή των λεκτικών μεταβλητών για την ανάπτυξη κανόνα ασάφειας.

Η λογική της δημιουργίας των κανόνων ασάφειας βασίστηκε στην ομαδοποίηση των κριτηρίων βάσει:

- ο της σπουδαιότητά τους στη διαμόρφωση του προβλήματος
- ο της συμπληρωματικής τους συμμετοχής στη διαμόρφωση ενός ενδεχομένου (πχ. κατάλληλη γεωλογία - ύπαρξη ρηγμάτων)
- ο του ποσοστού κάλυψης της περιοχής μελέτης από το συνδυασμό τους

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνολικά οι κανόνες ασάφειας που διαμορφώθηκαν για τις δυο υποκλάσεις (high και low) της πιθανότητας εντοπισμού και η αντίστοιχη φραστική τους απόδοση.

Κανόνας Ασάφειας	Rule1 <ul style="list-style-type: none"> ➤ IF volcanoes IS low ➤ AND springs IS low ➤ THEN potential IS high WITH 0,85
Φραστική απόδοση	ΑΝ η απόσταση από ηφαίστεια είναι μικρή ΚΑΙ η απόσταση από πηγές είναι μικρή ΤΟΤΕ η πιθανότητα εντοπισμού είναι μεγάλη με βαθμό βεβαιότητας απόδοσης του κανόνα 0,85

Κανόνας Ασάφειας	Rule2 <ul style="list-style-type: none"> ➤ IF macro IS low ➤ AND faults IS low ➤ AND volcanic IS low ➤ THEN potential IS high WITH 0,75
Φραστική απόδοση	ΑΝ η απόσταση από επίκεντρα μεγάλων σεισμών είναι μικρή ΚΑΙ η απόσταση από ρήγματα είναι μικρή ΚΑΙ η απόσταση από ηφαιστειακά πετρώματα είναι μικρή ΤΟΤΕ η πιθανότητα εντοπισμού είναι μεγάλη με βαθμό βεβαιότητας απόδοσης του κανόνα 0,75

Κανόνες Ασάφειας	Rule3 ➤ IF volcanic IS high ➤ AND intrusive IS high ➤ AND faults IS high ➤ AND macro IS high ➤ THEN potential IS high WITH 0,15
Φραστική απόδοση	AN η απόσταση από ηφαιστειακά πετρώματα είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από πυριγενή πετρώματα είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από ρήγματα είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από επίκεντρα μεγάλων σεισμών είναι μεγάλη ΤΟΤΕ η πιθανότητα εντοπισμού είναι μεγάλη με βαθμό βεβαιότητας απόδοσης του κανόνα 0,15

Κανόνες Ασάφειας	Rule4 ➤ IF volcanic IS high ➤ AND intrusive IS high ➤ AND faults IS high ➤ AND macro IS high ➤ THEN potential IS high WITH 0,3
Φραστική απόδοση	AN η απόσταση από επίκεντρα μικροσεισμών είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από επίκεντρα μεγάλων σεισμών είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από πηγές είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από ηφαιστειακά πετρώματα είναι μεγάλη ΤΟΤΕ η πιθανότητα εντοπισμού είναι μεγάλη με βαθμό βεβαιότητας απόδοσης του κανόνα 0,3

Κανόνες Ασάφειας	Rule5 ➤ IF volcanoes IS high ➤ AND micro IS high ➤ AND macro IS high ➤ AND volcanic IS high ➤ THEN potential IS high WITH 0,3
Φραστική απόδοση	AN η απόσταση από ηφαίστεια είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από επίκεντρα μικροσεισμών είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από επίκεντρα μεγάλων σεισμών είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από ηφαιστειακά πετρώματα είναι μεγάλη ΤΟΤΕ η πιθανότητα εντοπισμού είναι μεγάλη με βαθμό βεβαιότητας απόδοσης του κανόνα 0,3

Κανόνες Ασάφειας	Rule6 ➤ IF springs IS low ➤ AND volcanic IS low ➤ AND faults IS low ➤ AND macro IS low ➤ THEN potential IS high WITH 0,7
Φραστική απόδοση	AN η απόσταση από πηγές είναι μικρή ΚΑΙ η απόσταση από ηφαιστειακά πετρώματα είναι μικρή ΚΑΙ η απόσταση από ρήγματα είναι μικρή ΚΑΙ η απόσταση από επίκεντρα μεγάλων σεισμών είναι μικρή ΤΟΤΕ η πιθανότητα εντοπισμού είναι μεγάλη με βαθμό βεβαιότητας απόδοσης του κανόνα 0,7

Κανόνας Ασάφειας	Rule7 <ul style="list-style-type: none"> ➤ IF volcanoes IS low ➤ AND springs IS high ➤ AND macro IS low ➤ THEN potential IS high WITH 0,8
Φραστική απόδοση	AN η απόσταση από ηφαίστεια είναι μικρή ΚΑΙ η απόσταση από πηγές είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από επίκεντρα μεγάλων σεισμών είναι μικρή ΤΟΤΕ η πιθανότητα εντοπισμού είναι μεγάλη με βαθμό βεβαιότητας απόδοσης του κανόνα 0,8

Κανόνας Ασάφειας	Rule8 <ul style="list-style-type: none"> ➤ IF macro IS high ➤ AND volcanic IS high ➤ AND faults IS high ➤ THEN potential IS low WITH 0,7
Φραστική απόδοση	AN η απόσταση από επίκεντρα μεγάλων σεισμών είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από ηφαιστειακά πετρώματα είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από ρήγματα είναι μεγάλη ΤΟΤΕ η πιθανότητα εντοπισμού είναι μικρή με βαθμό βεβαιότητας απόδοσης του κανόνα 0,7

Κανόνας Ασάφειας	Rule9 <ul style="list-style-type: none"> ➤ IF volcanic IS high ➤ AND intrusive IS high ➤ AND faults IS high ➤ AND macro IS high ➤ THEN potential IS low WITH 0,85
Φραστική απόδοση	AN η απόσταση από ηφαιστειακά πετρώματα είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από πυριγενή πετρώματα είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από ρήγματα είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από επίκεντρα μεγάλων σεισμών είναι μεγάλη ΤΟΤΕ η πιθανότητα εντοπισμού είναι μικρή με βαθμό βεβαιότητας απόδοσης του κανόνα 0,85

Κανόνας Ασάφειας	Rule10 <ul style="list-style-type: none"> ➤ IF micro IS low ➤ AND intrusive IS high ➤ AND macro IS high ➤ THEN potential IS low WITH 0,45
Φραστική απόδοση	AN η απόσταση από επίκεντρα μικροσεισμών είναι μικρή ΚΑΙ η απόσταση από πυριγενή πετρώματα είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από επίκεντρα μεγάλων σεισμών είναι μεγάλη ΤΟΤΕ η πιθανότητα εντοπισμού είναι μικρή με βαθμό βεβαιότητας απόδοσης του κανόνα 0,45

Κανόνας Ασάφειας	Rule11 <ul style="list-style-type: none"> ➤ IF micro IS high ➤ AND macro IS high ➤ AND faults IS low ➤ THEN potential IS low WITH 0,6
Φραστική απόδοση	AN η απόσταση από επίκεντρα μικροσεισμών είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από επίκεντρα μεγάλων σεισμών είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από ρήγματα είναι μικρή ΤΟΤΕ η πιθανότητα εντοπισμού είναι μικρή με βαθμό βεβαιότητας απόδοσης του κανόνα 0,6

Κανόνες Ασάφειας	Rule12 <ul style="list-style-type: none"> ➤ IF springs IS high ➤ AND faults IS low ➤ AND volcanic IS low ➤ AND micro IS low ➤ THEN potential IS low WITH 0,35
Φραστική απόδοση	ΑΝ η απόσταση από πηγές είναι μεγάλη ΚΑΙ η απόσταση από ρήγματα είναι μικρή ΚΑΙ η απόσταση από ηφαιστειακά πετρώματα είναι μικρή ΚΑΙ η απόσταση από επίκεντρα μικροσεισμών είναι μικρή ΤΟΤΕ η πιθανότητα εντοπισμού είναι μικρή με βαθμό βεβαιότητας απόδοσης του κανόνα 0,35

Κανόνες Ασάφειας	Rule13 <ul style="list-style-type: none"> ➤ IF springs IS low ➤ AND faults IS low ➤ AND volcanic IS low ➤ THEN potential IS low WITH 0,3
Φραστική απόδοση	ΑΝ η απόσταση από πηγές είναι μικρή ΚΑΙ η απόσταση από ρήγματα είναι μικρή ΚΑΙ η απόσταση από ηφαιστειακά πετρώματα είναι μικρή ΤΟΤΕ η πιθανότητα εντοπισμού είναι μικρή με βαθμό βεβαιότητας απόδοσης του κανόνα 0,3

Κανόνες Ασάφειας	Rule14 <ul style="list-style-type: none"> ➤ IF volcanoes IS low ➤ AND micro IS low ➤ AND macro IS low ➤ THEN potential IS low WITH 0,15
Φραστική απόδοση	ΑΝ η απόσταση από ηφαίστεια είναι μικρή ΚΑΙ η απόσταση από επίκεντρα μικροσεισμών είναι μικρή ΚΑΙ η απόσταση από επίκεντρα μεγάλων σεισμών είναι μικρή ΤΟΤΕ η πιθανότητα εντοπισμού είναι μικρή με βαθμό βεβαιότητας απόδοσης του κανόνα 0,15

Μετά το στάδιο της δημιουργίας των κανόνων ασάφειας, ακολουθεί η επεξεργασία τους για την εξαγωγή συμπεράσματος. Η διαδικασία αξιολόγησης των κανόνων σε περιλαμβάνει τρία στάδια: τη συσσώρευση (aggregation), τη σημαντικότητα (implication) και τη συγκέντρωση (accumulation).

Η *συσσώρευση* περιλαμβάνει την αξιολόγηση της εκπλήρωσης του κάθε κανόνα, με βάση την εκπλήρωση της κάθε μεταβλητής του. Συνήθως, αντιστοιχεί στο λογικό AND, αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι τελεστές, όπως ο τελεστής γ (Gamma). Η επιλογή του τελεστή εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα.

Στο στάδιο της *σημαντικότητας*, υπολογίζεται η βεβαιότητα για το σύνολο των κανόνων, με βάση τις βεβαιότητες του κάθε κανόνα χωριστά. Σε αυτό το στάδιο αποδίδεται το συμπέρασμα των κανόνων της λογικής μορφής «Εάν Α τότε Β». Η μέγιστη βεβαιότητα όπου και αντιστοιχεί σε ένα σίγουρο αποτέλεσμα, είναι ίση με την μονάδα και είναι συνήθως σπάνιο. Οι συνηθέστεροι τελεστές που χρησιμοποιούνται είναι η τομή και το αλγεβρικό γινόμενο

Με τη διαδικασία της *συγκέντρωσης*, η οποία αντιστοιχεί στο λογικό OR, επιλέγεται ένας μόνο βαθμός εκπλήρωσης καθώς σε ένα ασαφές σύστημα, περισσότεροι από ένας κανόνες μπορούν να οδηγήσουν στο ίδιο αποτέλεσμα με διαφορετικούς βαθμούς εκπλήρωσης. Οι συνηθέστεροι τελεστές για τη διαδικασία της συγκέντρωσης είναι η ένωση και το αλγεβρικό άθροισμα.

Για την εξαγωγή του αποτελέσματος στο συγκεκριμένο πρόβλημα χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τελεστές: Gamma (0.5) για τη συσσώρευση, Algebraic Product (αλγεβρικό γινόμενο) για τη σημαντικότητα και Algebraic Sum (αλγεβρικό άθροισμα) για τη συγκέντρωση. Η επιλογή του καταλληλότερου συνδυασμού τελεστών προέκυψε από τη χρήση των ιστογραμμάτων κατανομής του αριθμού των pixels στα διάφορα ποσοστά βεβαιότητας για τη μικρή και τη μεγάλη πιθανότητα εντοπισμού και επιλέχθηκε ο συνδυασμός για τον οποίο η κατανομή του βαθμού βεβαιότητας πλησιάζει την κανονική.

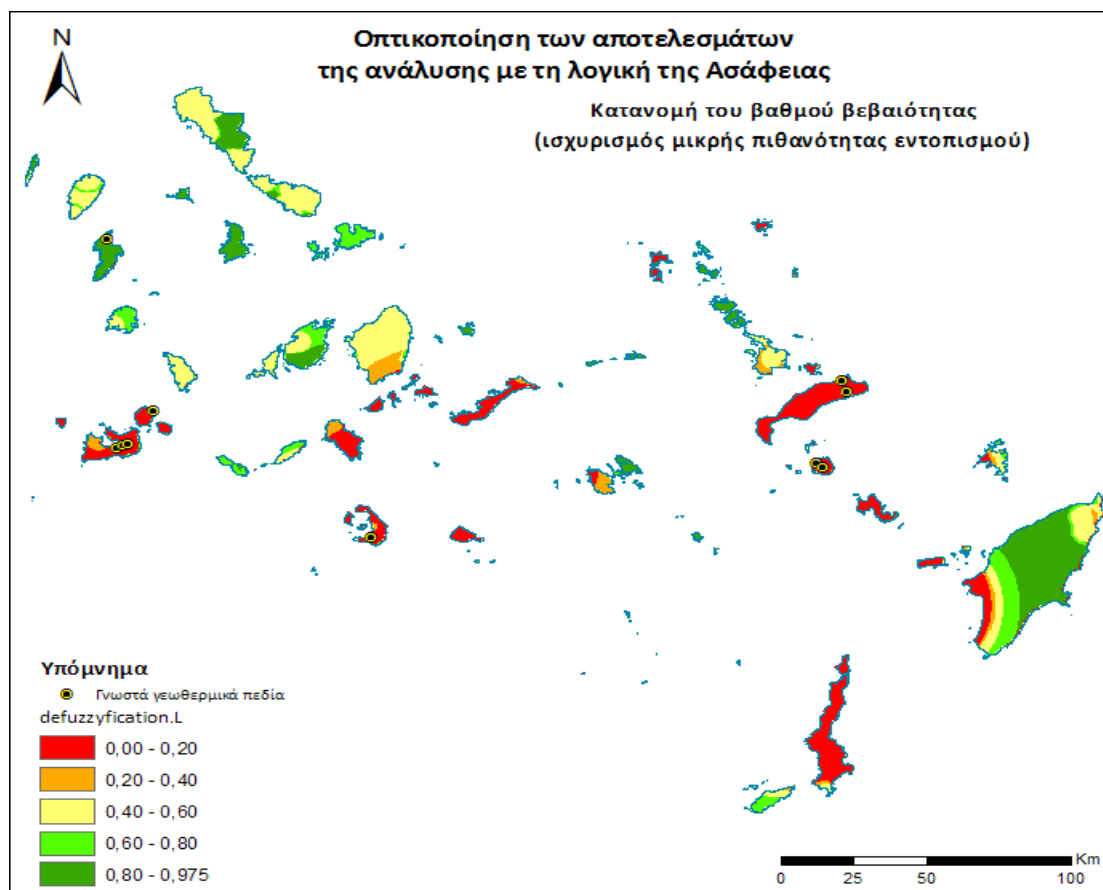
8. Απασαφοποίηση

Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας των κανόνων είναι μια λεκτική μεταβλητή (potential) με συμμετοχές σε δύο υποκλάσεις, μικρή (low) και μεγάλη (high). Έτσι δημιουργήθηκαν δυο θεματικά γεωγραφικά επίπεδα. Η οπτικοποίησή τους περιλαμβάνει την ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων για τις δυο κατηγορίες πιθανότητας στον πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών του θεματικού επιπέδου fuzzysset με τη διαδικασία Join and Relates-> Join..J. Τα αποτελέσματα του dataengine εισήχθησαν σε φύλλο του Excel και αποθηκεύτηκαν σε format dbf4. με στήλες ID L, H, H-L. Το πεδίο ID αντιστοιχεί στον αριθμό του κάθε pixel, το L στο βαθμό βεβαιότητας του ισχυρισμού μικρής πιθανότητας εντοπισμού στο αντίστοιχο pixel, το H στον αντίστοιχο βαθμό βεβαιότητας του ισχυρισμού μεγάλης πιθανότητας εντοπισμού, ενώ η στήλη H-L αντιστοιχεί στη διαφορά μεταξύ του βαθμού βεβαιότητας των ισχυρισμών μεγάλης και μικρής πιθανότητας εντοπισμού αντίστοιχα. Η τελευταία στήλη δημιουργήθηκε προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στο τελικό στάδιο της απασαφοποίησης.

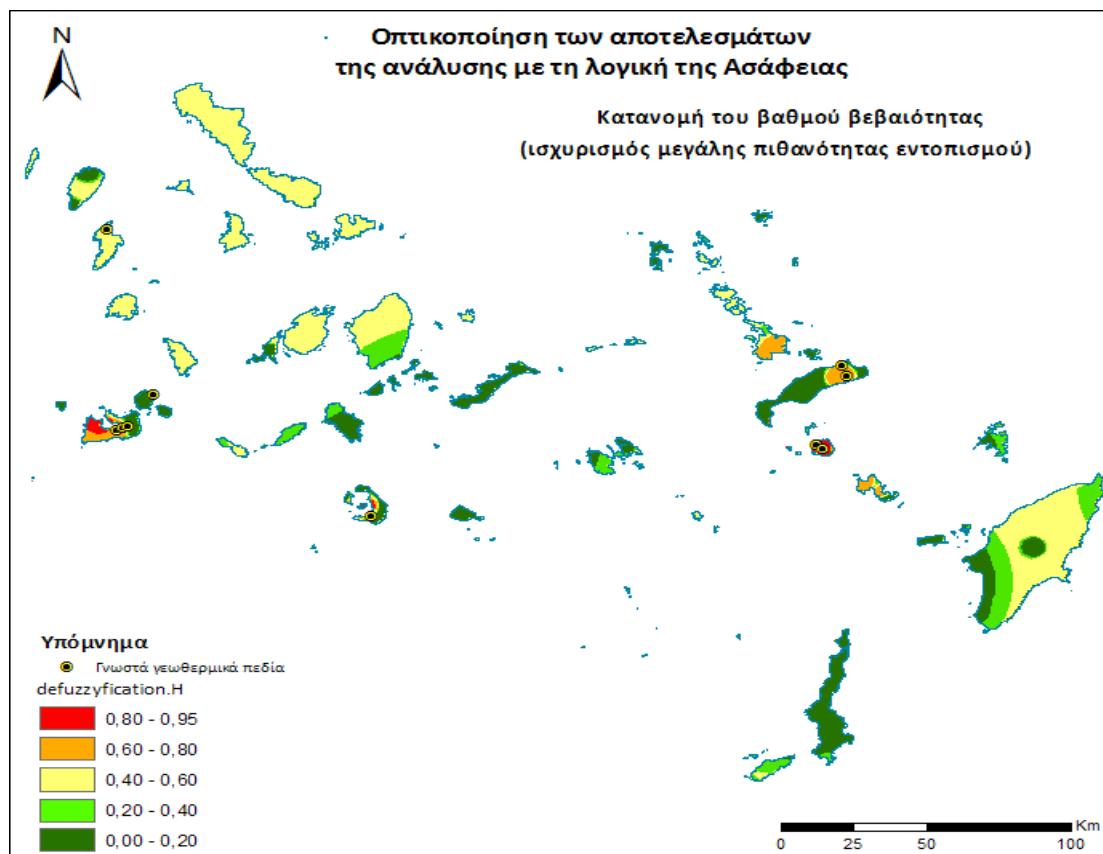
Στους παρακάτω χάρτες απεικονίζεται η διαμόρφωση του βαθμού βεβαιότητας των ισχυρισμών μικρής και μεγάλης πιθανότητας εντοπισμού. Επιπλέον, γίνεται μια αντιπαραβολή με τα ήδη γνωστά γεωθερμικά πεδία.

Στην εικόνα 5.19, διαφαίνεται ότι στις περιοχές των ήδη γνωστών γεωθερμικών πεδίων, το ποσοστό βεβαιότητας του ισχυρισμού μικρής πιθανότητας εντοπισμού είναι ιδιαίτερος χαμηλό, με εξαίρεση το γεωθερμικό πεδίο της Κύθνου όπου το αντίστοιχο ποσοστό βεβαιότητας υποδηλώνει τη σχεδόν βέβαιη απουσία γεωθερμικού πεδίου. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι χαμηλός βαθμός βεβαιότητας του εν λόγω ισχυρισμού, δεν συνιστά απαραίτητα βεβαιότητα για την ύπαρξη γεωθερμικού πεδίου.

Στην εικόνα 5.20, στα ήδη γνωστά γεωθερμικά πεδία, διαφαίνεται ότι το ποσοστό βεβαιότητας του ισχυρισμού μεγάλης πιθανότητας εντοπισμού παρουσιάζεται ιδιαίτερα υψηλό για τα γεωθερμικά πεδία Μήλου, Νισύρου και Σαντορίνης, ενώ, στην περιοχή των γεωθερμικών πεδίων της νήσου Κω παραμένει αρκετά υψηλό. Ωστόσο, στην Κύθνο και την Κίμωλο υποδεικνύεται σχετική και υψηλή αβεβαιότητα του ισχυρισμού αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι αβεβαιότητα στον ισχυρισμό μεγάλης πιθανότητας εντοπισμού δεν συνιστά σε καμία περίπτωση βεβαιότητα για την απουσία γεωθερμικού πεδίου.

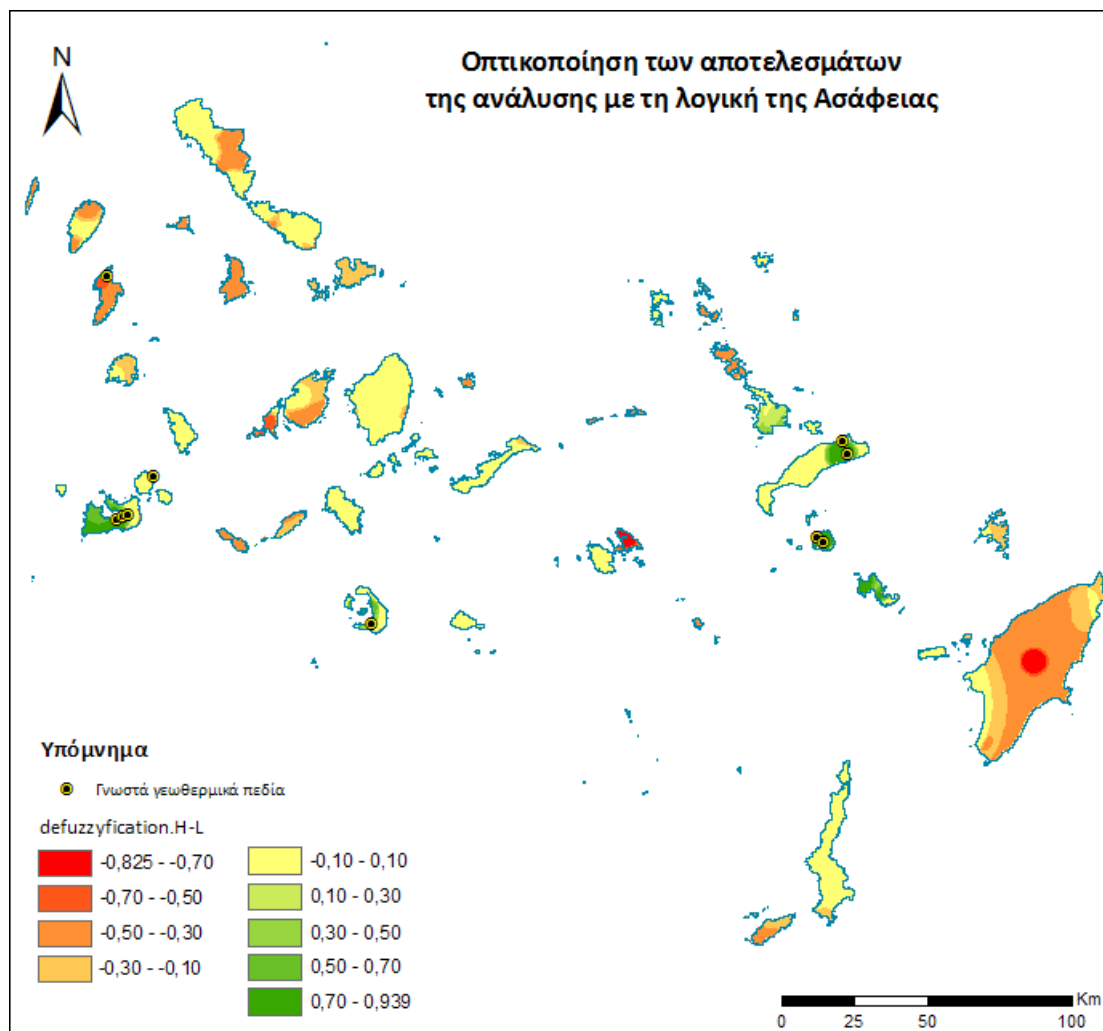


Εικόνα 5.19: Κατανομή του βαθμού βεβαιότητας του ισχυρισμού μικρής πιθανότητας εντοπισμού.



Εικόνα 5.20: Κατανομή του βαθμού βεβαιότητας ισχυρισμού μεγάλης πιθανότητας εντοπισμού.

Στην συνέχεια έχουμε την απασαφοποίηση των αποτελεσμάτων, με την δημιουργία ενός θεματικού επιπέδου που προέκυψε από την απεικόνιση του πεδίου HL, το οποίο αντιστοιχεί στη διαφορά του βαθμού βεβαιότητας των ισχυρισμών μικρής και μεγάλης πιθανότητας εντοπισμού για κάθε pixel.



Εικόνα 5.21: Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων της λογικής της Ασάφειας με το λογισμικό ArcGIS της εταιρίας ESRI. (Πηγή: Παπαθεοδώρου Ν., 2007).

Στην εικόνα 5.21, οι τιμές κοντά στο -1 αφορούν τις περιοχές μικρής πιθανότητας εντοπισμού, ενώ οι τιμές κοντά στο 1 υποδηλώνουν μεγάλη πιθανότητα εντοπισμού. Οι τιμές κοντά στο 0 αναπαριστούν περιοχές αλλαγής των ζωνών, δηλαδή περιοχές με υψηλό ποσοστό αβεβαιότητας ως προς τη διαμόρφωση της παραπάνω πιθανότητας. Αξίζει να σημειωθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου, με βάση τα ήδη γνωστά γεωθερμικά πεδία, καθώς οι περιοχές με τον υψηλότερο δείκτη βεβαιότητας, όχι μόνο “εντοπίζουν” τα γεωθερμικά πεδία Μήλου, Νισύρου, Σαντορίνης και Κω, αλλά η έκτασή τους περιορίζεται αυστηρά στην εγγύς περιοχή των πεδίων αυτών.

Κεφάλαιο 6°

Γενικά Συμπεράσματα

6.1. Συμπεράσματα

Σε έναν κόσμο που δείχνει αυξημένο ενδιαφέρον για το περιβάλλον, δίδεται μεγαλύτερη έμφαση στη χρήση καθαρών πηγών ενέργειας όπως είναι η γεωθερμική. Η γεωθερμία αποτελεί μια πολύ σημαντική μορφή ενέργειας, που εκτός από την ηλεκτροπαραγωγή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πλήθος άλλων αναγκών και να προσφέρει προοπτικές ανάπτυξης για τις περιοχές που βρίσκονται κοντά στα πεδία.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια φυσική, ήπια και πρακτικά ανεξάντλητη μορφή ενέργειας, που με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα μπορεί να καλύψει σημαντικό ποσοστό από τις ενεργειακές ανάγκες μας. Η σημειαικότητα με την οποία εμφανίζεται, παρόλο που πολλές φορές μπορεί να αποτελεί μειονέκτημα, συνεισφέρει στην περιφερειακή ανάπτυξη και στην αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας. Οι νέες τεχνολογίες στη γεωθερμία εξασφαλίζουν λύσεις με μηδαμινές έως μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η εκμετάλλευση της γεωθερμίας, παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μορφές ενέργειας. Η συνεχής παροχή ρευστού από τον γεωθερμικό ταμιευτήρα, είναι ίσως το σημαντικότερο από αυτά, καθώς επιτρέπει τη συνεχόμενη χρήση του, χωρίς η λειτουργία της εκάστοτε εγκατάστασης να επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες.

Παρόλο που οι γεωλογικές συνθήκες στην Ελλάδα ευνόησαν γενικά τη δημιουργία ενός πολύ σημαντικού γεωθερμικού δυναμικού χαμηλής ενθαλπίας, η εκμετάλλευσή του, ακόμα καλύπτει πολύ μικρό ποσοστό των δυνατοτήτων των βεβαιωμένων γεωθερμικών πεδίων. Σήμερα, αξιοποιούνται μόνο τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής θερμοκρασίας (από 25 μέχρι 80°C περίπου) τα οποία είναι πολύ περισσότερο διαδεδομένα και βρίσκονται σχεδόν σ' όλη τη χώρα.

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) αναδεικνύονται ως ένα ισχυρό εργαλείο στην διαδικασία της χωρικής ανάλυσης και για την χάραξη ενεργειακής και περιβαλλοντικής πολιτικής. Η εξάρτηση των ΑΠΕ από τα χωρικά χαρακτηριστικά της κάθε τοποθεσίας, καθιστούν το GIS ένα απαραίτητο εργαλείο όσον αφορά τον ενεργειακό σχεδιασμό των ΑΠΕ.

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται η χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών για τον εντοπισμό γεωθερμικών πεδίων στον Ελλαδικό χώρο. Ωστόσο, θα πρέπει να αποδώσουμε μια μορφή λογικής, που να πλησιάζει, όσο το δυνατόν περισσότερο την ανθρώπινη σκέψη.

Στην ανάλυση με την Δυαδική λογική, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών αδυνατούν να αποδώσουν ρεαλιστικά την πολυπλοκότητα και την ασάφεια που χαρακτηρίζουν ένα πολύπλευρο πρόβλημα. Αντίθετα η πολυπλοκότητα και η ασάφεια αυτή, προσεγγίζεται ικανοποιητικά μέσω της μεθοδολογίας της Λογικής της Ασάφειας καθώς λαμβάνεται υπόψη η συνδυαστική επίδραση των παραμέτρων του χωρικού προβλήματος.

Βιβλιογραφία

- **Antenucci J.C., Brown K., Crosswell P.L., Kevany M.J., Archer H., (1992).** "Geographic Information Systems, A guide to the Technology". New York: Van Nostrand Reinhold.
- **Armstead H.C.H., Bullard E. et al (1973).** "Geothermal Energy" - 184 pp., Paris (UNESCO).
- **Aronoff S., (1989).** "Geographic Information Systems: A management perspective". Ottawa, Canada: WDL Publications.
- **Ανδρίτσος Ν., (2008).** "Ενέργεια και Περιβάλλον". Διδακτικές σημειώσεις. Βόλος.
- **Ανδρίτσος Ν., Αρβανίτης Α., Παπαχρήστου Μ., Φυτίκας Μ., (2009).** "Κατάσταση και προοπτικές αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας στην Ελλάδα", Ένατο εθνικό συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργειας, σελ. 541 – 548. Πάφος.
- **Αντωνίου Β., Παπασπυρόπουλος Κ., (2016).** "Διαχείριση περιβάλλοντος". Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Αθήνα.
- **Αρβανίτης Α., (2008).** "Μύθοι και πραγματικότητα για τη Γεωθερμία". ΙΓΜΕ. Αθήνα.
- **Babuska R., (2000).** "Introduction to Fuzzy Systems". In COIL 2000 Workshop I: Evolutionary Computing – Fuzzy Logic – Machine Learning – Neural Networks. 19 June 2000. Chios. Greece.
- **Burrough P.A., (1986).** "Fuzzy Mathematical Methods for Soil Survey and Land Evaluation". Journal of Soil Science, vol. 40, p.p. 477-492.
- **Chrisman N., (1997).** "Exploring Geographic Information Systems". John Wiley and Sons.
- **Γαλανού Α., (2012).** "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Χρονική εξέλιξη – σύγκριση". Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα.
- **Γκαρδιακός Χ., (2010).** "Αξιοποίηση της γεωθερμίας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας". Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα.
- **Dickson M.H. & Fanelli M., (2004).** "What is Geothermal Energy?". Istituto di Geoscienze e Georisorse. Pisa Italy.
- **Διακογιάννης Γ., (2014).** "Χωροθέτηση μονάδων παραγωγής Ενέργειας από Γεωθερμία. Προτάσεις για την αξιοποίηση των γεωθερμικών πεδίων της Ελλάδας". Διπλωματική εργασία. Αθήνα.
- **Egenhofer M., (1991).** "Extending SQL for Geographic Chartographic Displays". Cartography and Geographic Information Systems, vol. 18, p.p. 230-245.
- **Eliasson E.T., (2001).** "Power Generation from High-Enthalpy Geothermal Resources". Geo-Heat Center Bulletin Vol. 22, No. 2, p. 26-34.
- **Fedra K., (1996).** "Distributed models and Embedded GIS: Strategies and Case Studies of Integration". In Goodchild, M.F., Steyaert, L.T., Parks, B.O., Johnston, C., Maidment, D., Crane, M., Glendinning, S. (1996). "GIS and

Environmental modeling: Progress and Research Issues". Fort Collins, Colo.: GIS World Books. p.p. 413-418.

- **International Energy Agency, (2011).** "Technology Roadmap, Geothermal Heat and Power".
- **IGME, (2007).** "Τα γεωθερμικά πεδία της χώρας". Αθήνα.
- **Knight K. & Fayek A.R., (2002).** "Use of Fuzzy Logic for Predicting Design Cost Overruns on Building Projects". Journal of Construction Engineering and Management, vol. 128, No.6, p.p. 503-512.
- **ΚΑΠΕ.** "Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για δυνητικούς χρήστες". Αθήνα.
- **Καρτέρης Μ.Α., (1994).** "Τηλεπισκόπηση Φυσικών Πόρων και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών". Α.Π.Θ.. Θεσσαλονίκη.
- **Καρυδάκης Γ.Ι., (2005).** "Γεωθερμική Ενέργεια". Εκδόσεις Αθλότυπο. Αθήνα.
- **Κατινάς Ν., Θύμιος Δ., (2014).** "Η Γεωθερμία στην Ελλάδα". Πτυχιακή Εργασία. Αθήνα.
- **Κίκιρας Π., (2006).** "Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών. Εισαγωγή στην τεχνολογία και τις εφαρμογές τους".
- **Κορωναίος Χ.Ι., (2012).** "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας –Διδακτικές Σημειώσεις". Αθήνα.
- **Κουτίνας Γ., (1989).** "Σύγχρονες διεθνείς εξελίξεις στο χώρο της γεωθερμίας και η ελληνική πραγματικότητα". Ανακοιν. Διήμερο Τ.Ε.Ε. "Η αξιοποίηση του Ελληνικού Γεωθερμικού δυναμικού. Παρούσα κατάσταση και προοπτικές". Αθήνα.
- **Κουτσόπουλος Κ., (2005).** "Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Ανάλυση Χώρου". Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- **Laurini R. and Thompson D., (1992).** "Fundamentals of Spatial Information Systems". London: Academic Press.
- **Lee W.H.K. & Ueda S., (1965).** "Review of heat flow data" - In Lee W.H.K. "Terrestrial Heat flow". Geoph. Monograph. 8, 87-190.
- **Lindal B., (1992).** "Review of industrial applications of geothermal energy and future considerations". Geothermics Vol. 21, Issues 5-6, p. 591-604.
- **Maquire D.J., Goodchild M.F., Rhind D.W., (1991).** "Geographic Information Systems. Theory and Applications. Longman Scientific & Technical".
- **Μανιάτης Ι., (1996).** "Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών Γης και Κτηματολογίου". Εκδόσεις Ζήτη. Θεσσαλονίκη.
- **Μυστακίδης Ζ., (2014).** "Προβλήματα της Γεωθερμίας".
- **Νικολάου Σ., (2013).** "Χωροθετικός σχεδιασμός ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε περιβάλλον GIS: Η περίπτωση των αιολικών πάρκων της Κύπρου". Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα.
- **Ξενίδης Ι., (2006).** "Ανάλυση επικινδυνότητας έργων με σύμβαση παραχώρησης με τη χρήση της θεωρίας της ασάφειας". Διδακτορική Διατριβή. Α.Π.Θ.. Θεσσαλονίκη.
- **Papadias D., Theodoridis Y., (1997).** "Spatial Relations, Minimum Bounding Rectangles, and Spatial Data Structures". International Journal of Geographical Information Science 11(2): p.p. 111-138.

- **Παπαθεοδώρου Ν., (2007).** "Ανάπτυξη Συστήματος Υποστήριξης Χωρικών Αποφάσεων για τον εντοπισμό Γεωθερμικών Πεδίων, σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, με χρήση διαφορετικών Αναλυτικών Μεθόδων Εφαρμογή στο σύνολο του Ελλαδικού Χώρου". Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα.
- **Πολύζου Ο., (2007).** "Γεωθερμία – Βιώσιμη ανάπτυξη και τοπικές κοινωνίες". Διδακτορική διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα.
- **Riva G., Foppapedretti E., Carolis de C., Γιακουμέλος Ε, Μαλαματένιος Χ., Signanini P., Crema G., Fazio Di M., Gajdos J., Rucinsky R., (2005).** "Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας". Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ). Αθήνα.
- **Ross T.J., (1995).** "Fuzzy Logic with Engineering Applications". USA: McGraw-Hill Inc.
- **Tsoukalas L.H. & Uhrig, R.E., (1997).** "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering". New York: John Wiley & Sons Inc.
- **Τζάνη Α., (2010).** "Σημειώσεις για την έρευνα γεωθερμικών πεδίων". Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος. Αθήνα.
- **ΥΠΕΚΑ, (2008).** "Περιβαλλοντικός οδηγός Γεωθερμίας". Αθήνα.
- **ΥΠΕΚΑ, (2012).** "Εθνικός Ενεργειακός σχεδιασμός". Αθήνα.
- **White D.E., (1973).** "Characteristics of geothermal resources". In Kruger, P., Otte, C. "Geothermal Energy". Stanford University Press, Stanford, Cal., p.p. 69-94.
- **Worboys M.F., (1995).** "GIS-A computer perspective". London: Taylor & Francis.
- **Φυτίκας Μ., (2014).** "Γεωθερμία στην Ελλάδα :Δυναμικό, Εφαρμογές, Προοπτικές". ΕΕΠΠ. Σειρά Εισηγήσεων Βιοκλιματικού Σχεδιασμού "Γεωθερμία, η μεγάλη αγνοούμενη ΑΠΕ στην Ελλάδα". Αθήνα.
- **Φυτίκας Μ., Ανδρίτσος Ν., (2004).** "Γεωθερμία". Εκδόσεις Τζιόλα.
- **Φυτίκας Μ., Ανδρίτσος Ν., Δρακούλης Ρ., (2008).** "Γεωθερμία και τυποποίηση". Διήμερο Συμπόσιο για την Τυποποίηση. ΤΕΕ. Αθήνα.
- **Χαλκιός Χ., (2011).** "Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Συμπληρωματικές Σημειώσεις)". Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο. Τμήμα Γεωγραφίας. Αθήνα.
- **Χατζηχρήστος Θ., Μαρσέλη Κ., (2013).** "Τα βασικά του ARCGIS 10.1 για Desktop". Αθήνα.
- **Χρηστάνης Κ., (2001).** "Γεωθερμία". Πανεπιστήμιο Πατρών. Τμήμα Γεωλογίας. Πάτρα.
- **Zadeh L., (1965).** "Fuzzy Sets". Information and Control, Vol. 8, p.p. 338-353.

Διαδίκτυο

- <http://www.cres.gr>. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ).
- <http://www.egec.net/>. European Geothermal Energy Council (EGEC).

- <http://www.ener-supply.eu>. ENergy Efficiency and Renewables – SUPporting Policies in Local level for Energy, Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας - Υποστήριξη των Ενεργειακών Πολιτικών σε Τοπικό Επίπεδο (ENER SUPPLY).
- <http://www.energia.gr/>. Ηλεκτρονική ενημέρωση για θέματα ενέργειας.
- <http://www.geo-energy.org/>. Geothermal Energy Association (GEA).
- <http://geodata.gov.gr>. Ανοικτά γεωχωρικά δεδομένα και υπηρεσίες για την Ελλάδα.
- <http://iea-gia.org/>. International Energy Agency Geothermal Energy (IEA).
- <http://www.rae.gr>. Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ).
- <http://www.ypeka.gr/>. Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής.