

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΓΚΑΡΔΙΑΚΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΡΘΟΥΡΟΣ ΖΕΡΒΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους αυτούς τους ανθρώπους που συνέβαλαν στο να φέρω εις πέρας τη παρούσα διπλωματική εργασία. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή, κ. Αρθούρο Ζερβό, καθώς επίσης και τους συνεργάτες του, κ. Γιώργο Κάραλη και κ. Αντώνιο Σαλιάγκα για την καθοδήγησή τους. Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σωτήριο Καρέλλα και τον κ. Μιχαήλ Χλαμπουτάκη για τις πολύτιμες πληροφορίες που μου προσέφεραν και το χρόνο που μου αφιέρωσαν.

Η συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας σηματοδοτεί την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών και για αυτό το λόγο θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου σε όλα τα μέλη της οικογένειάς μου για την αμέριστη συμπαράσταση, κατανόηση και αγάπη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους φίλους και συμφοιτητές μου, και ιδιαίτερα την Ελένη Μαχαίρα, για την άμεση βοήθεια και ανιδιοτελή υποστήριξή τους καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μόλυνση του περιβάλλοντος, η αύξηση της ενεργειακής ζήτησης και τα μειονεκτήματα των ορυκτών καυσίμων, τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κόρον από τις αρχές του 20^{ου} 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 απαντήσεις στα παραπάνω προβλήματα. Έτσι λοιπόν, τη τελευταία εικοσαετία έχει σημειωθεί μεγάλη ανάπτυξη των τεχνολογιών και των διατάξεων αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά τη γεωθερμική ενέργεια, μία εκ των ανανεώσιμων πηγών, και τις ηλεκτροπαραγωγικές εφαρμογές της.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο, επισημαίνεται ο ρόλος τον οποίο διαδραματίζει η ενέργεια στη ζωή του ανθρώπου, τόσο στην επιβίωσή του, όσο και σε οποιαδήποτε άλλη δραστηριότητά του. Επίσης, παρουσιάζεται η σύγχρονη ενεργειακή ιστορία, από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα μέχρι και σήμερα, σημειώνεται η σταδιακή στροφή της παγκόσμιας ενεργειακής κοινότητας προς τις ανανεώσιμες πηγές και δίνεται ο ορισμός της γεωθερμικής ενέργειας.

Το δεύτερο κεφάλαιο, μετά από μία ιστορική ανασκόπηση των ανθρώπινων ανακαλύψεων και θεωριών πάνω στη γεωθερμία, αναλύει το τρόπο με τον οποίο δημιουργείται η θερμική ενέργεια στο εσωτερικό της γης, καθώς και τα αντίστοιχα φαινόμενα και δραστηριότητες που προκαλούνται στην επιφάνειά της. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η δομή του γεωθερμικού συστήματος και κατηγοριοποιούνται οι γεωθερμικοί πόροι βάση ορισμένων κριτηρίων. Τέλος, δικαιολογείται ο χαρακτηρισμός της γεωθερμίας ως ανανεώσιμη και αιεφόρα πηγή ενέργειας.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι διαδικασίες και οι μέθοδοι που ακολουθούνται για τον εντοπισμό και την έρευνα των γεωθερμικών πεδίων. Επίσης, παρατίθενται συνοπτικά όλα τα γεωθερμικά πεδία της Ελλάδας, ενώ ιδιαίτερη αναφορά γίνεται σε αυτά της Μήλου και της Νισύρου, τα οποία είναι τα μοναδικά πεδία υψηλής ενθαλπίας στην χώρα.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στις άμεσες και έμμεσες εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας. Περιλαμβάνει το χρονικό αξιοποίησής της από τον άνθρωπο, πίνακες με την εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύ των κρατών που δραστηριοποιούνται στο τομέα αυτό καθώς και ορισμένα παραδείγματα εφαρμογών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι επικρατέστερες διατάξεις αξιοποίησης της γεωθερμίας για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και αναλύεται διεξοδικά ο τρόπος λειτουργίας τους.

Στο έκτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια οικονομική ανάλυση των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιώντας τη γεωθερμία. Το συνολικό κόστος της ηλεκτρικής-γεωθερμικής ενέργειας διαχωρίζεται στο κόστος κύριας επένδυσης και στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης και παρουσιάζονται οι παράμετροι από τις οποίες εξαρτούνται τα κόστη αυτά.

Το έβδομο κεφάλαιο αποτελεί μια περιβαλλοντική μελέτη, στην οποία θίγονται όλες οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη κατασκευή και τη λειτουργία μιας γεωθερμικής μονάδας, ενώ παράλληλα προτείνονται οι κατάλληλες μέθοδοι για τη μείωση και εξάλειψη των επιπτώσεων αυτών.

Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής-γεωθερμικής ενέργειας, καθώς επίσης και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την οικονομική ανάλυση και τη μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Επίσης, παρατίθενται και τα τελικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1 Γενικά	9
1.2 Σύγχρονη ενεργειακή ιστορία	9
1.3 Το ενεργειακό μέλλον και η γεωθερμία.....	11
2. ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ	13
2.1 Ιστορική αναδρομή	13
2.2 Η θερμική κατάσταση στο εσωτερικό της γης.....	15
2.3 Γεωθερμικό σύστημα.....	19
2.4 Γεωθερμικοί πόροι.....	22
2.4.1 Κριτήριο ενθαλπίας	23
2.4.2 Κριτήριο γεωθερμικού μέσου	24
2.4.3 Κριτήριο μετάδοσης θερμότητας	25
2.4.4 Θερμά Ξηρά Πετρώματα.....	26
2.5 Η γεωθερμία ως ανανεώσιμη και αειφόρα πηγή ενέργειας.....	28
3. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ	31
3.1 Γεωθερμική έρευνα.....	31
3.1.1 Αντικείμενα γεωθερμικής έρευνας.....	31
3.1.2 Μέθοδοι έρευνας.....	32
3.1.3 Κατάρτιση του Ερευνητικού Προγράμματος.....	35
3.2 Ελληνικά γεωθερμικά πεδία	36
3.3 Μήλος.....	40
3.3.1 Γενικές πληροφορίες.....	40
3.3.2 Γεωθερμική δραστηριότητα.....	41
3.3.3 Έρευνα γεωθερμικού πεδίου	42
3.4 Νίσυρος.....	45
3.4.1 Γενικές πληροφορίες.....	45
3.4.2 Γεωθερμική δραστηριότητα.....	45
3.4.3 Έρευνα γεωθερμικού πεδίου	46

4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	49
4.1 Εισαγωγή	49
4.2 Ιστορική αναδρομή γεωθερμικών εφαρμογών.....	50
4.3 Σύγχρονες γεωθερμικές εφαρμογές	52
4.4 Παραδείγματα εφαρμογών	58
5. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ	63
5.1 Βασικές αρχές ηλεκτροπαραγωγής	63
5.2 Διατάξεις αξιοποίησης της γεωθερμίας για ηλεκτροπαραγωγή	64
5.2.1 Με χρήση ξηρού ατμού (dry steam)	64
5.2.2 Με στιγμιαία ατμοποίηση εργαζόμενου μέσου (flash steam)	67
5.2.3 Με ξεχωριστά εργαζόμενα μέσα (binary cycle)	69
5.2.4 Με χρήση συνδυασμένου κύκλου (combined cycle)	72
6. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	73
6.1 Εισαγωγή	73
6.2 Κόστος κύριας επένδυσης.....	73
6.2.1 Εξερεύνηση.....	74
6.2.2 Επιβεβαίωση.....	75
6.2.3 Έργα ανάπτυξης	76
6.3 Κόστος συντήρησης και λειτουργίας.....	81
6.3.1 Κόστος λειτουργίας	82
6.3.2 Κόστος συντήρησης.....	83
7. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ	85
7.1 Εισαγωγή	85
7.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	86
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η ενέργεια είναι άμεσα συνδεδεμένη με κάθε πτυχή της ζωής του ανθρώπου. Είναι απαραίτητη για τη θέρμανση, το δροσισμό, το φωτισμό των χώρων διαβίωσης, καθώς επίσης και για το μαγείρεμα και την αποθήκευση της τροφής. Η ενέργεια τροφοδοτεί ακόμα, τα μέσα μετακίνησης, τις βιομηχανίες, τους χώρους εργασίας και γενικά όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Στη σημερινή εποχή, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας προέρχεται από την εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων, όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, τα οποία αποτελούν άφθονες, άμεσα διαθέσιμες και συνεπώς φθηνές ενεργειακές πηγές.

Η εκμετάλλευση όμως, ενεργειακών πηγών χαρακτηρίζει τους ανθρώπινους πολιτισμούς πολύ πριν τη βιομηχανική επανάσταση και την ανακάλυψη των ορυκτών καυσίμων. Για εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια, οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν τη φωτιά του ξύλου για θέρμανση, φωτισμό και μαγείρεμα της τροφής τους. Αργότερα, η φωτιά χρησιμοποιήθηκε για την εξόρυξη και κατεργασία μετάλλων, καθώς και για την κατασκευή πήλινων αγγείων και οικοδομικών υλικών. Άλλες ενεργειακές πηγές, όπως ο αέρας και το τρεχούμενο νερό των ποταμών, χρησιμοποιήθηκαν για τη ναυσιπλοΐα και την επεξεργασία των σιτηρών αντίστοιχα.

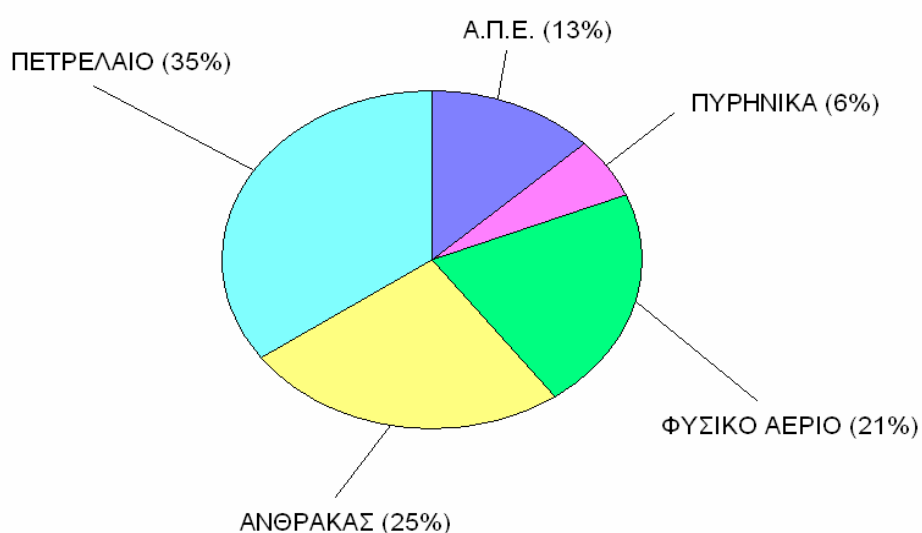
1.2 Σύγχρονη ενεργειακή ιστορία

Το τέλος του 19^{ου} αιώνα και η αρχή του 20^{ου} χαρακτηρίζονται από την ανάπτυξη του ηλεκτρισμού, της μηχανής εσωτερικής καύσης και τη χρήση του πετρελαίου. Τη περίοδο εκείνη ο άνθρωπος αξιοποιούσε την ενέργεια είτε άμεσα, με τη καύση πετρελαίου σε μηχανές, είτε έμμεσα, με την ηλεκτρική ενέργεια που παραγόταν από την καύση των ορυκτών καυσίμων. Στα μέσα του 20^{ου} αιώνα αναπτύσσονται τα ηλεκτρικά δίκτυα, τα οποία καθιστούν εφικτή τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας ακόμα και σε απομακρυσμένες περιοχές. Επίσης, με την ανακάλυψη των μεγάλων πετρελαϊκών πεδίων στη Μέση Ανατολή και τη Βόρειο Αφρική οι βιομηχανικές χώρες αρχίζουν να εξαρτώνται πλήρως από τη χρήση ορυκτών

καυσίμων για τη κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. Μια νέα ενεργειακή πηγή, η πυρηνική, αναπτύσσεται μετά το 2^ο παγκόσμιο πόλεμο συμβάλλοντας στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τη περίοδο αυτή τα ορυκτά καύσιμα ήταν άφθονα και φθηνά, ενώ ο άνθρωπος αγνοούσε παντελώς τις επιπτώσεις που είχε η καύση τους στο περιβάλλον.

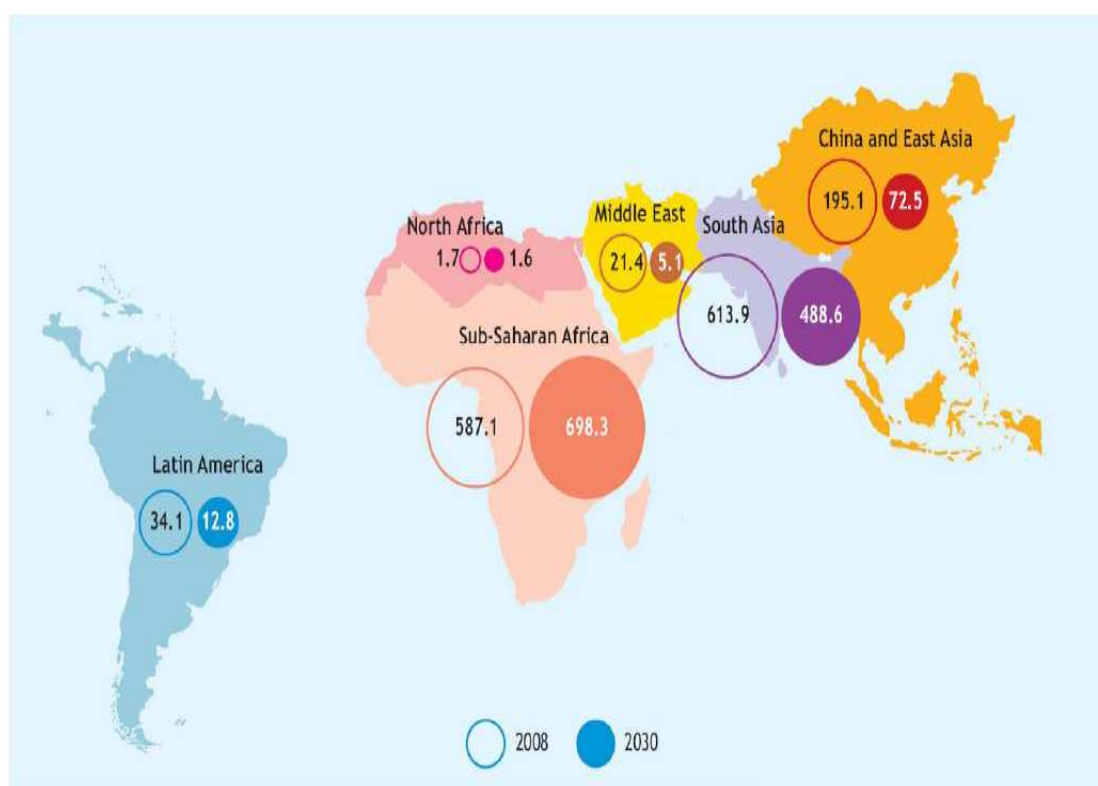
Από το τέλος της δεκαετίας του 1960 άρχισαν να αναγνωρίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της βιομηχανικής ανάπτυξης και ιδιαίτερα της καύσης των ορυκτών καυσίμων και ο άνθρωπος άρχισε να ευαισθητοποιείται στο θέμα της προστασίας του περιβάλλοντος. Η ευαισθητοποίηση αυτή σε συνδυασμό με τις ενεργειακές κρίσεις της δεκαετίας του 1970 οδήγησαν στην ανάπτυξη τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρισμού μέσω της εκμετάλλευσης ενεργειακά ανανεώσιμων πηγών. Η πτώση όμως των τιμών του πετρελαίου τη δεκαετία του 1980 και του μεγαλύτερου μέρους της δεκαετίας του 1990 λειτούργησε ανασταλτικά στην ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών, καθώς συνέχισε να προωθείται για οικονομικούς λόγους η εκμετάλλευση των συμβατικών πηγών ενέργειας [1].

Στη σημερινή εποχή, τα ορυκτά καύσιμα καλύπτουν περίπου το 81% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης. Μεταξύ αυτών το πετρέλαιο κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό (35%) και ακολουθεί ο άνθρακας (25%) με το φυσικό αέριο (21%). Το υπόλοιπο μερίδιο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1, αντιστοιχεί στις ανανεώσιμες πηγές και τη πυρηνική ενέργεια με 13% και 6% αντίστοιχα.



Σχήμα 1.1: Παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο, σύμφωνα με στοιχεία του 2004 [2]

Η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση εικοσαπλασιάστηκε από το 1850 μέχρι σήμερα, δεκαπλασιάστηκε από το 1900 και τετραπλασιάστηκε από το 1950. Να σημειώσουμε βέβαια, ότι το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης, κατά τη τελευταία εκατονταετία, έγινε στις ανεπτυγμένες βιομηχανικά χώρες, οι οποίες αποτελούν το 20% του παγκόσμιου πληθυσμού. Η ενεργειακή ζήτηση συνεχίζει ακόμα να αυξάνεται με υψηλούς ρυθμούς, καθώς όλο και περισσότερες χώρες εισέρχονται σε αναπτυξιακή τροχιά, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα όλο και μεγαλύτερο τμήμα του πληθυσμού της γης να βελτιώνει το βιοτικό του επίπεδο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το γεγονός ότι το 2008, 1,5 δισεκατομμύριο άνθρωποι δεν είχαν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια, ενώ ο αντίστοιχος αριθμός για το 2030 υπολογίζεται σε 1,3 δισεκατομμύρια (σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2: Πληθυσμός ανά τον κόσμο χωρίς πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια για το έτος 2008 και πρόβλεψη για το 2030 [3]

1.3 Το ενεργειακό μέλλον και η γεωθερμία

Έχοντας ως δεδομένο λοιπόν, τους υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης των χωρών και την ολοένα και αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση, ένα ενεργειακό μέλλον, το οποίο θα συνεχίσει να στηρίζεται στην εντατική εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων, θα παρουσιάσει μια σειρά από προκλήσεις και προβλήματα για την ανθρωπότητα. Τα

κυριότερα από αυτά, τα οποία ήδη διαφαίνονται στον ορίζοντα, 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. Η λύση στα παραπάνω προβλήματα είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, η αποκέντρωση της παραγωγής και το σημαντικότερο, η εισαγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη με όσο το δυνατόν υψηλότερο ποσοστό. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούνται από την ηλιακή, την αιολική και την υδροδυναμική ενέργεια, τη βιομάζα και τη γεωθερμία.

Η αξιοποίηση της γεωθερμίας για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αντικείμενο με το οποίο θα ασχοληθούμε εκτενέστερα στο παρόν κείμενο, παρουσιάζει ορισμένες ενδιαφέρουσες ιδιαιτερότητες και πλεονεκτήματα. Αρχικά, να σημειώσουμε ότι ως γεωθερμική ενέργεια ορίζεται η ενέργεια, υπό μορφή θερμότητας, που περιέχεται στο εσωτερικό της γης και είναι υπεύθυνη για την γένεση διαφόρων γεωλογικών φαινομένων σε παγκόσμια κλίμακα. Συνήθως όμως, ο όρος γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται σήμερα για να δηλώσει εκείνο το τμήμα της γήινης θερμότητας που μπορεί να ανακτηθεί και να αξιοποιηθεί από τον άνθρωπο. Με αυτή την έννοια λοιπόν, θα χρησιμοποιηθεί ο όρος αυτός από τώρα και στο εξής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η παρουσία ηφαιστείων, θερμών πηγών και άλλων επιφανειακών εκδηλώσεων θερμότητας είναι αυτή που οδήγησε τους προγόνους μας στο συμπέρασμα ότι το εσωτερικό της γης είναι θερμό. Όμως μόνο κατά την περίοδο μεταξύ του 16^{ου} και 17^{ου} αιώνα, όταν δηλαδή κατασκευάστηκαν τα πρώτα μεταλλεία, τα οποία ανορύχθηκαν σε βάθος μερικών εκατοντάδων μέτρων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, οι άνθρωποι, με τη βοήθεια κάποιων απλών φυσικών παρατηρήσεων, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία της γης αυξάνεται με το βάθος.

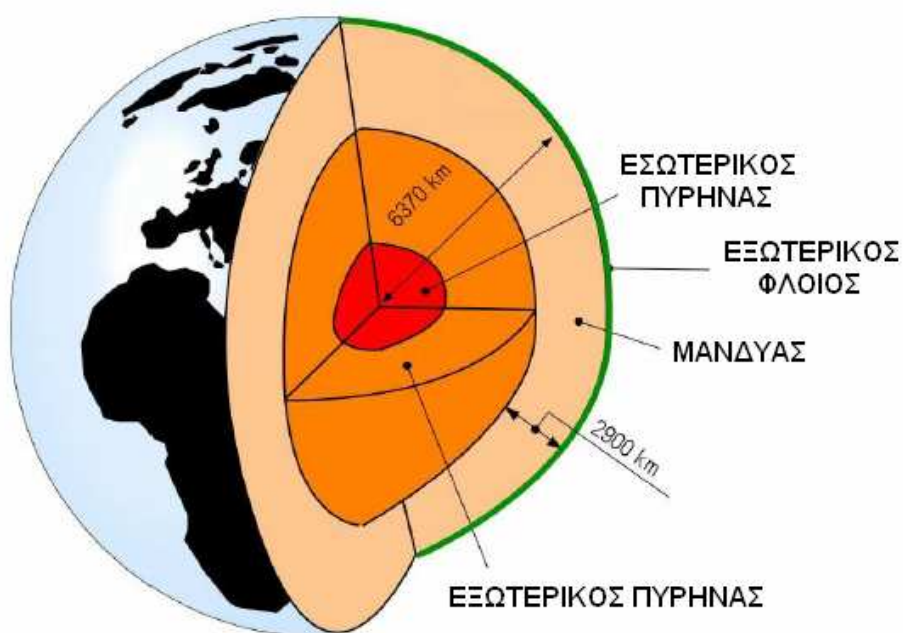
Οι πρώτες μετρήσεις με θερμόμετρο έγιναν κατά πάσα πιθανότητα το 1740 σε ένα ορυχείο κοντά στο Belfort της Γαλλίας [4]. Από το 1870 άρχισαν να χρησιμοποιούνται κάποιες προχωρημένες για την εποχή επιστημονικές μέθοδοι για τη μελέτη της θερμικής κατάστασης του εσωτερικού της γης. Τον 20ο αιώνα η θερμική αυτή κατάσταση, καθώς και η θερμική ισορροπία της γης κατανοήθηκαν καλύτερα με την ανακάλυψη του ρόλου που διαδραματίζει στη διαμόρφωσή τους η ραδιενεργή θερμότητα. Πράγματι, σε όλα τα σύγχρονα πρότυπα (μοντέλα) της θερμικής κατάστασης που επικρατεί στο εσωτερικό της γης πρέπει να συμπεριλαμβάνεται η θερμότητα που συνεχώς παράγεται από τη διάσπαση των μακράς διάρκειας ζωής ραδιενεργών ισοτόπων του ουρανίου (U238, U235), του θορίου (Th232) και του καλίου (K40) [5]. Εκτός όμως από τη ραδιενεργό θερμότητα, δρουν αθροιστικά σε απροσδιόριστες όμως ποσότητες και άλλες δυνητικές πηγές θερμότητας, όπως είναι η αρχέγονη ενέργεια από την εποχή δημιουργίας και μεγέθυνσης του πλανήτη. Μέχρι τη δεκαετία του 1980 τα μοντέλα αυτά δεν βασίζονταν σε κάποιες ρεαλιστικές θεωρίες. Τότε όμως αποδείχθηκε ότι αφενός μεν δεν υπάρχει ισοζύγιο μεταξύ της ραδιενεργής θερμότητας που δημιουργείται στο εσωτερικό της γης και της θερμότητας που διαφεύγει από τη γη προς το διάστημα και αφετέρου ότι ο πλανήτης μας ψύχεται με αργό ρυθμό στο εσωτερικό του.

Ως μια γενική ιδέα της φύσης και της κλίμακας του εμπλεκόμενου φαινομένου, μπορεί να αναφερθεί η θεωρία της θερμικής ισορροπίας της γης όπως διατυπώθηκε από τους Stacey και Loper το 1988 [6]. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, η ολική ροή θερμότητας από τη γη (αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία) εκτιμάται ότι ανέρχεται

στα $42 \times 10^{12} \text{W}$. Από αυτά, $8 \times 10^{12} \text{W}$ προέρχονται από το φλοιό, ο οποίος αντιπροσωπεύει μόνο το 2% του συνολικού όγκου της γης αλλά είναι πλούσιος σε ραδιενεργά ισότοπα, $32,3 \times 10^{12} \text{W}$ προέρχονται από το μανδύα, ο οποίος αντιπροσωπεύει το 82% του συνολικού όγκου της γης και $1,7 \times 10^{12} \text{W}$ προέρχονται από τον πυρήνα, ο οποίος αντιπροσωπεύει με τη σειρά του το 16% του συνολικού όγκου της γης και δεν περιέχει ραδιενεργά ισότοπα (σχήμα 2.1). Σύμφωνα με πιο πρόσφατες εκτιμήσεις και υπολογισμούς, που βασίζονται σε μεγαλύτερο αριθμό δεδομένων, η ολική θερμική ροή της γης είναι περίπου 6% υψηλότερη από τις τιμές που αναφέρονταν στη θεωρία των Stacey και Loper το 1988.

Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι η διαδικασία ψύξης του εσωτερικού της γης, την οποία αναφέραμε πιο πάνω, παραμένει πολύ αργή. Απόδειξη αποτελεί το γεγονός ότι η θερμοκρασία του μανδύα δεν έχει μειωθεί περισσότερο από $300\text{-}350^\circ\text{C}$ τα τελευταία 3 δισεκατομμύρια χρόνια παραμένοντας περίπου στους 4.000°C στη βάση του. Έχει υπολογιστεί ότι το συνολικό θερμικό περιεχόμενο της γης συνολικά είναι της τάξης των $12,6 \times 10^{24} \text{MJ}$ και του φλοιού $5,4 \times 10^{21} \text{MJ}$ [7].

Όπως λοιπόν προκύπτει από τα παραπάνω, η θερμική ενέργεια της γης είναι απέραντη, όμως μόνο τμήμα αυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί τελικά από τον άνθρωπο. Μέχρι σήμερα η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας έχει περιοριστεί σε περιοχές όπου οι γεωλογικές συνθήκες επιτρέπουν σε ένα μέσο (νερό σε υγρή ή αέρια φάση) να μεταφέρει τη θερμότητα από τις βαθιές θερμές ζώνες της γης στην επιφάνεια της ή κοντά σε αυτήν. Πιθανώς στο άμεσο μέλλον νέες πρωτοποριακές τεχνικές να μας προσφέρουν καινούργιες προοπτικές στον τομέα της εκμετάλλευσης.



Σχήμα 2.1: Ο Φλοιός, ο Μανδύας και ο Πυρήνας της γης [8]

2.2 Η θερμική κατάσταση στο εσωτερικό της γης

Ένα βασικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τη κλιμάκωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της γης είναι η γεωθερμική βαθμίδα ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$), η οποία ορίζεται ως ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το βάθος μέσα στο γήινο φλοιό. Σε βάθη που είναι προσβάσιμα με τις σύγχρονες γεωτρητικές μεθόδους, δηλαδή μέχρι τα 10.000m, η μέση γεωθερμική βαθμίδα κυμαίνεται περίπου στους 2,5-3 $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Για παράδειγμα, εάν η θερμοκρασία στα πρώτα μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους είναι κατά μέσο όρο ίση με τη μέση ετήσια θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα, δηλαδή στους 15 $^{\circ}\text{C}$, τότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία στο βάθος των 2.000m θα είναι περίπου 65-75 $^{\circ}\text{C}$, στα 3.000m θα είναι 90-105 $^{\circ}\text{C}$, και ούτω καθεξής για μερικά ακόμα χιλιάδες μέτρα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν πολλές περιοχές στις οποίες η γεωθερμική βαθμίδα αποκλίνει από τη μέση τιμή των 2,5-3 $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ που αναφέραμε πιο πάνω. Εκεί όπου το γεωλογικό υπόβαθρο έχει υποστεί πολύ γρήγορη βύθιση και η λεκάνη έχει πληρωθεί με γεωλογικά πολύ νέα ιζήματα, η γεωθερμική βαθμίδα μπορεί να είναι μικρότερη και από 1 $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Αντίθετα, σε μερικές περιοχές με έντονη γεωθερμική δραστηριότητα η τιμή της γεωθερμικής βαθμίδας μπορεί να είναι και δεκαπλάσια της μέσης γήινης.

Λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στα διάφορα στρώματα προκαλείται ροή θερμότητας από τις βαθιές και θερμές ζώνες του υπεδάφους προς τις ρηχές και ψυχρότερες, τείνοντας έτσι στη δημιουργία ομοιόμορφων συνθηκών. Στην πραγματικότητα όμως, όπως πολύ συχνά συμβαίνει στη φύση, κάτι τέτοιο ουδέποτε επιτυγχάνεται πλήρως. Η μέση γήινη ροή θερμότητας στις ηπειρούς και τους ωκεανούς είναι 65 και 101 mW/m^2 αντίστοιχα και υπολογίζοντας την έκταση των περιοχών, δίνουν ένα παγκόσμιο μέσο όρο της τάξης των 87 mW/m^2 [9]. Οι τιμές αυτές προέκυψαν μετά από 24.774 μετρήσεις σε 20.201 θέσεις, που καλύπτουν το 62% περίπου της γήινης επιφάνειας. Υπάρχουν βέβαια και κάποιοι εμπειρικοί υπολογισμοί που αναφέρονται σε γεωλογικές χαρτογραφικές μονάδες και επιτρέπουν την εκτίμηση της θερμικής ροής χωρίς να προηγηθούν μετρήσεις. Η ανάλυση της θερμικής ροής από τον Pollack και τους συνεργάτες του το 1993 είναι η πιο πρόσφατη και η μόνη σε έντυπη μορφή. Το Πανεπιστήμιο της Βόρειας Ντακότα, επιτρέπει σήμερα την πρόσβαση μέσω του Διαδικτύου σε μια ανανεωμένη βάση δεδομένων θερμικής ροής, που περιλαμβάνει στοιχεία τόσο από ωκεάνιες όσο και από ηπειρωτικές περιοχές [10].

Τα ηφαίστεια, οι θερμοπίδακες, οι φυσικές πηγές θερμού νερού καθώς και άλλες επιφανειακές γεωλογικές δραστηριότητες, αποτελούν κατά μία έννοια την ορατή εκδήλωση της θερμότητας του εσωτερικού της γης. Τα φαινόμενα αυτά αναφέρονται συνοπτικά στη θεωρία των τεκτονικών πλακών. Στη συνέχεια, θα

προσπαθήσουμε να τα περιγράψουμε με απλό τρόπο και να αναλύσουμε τη σχέση τους με τους γεωθερμικούς πόρους.

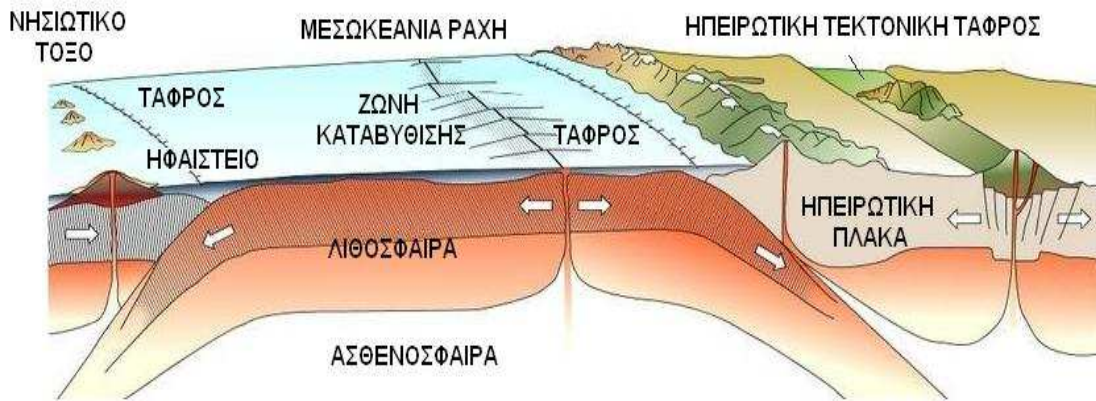
Ο πλανήτης μας αποτελείται από το φλοιό, το πάχος του οποίου κυμαίνεται από 20-65km στις ηπειρωτικές περιοχές και από 5-6km στις ωκεάνιες, από το μανδύα, με πάχος κατά προσέγγιση ίσο με 2.900km και από τον πυρήνα με ακτίνα περίπου 3.470km (σχήμα 2.1). Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του φλοιού, του μανδύα και του πυρήνα διαφέρουν καθώς κινούμαστε από την επιφάνεια προς το κέντρο της γης. Το εξωτερικό στερεό περίβλημα της γης, γνωστό ως λιθόσφαιρα, αποτελείται από το φλοιό και το ανώτερο τμήμα του μανδύα. Με μεταβαλλόμενο πάχος, από λιγότερο των 80km στις ωκεάνιες ζώνες και μέχρι πάνω από 200km στις ηπειρωτικές, η λιθόσφαιρα συμπεριφέρεται σαν ένα συμπαγές σώμα. Κάτω από τη λιθόσφαιρα βρίσκεται η ζώνη που ονομάζεται ασθενόσφαιρα, πάχους 200-300km, η οποία παρουσιάζει μια λιγότερο συμπαγή και περισσότερο πλαστική συμπεριφορά. Με άλλα λόγια, στη γεωλογική κλίμακα, όπου ο χρόνος μετριέται σε εκατομμύρια χρόνια, αυτό το τμήμα της γης συμπεριφέρεται πιο κοντά με ένα ρευστό σε κάποιες διαδικασίες.

Εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στα διάφορα τμήματα της ασθενόσφαιρας, δημιουργήθηκαν πριν από μερικές δεκάδες εκατομμύρια έτη μεταφορικές (συναγωγικές) κινήσεις μεταξύ της στερεάς βάσης αυτού του στρώματος και της βάσης του φλοιού και πιθανώς κάποιοι συναγωγικοί θύλακες. Οι κινήσεις αυτές θεωρούνται τα βασικά αίτια μετατόπισης των λιθοσφαιρικών πλακών. Είναι εξαιρετικά αργές (λίγα εκατοστά ανά έτος), αλλά παρόλα αυτά σταθερές λόγω της συνεχούς παραγωγής θερμότητας από τη διάσπαση των ραδιενεργών στοιχείων και της προσφοράς θερμότητας από τα μεγαλύτερα βάθη της γης. Λόγω των κινήσεων αυτών, τεράστιοι όγκοι βαθύτερων και θερμών λιωμένων πετρωμάτων, με μικρότερη πυκνότητα και συνεπώς μικρότερο βάρος, ανέρχονται προς την επιφάνεια, ενώ ψυχρότερα και βαρύτερα πετρώματα, που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια, βυθίζονται, αναθερμαίνονται και ανεβαίνουν πάλι στην επιφάνεια.

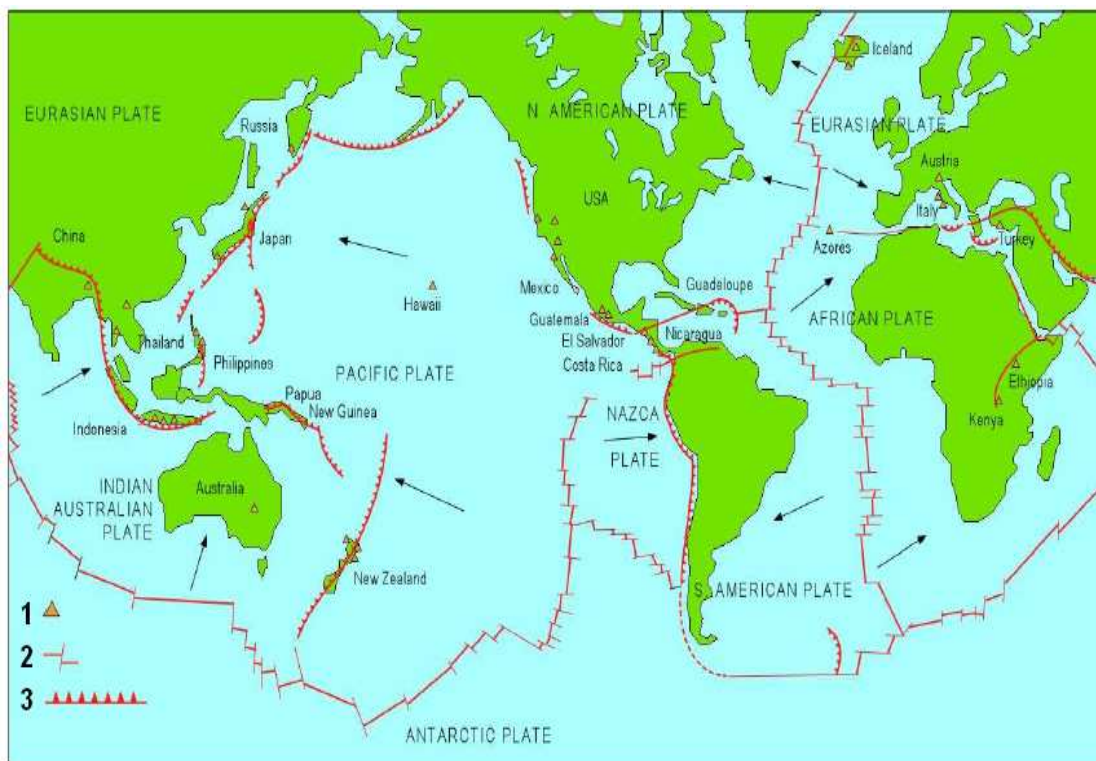
Στις ζώνες μικρού λιθοσφαιρικού πάχους, και κυρίως στις ωκεάνιες περιοχές, η λιθόσφαιρα ωθείται προς τα πάνω και στη συνέχεια, κατακερματίζεται εξαιτίας της ανόδου των θερμών, και εν μέρει λιωμένων, υλικών της ασθενόσφαιρας εκεί όπου σχηματίζεται ο ανερχόμενος κλάδος των συναγωγικών θαλάμων. Αυτός ακριβώς είναι ο μηχανισμός που δημιούργησε και συνεχίζει να δημιουργεί τις εκτεινόμενες ράχες, οι οποίες εκτείνονται σε μήκος μεγαλύτερο των 60km κάτω από τους ωκεανούς. Οι ράχες αυτές σε κάποιες περιοχές, όπως στις Αζόρες και την Ισλανδία, αναδύονται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ σε άλλες, όπως στην Ερυθρά Θάλασσα, αναδύονται ανάμεσα στις ηπείρους. Ένα σχετικά μικρό ποσοστό αυτών των ασθενοσφαιρικών λιωμένων υλικών αναδύονται στην επιφάνεια της γης μέσω των κορυφογραμμών των υποθαλάσσιων οροσειρών (ραχών) και ερχόμενα σε

επαφή με το θαλασσινό νερό ψύχονται, στερεοποιούνται και σχηματίζουν με τον τρόπο αυτό νέο ωκεάνιο φλοιό. Το μεγαλύτερο όμως μέρος του ασθenoσφαιρικού αυτού υλικού χωρίζεται σε δύο κλάδους, οι οποίοι κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις κάτω από τη λιθόσφαιρα, στη θέση ακριβώς των μεσωκεάνιων ραχών. Η συνεχής δημιουργία νέου φλοιού και η απόκλιση του ωκεάνιου πυθμένα με ένα ρυθμό της τάξης των λίγων εκατοστών ανά έτος προκαλεί συνεχή αύξηση της ωκεάνιας λιθόσφαιρας. Σε άλλα σημεία της λιθόσφαιρας σχηματίζονται τεράστιες κατακόρυφες διαρρήξεις, εκατέρωθεν των οποίων παρατηρείται οριζόντια μετακίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών. Οι διαρρήξεις αυτές μπορούν να φτάσουν σε μήκος μερικών χιλιάδων χιλιομέτρων και ονομάζονται ρήγματα μετασχηματισμού.

Τα φαινόμενα που είδαμε πιο πάνω οδηγούν στην παρακάτω εύστοχη θεώρηση. Αφού τελικά η συνολική επιφάνεια των λιθοσφαιρικών πλακών παραμένει περίπου σταθερή στο χρόνο, η συνεχής δημιουργία νέου φλοιού στις μεσωκεάνιες ράχες και το άνοιγμα των ωκεάνιων τμημάτων θα πρέπει να εξισορροπείται κατά κάποιον τρόπο με τη συρρίκνωση (καταστροφή) της λιθόσφαιρας σε άλλα σημεία της γης. Αυτό ακριβώς συμβαίνει στις λεγόμενες ζώνες καταβύθισης, οι μεγαλύτερες από τις οποίες καταδεικνύονται από τις τεράστιες σε έκταση ωκεάνιες τάφρους, όπως παραδείγματος χάρη αυτές που εκτείνονται κατά μήκος των δυτικών ορίων του Ειρηνικού Ωκεανού και των δυτικών ακτών της Νότιας Αμερικής. Στις ζώνες καταβύθισης η λιθόσφαιρα κάμπτεται και βυθίζεται κάτω από τα παρακείμενα στρώματα φθάνοντας μέσα στις πολύ θερμές και βαθιές ζώνες της, όπου αφομοιώνεται από το μανδύα. Μέρος του υλικού της λιθόσφαιρας επανατήκεται και ανεβαίνει πάλι προς την επιφάνεια μέσω των ρηγμάτων του φλοιού. Συνέπεια αυτών των φαινομένων είναι η δημιουργία μαγματικών τόξων με πολλά ηφαίστεια που εντοπίζονται παράλληλα προς τις τάφρους στην αντίθετη πλευρά των οροσειρών. Όταν οι τάφροι βρίσκονται κατά μήκος των ηπειρωτικών ορίων τότε τα μαγματικά τόξα αποτελούνται από αλυσίδες οροσειρών με πολλά ηφαίστεια, όπως είναι οι Άνδεις. Όταν οι τάφροι εντοπίζονται σε ωκεάνιες περιοχές, όπως στον Ειρηνικό ωκεανό, τα μαγματικά τόξα αποτελούνται από πολλά ηφαιστειακά νησιά, όπως η Ιαπωνία και οι Φιλιππίνες. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται ακριβώς αυτά τα φαινόμενα.



Σχήμα 2.2: Σχηματική τομή που δείχνει τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στις τεκτονικές πλάκες [8]



Σχήμα 2.3: Γεωθερμικά πεδία, τεκτονικές πλάκες, μεσωκεάνιες ράχες, ωκεάνιες τάφροι και ζώνες καταβύθισης. Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση κίνησης των λιθосφαιρικών 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 [8].

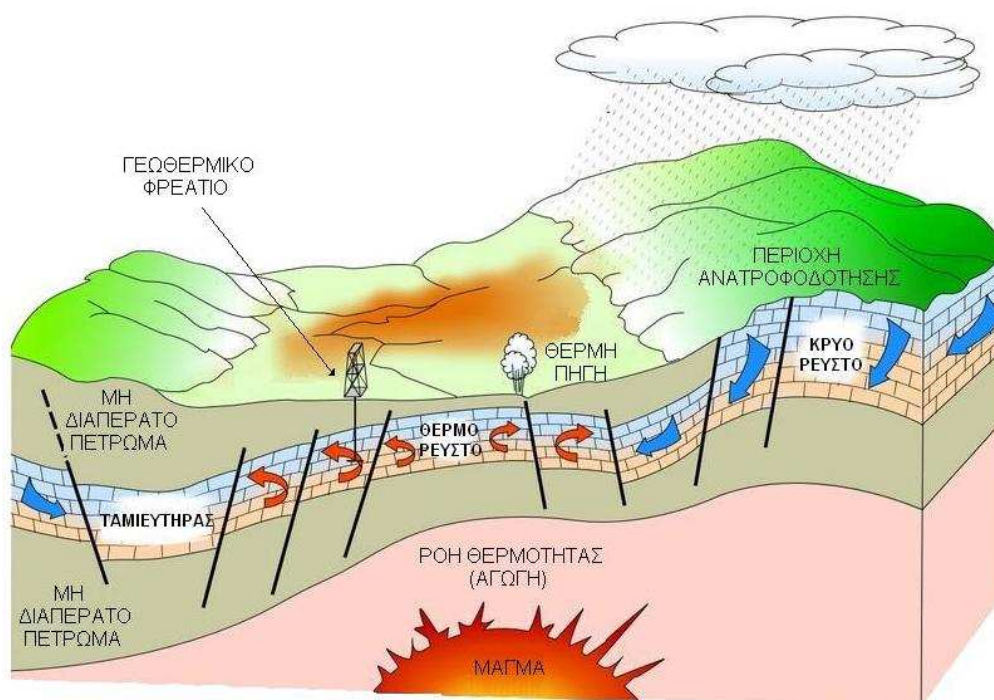
Οι μεσσωκεάνιες ράχες, τα ρήγματα μετασχηματισμού και οι ζώνες καταβύθισης σχηματίζουν ένα εκτεταμένο δίκτυο που χωρίζει την επιφάνεια της γης σε έξι τεράστιες και πολλές άλλες μικρότερες λιθοσφαιρικές περιοχές ή καλύτερα πλάκες. Εξαιτίας των τεράστιων τάσεων που προκαλούνται από την ασυμμετρία των ζωνών που δημιουργούν και καταστρέφουν λιθοσφαιρικό υλικό, οι πλάκες αυτές κινούνται αργά η μία προς την άλλη αλλάζοντας συνεχώς τη σχετική τους θέση. Τα όρια των πλακών αντιστοιχούν σε μεγάλου μεγέθους διαρρηγμένες ζώνες του φλοιού που χαρακτηρίζονται από έντονη σεισμικότητα, μεγάλο αριθμό ηφαιστείων και από υψηλή ροή θερμότητας από το εσωτερικό της γης προς την επιφάνεια, λόγω της ανόδου πολύ θερμών υλικών προς την επιφάνεια. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 πιο πάνω, οι πιο σημαντικές γεωθερμικές περιοχές εντοπίζονται κοντά στα όρια αυτών των πλακών [8].

2.3 Γεωθερμικό σύστημα

Ως γεωθερμικό σύστημα ορίζουμε ένα γεωλογικό σχηματισμό με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, μέσα στον οποίο είναι αποθηκευμένη η γεωθερμική ενέργεια. Τα γεωθερμικά συστήματα εντοπίζονται σε περιοχές με κανονική ή με λίγο μεγαλύτερη από τη μέση γήινη γεωθερμική βαθμίδα και κυρίως γύρω από τα όρια των τεκτονικών πλακών, όπου η βαθμίδα μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερη της μέσης τιμής. Στην πρώτη περίπτωση, τα γεωθερμικά συστήματα χαρακτηρίζονται από χαμηλές θερμοκρασίες που συνήθως δεν ξεπερνούν τους 100°C, ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι θερμοκρασίες μπορεί να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, από σχετικά χαμηλές τιμές μέχρι και μεγαλύτερες, της τάξεως των 400°C.

Το γεωθερμικό σύστημα μπορεί να περιγραφεί ως ένα σύστημα που βρίσκεται σε περιορισμένο χώρο στον ανώτερο φλοιό της γης. Στο εσωτερικό του υπάρχει κινούμενο νερό, το οποίο μεταφέρει θερμότητα από μια πηγή σε μια δεξαμενή θερμότητας, η οποία συνήθως είναι μια ελεύθερη επιφάνεια [11]. Έτσι λοιπόν, ένα γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από τα εξής τρία στοιχεία: την εστία θερμότητας, τον ταμιευτήρα και το γεωθερμικό ρευστό, το οποίο λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας. Η εστία θερμότητας μπορεί να είναι είτε μια πολύ υψηλής θερμοκρασίας (>600°C) μαγματική διείσδυση που έχει φτάσει σε σχετικά μικρά βάθη (5-10km) είτε, στα χαμηλής θερμοκρασίας συστήματα, η κανονική θερμοκρασία των πετρωμάτων του εσωτερικού της γης, η οποία όπως έχει αναφερθεί αυξάνεται με το βάθος. Ο ταμιευτήρας είναι ένας σχηματισμός από θερμά υδατοπερατά πετρώματα, που επιτρέπουν την κυκλοφορία των ρευστών και από τα οποία το ρευστό αντλεί θερμότητα. Πάνω από τον ταμιευτήρα βρίσκεται συνήθως ένα κάλυμμα αδιαπέρατων πετρωμάτων. Ο ταμιευτήρας πολλές φορές συνδέεται με μια επιφανειακή περιοχή

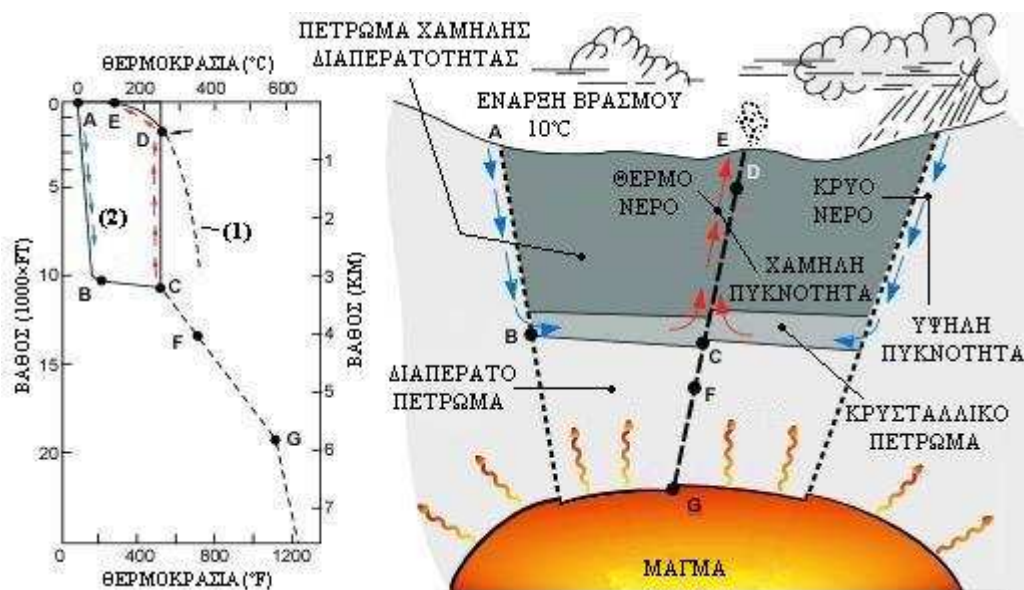
τροφοδοσίας, δια μέσου της οποίας βρόχινο και γενικά επιφανειακό νερό κατεβαίνει και αντικαθιστά μερικώς ή ολικώς τα ρευστά που φεύγουν από τον ταμιευτήρα και εξέρχονται στην επιφάνεια με τη μορφή θερμών πηγών ή αντλούνται μέσω γεωτρήσεων. Το γεωθερμικό ρευστό είναι νερό, το οποίο ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στον ταμιευτήρα βρίσκεται σε υγρή ή αέρια φάση. Συχνά το ρευστό είναι εμπλουτισμένο με χημικά στοιχεία και αέρια, όπως CO₂, H₂S και άλλα. Στο σχήμα 2.4 αποτυπώνεται σε πολύ απλουστευμένη μορφή ένα πρότυπο γεωθερμικό σύστημα.



Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση ενός ιδανικού γεωθερμικού συστήματος [8]

Ο μηχανισμός που διέπει τη λειτουργία του γεωθερμικού συστήματος εν γένει ελέγχεται από τη μεταφορά θερμότητας μέσω της κυκλοφορίας των ρευστών. Στο σχήμα 2.5 παριστάνεται σχηματικά ο μηχανισμός ενός υδροθερμικού συστήματος ενδιάμεσης θερμοκρασίας. Η θερμική συναγωγή λαμβάνει χώρα λόγω της θέρμανσης και, κατ' επέκταση, της θερμικής διαστολής των ρευστών σε ένα πεδίο βαρύτητας. Η ενέργεια που προκαλεί το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι ουσιαστικά η θερμότητα που προσφέρεται από την εστία στη βάση του συστήματος κυκλοφορίας. Η πυκνότητα των ρευστών που θερμαίνονται μειώνεται, οπότε παρουσιάζουν τάσεις ανόδου προς μικρότερα βάθη, ενώ αντικαθίστανται στη συνέχεια από ρευστά μικρότερης θερμοκρασίας και μεγαλύτερης πυκνότητας που προέρχονται από τα όρια του γεωθερμικού συστήματος. Λόγω λοιπόν της θερμικής συναγωγής,

προκαλείται θερμοκρασιακή αύξηση στο ανώτερο τμήμα του γεωθερμικού συστήματος, καθώς οι θερμοκρασίες στα κατώτερα τμήματα μειώνονται.



Σχήμα 2.5: Πρότυπο μοντέλο ενός γεωθερμικού συστήματος. 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 Α (τροφοδοσία) προς το σημείο Ε (αποφόρτιση) [12].

Οι διεργασίες που μόλις περιγράφηκαν πιθανώς να φαίνονται πολύ απλές, όμως η κατασκευή ενός καλού πρότυπου μοντέλου, το οποίο να αντιστοιχεί σε ένα πραγματικό γεωθερμικό σύστημα, είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί. Μια τέτοια εργασία απαιτεί πολύπλευρες ικανότητες, ειδικές γνώσεις και μεγάλη εμπειρία, ιδιαίτερα όταν αφορά συστήματα υψηλής θερμοκρασίας. Εξάλλου, τα γεωθερμικά συστήματα εμφανίζονται στη φύση με πάρα πολλές ιδιαιτερότητες και ιδιομορφίες, οι οποίες σχετίζονται με διάφορους συνδυασμούς γεωλογικών, φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών που μπορεί να οδηγήσουν σε διάφορους τύπους συστημάτων.

Από τα τρία στοιχεία ενός γεωθερμικού συστήματος, η εστία θερμότητας είναι το μόνο που απαραίτητως πρέπει να έχει φυσική προέλευση. Εάν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές, τα άλλα δύο στοιχεία μπορεί να είναι και τεχνητά. Για παράδειγμα, τα γεωθερμικά ρευστά που αντλούνται από τον ταμιευτήρα και χρησιμοποιούνται ως η κινητήρια δύναμη μιας γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν μετά την ενεργειακή εκμετάλλευσή τους να επανεισαχθούν στον ταμιευτήρα μέσω συγκεκριμένων γεωτρήσεων επανεισαγωγής. Με αυτό το τρόπο η φυσική τροφοδοσία ενός ταμιευτήρα μπορεί να συνοδευθεί ή και να αντικατασταθεί από μια τεχνητή επανατροφοδοσία.

Εδώ και αρκετά χρόνια η τεχνική επανεισαγωγής των ρευστών στον ταμιευτήρα εφαρμόζεται σε πολλές περιοχές του κόσμου ως ένα μέσο δραστηκής μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη λειτουργία των γεωθερμικών εγκαταστάσεων. Η τεχνική αυτή μπορεί επίσης να βοηθήσει στη συντήρηση κάποιων παλιών ή και εξαντλημένων γεωθερμικών πεδίων. Ως παράδειγμα, αναφέρεται η περίπτωση του γεωθερμικού πεδίου Geysers της Καλιφόρνιας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (Η.Π.Α.), το οποίο είναι ένα από τα μεγαλύτερα γεωθερμικά πεδία στον κόσμο. Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 παρατηρήθηκε στο γεωθερμικό αυτό πεδίο δραστηκή μείωση της παραγωγής λόγω έλλειψης ρευστών στον ταμιευτήρα, γεγονός που οφειλόταν στην εκτεταμένη εκμετάλλευση του πεδίου. Το 1997 ξεκίνησε ένα πρόγραμμα (Southeast Geysers Effluent Recycling Project) που αποσκοπούσε στη μεταφορά επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων στο γεωθερμικό πεδίο από μια απόσταση 48km. Το πρόγραμμα αυτό οδήγησε στην επαναλειτουργία αρκετών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες είχαν εγκαταλειφθεί εξαιτίας της έλλειψης ρευστών. Στα πλαίσια ενός αντίστοιχου προγράμματος (Santa Rosa Geysers Recharge Project) 41,5 εκατομμύρια λίτρα επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων θα αντλούνται κάθε μέρα από τους τοπικούς σταθμούς επεξεργασίας της Santa Rosa και άλλων γειτονικών πόλεων και θα μεταφέρονται, μέσω ενός δικτύου σωληνώσεων συνολικού μήκους 66km, στο γεωθερμικό πεδίο Geysers, όπου θα χρησιμοποιούνται για την επανατροφοδοσία του ταμιευτήρα διαμέσου ειδικών γεωτρήσεων.

2.4 Γεωθερμικοί πόροι

Ως γεωθερμικός πόρος ορίζεται ουσιαστικά η θερμική ενέργεια (δυναμικό) που βρίσκεται αποθηκευμένη κάτω από μια συγκεκριμένη περιοχή, μεταξύ της επιφάνειας της γης και ενός ορισμένου βάθους στο φλοιό. Ο ωφέλιμος και προσβάσιμος γεωθερμικός πόρος αναφέρεται στο τμήμα της ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί με νόμιμο και οικονομικά συμφέροντα τρόπο κάποια στιγμή στο σχετικά άμεσο μέλλον, δηλαδή μέσα σε λιγότερο από 100 χρόνια. Ο οικονομικά επωφελής γεωθερμικός πόρος αποτελεί μέρος του ωφέλιμου και προσβάσιμου πόρου. Αυτού του είδους οι γεωθερμικοί πόροι είναι γνωστοί και ως αποθέματα και αναφέρονται στη ποσότητα της γεωθερμικής ενέργειας μιας συγκεκριμένης περιοχής, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί με ανταγωνιστικό κόστος σε σχέση με τις άλλες πηγές ενέργειας. Οι πόροι αυτοί έχουν εξερευνηθεί και αξιολογηθεί με τη βοήθεια γεωτρητικών, γεωχημικών και άλλων γεωλογικών ερευνών και μελετών [13]. Πιο κάτω, στο πίνακα 2.1, δίνεται η εκτίμηση του παγκόσμιου γεωθερμικού δυναμικού.

Πίνακας 2.1: Εκτίμηση παγκόσμιου γεωθερμικού δυναμικού ανά κατηγορία [1]

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ [Exajoules]
Θεωρητικό δυναμικό (βάθος 5km)	140.000.000
Διαθέσιμο δυναμικό	600.000
Ωφέλιμο και προσβάσιμο δυναμικό	5.000
Οικονομικά επωφελές δυναμικό	500

Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε ότι, όσον αφορά τους γεωθερμικούς πόρους, δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη και διεθνώς καθιερωμένη ορολογία που να χρησιμοποιείται από το σύνολο της γεωθερμικής κοινότητας ώστε να διευκολύνεται η αμοιβαία κατανόηση και συνεννόηση. Οπότε στη συνέχεια του κεφαλαίου παρατίθενται μερικοί από τους πλέον κοινώς χρησιμοποιούμενους ορισμούς και ταξινομήσεις των γεωθερμικών πόρων.

2.4.1 Κριτήριο ενθαλπίας

Το πλέον συνηθισμένο κριτήριο για την ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων είναι αυτό που βασίζεται στην ενθαλπία των γεωθερμικών ρευστών, τα οποία λειτουργούν ως φορέας της θερμότητας μεταφέροντάς τη από τα βαθιά και θερμά πετρώματα προς την επιφάνεια. Η ενθαλπία, η οποία σε γενικές γραμμές θεωρείται ανάλογη της θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται για να εκφράσει την περιεχόμενη θερμική ενέργεια των ρευστών και δίνει μια γενική εικόνα της ενεργειακής αξίας τους. Έτσι λοιπόν, οι γεωθερμικοί πόροι σύμφωνα κυρίως με το ενεργειακό τους περιεχόμενο αλλά και με τις πιθανές μορφές αξιοποίησής τους διακρίνονται σε χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας. Στον πίνακα 2.1 αναφέρονται οι χαρακτηριστικοί τρόποι ταξινόμησης, όπως αυτοί προτάθηκαν από διάφορους συγγραφείς. Είναι προφανές πως μια κοινώς αποδεκτή μέθοδος ταξινόμησης θα βοηθούσε στην αποφυγή συγχύσεων και παρεξηγήσεων. Όμως μέχρι να γίνει αυτό θα πρέπει κάθε φορά και κατά περίπτωση να δηλώνονται οι τιμές των θερμοκρασιών ή το εύρος τους, διότι όροι όπως χαμηλή, ενδιάμεση ή υψηλή δεν έχουν πάντα την ίδια ερμηνεία και πολλές φορές είναι παραπλανητικοί.

Πίνακας 2.2: Ταξινόμηση γεωθερμικών πόρων (°C)

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

Πηγή: (1) Muffler and Cataldi [13]

(2) Hochstein [11]

(3) Benderitter and Cormy [14]

(4) Nicholson [15]

(5) Axelsson and Gunnlaugsson [16]

2.4.2 Κριτήριο γεωθερμικού μέσου

Συχνά η ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων γίνεται με βάση τη σύσταση του γεωθερμικού μέσου, το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μίγμα υγρού και αέριου νερού. Σε αυτή τη περίπτωση λοιπόν, διακρίνονται δύο είδη γεωθερμικών πόρων, αυτοί στους οποίους το κυρίαρχο ρευστό είναι το νερό στην υγρή φάση (liquid dominated systems) και αυτοί στους οποίους το κυρίαρχο ρευστό είναι το νερό στην αέρια φάση (vapour dominated systems ή dry steam systems).

Στα γεωθερμικά συστήματα που κυριαρχεί η υγρή φάση του νερού, αυτή είναι που ελέγχει συνεχώς την πίεση. Μέσα στην υγρή αυτή φάση μπορεί να περιέχονται και κάποια αέρια με τη μορφή μικρών φυσαλίδων. Σε αυτά τα γεωθερμικά συστήματα οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 125°C έως 225°C και είναι τα πλέον συνηθισμένα παγκοσμίως. Ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, μπορούν να παράγουν θερμό νερό, μίγμα υγρού και αέριου νερού, υγρό ατμό, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις ξηρό ατμό.

Στα συστήματα που κυριαρχεί η αέρια φάση του νερού, οι δύο φάσεις (υγρή και αέρια) συνήθως συνυπάρχουν στον ταμιευτήρα με την αέρια όμως να λειτουργεί ως η φάση που ελέγχει συνεχώς την πίεση. Αυτού του τύπου τα γεωθερμικά συστήματα είναι υψηλής θερμοκρασίας και κατά κύριο λόγο παράγουν ξηρό έως υπέρθερμο ατμό. Είναι κατά βάση σπάνια και τα πιο γνωστά αυτού του τύπου βρίσκονται στο Larderello της Ιταλίας και στο Geysers της Καλιφόρνια (Η.Π.Α.) [11].

Οι όροι υγρός, ξηρός και υπέρθερμος ατμός, οι οποίοι χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά, χρειάζονται ίσως κάποιες επιπλέον επεξηγήσεις ώστε να

αποσαφηνιστούν και να εντοπιστούν οι μεταξύ τους διαφορές. Για να γίνει όσο το δυνατόν απλούστερο και κατανοητό, θα χρησιμοποιήσουμε το παράδειγμα ενός δοχείου γεμάτο με νερό, μέσα στο οποίο η πίεση μπορεί να κρατηθεί σταθερή και ίση με 1atm (101,3kPa). Εάν θερμάνουμε το νερό, τότε μόλις φτάσει στη θερμοκρασία των 100°C (σημείο ζέσεως για πίεση ίση με 1atm) θα αρχίσει να βράζει και να περνά από την υγρή στην αέρια φάση. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα μέσα στο δοχείο, το υγρό και ο ατμός θα συνυπάρχουν, θα βρίσκονται δηλαδή σε θερμοδυναμική ισορροπία, αποτελώντας ουσιαστικά τον υγρό ατμό. Αν συνεχίσουμε να θερμαίνουμε το δοχείο, διατηρώντας την πίεση στη 1atm, το υγρό θα εξατμιστεί εντελώς και τελικά το δοχείο θα περιέχει μόνο ατμό. Ο ατμός αυτός αποκαλείται ξηρός ατμός. Επιπλέον, να αναφέρουμε ότι ο υγρός και ο ξηρός ατμός αποκαλούνται επίσης και κορεσμένοι ατμοί. Τέλος, αυξάνοντας κι άλλο τη θερμοκρασία, μέχρι τους 120°C για παράδειγμα και συνεχίζοντας να διατηρούμε την πίεση σταθερή, θα πάρουμε υπέρθερμο ατμό με υπερθέρμανση 20°C πάνω από τη θερμοκρασία ζέσεως στις συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης. Τα ίδια σε γενικές γραμμές φαινόμενα αλλά σε διαφορετικά μεγέθη και υπό διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας λαμβάνουν χώρα και στο υπέδαφος.

2.4.3 Κριτήριο μετάδοσης θερμότητας

Ένας άλλος διαχωρισμός των γεωθερμικών πόρων είναι αυτός που βασίζεται στην κατάσταση ισορροπίας του ταμιευτήρα. Αυτός ο διαχωρισμός έχει ως κριτήριο τη κυκλοφορία του γεωθερμικών μέσου στο ταμιευτήρα και το μηχανισμό μεταφοράς της θερμότητας [15].

Στα δυναμικά συστήματα ο ταμιευτήρας τροφοδοτείται συνεχώς με νερό το οποίο και θερμαίνεται. Στη συνέχεια, ο ταμιευτήρας αποφορτίζεται είτε γιατί το θερμό ρευστό ανέβηκε μέχρι την επιφάνεια, είτε γιατί άρχισε να γεμίζει τους υδατοπερατούς υπόγειους σχηματισμούς. Η θερμότητα μεταφέρεται στο σύστημα μέσω του μηχανισμού της συναγωγής και της κυκλοφορίας του ρευστού. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει συστήματα τόσο υψηλής (>150°C), όσο και χαμηλής (<100°C) θερμοκρασίας.

Στα στατικά συστήματα, γνωστά και ως στάσιμα ή συστήματα αποθήκευσης, παρατηρείται ελάχιστη ή και μηδενική τροφοδοσία του ταμιευτήρα και η μεταφορά θερμότητας γίνεται μόνο με τη βοήθεια του μηχανισμού αγωγής. Αυτή είναι και η ειδοποιός διαφορά των στατικών από τα δυναμικά συστήματα. Η συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνει τα χαμηλής θερμοκρασίας και τα γεωπεπαισμένα συστήματα. Γεωπεπαισμένα συστήματα έχουν προσδιοριστεί σε μεγάλες ιζηματογενείς λεκάνες (π.χ. στον Κόλπο του Μεξικού, Η.Π.Α.) σε βάθη 3-7km. Οι γεωπεπαισμένοι ταμιευτήρες αποτελούνται από περατά ιζηματογενή πετρώματα που

βρίσκονται ανάμεσα σε αδιαπέρατα, χαμηλής αγωγιμότητας, στρώματα και περιέχουν πεπιεσμένο θερμό νερό που εγκλωβίστηκε εκεί κατά την περίοδο δημιουργίας των λεκανών και απόθεσης των ιζημάτων. Η πίεση του θερμού νερού υπερβαίνει κατά πολύ την υδροστατική και προσεγγίζει τη λιθοστατική. Οι γεωπεπιεσμένοι ταμιευτήρες μπορούν επίσης να περιέχουν σημαντικές ποσότητες μεθανίου ή άλλων υδρογονανθράκων, οπότε μπορούν να παράγουν θερμική και υδραυλική ενέργεια (πεπιεσμένο θερμό νερό) καθώς και αέριο μεθάνιο. Τέτοιοι ενεργειακοί πόροι έχουν υποστεί εκτεταμένη έρευνα, αλλά μέχρι στιγμής δεν υπήρξε κάποια βιομηχανική αξιοποίησή τους.

2.4.4 Θερμά Ξηρά Πετρώματα

Μια ιδιαίτερη κατηγορία γεωθερμικών πόρων αποτελούν τα θερμά ξηρά πετρώματα τα οποία μπορούν να περιγραφούν ως ένας θερμός γεωλογικός σχηματισμός. Η ειδοποιός διαφορά τους από τους υπόλοιπους γεωθερμικούς πόρους και από το τυπικό γεωθερμικό σύστημα είναι η απουσία γεωθερμικού μέσου και ταμιευτήρα.

Για την αξιοποίηση λοιπόν των θερμών ξηρών πετρωμάτων γίνεται, μέσω ειδικών γεωτρήσεων, τεχνητή εισαγωγή νερού με υψηλή πίεση σε ένα θερμό και συμπαγές πέτρωμα, το οποίο βρίσκεται σε μεγάλο βάθος. Η υψηλή πίεση του νερού προκαλεί στο πέτρωμα υδραυλική διάρρηξη. Το νερό διαπερνά τις τεχνητές διαρρήξεις και ερχόμενο σε επαφή με τις μεγάλες επιφάνειες θερμού πετρώματος αντλεί θερμότητα από αυτόν τον μεγάλο σε όγκο σχηματισμό, ο οποίος λειτουργεί ως ένας φυσικός ταμιευτήρας. Στη συνέχεια, ο ταμιευτήρας διαπερνάται από μια δεύτερη γεώτρηση μέσα από την οποία αντλείται το νερό που θερμάνθηκε. Συνοψίζοντας λοιπόν, το συγκεκριμένο γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από την ειδική γεώτρηση που χρησιμοποιείται για την υδραυλική διάρρηξη, τον τεχνητό ταμιευτήρα ο οποίος τροφοδοτείται με κρύο νερό υψηλής πίεσης και από τη γεώτρηση άντλησης του θερμού νερού. Όλο αυτό το σύστημα μαζί με τις αντίστοιχες εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης στην επιφάνεια, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.6, σχηματίζουν ένα κλειστό κύκλωμα [17].



Σχήμα 2.6: Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος θερμών ξηρών πετρωμάτων [8]

Οι πρώτες πειραματικές δοκιμές αξιοποίησης των θερμών ξηρών πετρωμάτων έγιναν το 1970 στο Los Alamos του Νέου Μεξικού (ΗΠΑ), το ερευνητικό πρόγραμμα του οποίου αποτέλεσε πρόδρομο και για άλλες παρόμοιες εφαρμογές σε διάφορες χώρες όπως την Αυστραλία, Γαλλία, Γερμανία, Ιαπωνία και τη Μεγάλη Βρετανία. Οι εφαρμογές αυτές, αφού βέβαια μεσολάβησε μια περίοδος μειωμένου επιστημονικού ενδιαφέροντος ως προς τη αξιοποίηση των θερμών ξηρών πετρωμάτων, απέκτησαν νέα ώθηση. Η ώθηση αυτή οφείλεται στην ανακάλυψη ότι τα βαθιά πετρώματα έχουν ήδη κάποιες περιορισμένες φυσικές διαρρήξεις και στο ότι οι τεχνικές και η μεθοδολογία που πρέπει να χρησιμοποιηθεί εξαρτώνται κατά πολύ από τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες.

Οι πιο εξελιγμένες επιστημονικά και τεχνολογικά έρευνες στον τομέα των θερμών ξηρών πετρωμάτων πραγματοποιήθηκαν στην Ιαπωνία και στο ευρωπαϊκό πρόγραμμα της Αλσατίας (Γαλλία). Πολλά προγράμματα που ξεκίνησαν στην Ιαπωνία τη δεκαετία του 1980 (στις περιοχές Hijiori, Ogachi και Yunomori) είχαν σημαντική χρηματοδότηση από την ιαπωνική κυβέρνηση και τη βιομηχανία και κατέληξαν σε ενδιαφέροντα αποτελέσματα, τόσο από επιστημονική, όσο και από βιομηχανική άποψη. Το αντίστοιχο ευρωπαϊκό πρόγραμμα εφαρμόστηκε σε διάφορες φάσεις και περιέλαβε την κατασκευή δύο γεωτρήσεων, η μία εκ των οποίων

έφτασε σε βάθος 5.060m. Οι υδραυλικές δοκιμές και μετρήσεις, όπως εξάλλου και οι γεωφυσικές έρευνες, κατέληξαν σε θετικά και πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα. Έτσι λοιπόν, το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα στο τομέα των θερμών ξηρών πετρωμάτων φαίνεται να είναι για την ώρα το πιο πετυχημένο [18].

2.5 Η γεωθερμία ως ανανεώσιμη και αιεφόρα πηγή ενέργειας

Επειδή η γεωθερμική ενέργεια περιγράφεται ως ανανεώσιμη και αιεφόρα, είναι σημαντικό να διαχωρίσουμε τις δύο αυτές έννοιες. Ο όρος ανανεώσιμη περιγράφει μια ιδιότητα του ενεργειακού πόρου, ενώ η αιεφορία τον τρόπο με τον οποίο αυτός αξιοποιείται.

Το πιο σημαντικό κριτήριο για την κατάταξη της γεωθερμικής ενέργειας στις ανανεώσιμες πηγές είναι ο ρυθμός επαναφόρτισης του ενεργειακού συστήματος. Κατά την εκμετάλλευση λοιπόν ενός γεωθερμικού πόρου, η επαναφόρτισή του επιτυγχάνεται με την αναπλήρωση του γεωθερμικού μέσου στον ταμιευτήρα στο ίδιο χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται η παραγωγή των θερμών ρευστών από τα αντίστοιχα φρεάτια παραγωγής. Αυτή ακριβώς η διαδικασία δικαιολογεί την ταξινόμηση της γεωθερμίας στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στην περίπτωση των θερμών ξηρών πετρωμάτων, η ενεργειακή φόρτιση ελέγχεται αποκλειστικά από την αγωγή θερμότητας, η οποία είναι μια ιδιαίτερος αργή διαδικασία. Για το λόγο αυτό, ίσως θα έπρεπε τα συστήματα αυτά να κατατάσσονται στις πεπερασμένες πηγές ενέργειας [19].

Η αιεφορία που αφορά την κατανάλωση ενός ενεργειακού πόρου εξαρτάται από το αρχικό του μέγεθος, το ρυθμό εκμετάλλευσης (παραγωγής ρευστών) και το ρυθμό κατανάλωσης. Η κατανάλωση μπορεί προφανώς να διατηρηθεί σταθερή για τη χρονική περίοδο κατά την οποία η επαναφόρτιση της πηγής είναι ταχύτερη ή ίση με την αποφόρτιση. Ο όρος “αιεφόρος ανάπτυξη” χρησιμοποιείται από την Παγκόσμια Επιτροπή Περιβάλλοντος και Ανάπτυξης για να περιγράψει την ανάπτυξη η οποία ανταποκρίνεται στις ανάγκες της σημερινής γενιάς, χωρίς όμως να θέτει σε κίνδυνο την κάλυψη των αναγκών των μελλοντικών γενεών. Σε αυτό το πλαίσιο η αιεφόρος ανάπτυξη δεν υποδηλώνει ότι κάθε δεδομένη πηγή ενέργειας πρέπει να αξιοποιείται με έναν εξολοκλήρου αιεφόρο τρόπο, αλλά ότι θα πρέπει να βρεθεί ένα σχέδιο αντικατάστασης του πόρου που υφίσταται εκμετάλλευση, έτσι ώστε οι επόμενες γενιές να μπορούν να εξασφαλίσουν κατάλληλους ενεργειακούς πόρους, ανεξάρτητα με το αν ο συγκεκριμένος θα έχει εξαντληθεί. Με την έννοια αυτή, οι μελέτες που αφορούν την αιεφόρα ανάπτυξη ενός συγκεκριμένου γεωθερμικού πεδίου θα πρέπει να προσανατολίζονται στην εξεύρεση τρόπων διατήρησης ενός σταθερού επιπέδου παραγωγής γεωθερμικής ισχύος σε εθνικό ή περιφερειακό

πλαίσιο. Αυτό βέβαια ισχύει τόσο για τις ηλεκτρικές (έμμεσες) όσο και για τις άμεσες χρήσεις και αφορά κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, για παράδειγμα μια περίοδο 300 ετών, όπου οι γεωθερμικοί πόροι που εξαντλούνται θα αντικαθίστανται από νέους [20].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

3.1 Γεωθερμική έρευνα

Βασικό και αναπόσπαστο κομμάτι της εκμετάλλευσης του διαθέσιμου γεωθερμικού δυναμικού μιας περιοχής είναι η έρευνα του αντίστοιχου πεδίου. Η έρευνα αυτή, η οποία αποτελεί το πρώτο βήμα προς την αξιοποίηση του ενεργειακού πόρου, περιλαμβάνει συγκεκριμένες διαδικασίες και θέτει ορισμένους στόχους.

Αρχικά, να σημειώσουμε ότι ο όρος γεωθερμικό πεδίο αποτελεί ένα γεωγραφικό προσδιορισμό, που συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια περιοχή στην οποία παρουσιάζεται κάποια επιφανειακή γεωθερμική δραστηριότητα. Στις περιπτώσεις όπου δεν παρατηρείται δραστηριότητα στην επιφάνεια, ο όρος αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσει μια περιοχή που αντιστοιχεί στο γεωθερμικό ταμειυτήρα, ο οποίος βρίσκεται στο υπέδαφος [18].

3.1.1 Αντικείμενα γεωθερμικής έρευνας

Τα αντικείμενα της γεωθερμικής έρευνας απαριθμούνται στη λίστα που ακολουθεί:

1. Προσδιορισμός των γεωθερμικών φαινομένων
2. Επιβεβαίωση της ύπαρξης ενός ωφέλιμου παραγωγικού γεωθερμικού πεδίου
3. Εκτίμηση του μεγέθους του ενεργειακού πόρου
4. Καθορισμός του τύπου του γεωθερμικού πεδίου
5. Εντοπισμός των παραγωγικών ζωνών
6. Καθορισμός του θερμικού περιεχομένου των γεωθερμικών ρευστών που θα παραχθούν από το πεδίο μέσω των παραγωγικών γεωτρήσεων
7. Συλλογή των βασικών δεδομένων, πάνω στα οποία θα βασιστούν τα αποτελέσματα της μελλοντικής παρακολούθησης του πεδίου
8. Καθορισμός των ευαίσθητων περιβαλλοντικών παραμέτρων πριν από την εκμετάλλευση
9. Συλλογή πάσης φύσεως πληροφορίας και δεδομένων για κάθε χαρακτηριστικό στοιχείο που θα μπορούσε να προκαλέσει προβλήματα κατά την εκμετάλλευση του πεδίου

Η σχετική σπουδαιότητα καθενός από τα παραπάνω εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι περισσότεροι από τους οποίους συνδέονται με αυτό καθαυτό τον ενεργειακό πόρο και περιλαμβάνουν το είδος της αναμενόμενης εκμετάλλευσης, τη διαθέσιμη τεχνολογία, τα οικονομικά μεγέθη, την κατάσταση, 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 γεωθερμικών εκδηλώσεων επιφανείας αποκτούν ιδιαίτερη σημασία και χρησιμότητα όταν αφορούν μια απομακρυσμένη και μη μελετημένη περιοχή, σε σχέση με μια γνωστή και εκτενώς μελετημένη. Εξάλλου, η εκτίμηση του ακριβούς μεγέθους του γεωθερμικού πόρου αποκτά ίσως μικρότερη σημασία όταν πρόκειται για μια μικρής κλίμακας εφαρμογή, καθώς μία τέτοια εφαρμογή απαιτεί προφανώς πολύ λιγότερη θερμική ενέργεια απ' ό,τι ήδη παράγεται από το πεδίο. Επίσης, εάν η γεωθερμική ενέργεια πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τηλεθέρμανση μιας περιοχής ή σε εφαρμογές που δεν έχουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, τότε η εύρεση ρευστών υψηλής θερμοκρασίας δεν αποτελεί απαραίτητα τον αντικειμενικό σκοπό της γεωθερμικής έρευνας [21].

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. Παρόλο όμως που μπορεί να έχουν εξαιρετική συμβολή και η εφαρμογή τους να είναι πετυχημένη στην έρευνα π.χ. ορυκτών, πετρελαίου ή φυσικού αερίου, δεν αποτελούν αναγκαστικά την πλέον ενδεδειγμένη λύση στη γεωθερμική έρευνα. Αντίθετα, τεχνικές περιορισμένης χρήσης στην έρευνα πετρελαίου μπορεί να αποδειχθούν ιδανικά εργαλεία στον τομέα της αναζήτησης φυσικής γήινης θερμότητας [22].

3.1.2 Μέθοδοι έρευνας

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. Οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές μελέτες παίζουν σημαντικό ρόλο σε όλες τις επόμενες φάσεις της γεωθερμικής έρευνας, ακόμη και στον καθορισμό της θέσης των ερευνητικών και παραγωγικών γεωτρήσεων. Επίσης, παρέχουν τις βασικές πληροφορίες για την ερμηνεία των δεδομένων που συγκεντρώνονται από τις άλλες μεθόδους, την εκτίμηση του δυναμικού του γεωθερμικού πεδίου και τελικά, την κατασκευή ενός ρεαλιστικού προτύπου (μοντέλου) του γεωθερμικού συστήματος. Τα στοιχεία των μελετών αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και στη φάση παραγωγής σχετικά με την ορθολογική διαχείριση του γεωθερμικού ταμιευτήρα και γενικότερα του πεδίου.

Φαίνεται λοιπόν, ότι η διάρκεια και το συνολικό κόστος μιας ολοκληρωμένης γεωθερμικής έρευνας μπορεί να μειωθούν σημαντικά αν ο προγραμματισμός της γίνει με σωστό σχεδιασμό και αποδοτικό συντονισμό.

Οι γεωχημικές έρευνες (συμπεριλαμβανομένης της γεωχημείας ισοτόπων), αποτελούν αξιόλογα εργαλεία για τον καθορισμό της φύσης των γεωθερμικών ρευστών (υγρό ή ατμός), την εκτίμηση της ελάχιστης αναμενόμενης θερμοκρασίας και της ομοιογένειας στην παροχή των ρευστών, την έμμεση εκτίμηση των χημικών χαρακτηριστικών των ρευστών καθώς και για τον προσδιορισμό της πηγής τροφοδοσίας του ταμιευτήρα. Ακόμα, μπορούν να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για το είδος των προβλημάτων που ενδέχεται να προκύψουν κατά την επανεισαγωγή των ρευστών στον ταμιευτήρα και κατά την παραγωγική διαδικασία (π.χ. αλλαγές στη σύσταση των ρευστών, διάβρωση ή επικαθήσεις στις σωληνώσεις και τις εγκαταστάσεις, περιβαλλοντικές επιπτώσεις), καθώς και για τον τρόπο αντιμετώπισης ή αποφυγής τους. Η γεωχημική έρευνα πραγματοποιείται με δειγματοληψίες, οι οποίες αποτελούνται από χημικές ή/και ισοτοπικές αναλύσεις του νερού και των αερίων των γεωθερμικών επιφανειακών εκδηλώσεων (θερμές πηγές, ατμίδες, κ.λπ.) ή των γεωτρήσεων στην υπό μελέτη περιοχή. Λόγω του ότι η γεωχημική έρευνα παρέχει πολύ χρήσιμα στοιχεία για τον περαιτέρω σχεδιασμό του γεωθερμικού προγράμματος και το κόστος της είναι σχετικά χαμηλό σε σχέση με πιο εξεζητημένες μεθόδους, όπως είναι για παράδειγμα οι γεωφυσικές, θα πρέπει να χρησιμοποιείται όσο τον δυνατόν περισσότερο πριν την εφαρμογή άλλων περισσότερο δαπανηρών μεθοδολογιών.

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις σκοπεύουν στην έμμεση απόκτηση γνώσης, από την επιφάνεια ή κοντά σε αυτήν, για τις φυσικές παραμέτρους των γεωλογικών σχηματισμών που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη. Οι παράμετροι αυτές περιλαμβάνουν τα εξής:

- Θερμοκρασία (θερμική έρευνα)
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα (γεωηλεκτρική και ηλεκτρομαγνητική μέθοδος)
- Ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων (σεισμική μέθοδος)
- Πυκνότητα (βαρυτομετρική μέθοδος)
- 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 ταμιευτήρα. Όμως, οι μέθοδοι αυτές παρέχουν λίγα έως καθόλου στοιχεία για την ύπαρξη ή όχι ρευστών, κάτι που αποτελεί τον πρωταρχικό στόχο της γεωθερμικής έρευνας. Για το λόγο αυτό,

θεωρείται σκοπιμότερη η εφαρμογή των συγκεκριμένων μεθόδων για την αποσαφήνιση λεπτομερειών κατά τα τελευταία στάδια του γεωθερμικού ερευνητικού προγράμματος, πριν ακριβώς τον καθορισμό της θέσης των ερευνητικών γεωτρήσεων. 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. Η μαγνητοτελλουρική μέθοδος (MT), η οποία αξιοποιεί τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που παράγονται από τις ηλιακές καταιγίδες, έχει βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, προσφέροντας πλέον δυνατότητες για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, παρά το γεγονός ότι προϋποθέτει πολύ εξεζητημένο τεχνολογικό εξοπλισμό και είναι ευαίσθητη στους βασικούς θορύβους των αστικών ή βιομηχανικών περιοχών. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μαγνητοτελλουρικής μεθόδου είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό βαθύτερων, σε σχέση με αυτές που προσδιορίζονται από την ηλεκτρομαγνητική ή τη γεωηλεκτρική μέθοδο, δομών. Η ηχομαγνητοτελλουρική μέθοδος ελεγχόμενης πηγής (Controlled Source Audiomagnetotelluric Method - CSAMT) που αναπτύχθηκε πρόσφατα, χρησιμοποιεί τεχνητά επαγόμενα κύματα αντί των φυσικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το βάθος διείσδυσης με αυτήν την τεχνική είναι μικρότερο, αλλά τα αποτελέσματα είναι πιο γρήγορα, το κόστος μικρότερο και οι λεπτομέρειες που τελικά προκύπτουν είναι πολύ περισσότερες σε σχέση με την κλασική μαγνητοτελλουρική μέθοδο.

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 ταμιευτήρα.

Όλες γενικά οι μέθοδοι γεωφυσικών διασκοπήσεων έχουν μεγάλο κόστος, κάποιες μάλιστα ιδιαίτερα υψηλό. Για το λόγο αυτό, δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αδιακρίτως και υπό οποιεσδήποτε καταστάσεις και συνθήκες, διότι μια μέθοδος που πιθανώς παρέχει θαυμάσια αποτελέσματα σε ένα συγκεκριμένο γεωλογικό περιβάλλον, μπορεί να μην έχει καθόλου ικανοποιητική απόδοση σε κάποιο άλλο. Άρα, η εκ των προτέρων προσεκτική επιλογή της γεωφυσικής μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί είναι πολύ σημαντική όσον αφορά τον περιστολή του κόστους και θα πρέπει να γίνεται από κατάλληλους και ειδικούς γεωφυσικούς επιστήμονες που με τη σειρά τους θα βρίσκονται σε συνεχή και στενή συνεργασία με τους γεωλόγους [23].

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. 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 ταμειυτήρας 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 [22].

3.1.3 Κατάρτιση του Ερευνητικού Προγράμματος

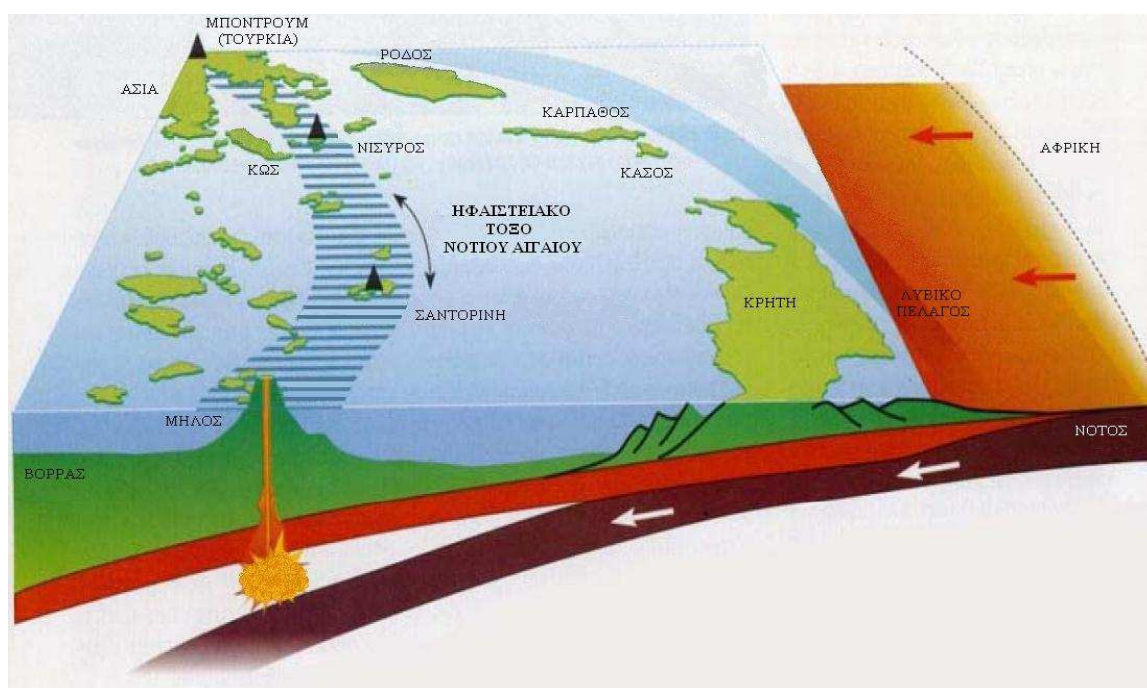
Πριν από το σχεδιασμό ενός γεωθερμικού ερευνητικού προγράμματος, θα πρέπει να συγκεντρωθούν όλα τα υπάρχοντα γεωλογικά, γεωφυσικά και γεωχημικά δεδομένα και να συμπληρωθούν με όλα τα διαθέσιμα στοιχεία από άλλες προηγούμενες έρευνες-μελέτες, που πιθανώς είχαν γίνει με σκοπό την ανεύρεση νερού, μεταλλευμάτων-ορυκτών ή υδρογονανθράκων, τόσο στην υπό μελέτη περιοχή όσο και τις γειτονικές της. Τέτοιες πληροφορίες παίζουν συχνά σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των στόχων του ερευνητικού προγράμματος, ενώ παράλληλα μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του κόστους του.

Ένα ερευνητικό πρόγραμμα συνήθως αναπτύσσεται ακολουθώντας βήμα προς βήμα τις εξής φάσεις: αναγνώριση, προκαταρκτική έρευνα, σκοπιμότητα. Κατά τη διάρκεια κάθε μιας από τις παραπάνω φάσεις απορρίπτονται σταδιακά οι λιγότερο ενδιαφέρουσες περιοχές ενώ το ενδιαφέρον εστιάζεται στις πιο πολλά υποσχόμενες και ευνοϊκές θέσεις. Καθώς η έρευνα προχωρά, οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι γίνονται όλο και περισσότερο εξεζητημένες και λεπτομερείς. Το μέγεθος και ο προϋπολογισμός του όλου προγράμματος θα πρέπει να είναι ανάλογα των αντικειμενικών στόχων, της σπουδαιότητας και της αξίας των πόρων που αναμένεται να εντοπιστούν και του προβλεπόμενου τρόπου αξιοποίησής τους. Το χρονοδιάγραμμα των ερευνών θα πρέπει να είναι ευέλικτο και ευπροσάρμοστο, αναλόγως των αποτελεσμάτων που θα προκύπτουν από τις επιμέρους ερευνητικά στάδια. Ομοίως, το γεωλογικό-γεωθερμικό μοντέλο θα πρέπει να αναβαθμίζεται και να βελτιώνεται συνεχώς, σύμφωνα με τα νέα κάθε φορά στοιχεία. Οι περιοδικές αναπροσαρμογές του προγράμματος θα πρέπει να αποσκοπούν στην αποφυγή των εργασιών που θα κρίνονται περιττές και στην προσθήκη άλλων, πιο κατάλληλων και απαραίτητων για την επιτυχή διεξαγωγή της έρευνας. Παρόλα αυτά, πρέπει να είναι ξεκάθαρο ότι κάθε μείωση στο πλήθος ή το μέγεθος των ερευνών θα οδηγήσει μεν σε μείωση του κόστους αλλά από την άλλη, σε αύξηση της πιθανότητας λάθους ή αποτυχίας. Αντιθέτως, για τη μείωση της πιθανότητας σφαλμάτων θα πρέπει γενικά να δαπανηθούν περισσότερα χρήματα. Έτσι λοιπόν, η οικονομική επιτυχία ενός γεωθερμικού ερευνητικού προγράμματος εντοπίζεται στην εύρεση της σωστής

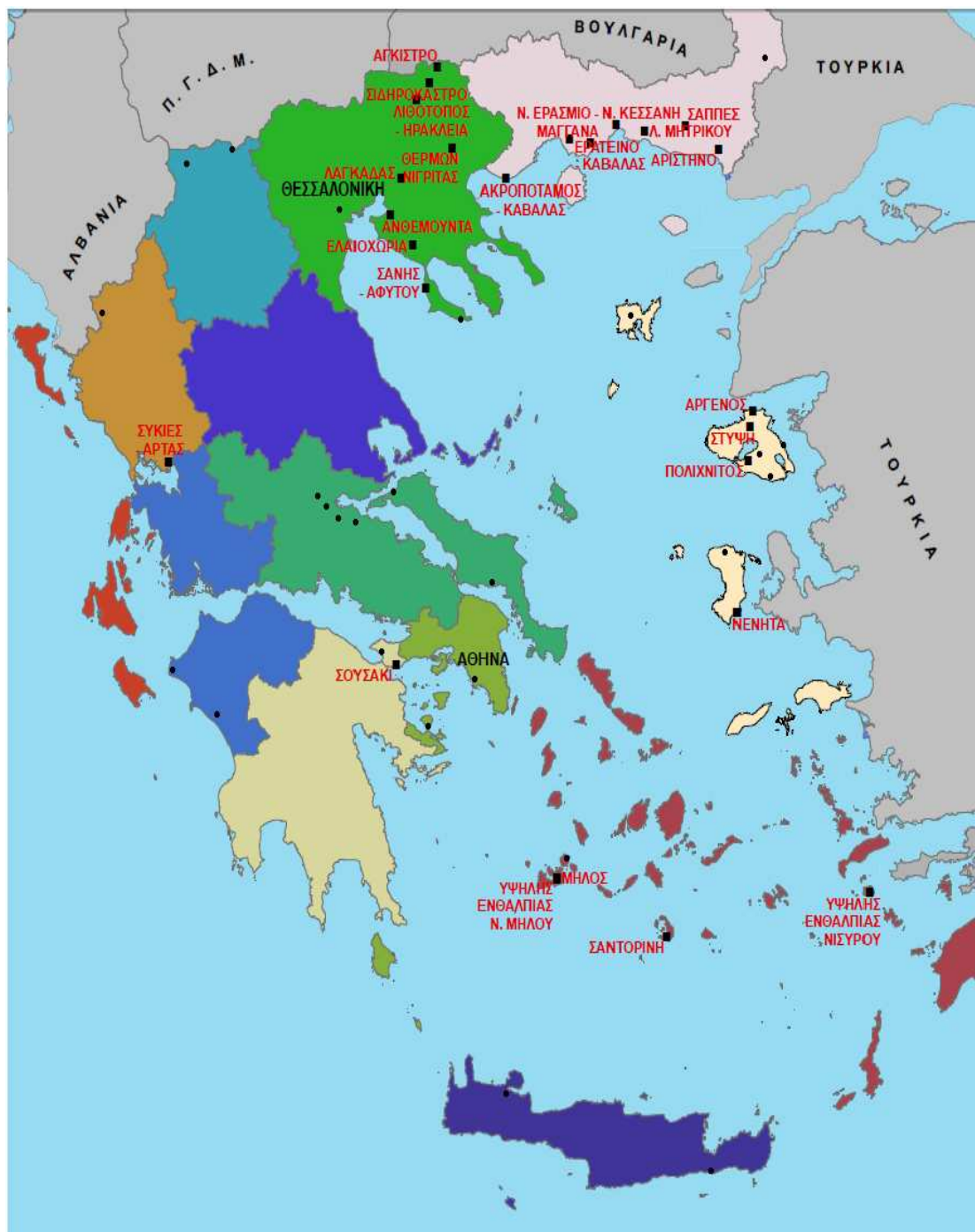
ισορροπίας και της χρυσής τομής ανάμεσα στο κόστος και την αποτελεσματικότητα των χρησιμοποιούμενων μεθόδων.

3.2 Ελληνικά γεωθερμικά πεδία

Η Ελλάδα λόγω των ειδικών γεωλογικών συνθηκών της είναι πλούσια σε γεωθερμική ενέργεια, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνεται και από τα κυρίως χαμηλής ενθαλπίας γεωθερμικά πεδία που είναι διάσπαρτα σε όλη τη χώρα και εντοπίζονται κυρίως σε αγροτικές περιοχές (σχήμα 3.2). Αντίθετα, γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας έχουν εντοπιστεί μόνο κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου νοτίου Αιγαίου (σχήμα 3.1) και πιο συγκεκριμένα, στη Μήλο και τη Νίσυρο. Στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί πιο κάτω παρατίθενται τα χαμηλής ενθαλπίας γεωθερμικά πεδία της Ελλάδας συνοδευόμενα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους και στον πίνακα 3.2 τα αντίστοιχα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας.



Σχήμα 3.1: Το ηφαιστειακό τόξο νοτίου Αιγαίου και τα νησιά τα οποία περιλαμβάνει [24]



Σχήμα 3.2: Τα γεωθερμικά πεδία της Ελλάδας [25]

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά στοιχεία γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας [25],[1]

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
Σουσακι Κορινθίας	3	60 - 76 / <75	50-200 / 600-900	600
Συκιές Άρτας	10	32 - 51	>320	100
Άργενος Λέσβου	1	90	<150	300
Στύψη 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

Ίβηρα Σερρών	---	40	---	---
Αγ. Παρασκευή Χαλκιδικής	---	41	---	---
Τυχερό Θράκης	---	35	---	350
Θέρμη Λήμνου	---	44	---	---
Καλλονή Λέσβου	---	45	---	---
Γέρας Λέσβου	---	38	---	---
Λισβόρι Λέσβου	---	65	---	---
Αγιάσματα Χίου	---	38	---	---

Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι τα γεωθερμικά πεδία που παρατίθενται στη πρώτη σελίδα του πίνακα 3.1, τα οποία αναφέρονται και ονομαστικά στο χάρτη του σχήματος 3.2, είναι τα σημαντικότερα πεδία χαμηλής ενθαλπίας στη χώρας και αυτά που έχουν ερευνηθεί εκτενέστερα.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά στοιχεία γεωθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας [25]

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

3.3 Μήλος

3.3.1 Γενικές πληροφορίες

Η Μήλος βρίσκεται στο νοτιοδυτικό χώρο των Κυκλάδων, του μεγάλου αυτού νησιωτικού συμπλέγματος του Αιγαίου πελάγους, και η πρωτεύουσα της είναι η Πλάκα ή Μήλος. Η έκτασή της Μήλου είναι 151km², το μήκος των ακτών της είναι 125km και αποτελεί το πέμπτο σε μέγεθος νησί των Κυκλάδων. Οι συντεταγμένες

του νησιού είναι 36° 44' 35" βόρειο πλάτος και 24° 25' 28" ανατολικό μήκος (Πλάκα), ενώ η ψηλότερη κορυφή του έχει ύψος 751 μέτρα και βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα. Ο πληθυσμός του νησιού είναι 4.700 σύμφωνα με την απογραφή του 2001, νούμερο που αυξάνεται σημαντικά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Η Μήλος, η οποία είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου ένα ηφαιστειακό νησί, βρίσκεται πάνω στην ευρασιατική πλάκα και απέχει περίπου 220km από το σημερινό όριο σύγκρουσης με την αφρικανική πλάκα και βυθίζεται κάτω απ αυτήν με ταχύτητα 2,5 εκατοστά το χρόνο και με γωνία 35° περίπου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι το νησί βρίσκεται ακόμα και σήμερα σε φάση καταβύθισης, υφίσταται δηλαδή τα αποτελέσματα μιας αργής καθοδικής κίνησης, ιδιαίτερα στο νότιο τμήμα του.

Η Μήλος βρίσκεται στο ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου και περιέχει δύο μεγάλα αλλά ανενεργά ηφαίστεια. Το ένα είναι το ηφαίστειο της Φυριπλάκας, το οποίο βρίσκεται στο κεντρικό και νότιο τμήμα του νησιού και έχει ένα εντυπωσιακό κρατήρα με διάμετρο 1.700m και ύψος 220m, και το δεύτερο είναι το ηφαίστειο του Τράχηλα, που βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα του νησιού. Από ραδιοχρονολογήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί, οι επιστήμονες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η ηφαιστειότητα στο νότιο Αιγαίο άρχισε πριν από 2 με 3 εκατομμύρια χρόνια περίπου. Στη Μήλο η ηφαιστειακή αυτή δραστηριότητα σταματά οριστικά πριν από 90.000 χρόνια και θεωρείται σχετικά πρόσφατη [26].

Οι ενεργειακές ανάγκες του νησιού καλύπτονται από μια μονάδα ισχύος 7.600 kW, η οποία είναι εγκατεστημένη στο νησί και χρησιμοποιεί ως καύσιμο το πετρέλαιο. Η μονάδα αυτή καλύπτει και τις ανάγκες της Κιμώλου, με την οποία η Μήλος είναι διασυνδεδεμένη. Η μέγιστη ετήσια ενεργειακή ζήτηση και των δυο νησιών δε ξεπερνάει τις 23.912 MWh [27].

3.3.2 Γεωθερμική δραστηριότητα

Μπορεί βέβαια τα ηφαίστεια της να είναι σβησμένα τη σημερινή εποχή, λαμβάνουν όμως χώρα διάφορες άλλες εκδηλώσεις που μας δείχνουν ότι, ακόμα και σήμερα, υπάρχει επικοινωνία ανάμεσα στην επιφάνεια του νησιού και το εσωτερικό της γης. Στη Μήλο λοιπόν, συναντάμε ατμίδες (πηγές αερίων) κυρίως στην ανατολική και νοτιοανατολική περιοχή του νησιού. Είναι περιοχές από τις οποίες, λόγω της τεκτονικής τους κατασκευής, αέρια προερχόμενα από το εσωτερικό της γης (ατμοί, διοξείδιο του άνθρακα, υδροθείο και άλλα) διαφεύγουν και απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Στις περιοχές αυτές, μερικές φορές είναι χαρακτηριστικό το κίτρινο χρώμα του θείου και η μυρωδιά του, ενώ η θερμοκρασία του εδάφους είναι πολύ υψηλή. Τέτοιες περιοχές είναι η Αγία Κυριακή (102°C), οι Πυρωμένες (100°C), το Παλιοχώρι (101°C), τα Βουνάλια (54°C), ο Καστανάς (86°C) και ο Αδάμαντας (100°C). Ατμίδες όμως παρατηρούνται και σε υποθαλάσσιες περιοχές (Αγία Κυριακή,

Παλιοχώρι, Κάναβα, Ριβάρι), όπου και πάλι το κίτρινο χρώμα του θείου είναι χαρακτηριστικό, τα δε αέρια βγαίνουν στην επιφάνεια του νερού υπό μορφή φυσαλίδων.

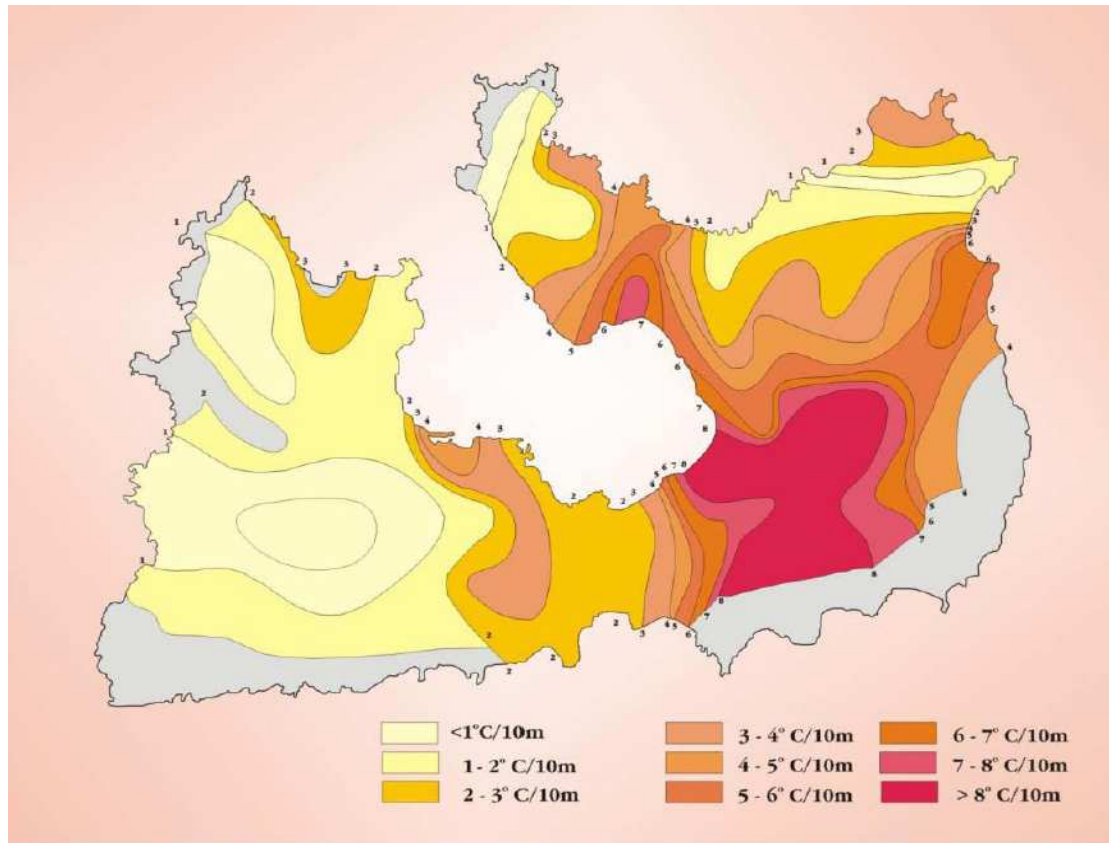
Εκτός από τις ατμίδες έχουμε και θερμές πηγές, τις οποίες βρίσκουμε σε διάφορα σημεία του νησιού και κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας. Μερικές από αυτές μάλιστα, είναι και ιαματικές, χωρίς όμως να έχουν αξιοποιηθεί κατάλληλα. Τέτοιες πηγές λοιπόν, συναντάμε στον Αδάμαντα, μέσα σ' ένα σπήλαιο όπου έχουν κατασκευαστεί και χώροι για λουτρά, με θερμοκρασία 33,3°C, στις Αλυκές με 22°C, στην Κάναβα με 50°C, στο Παλιοχώρι με 50°C, στα Μαντράκια με 54°C, στον Αδάμαντα στην περιοχή Χάρου με 42°C, στον Προβατά, Τρία Πηγάδια και σε άλλα ακόμα σημεία.

Όλες αυτές οι επιφανειακές εκδηλώσεις της γεωθερμικής ενέργειας στο νησί της Μήλου, με το πέρασμα εκατομμυρίων ετών, έχουν δράσει έτσι ώστε να αλλοιώσουν το έδαφος δίνοντάς μας διάφορα εκμεταλλεύσιμα ορυκτά και πετρώματα. Επίσης, έχουν κινήσει το ενδιαφέρον των ειδικών ώστε να ερευνηθούν τη πιθανότητα ύπαρξης κάποιου γεωθερμικού πεδίου στη περιοχή και το τρόπο που μπορεί αυτό να αξιοποιηθεί. Έτσι λοιπόν, οι επιστήμονες του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) και της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.), μετά από πολυετείς έρευνες και γεωτρήσεις μέσου και μεγάλου βάθους, απέδειξαν την ύπαρξη αυτού του πεδίου [25].

3.3.3 Έρευνα γεωθερμικού πεδίου

Οι έρευνες του Ι.Γ.Μ.Ε. που πραγματοποιήθηκαν στη Μήλο τη δεκαετία του 1970 εντόπισαν το πρώτο ελληνικό γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας. Για τη περαιτέρω διερεύνηση του πεδίου χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τεχνικές και μέθοδοι επιφανείας, μεταξύ των οποίων και η διάνοιξη 48 αβαθών γεωτρήσεων (250m) γεωθερμικής βαθμίδας (σχήμα 3.3). Σε δεύτερη φάση, αλλά την ίδια περίοδο, η Δ.Ε.Η. πραγματοποίησε συνολικά 5 βαθιές γεωτρήσεις έρευνας-παραγωγής σε βάθος 1.000-1.400m. Τα χαρακτηριστικά του βεβαιωμένου αυτού γεωθερμικού πεδίου, όπως προέκυψαν από τις προαναφερθείσες έρευνες, είναι τα εξής:

- Έκταση: 50m²
- Θερμοκρασία: 280-320°C (πυθμένα γεωτρήσεων)
- Βάθος ταμιευτήρα: 1.000-1.380m
- Παραγωγή: 339 ton/h (200 ton/h κεκορεσμένος ατμός και 139 ton/h θερμό νερό)
- Πίεση: 11-19 atm



Σχήμα 3.3: Διακύμανση της γεωθερμικής βαθμίδας στο νησί της Μήλου [24]

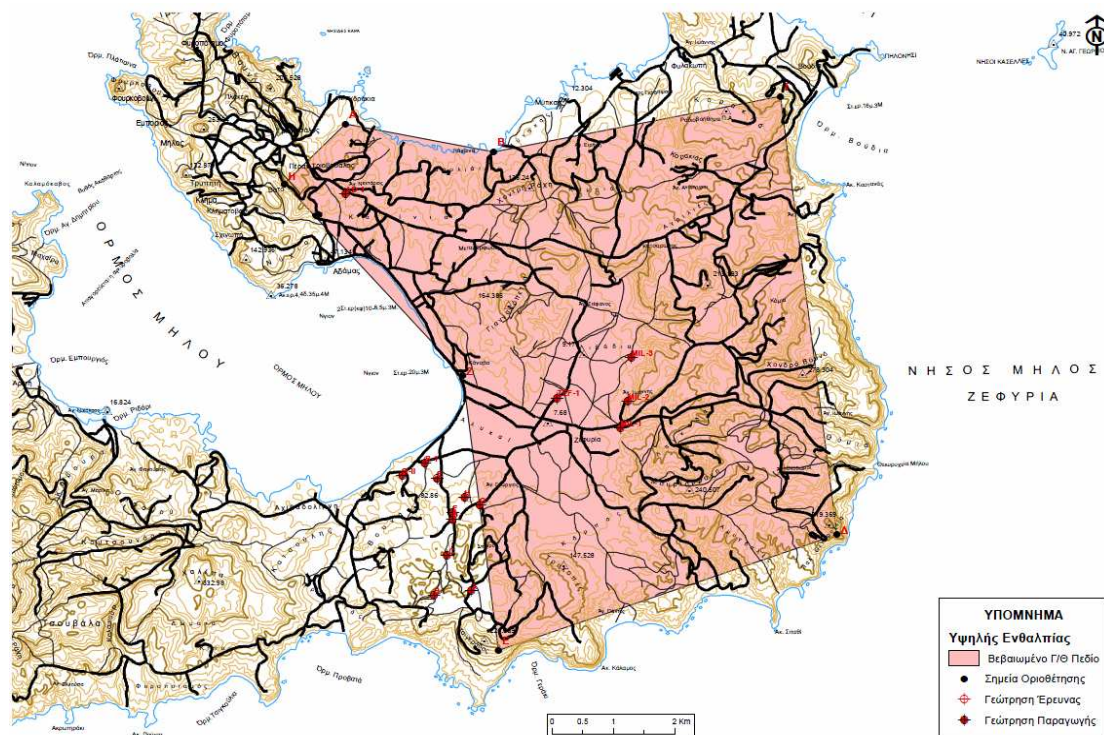
Η χωροθέτηση του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4, όπως επίσης και οι θέσεις των παραγωγικών γεωτρήσεων. Πιο κάτω ακολουθεί ο πίνακας 3.3 με τις συντεταγμένες των γεωτρήσεων παραγωγής καθώς και ένας ακόμα, πίνακας 3.4, με τις συντεταγμένες των σημείων οριοθέτησης του πεδίου. Τέλος, στο πίνακα 3.5 δίδονται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των γεωθερμικών ρευστών από τις γεωτρήσεις παραγωγής.

Πίνακας 3.3: Συντεταγμένες σημείων οριοθέτησης του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας της Μήλου [25]

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ		ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)
	X	Y	
AD-1	539915,43	4065348,50	60,00
MIL-1	544404,43	4061432,00	30,00
MIL-2	544527,50	4061877,00	30,00
MIL-3	544589,81	4062614,50	60,00
ZEF-1	543371,75	4061931,00	40,00

Πίνακας 3.4: Συντεταγμένες και υψόμετρο των σημείων των γεωτρήσεων παραγωγής [25]

ΚΟΡΥΦΗ ΠΟΛΥΓΩΝΟΥ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ	
	X	Y
A	539914,49	4066515,91
B	542336,29	4066051,55
Γ	547022,40	4066976,83
Δ	547944,25	4059650,59
E	542413,18	4057709,86
Z	541830,96	4062319,09
H	538919,87	4065521,28



Σχήμα 3.4: Η χωροθέτηση του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας της Μήλου και τα σημεία των γεωτρήσεων παραγωγής [25]

Η Δ.Ε.Η. εγκατέστησε τελικά το 1985 μια πειραματική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιώντας το γεωθερμικό δυναμικό της Μήλου. Η μονάδα λειτούργησε μέχρι το 1989 και η εγκατεστημένη ισχύς της ήταν 2 MW.

Πίνακας 3.5: Χημική ανάλυση δείγματος γεωθερμικού ρευστού υγρής φάσης από τις γεωτρήσεις του γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας της Μήλο, (mg/l) [25]

ΔΕΙΓΜΑ	MIL-1	HCO₃	0
ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (μS/cm)	135.000	Cl	68.000
PH	4,3	SO₄	60
T.D.S	120.000	SiO₂	1.000
Ca	4.750	Al	0
Mg	14	B	87
Na	33.500	Fe	47,3
K	8.700	F	3

3.4 Νίσυρος

3.4.1 Γενικές πληροφορίες

Η Νίσυρος είναι νησί του νοτιοανατολικού αιγαίου και ανήκει στο σύμπλεγμα των Δωδεκανήσων. Πιο συγκεκριμένα, βρίσκεται δυτικά της Ρόδου, ανάμεσα στη Κω και τη Τήλο. Αν και το 1950 αριθμούσε 2.516 κατοίκους, σήμερα ο πληθυσμός του νησιού, σύμφωνα πάντα με την απογραφή του 2001, ανέρχεται σε 948 κατοίκους. Έχει έκταση 41km², μήκος ακτών 30km και μέγιστο υψόμετρο 698m. Οι συντεταγμένες του νησιού είναι 36° 36' 38" βόρειο πλάτος και 27° 07' 55" ανατολικό μήκος και η πρωτεύουσα του νησιού είναι το Μανδράκι.

Η Νίσυρος ενεργειακά είναι διασυνδεδεμένη με τη Κάλυμνο, τη Λέρο, τους Λειψούς, τη Τέλενδο, τη Κω, τη Ψέριμο, τη Τήλο και το Γυαλί. Οι ενεργειακές ανάγκες των νησιών αυτών καλύπτονται από μια μονάδα ισχύος 60,5MW, η οποία είναι εγκατεστημένη στη Κω, και από μία ακόμα, ισχύος 9,1MW, η οποία είναι εγκατεστημένη στη Κάλυμνο. Οι μονάδες αυτές, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα και χρησιμοποιούν πετρέλαιο ως καύσιμο, εξυπηρετούν την ετήσια ζήτηση ενέργειας των νησιών που προαναφέραμε, η οποία ανέρχεται σε 217.824 MWh [28].

3.4.2 Γεωθερμική δραστηριότητα

Η Νίσυρος είναι ένα από τα νησιά που βρίσκεται στο ηφαιστειακό τόξο νοτίου Αιγαίου, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνεται και από την σημαντική ηφαιστειακή της δραστηριότητα και τους κρατήρες που υπάρχουν στο εσωτερικό της. Ο μεγαλύτερος και επιβλητικότερος κρατήρας του νησιού ονομάζεται "Στέφανος" και μονοπωλεί το

ενδιαφέρον των τουριστών γιατί είναι ένας από τους και καλύτερα διατηρημένους υδροθερμικούς κρατήρες στο κόσμο. Έχει ελλειψοειδές σχήμα με το μεγαλύτερο άξονα να φτάνει τα 330m και το μικρότερο τα 260m. Το ύψος του είναι 30m και η ηλικία του εκτιμάται στα 3.500 περίπου χρόνια. Άλλοι σημαντικοί κρατήρες του νησιού είναι ο “Λογοθέτης”, ο οποίος είναι και ο παλαιότερος, ο “Μεγάλος Πολυβιώτης” και ο “Αλέξανδρος”. Η τελευταία υδροθερμική έκρηξη που έχει καταγραφεί στη Νίσυρο έγινε το 1887 και είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ακόμη κρατήρα που ονομάστηκε “Μικρός Πολυβιώτης”.

Οι άφθονες θερμές πηγές της Νισύρου είναι μια ακόμα απόδειξη της γεωθερμικής δραστηριότητας του νησιού. Σε πολλά σημεία λοιπόν, κατά μήκος των ακτών αναβλύζει θερμό νερό θερμοκρασίας 30-60°C, το οποίο αποτελείται από θαλασσινό και βρόχινο νερού αναμεμιγμένο με γεωθερμικά ρευστά του ανώτερου θερμικού ορίζοντα. Οι πιο γνωστές θερμές πηγές είναι αυτές των Λουτρών, της Θερμιάνης και του Αυλακιού [27].

3.4.3 Έρευνα γεωθερμικού πεδίου

Οι έρευνες στη Νίσυρο, όπου και εντοπίζεται το δεύτερο γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας της χώρας, ξεκίνησαν από το Ι.Γ.Μ.Ε. τη δεκαετία του 1970. Στις έρευνες αυτές ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία με τις αντίστοιχες στη Μήλο, οι οποίες είχαν λάβει χώρα λίγα χρόνια νωρίτερα. Έτσι λοιπόν, εκτελέστηκαν μεγάλοι εύρους ερευνητικές εργασίες επιφανείας και διανοίχθηκαν εννέα αβαθείς γεωτρήσεις με σκοπό τη μέτρηση της γεωθερμικής βαθμίδας. Λίγο αργότερα, τη δεκαετία του 1980, η Δ.Ε.Η., βασιζόμενη στα αποτελέσματα των προηγούμενων ερευνών, προχώρησε στη διάνοξη δύο βαθιών γεωτρήσεων έρευνας-παραγωγής βάθους μέχρι 1.820m περίπου. Τα χαρακτηριστικά του βεβαιωμένου αυτού γεωθερμικού πεδίου, όπως προέκυψαν από τις προαναφερθείσες έρευνες, είναι τα εξής:

- Έκταση: 3,5m²
- Θερμοκρασία: >350°C (πυθμένα γεωτρήσεων)
- Βάθος ταμιευτήρα: 1.400-1.900m
- Παραγωγή: 75ton/h (21 ton/h κεκορεσμένος ατμός και 54 ton/h θερμό νερό)
- Πίεση: 12atm

Η χωροθέτηση του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5, όπως επίσης και οι θέσεις των παραγωγικών γεωτρήσεων. Πιο κάτω ακολουθούν δυο πίνακες (πίνακας 3.6 και 3.7) με τις συντεταγμένες των σημείων οριοθέτησης του πεδίου και με τις συντεταγμένες των γεωτρήσεων παραγωγής

αντίστοιχα. Τέλος, στο πίνακα 3.8 και 3.9 δίδονται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των γεωθερμικών ρευστών από τις γεωτρήσεις παραγωγής.

Πίνακας 3.6: Συντεταγμένες σημείων οριοθέτησης του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας της Νισύρου [25]

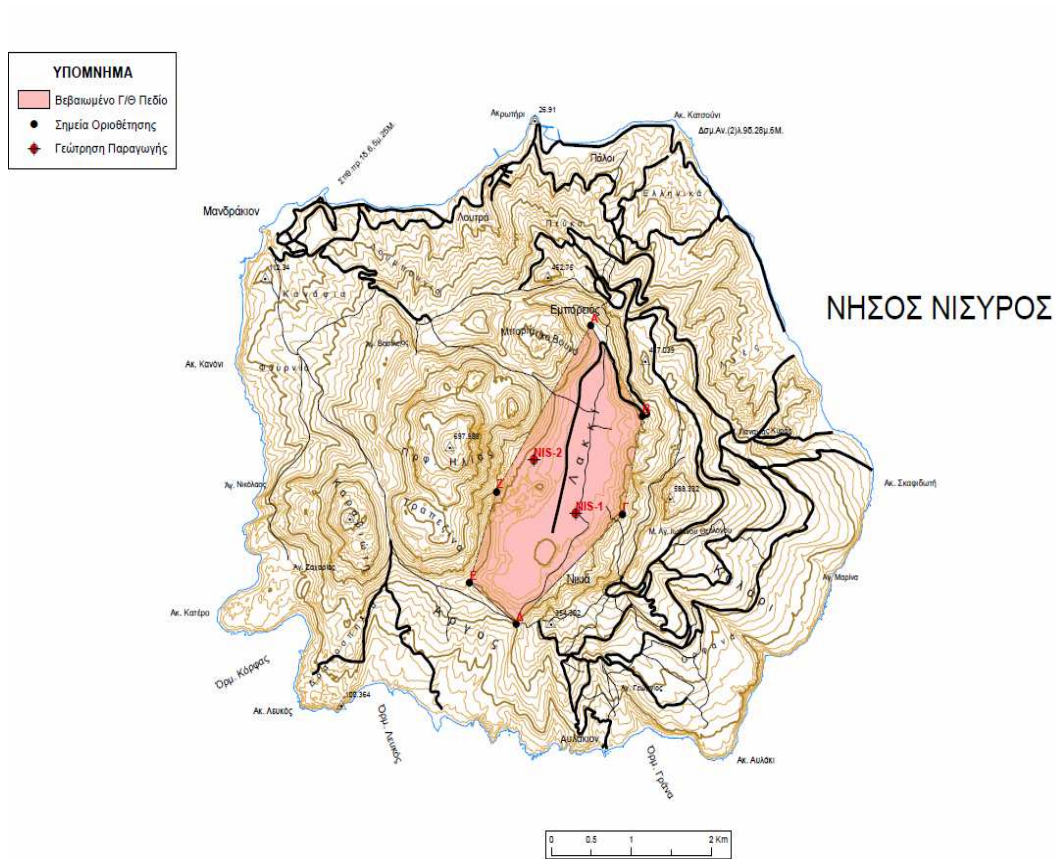
ΚΟΡΥΦΗ ΠΟΛΥΓΩΝΟΥ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ	
	X	Y
A	783911,32	4054938,27
B	784562,64	4053937,18
Γ	784309,35	4052863,72
Δ	782982,60	4051669,65
E	782403,66	4052115,92
Z	782741,37	4053117,01

Πίνακας 3.7: Συντεταγμένες και υψόμετρο των σημείων των γεωτρήσεων παραγωγής [25]

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ		ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)
	X	Y	
NIS-1	783727,12	4052874,75	110,00
NIS-2	783207,00	4053461,75	165,00

Πίνακας 3.8: Χημική ανάλυση δείγματος γεωθερμικού ρευστού υγρής φάσης από τις γεωτρήσεις του γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας της Νισύρου, (mg/l) [25]

ΔΕΙΓΜΑ	N-2	HCO₃	0
ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (μS/cm)	135.000	Cl	66.390
PH	4,9	SO₄	32,6
T.D.S	117.000	SiO₂	842
Ca	9.670	Al	0
Mg	103	B	55
Na	28.470	Fe	8,2
K	3.783	F	1,4



Σχήμα 3.5: Η χωροθέτηση του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας της Νισύρου και τα σημεία των γεωτρήσεων παραγωγής [25].

Πίνακας 3.9: Χημική ανάλυση δείγματος γεωθερμικού ρευστού αέριας φάσης από τις γεωτρήσεις του γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας της Μήλο, (% κ.ο.) [25]

ΔΕΙΓΜΑ	H ₂	CH ₂	CO ₂	H ₂ S	N ₂	NH ₃
N-2	0,1	0,45	97,7	1,65	0	0
N-1	1,4	0,215	93	4,55	0,91	0

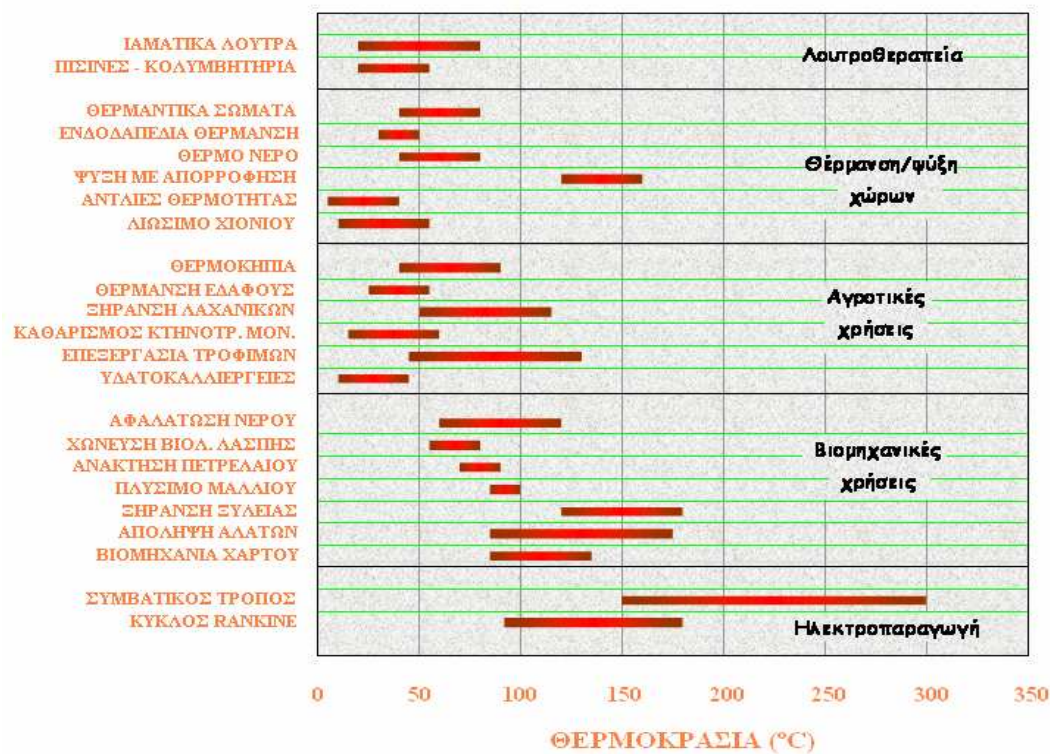
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Οι εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, στις άμεσες και στις ηλεκτροπαραγωγικές. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει 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 τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, πράγμα το οποίο επιτυγχάνεται με διάφορων ειδών διατάξεις, τις οποίες και θα εξετάσουμε διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο.

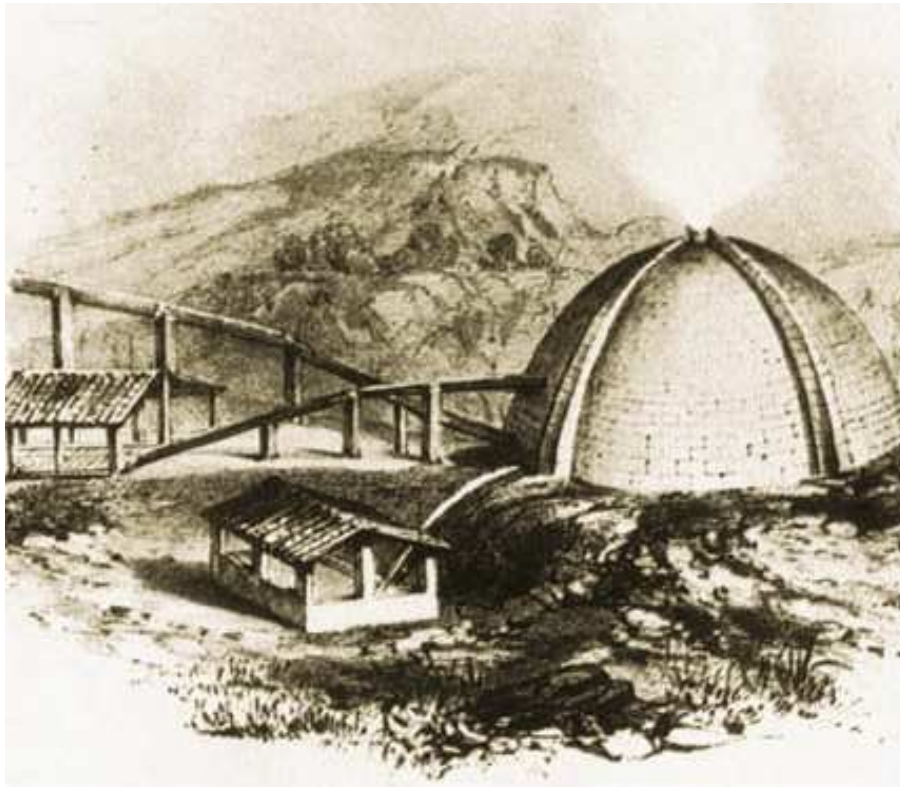
Ο τρόπος εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού. Έτσι λοιπόν, κάθε εφαρμογή αξιοποίησης της γεωθερμίας αντιστοιχεί με ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών, για το οποίο η εφαρμογή αυτή καθίσταται τεχνικά εφικτή και οικονομικά συμφέρουσα. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η αντιστοιχία μεταξύ γεωθερμικών εφαρμογών και θερμοκρασιακού εύρους του γεωθερμικού ρευστού.



Σχήμα 4.1: Αντιστοιχία γεωθερμικών εφαρμογών με πεδίο θερμοκρασιών γεωθερμικού ρευστού [29]

4.2 Ιστορική αναδρομή γεωθερμικών εφαρμογών

Σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης ζωής οι πρακτικές εφαρμογές προηγούνται της επιστημονικής έρευνας και της τεχνολογικής ανάπτυξης. Η γεωθερμία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα του φαινομένου αυτού. Ήδη από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα λάμβανε χώρα η αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχόμενου των γεωθερμικών ρευστών. Εκείνη την περίοδο, στην Τοσκάνη της Ιταλίας, και συγκεκριμένα στην περιοχή του Larderello, λειτουργούσε μια χημική βιομηχανία για την παραγωγή βορικού οξέος μέσω των βοριούχων θερμών νερών που ανέβλυζαν από φυσικές πηγές ή αντλούνταν από ρηχές γεωτρήσεις. Η παραγωγή του βορικού οξέος γινόταν με εξάτμιση των βοριούχων νερών μέσα σε σιδερένιους λέβητες χρησιμοποιώντας ως καύσιμη ύλη ξύλα από τα κοντινά δάση. Το 1827 ο Francesco Larderel, ιδρυτής της βιομηχανίας αυτής, ανέπτυξε ένα σύστημα για τη χρήση της θερμότητας των βοριούχων ρευστών στη διαδικασία της εξάτμισης, σε αντίθεση με τη καύση ξύλων από τα διαρκώς αποψιλούμενα δάση της περιοχής που εφαρμοζόταν μέχρι εκείνη τη στιγμή (σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2: Η καλυμμένη «λιμνούλα», που χρησιμοποιούνταν κατά το πρώτο μισό του 19^{ου} αιώνα στην περιοχή του Larderello, για τη συλλογή των βοριούχων υδάτων και την παραγωγή βορικού οξέος [8]

Η εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του φυσικού ατμού ξεκίνησε περίπου την ίδια περίοδο. Ο γεωθερμικός ατμός χρησιμοποιήθηκε για την ανέλκυση των ρευστών, αρχικά με κάποιους πρωτόγονους αέριους ανυψωτήρες και στη συνέχεια με παλινδρομικές και φυγοκεντρικές αντλίες και βαρούλκα. Ανάμεσα στο 1850 και 1875 οι εγκαταστάσεις του Larderello κατείχαν το μονοπώλιο παραγωγής βορικού οξέος στην Ευρώπη. Μεταξύ του 1910 και του 1940 στην περιοχή αυτή της Τοσκάνης ο χαμηλής πίεσης ατμός άρχισε να χρησιμοποιείται για τη θέρμανση βιομηχανικών κτιρίων, κατοικιών και θερμοκηπίων. Εν τω μεταξύ, ολοένα και περισσότερες χώρες άρχισαν να αναπτύσσουν τους γεωθερμικούς τους πόρους σε βιομηχανική κλίμακα. Το 1892 το πρώτο γεωθερμικό σύστημα τηλεθέρμανσης τέθηκε σε λειτουργία στο Boise του Άινταχο (Η.Π.Α.). Το 1928 μια άλλη πρωτοπόρος χώρα στην εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας, η Ισλανδία, ξεκίνησε επίσης την εκμετάλλευση των γεωθερμικών ρευστών (κυρίως θερμών νερών) για τη θέρμανση κατοικιών.

Μπορεί ο άνθρωπος να εκμεταλλευόταν τη γεωθερμία με διάφορους τρόπους από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα, η πρώτη όμως απόπειρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω γεωθερμίας πραγματοποιήθηκε αρκετά αργότερα. Το 1904 λοιπόν, στο Larderello της Ιταλίας ο πρίγκιπας Piero Ginori Conti χρησιμοποίησε για το

σκοπό αυτό μια πειραματική διάταξη δικής του εφεύρεσης, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3. Το εγχείρημα αυτό στέφθηκε από απόλυτη επιτυχία καταδεικνύοντας έτσι τη πραγματική βιομηχανική αξία της γεωθερμικής ενέργειας και σηματοδοτώντας την έναρξη μιας περιόδου αναζήτησης τεχνολογιών για την αξιοποίησή της σε ηλεκτροπαραγωγικές εφαρμογές.



Σχήμα 4.3: Ο πρίγκιπας Piero Ginori Conti και η πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε το 1904 για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της γεωθερμίας [8]

Μερικά χρόνια αργότερα, το 1911, κατασκευάστηκε και τέθηκε σε λειτουργία στο Larderello της Ιταλίας ο πρώτος γεωθερμικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ μέχρι το 1942 η συνολική εγκατεστημένη γεωθερμική-ηλεκτρική ισχύς είχε φτάσει τα 128 MW. Πολύ σύντομα το παράδειγμα της Ιταλίας ακολούθησαν και άλλες χώρες. Στην Ιαπωνία το 1919 πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες γεωθερμικές γεωτρήσεις ενώ ακολούθησαν αντίστοιχες στη California (Η.Π.Α.) το 1921. Το 1958 τέθηκε σε λειτουργία ένας γεωθερμικός σταθμός παραγωγής στη Νέα Ζηλανδία, το 1959 στο Μεξικό, το 1960 στις Η.Π.Α. (11 MW) και ακολούθησαν πολλοί ακόμα σε διάφορες άλλες χώρες.

4.3 Σύγχρονες γεωθερμικές εφαρμογές

Στην εποχή μας και ιδιαίτερα τα τελευταία 20 χρόνια η μη-ηλεκτρική, ή αλλιώς άμεση, χρήση της γεωθερμικής ενέργειας έχει σημειώσει μεγάλη ανάπτυξη. Κατά τη διάρκεια του 1985, άμεσες εφαρμογές της γεωθερμίας καταγράφηκαν σε 24 χώρες, το 1995 σε 29 και το 2000 σε 58 χώρες. Η πιο συνηθισμένη άμεση χρήση της

γεωθερμικής ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα είναι οι αντλίες θερμότητας με ποσοστό 32%, ακολουθούν η λουτροθεραπεία και η θέρμανση πισινών με 30%, η θέρμανση χώρων με 20% (εκ των οποίων 83% είναι τηλεθέρμανση), οι αγροτικές χρήσεις με 8%, οι υδατοκαλλιέργειες με 6% και τέλος οι βιομηχανικές χρήσεις με 4% [30].

Στο πίνακα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ισχύς εφαρμογών άμεσης αξιοποίησης της γεωθερμίας και η αντίστοιχη ενεργειακή παραγωγή και χρήση σε παγκόσμια κλίμακα για το έτος 2000 και 2010. Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι όλα τα δεδομένα που αφορούν το 2010 και παρατίθενται πιο κάτω αναφέρονται σε στοιχεία που έχουν προκύψει από το πρώτο τρίμηνο του έτους.

Πίνακας 4.1: Άμεσες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας ανά τον κόσμο τα έτη 2000 και 2010. Εγκατεστημένη ισχύς (MW) και ενεργειακή χρήση (σε TJ/έτος) [8],[31]

ΧΩΡΑ	2000		2010	
	ΙΣΧΥΣ (MW)	ΠΑΡΑΓΩΓΗ (TJ / ΕΤΟΣ)	ΙΣΧΥΣ (MW)	ΠΑΡΑΓΩΓΗ (TJ / ΕΤΟΣ)
Αίγυπτος	1	15	1	15
Αιθιοπία	-	-	2,2	42
Αλβανία	-	-	11	40
Αλγερία	100	1.586	56	1.723
Αργεντινή	25,7	449	307	3.907
Αρμενία	1	15	1	15
Αυστραλία	34,4	351	33	235
Αυστρία	255,3	1.609	663	3.728
Βιετνάμ	-	-	31	92
Βέλγιο	3,9	107	118	547
Βενεζουέλα	0,7	14	0,7	14
Βοσνία-Ερζεγοβίνη	-	-	22	255
Βουλγαρία	107,2	1.637	98	1.370
Βραζιλία	-	-	360	6.622
Γαλλία	326	4.895	1.345	12.929
Γερμανία	397	1.568	2.485	12.765
Γεωργία	250	6.307	25	659
Γουατεμάλα	4,2	117	2,3	56
Δανία	7,4	75	200	2.500

Εκουαδór	-	-	5,2	102
Ελβετία	547,3	2.386	1.061	7.715
Ελλάδα	57,1	385	135	938
Ελ Σαλβαδór	-	-	2	40
Εσθονία	-	-	63	356
Ηνωμένο Βασίλειο	2,9	21	187	850
Η.Π.Α.	3.766	20.302	12.611	56.552
Ιαπωνία	1.167	26.933	2.100	25.698
Ινδία	80	2.517	265	2.545
Ινδονησία	2,3	43	2,3	43
Ιορδανία	153,3	1.540	153	1.540
Ισλανδία	1.469	20.170	1.826	24.361
Ισπανία	-	-	141	684
Ισραήλ	63,3	1.713	82	2.193
Ιράν	-	-	42	1.064
Ιρλανδία	-	-	153	765
Ιταλία	325,8	3.774	867	9.941
Καναδάς	377,6	1.023	1.126	8.873
Κένυα	1,3	10	16	127
Κίνα	2.282	37.908	8.898	75.348
Κολομβία	13,3	266	14	287
Κόστα Ρίκα	-	-	1	21
Ν.Κορέα	35,8	753	229	1.955
Κροατία	113,9	555	67	469
Λετονία	-	-	1,6	32
Λευκορωσία	-	-	3,4	34
Λιθουανία	21	599	48	412
Μαρόκο	-	-	5	79
Μεξικό	164,2	3.919	156	4.023
Μογγολία	-	-	6,8	213
Νέα Ζηλανδία	307,9	7.081	393	9.552
Νεπάλ	1,1	22	2,7	74
Νορβηγία	6	32	3.300	25.200
Νότιος Αφρική	-	-	6	115
Νησιά Καραϊβικής	0,1	1	0,1	2,8
Ολλανδία	10,8	57	1.410	10.699
Ονδούρα	0,7	17	1,9	45
Ουγγαρία	472,7	4.086	655	9.767

Ουκρανία	-	-	11	119
Παπούα-Ν.Γουινέα	-	-	0,1	1
Π.Γ.Δ.Μ.	81,2	510	47	601
Περου	2,4	49	2,4	49
Πολωνία	68,5	275	281	1.501
Πορτογαλία	5,5	35	28	386
Ρουμανία	152,4	2.871	153	1.265
Ρωσία	308,2	6.144	308	6.144
Σερβία	80	2.375	101	1.410
Σλοβακία	132,3	2.118	132	3.067
Σλοβενία	42	705	105	1.153
Σουηδία	377	4.128	4.460	45.301
Ταϊλάνδη	0,7	15	2,5	79
Τατζικιστάν	-	-	2,9	55
Τουρκία	820	15.756	2.084	36.886
Τσεχία	12,5	128	152	922
Τυνησία	23,1	201	44	364
Υεμένη	1	15	1	15
Φιλανδία	80,5	484	858	8.370
Φιλιππίνες	1	25	3,3	40
Χιλή	0,4	7	9,1	132
Σύνολο	15.145	190.699	50.584	438.087

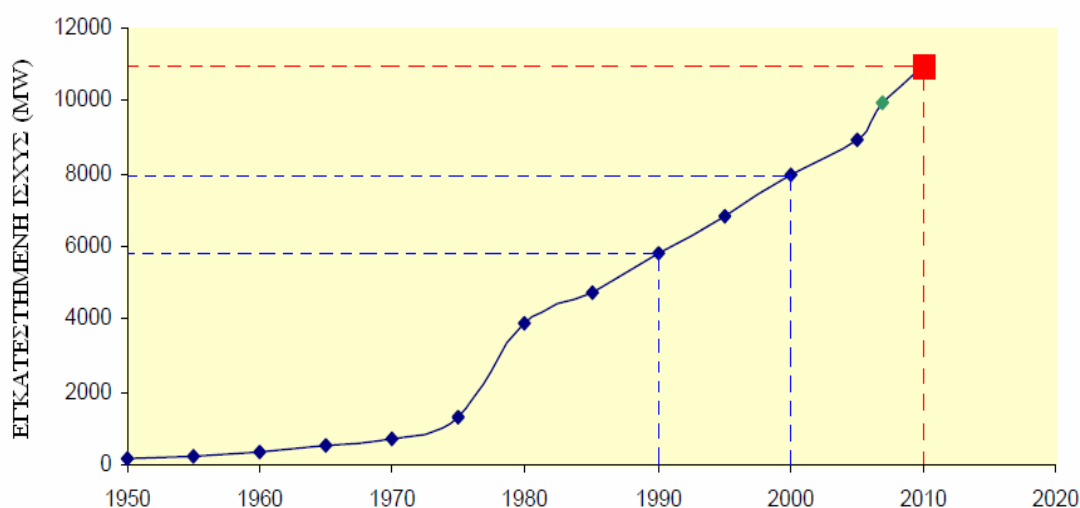
Μετά το 2^ο παγκόσμιο πόλεμο η αξιοποίηση της γεωθερμίας για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έγινε ελκυστική για πολλές χώρες, καθώς ήταν ανταγωνιστική ως προς άλλες μορφές ενέργειας και παρουσίαζε σημαντικά πλεονεκτήματα. Στον πίνακα 4.2 αναφέρονται οι χώρες που χρησιμοποιούν τη γεωθερμική ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρισμού, η εγκατεστημένη γεωθερμική-ηλεκτρική ισχύς κάθε μίας για το 1990, 1995, 2000, 2005 και 2010 καθώς και η συνολική παγκόσμια ισχύς για τα έτη αυτά. Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι η εγκατεστημένη γεωθερμική-ηλεκτρική ισχύς στις αναπτυσσόμενες χώρες το 1995 και το 2000 αντιπροσώπευε αντίστοιχα το 38% και το 47% αντίστοιχα της συνολικής εγκατεστημένης γεωθερμικής ισχύος παγκοσμίως.

Πίνακας 4.2: Εγκατεστημένη γεωθερμική-ηλεκτρική ισχύς (MW) σε παγκόσμια κλίμακα, από το 1990 έως το 2010 [8],[31]

ΧΩΡΑ	1990 (MW)	1995 (MW)	2000 (MW)	2005 (MW)	2010 (MW)
Αργεντινή	0,67	0,67	---	---	---
Αυστραλία	---	0,17	0,17	0,2	1,1
Αυστρία	---	---	---	1,2	1,4
Αιθιοπία	---	---	8,52	7	7,3
Γαλλία	4,2	4,2	4,2	14,7	16
Γερμανία	---	---	---	0,2	6,6
Γουατεμάλα	---	33,4	33,4	33	52
Ελ Σαλβαδόρ	95	105	161	151	204
Η.Π.Α.	2.774,6	2.816,7	2.228	2.544	3.903
Ιαπωνία	214,6	413,7	546,9	536	536
Ινδονησία	144,75	309,75	589,5	797	1.197
Ιταλία	545	631,7	785	790	843
Ισλανδία	44,6	50	170	322	575
Κένυα	45	45	45	127	167
Κόστα Ρίκα	---	55	142,5	163	166
Κίνα	19,2	28,78	29,17	28	24
Μεξικό	700	753	755	953	958
Νέα Ζηλανδία	283,2	286	437	435	628
Νικαράγουα	35	70	70	77	88
Παπούα-Ν.Γουινέα	---	---	---	39	56
Πορτογαλία	3	5	16	16	29
Ρωσία	11	11	23	79	82
Ταϊλάνδη	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Τουρκία	20,6	20,4	20,4	20,4	82
Φιλιππίνες	891	1.227	1.909	1.931	1.904
Σύνολο	5.831,52	6.866,77	7.974,06	9.064	10.715

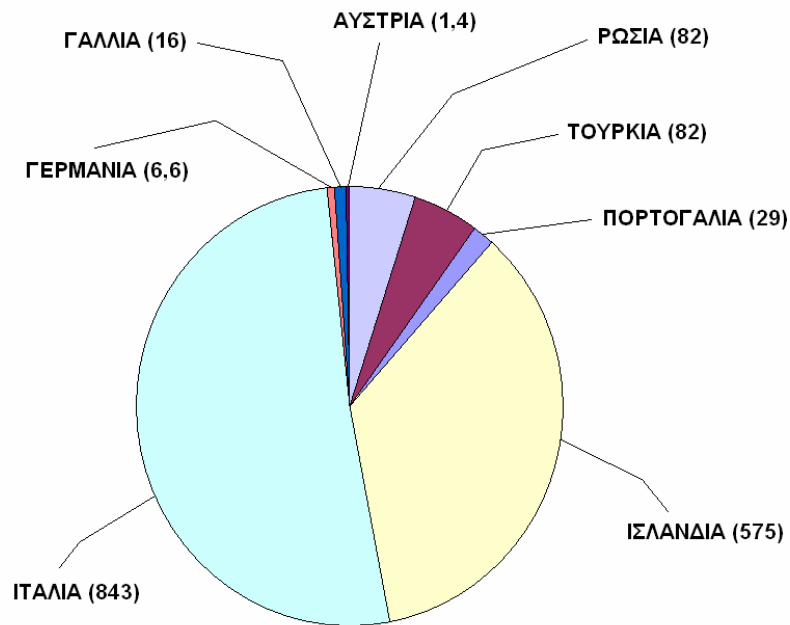
Η εκμετάλλευση της γεωθερμίας για ηλεκτροπαραγωγή στις αναπτυσσόμενες χώρες παρουσιάζει ενδιαφέρουσες τάσεις με το χρόνο. Μεταξύ των ετών 1975 και 1979 η εγκατεστημένη γεωθερμική ηλεκτρική ισχύς σε αυτές τις χώρες αυξήθηκε από 75 σε 462 MW. Στο τέλος της επόμενης πενταετίας (1984) έφτασε στα 1.495 MW παρουσιάζοντας ένα ρυθμό αύξησης κατά τη διάρκεια των δύο αυτών περιόδων 610% και 323% αντίστοιχα. Στα επόμενα 16 χρόνια, από το 1984 μέχρι το 2000, σημειώθηκε μια περαιτέρω αύξηση της τάξης του 150% [30]. Η αυξητική πορεία της παγκόσμιας εγκατεστημένης γεωθερμικής-ηλεκτρικής ισχύος διαμέσου των ετών φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα (σχήμα 4.4).

Αξίζει να σημειώσουμε ότι η γεωθερμική ενέργεια συμμετέχει σημαντικά στο ενεργειακό ισοζύγιο αρκετών περιοχών. Για παράδειγμα, το 2001 η ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε από γεωθερμικούς πόρους αντιπροσώπευε το 27% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας στις Φιλιππίνες, το 12,4 % στην Κένυα, το 11,4% στην Κόστα Ρίκα και το 4,3% στο Ελ Σαλβαδόρ.



Σχήμα 4.4: Παγκόσμια εγκατεστημένη γεωθερμική-ηλεκτρική ισχύς από το 1950 έως το 2010 [32]

Εξετάζοντας τον πίνακα 4.2, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι από τις 25 χώρες που αξιοποιούν τη γεωθερμία για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οι 8 είναι ευρωπαϊκές και παρουσιάζονται ξεχωριστά στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Οι ευρωπαϊκές χώρες που παράγουν ηλεκτρισμό από γεωθερμία με την εγκατεστημένη ισχύ (MW) καθεμιάς για το έτος 2007 [24]

4.4 Παραδείγματα εφαρμογών

- Nesjavellir, Ισλανδία
 παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμού νερού, συνολική εγκατεστημένη ισχύς 120MW, 24 φρεάτια παραγωγής, διάταξη στιγμιαίας ατμοποίησης



- Long Valley Caldera, Sierra Nevada Καλιφόρνια, Η.Π.Α.
4 μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συνολική εγκατεστημένη ισχύς 37MW



- Wairakei, Νέα Ζηλανδία
μονάδα παραγωγής συνδυασμένου κύκλου (ηλεκτροπαραγωγή και ιχθυοκαλλιέργεια)



- Valle Secolo, Ιταλία
Εγκατεστημένη ισχύς 2x60MW



- Ribeira Grande, Αζόρες, Πορτογαλία
μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, διάταξη ξεχωριστών εργαζόμενων
μέσων, εγκατεστημένη ισχύς 14MW



- Castelnuovo Val di Cecina, Ιταλία
οικισμός που χρησιμοποιεί για τη θέρμανση των σπιτιών τη γεωθερμική ενέργεια



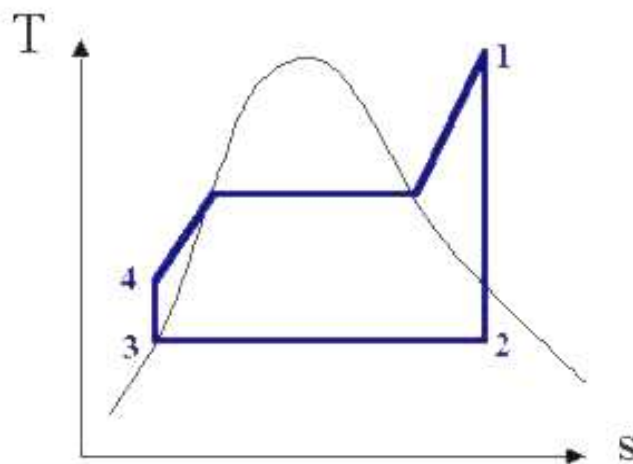
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5⁰

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

5.1 Βασικές αρχές ηλεκτροπαραγωγής

Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει μια θερμοδυναμική διεργασία που ονομάζεται κύκλος Rankine. Ο κύκλος αυτός, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1, περιγράφει τις μεταβολές στις οποίες υπόκειται το εργαζόμενο μέσο καθώς διέρχεται μέσα από τις διατάξεις μιας εγκατάστασης παραγωγής.

Αρχικά, υπάρχει ο ατμοπαραγωγός, ο οποίος προσδίδει στο εργαζόμενο μέσο την θερμότητα που χρειάζεται ώστε να ατμοποιηθεί και να έλθει σε κορεσμένη ή υπέρθερμη κατάσταση (σημείο 1). Στη συνέχεια το εργαζόμενο μέσο διοχετεύεται στον ατμοστρόβιλο όπου και εκτονώνεται ισεντροπικά μέχρι μια συγκεκριμένη πίεση, τη πίεση εξόδου (σημείο 2). Ακολούθως οδηγείται στο συμπυκνωτή όπου συμπυκνώνεται υπό σταθερή πίεση και θερμοκρασία (σημείο 3) με τη βοήθεια του πύργου ψύξης. Τέλος, μια αντλία τροφοδοτεί τον ατμοπαραγωγό με το υγροποιημένο εργαζόμενο μέσο αυξάνοντάς του ταυτόχρονα την πίεση του (σημείο 4).



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα θερμοκρασίας - εντροπίας κύκλου Rankine [33]

Μια μονάδα παραγωγής είναι ουσιαστικά μία διάταξη που μετατρέπει μία μορφή ενέργειας σε άλλη. Η αρχική μορφή ενέργειας λοιπόν, μετατρέπεται σε θερμική στον ατμοπαραγωγό ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί ο κύκλος Rankine και να έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαφορά μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με μία αντίστοιχη που αξιοποιεί τη γεωθερμία είναι η έλλειψη του ατμοπαραγωγού. Αυτό συμβαίνει, διότι στη δεύτερη περίπτωση το εργαζόμενο (γεωθερμικό) μέσο, με το οποίο τροφοδοτείται η εκάστοτε διάταξη, είναι ήδη υψηλής ενθαλπίας, έχει δηλαδή υψηλή θερμοκρασία και πίεση και δεν είναι απαραίτητη η πρόσδοση επιπλέον θερμικής ενέργειας.

5.2 Διατάξεις αξιοποίησης της γεωθερμίας για ηλεκτροπαραγωγή

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω γεωθερμίας επηρεάζεται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του γεωθερμικού ρευστού, δηλαδή τη θερμοκρασία, τη πίεση, τη περιεκτικότητά του σε αέρια και σε σωματίδια καθώς και τη παροχή του. Βάσει λοιπόν, αυτών των χαρακτηριστικών του γεωθερμικού μέσου, το οποίο είναι διαθέσιμο σε κάθε περιοχή, σχεδιάζεται και ο αντίστοιχη μονάδα παραγωγής. Παρακάτω παραθέτονται οι πιο κοινές διατάξεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιώντας τη γεωθερμία.

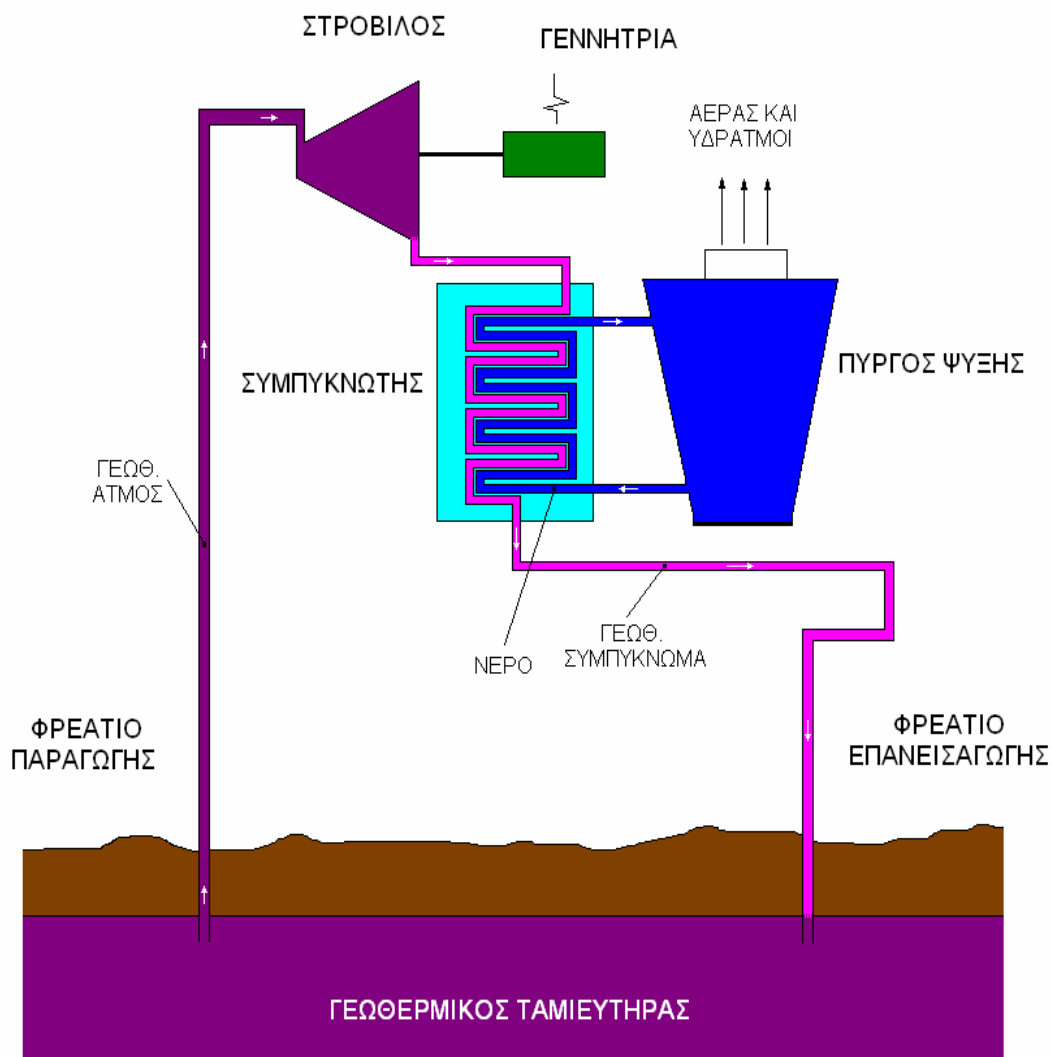
5.2.1 Με χρήση ξηρού ατμού (dry steam)

Η διάταξη παραγωγής με χρήση ξηρού ατμού αποτελεί την απλούστερη και οικονομικά ελκυστικότερη διάταξη αξιοποίησης του γεωθερμικού δυναμικού για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Βρίσκει εφαρμογή σε περιοχές όπου το γεωθερμικό μέσο λαμβάνεται από το φρεάτιο παραγωγής σε καθαρή αέρια φάση με μικρό ποσοστό υδρατμών.

Στη περίπτωση αυτή λοιπόν, το γεωθερμικό μέσο ταυτίζεται απόλυτα με το εργαζόμενο μέσο, πράγμα το οποίο αποτελεί και την ειδοποιό διάφορα αυτής της διάταξης σε σχέση με τις υπόλοιπες. Το γεωθερμικό μέσο λοιπόν, το οποίο αποτελείται από υπέρθερμο ατμό, οδηγείται απευθείας και χωρίς να παρεμβάλλεται καμία επεξεργασία (με εξαίρεση κάποια πιθανή χημική επεξεργασία) στο κατάλληλα διαμορφωμένο ζεύγος ατμοστρόβιλου-ηλεκτρογεννήτριας, στο οποίο εκτονώνεται και ως αποτέλεσμα έχουμε την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτού του τύπου η διάταξη μπορεί να λειτουργήσει είτε με συμπυκνωτή, είτε με απευθείας απόρριψη του ατμού στην ατμόσφαιρα.

Στη πρώτη περίπτωση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.2, ο ατμός μετά τον ατμοστρόβιλο οδηγείται στο συμπυκνωτή, όπου συμπυκνώνεται σε υγρή φάση με τη βοήθεια του πύργου ψύξης. Η διεργασία αυτή συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας η οποία διοχετεύεται στο περιβάλλον μέσω του πύργου ψύξης, όπως ακριβώς και στις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας. Εδώ να σημειώσουμε ότι η συμπύκνωση του ατμού που εξέρχεται από τον ατμοστρόβιλο βελτιώνει το βαθμό απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου, καθώς αυξάνεται η πτώση πίεσης που επιτυγχάνεται στον ατμοστρόβιλο. Επίσης η κατανάλωση ατμού είναι περίπου η μισή σε σχέση με τη διάταξη της απευθείας απόρριψης του ατμού στην ατμόσφαιρα. Το μοναδικό μειονέκτημά της συγκεκριμένης διάταξης είναι η πολυπλοκότητά της πράγμα που οδηγεί σε αυξημένες απαιτήσεις σε κατασκευαστικό, χωροταξικό και αναπόφευκτα οικονομικό επίπεδο. Εδώ να σημειώσουμε ότι μετά τη συμπύκνωση υπάρχει η δυνατότητα ο υγροποιημένος ατμός να διοχετευθεί πίσω στο γεωθερμικό ταμειυτήρα μέσω του φρεατίου επανεισαγωγής. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση της πίεσης του γεωθερμικού μέσου σε υψηλά επίπεδα για μεγάλο χρονικό διάστημα εκμετάλλευσης του αντίστοιχου γεωθερμικού πεδίου. Συνήθως η εγκατεστημένη ισχύς μονάδων παραγωγής ξηρού τύπου με συμπυκνωτή κυμαίνεται μεταξύ 55-60 MW, πρόσφατα βέβαια έχουν κατασκευαστεί και λειτουργούν σταθμοί ισχύος 110 MW.

Στην δεύτερη περίπτωση, η οποία αποτελεί και την πιο απλή μορφή μονάδας παραγωγής ενέργειας από τις δυο, ο χαμηλής πλέον ενθαλπίας και πίεσης ατμός εξέρχεται από τον ατμοστρόβιλο και απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Αν και αυτή η διάταξη χρειάζεται περίπου διπλάσια ποσότητα ατμού σε σχέση με την αντίστοιχη με συμπυκνωτή για τη παραγωγή ίδιας ποσότητας ενέργειας, έχει κάποια ενδιαφέροντα και χρήσιμα πλεονεκτήματα. Αρχικά, χρησιμοποιείται κατά κόρον σε πιλοτικές και εφεδρικές μονάδες, σε περιπτώσεις μικρών παροχών ατμού καθώς και σε δοκιμές παραγωγής ηλεκτρισμού στα πλαίσια αξιολόγησης της παραγωγής ενός γεωθερμικού πεδίου. Ακόμα η χρήση της είναι επιτακτική σε περιπτώσεις όπου ο ατμός έχει υψηλά ποσοστά (>12% κατά βάρος) περιεκτικότητας μη συμπυκνώσιμων συστατικών. Τέλος, μια τέτοια μονάδα παραγωγής που λειτουργεί με ατμοσφαιρική διάθεση ατμού λόγω της απλότητας του μπορεί να κατασκευαστεί και να εγκατασταθεί για λειτουργία σε σύντομο χρονικό διάστημα (13-14 μήνες). Η εγκατεστημένη ισχύς αυτού του είδους των σταθμών είναι μεταξύ 2,5-5 MW [30].

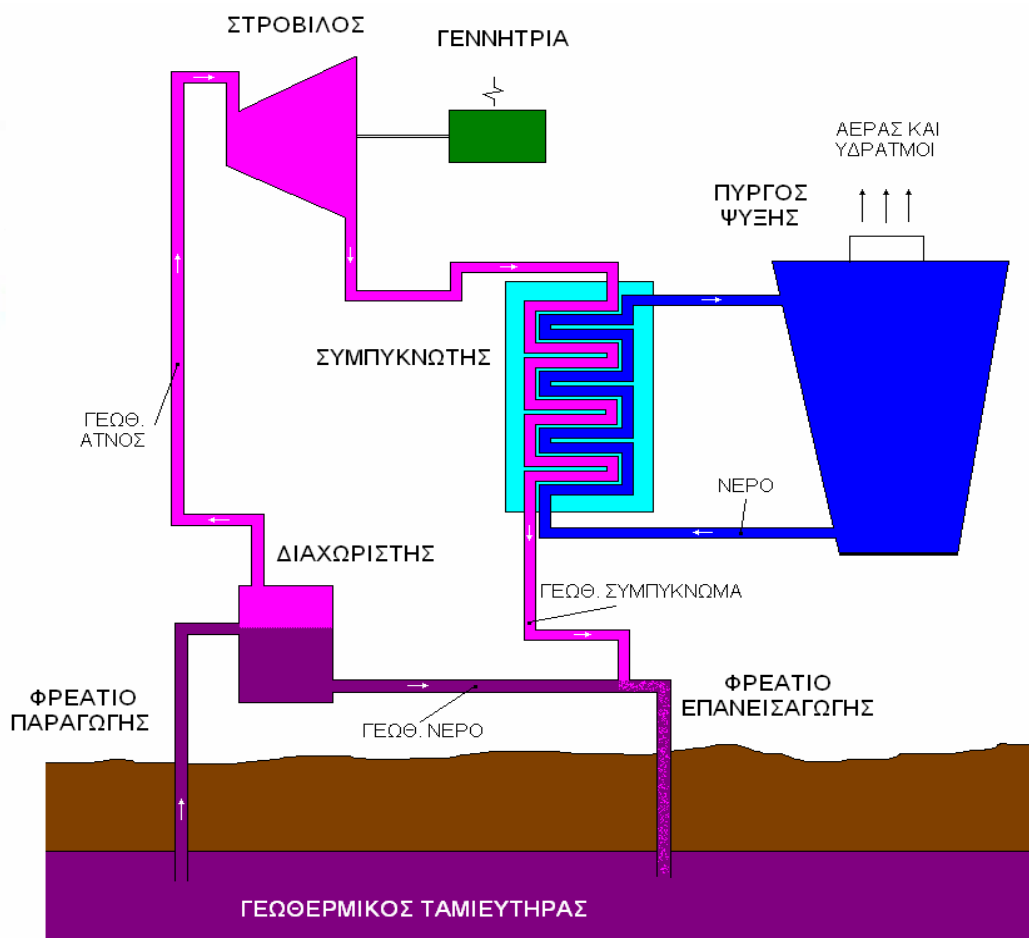


Σχήμα 5.2: Διάταξη ξηρού ατμού με συμπυκνωτή τύπου θερμικού εναλλάκτη

Οι συμβατικοί ατμοστρόβιλοι σε διατάξεις ξηρού ατμού έχουν ως απαίτηση γεωθερμικά πεδία με ατμό ελάχιστης θερμοκρασίας 150°C. Με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα βέβαια υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσης υπέρθερμου γεωθερμικού ατμού θερμοκρασίας μέχρι και 300-350°C και ολόένα και αυξανόμενης πίεσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, ο οποίος όμως δεν υπερβαίνει το 30%. Η απαίτηση μιας τυπικής γεωθερμικής μονάδας παραγωγής αυτής της διάταξης σε ξηρό ή υπέρθερμο ατμό είναι περίπου 6,5kg ανά παραγόμενη kWh. Να σημειώσουμε βέβαια, ότι τα γεωθερμικά πεδία που παράγουν καθαρό ατμό είναι αρκετά σπάνια και υπάρχουν μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές στο κόσμο.

5.2.2 Με στιγμιαία ατμοποίηση εργαζόμενου μέσου (flash steam)

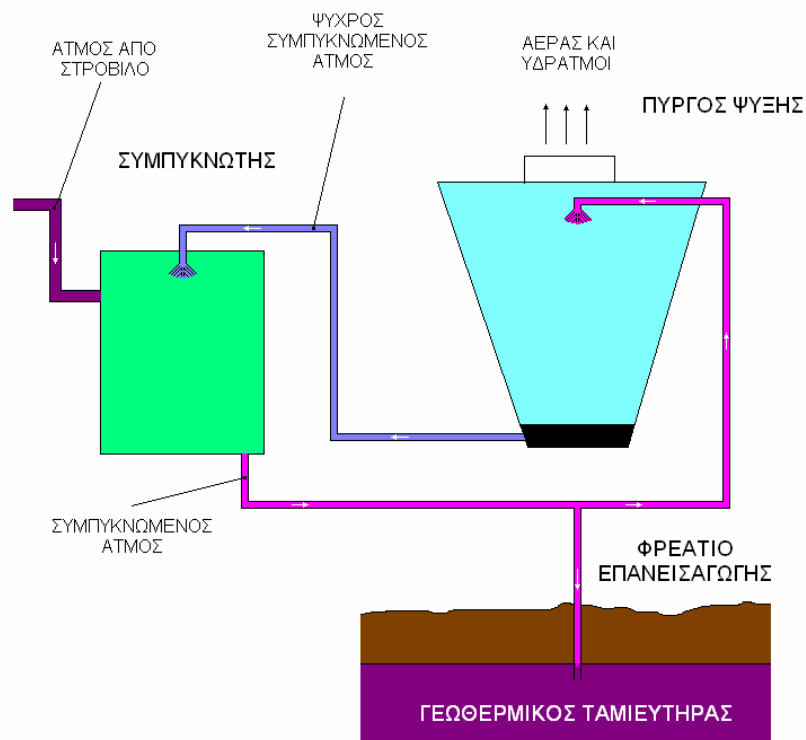
Η διάταξη παραγωγής με στιγμιαία ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου (σχήμα 5.3) είναι η πιο συχνά εφαρμοζόμενη διάταξη ηλεκτροπαραγωγής μέσω γεωθερμίας. Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου το γεωθερμικό μέσο που λαμβάνεται από το φρεάτιο παραγωγής δεν είναι καθαρός ατμός, αλλά μπορεί να είναι είτε μίγμα νερού-ατμού, είτε ατμός με υψηλό ποσοστό υγρασίας, είτε θερμό νερό σε υψηλή πίεση. Η ιδιαιτερότητα λοιπόν, αυτής της διάταξης εντοπίζεται στην ύπαρξη ενός ειδικού ταμιευτήρα που είναι τοποθετημένος πριν τον αμοστρόβιλο και ονομάζεται διαχωριστής. Το γεωθερμικό ρευστό, από το φρεάτιο παραγωγής, διοχετεύεται στο διαχωριστή και χάρη στην απότομη πτώση πίεσης που δημιουργείται στο εσωτερικό του, μέρος του ρευστού ατμοποιείται στιγμιαία. Έτσι καταλήγουμε να έχουμε καθαρό ατμό, ο οποίος και οδηγείται στον αμοστρόβιλο, και ζεστό νερό, που αποτελεί το ποσοστό του γεωθερμικού ρευστού που δεν ατμοποιήθηκε. Τέλος, να σημειώσουμε ότι ο διαχωριστής εκτός του ότι τροφοδοτεί τον αμοστρόβιλο με το απαραίτητο εργαζόμενο μέσο, τον προστατεύει επίσης από την είσοδο νερού.



Σχήμα 5.3: Διάταξη στιγμιαίας ατμοποίησης εργαζόμενου μέσου με συμπυκνωτή τύπου θερμικού εναλλάκτη

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται στην ηλεκτρογεννήτρια της μονάδας η οποία είναι συζευγμένη με τον αμοστρόβιλο ο οποίος κινείται από τον ατμό που προέρχεται από το διαχωριστή. Ο ατμός μετά τον αμοστρόβιλο διοχετεύεται στο συμπυκνωτή, όπου και συμπυκνώνεται δημιουργώντας υποπίεση, αυξάνοντας έτσι τη παραγόμενη ισχύ από τον αμοστρόβιλο.

Να σημειώσουμε εδώ ότι ο συμπυκνωτής μπορεί να είναι τύπου θερμικού εναλλάκτη ή τύπου άμεσου επαφής. Στους συμπυκνωτές άμεσου επαφής (σχήμα 5.4) το ψύχον μέσο (ψυχρός συμπυκνωμένος ατμός) προερχόμενο από το πύργο ψύξης περνάει πάνω στο εξερχόμενο από τον αμοστρόβιλο μίγμα ατμού προκαλώντας τη συμπύκνωσή του. Ο συμπυκνωμένος ατμός που προκύπτει εξέρχεται από το συμπυκνωτή, και ένα μέρος του οδηγείται, μαζί με το γεωθερμικό νερό από το διαχωριστή, στο φρεάτιο επανεισαγωγής. Ο υπόλοιπος συμπυκνωμένος ατμός εισέρχεται στο πύργο ψύξης και αφού ψυχθεί οδηγείται πάλι στο συμπυκνωτή όπου χρησιμοποιείται ως ψύχον μέσο. Ένα μικρό τμήμα του συμπυκνωμένου ατμού που εισέρχεται στο πύργο ψύξης απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα υπό τη μορφή υδρατμών. Το υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα γεωθερμικό νερό που παραμένει υγροποιημένο στο διαχωριστή, πριν διοχετευτεί στο φρεάτιο επανεισαγωγής, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως μέσο κεντρικής θέρμανσης σε γειτονικούς οικισμούς, έτσι ώστε να αξιοποιηθεί το υψηλό θερμικό του περιεχόμενο [1].



Σχήμα 5.4: Μονάδα στιγμιαίας ατμοποίησης εργαζόμενη μέσω συμπυκνωτή άμεσου επαφής

Για να αυξήσουμε την απόδοση αυτής της διάταξης και ανάλογα πάντα με τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού που μας παρέχει η πηγή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δυο διαχωριστές. Το γεωθερμικό ρευστό εισέρχεται στον πρώτο διαχωριστή όπου ένα μέρος του ατμοποιείται και το υπόλοιπο μέρος, το οποίο αποτελείται ουσιαστικά από ζεστό νερό, διοχετεύεται στον δεύτερο διαχωριστή για περαιτέρω ατμοποίηση. Εδώ να σημειώσουμε ότι ο ατμός που παράγεται στον δεύτερο διαχωριστή είναι χαμηλότερης πίεσης. Για να εκμεταλλευτούμε τώρα τον ατμό που παρέχεται με δυο διαφορετικές πιέσεις χρησιμοποιούμε ατμοστρόβιλο διπλής εισόδου. Η διάταξη αυτή ονομάζεται διπλή ατμοποίηση με αποτόνωση και μας δίνει τη δυνατότητα να αξιοποιούμε το μεγαλύτερο μέρος του δυναμικού της γεωθερμικής πηγής για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Εάν η πηγή έχει υψηλό επίπεδο αιωρούμενων και διαλυμένων στερεών, μπορεί να είναι αναγκαία η ενσωμάτωση εξοπλισμού ελέγχου των επικαθίσεων στην είσοδο της διάταξης και εξοπλισμού αποκατάστασης των στερεών στην έξοδο αυτής. Αυτό προφυλάσσει τον εξοπλισμό της μονάδας από απόφραξη και διατηρεί το γεωθερμικό ρευστό καθαρό για επανεισαγωγή στον ταμιευτήρα. Επιπροσθέτως, να αναφέρουμε ότι εάν υφίστανται σημαντικές ποσότητες μη συμπυκνώσιμων αερίων, μπορεί να είναι αναγκαία η εγκατάσταση εξοπλισμού αποβολής των αερίων αυτών από το συμπυκνωτή για να μην αυξηθεί η αντίθλιψη στο σύστημα με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της εγκατάστασης [33].

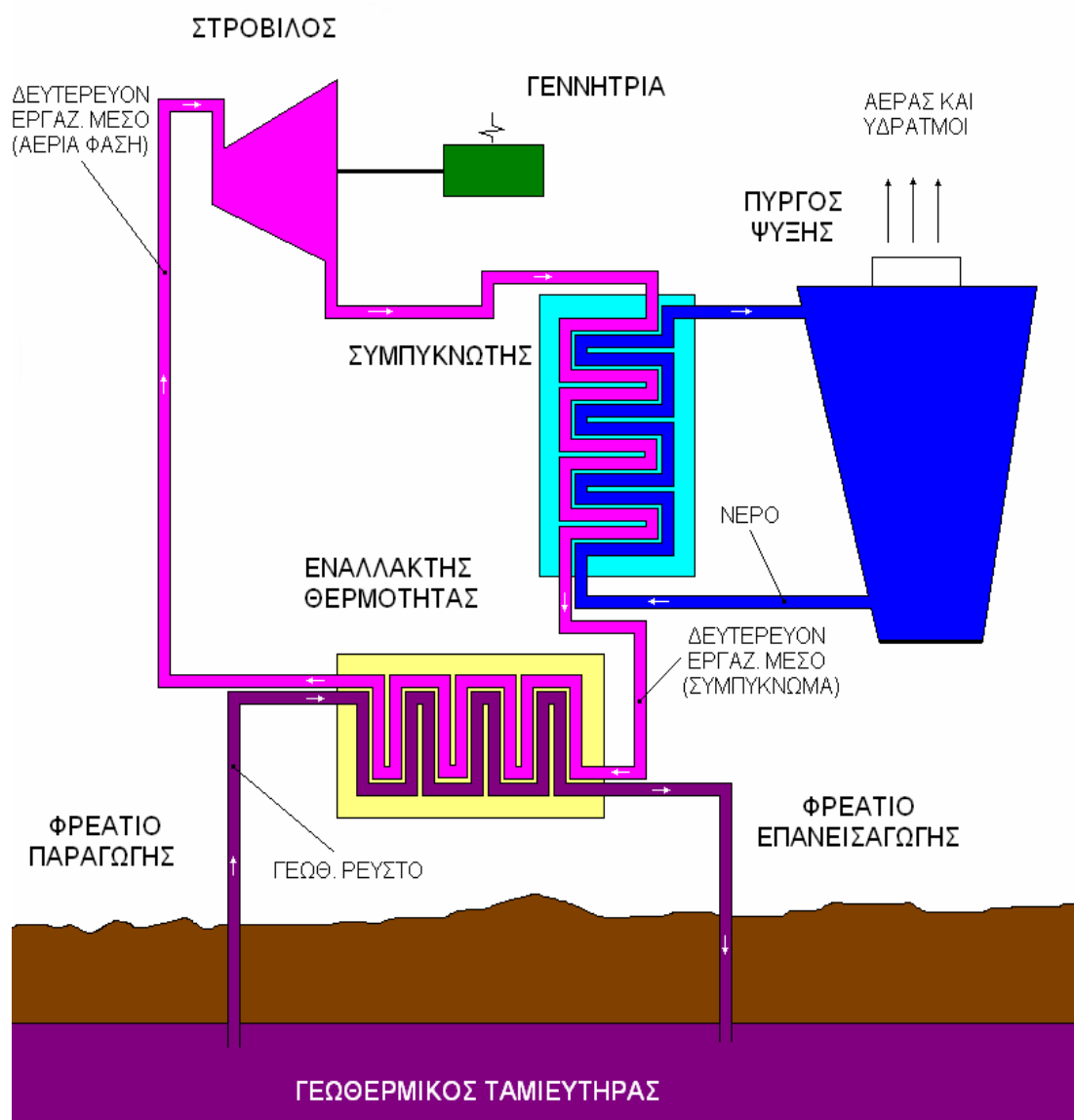
Οι μονάδες που χρησιμοποιούν αυτού του είδους τις διατάξεις έχουν ισχύ περίπου 5-100 MW. Τα επιθυμητά θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του ατμού είναι τα εξής: πίεση 0,5-0,6 MPa και θερμοκρασία 155-165°C, οπότε ο στρόβιλος απαιτεί παροχή περίπου 8kg ατμού ανά παραγόμενη kWh [1].

5.2.3 Με ξεχωριστά εργαζόμενα μέσα (binary cycle)

Η διάταξη παραγωγής με ξεχωριστά εργαζόμενα μέσα είναι η πλέον κατάλληλη για περιοχές όπου η θερμοκρασία του γεωθερμικού μέσου δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή (<180°C). Στη διάταξη αυτή λοιπόν (σχήμα 5.5) έχουμε δύο εργαζόμενα μέσα, το γεωθερμικό (πρωτεύον) που προέρχεται από την αντίστοιχη πηγή και το δευτερεύον.

Αρχικά το γεωθερμικό μέσο που λαμβάνεται μέσω του παραγωγικού φρεατίου οδηγείται σε κατάλληλο θερμικό εναλλάκτη, όπου αποδίδει μέρος της θερμικής του ενέργειας στο δευτερεύον εργαζόμενο μέσο και στη συνέχεια επιστρέφει στο γεωθερμικό ταμιευτήρα μέσω του φρεατίου επανεισαγωγής. Το γεωθερμικό μέσο μπορεί να αποτελείται από θερμό ατμό, θερμό νερό ή και μίγμα αυτών.

Το δευτερεύον εργαζόμενο μέσο τώρα χρησιμοποιείται σε ένα συμβατικό οργανικό κύκλο Rankine (OCR). Συγκεκριμένα το ρευστό διερχόμενο από τον εναλλάκτη απορροφά θερμότητα και ατμοποιείται καθώς παρουσιάζει χαμηλό σημείο ζέσεως (<math><100^{\circ}\text{C}</math>) βάσει και του οποίου και έχει επιλεγεί. Στη συνέχεια, οδηγείται στο ζεύγος αμοστροβίλου-ηλεκτρογεννήτριας όπου και εκτονώνεται παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Τέλος, αφού εισέλθει στον συμπυκνωτή, ο οποίος είναι τύπου θερμικού εναλλάκτη, και υγροποιηθεί οδηγείται και πάλι στον αρχικό εναλλάκτη εκτελώντας έναν κλειστό θερμοδυναμικό κύκλο. Ως εργαζόμενο μέσο επιλέγονται οργανικές ρευστές ουσίες τύπου υδρογονανθράκων (HFC) που έχουν χαμηλό σημείο ζέσεως και υψηλή τάση ατμών σε χαμηλές θερμοκρασίες (σε σχέση με τον υδάτινο ατμό) και συνήθως χρησιμοποιείται ισοπετάνιο, πεντάνιο ή βουτάνιο [33].



Σχήμα 4.5: Μονάδα με ξεχωριστά εργαζόμενα μέσα και συμπυκνωτή τύπου θερμικού εναλλάκτη

Εάν γίνει σωστή επιλογή του δευτερεύοντος ρευστού, η διάταξη αυτή μπορεί να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αξιοποιούνται γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασία που κυμαίνεται μεταξύ 85-170°C. Το ανώτερο όριο εξαρτάται από τη θερμική σταθερότητα του οργανικού ρευστού, ενώ το κατώτατο όριο από οικονομοτεχνικούς παράγοντες, καθώς κάτω από μια ορισμένη θερμοκρασία, εξαιτίας του μεγέθους και της ικανότητας των απαιτούμενων εναλλακτών, το όλο πρόγραμμα ίσως κατέληγε ασύμφορο από οικονομικής απόψεως.

Εκτός από τις περιπτώσεις χαμηλής-μέσης ενθαλπίας, η διάταξη ξεχωριστών εργαζόμενων μέσων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί εκεί όπου η εφαρμογή της στιγμιαίας ατμοποίησης του ρευστού θα πρέπει να αποφεύγεται (π.χ. για την αποφυγή απόφραξης των γεωτρήσεων). Στην περίπτωση αυτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υποβρύχιες αντλίες, ώστε τα γεωθερμικά ρευστά να παραμένουν υπό σταθερή πίεση και σε υγρή φάση, ενώ η ενέργεια μπορεί να λαμβάνεται και να αξιοποιείται μέσω του δευτερεύοντος εργαζόμενου μέσου [30].

Εδώ να σημειώσουμε ότι στη δεκαετία του 1990 αναπτύχθηκε μία νέα μέθοδος παραγωγής με ξεχωριστά εργαζόμενα μέσα και ονομάστηκε κύκλος Kalina. Ο κύκλος αυτός χρησιμοποιεί ως δευτερεύον εργαζόμενο μέσο ένα μίγμα νερού-αμμωνίας το οποίο διερχόμενο από το στρόβιλο υψηλής πίεσης εκτονώνεται σε υπέρθερμες συνθήκες και πριν εισέλθει στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης, πραγματοποιείται αναθέρμανση αυτού. Ο κύκλος Kalina είναι πολύ πιο αποδοτικός από τους αντίστοιχους οργανικούς κύκλους Rankine αλλά και πιο περίπλοκος, ενώ η αξιοπιστία του μένει να αποδειχθεί σε μακροχρόνια εφαρμογή του σε μονάδες παραγωγής ενέργειας.

Η διάταξη αυτή, των ξεχωριστών εργαζόμενων μέσων, λόγω της παράλληλης και ξεχωριστής λειτουργίας του δευτερεύοντος εργαζόμενου μέσου, επιτρέπει την αξιοποίηση γεωθερμικών ρευστών τα οποία είναι χημικά ακάθαρτα και σε αντίθετη περίπτωση θα δημιουργούσαν επικαθίσεις αλάτων και φθορά στις σωληνώσεις. Απαραίτητη προϋπόθεση βέβαια, είναι η διατήρηση των σωληνώσεων των παραγωγικών φρεατίων υπό πίεση, ώστε να αποφύγουμε την ατμοποίηση του γεμάτου προσμίξεις γεωθερμικού ρευστού.

Παρόλο που βρίσκονται σε λειτουργία περίπου 60 μονάδες παραγωγής με ξεχωριστά εργαζόμενα μέσα, τα λειτουργικά κόστη είναι αρκετά υψηλά. Η διατήρηση του γεωθερμικού μέσου υπό υψηλή πίεση και η αύξηση της πίεσης του δευτερεύοντος εργαζόμενου μέσου μετά το συμπυκνωτή καταναλώνει περίπου το 30% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας της μονάδας, καθώς για τις ενέργειες αυτές απαιτούνται αντλίες μεγάλης ισχύος. Οπότε η διάταξη αυτή πρέπει να διαχειρίζεται μεγάλες ποσότητες γεωθερμικού μέσου, ώστε να λειτουργεί με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο γεωθερμικός

σταθμός παραγωγής Mammoth στη Καλιφόρνια (Η.Π.Α.), όπου απαιτεί 84kg γεωθερμικού μέσου ανά παραγόμενη kWh [1].

5.2.4 Με χρήση συνδυασμένου κύκλου (combined cycle)

Μονάδες τέτοιου τύπου συνδυάζουν τις διατάξεις συμβατικού ατμοστρόβιλου και ξεχωριστού εργαζόμενου μέσου. Ο ατμός λοιπόν, ο οποίος έχει προέλθει είτε κατευθείαν από το φρεάτιο παραγωγής, είτε μέσω στιγμιαίας ατμοποίησης στον διαχωριστή, εκτονώνεται στον πρώτο ατμοστρόβιλο και στη συνέχεια οδηγείται σε έναν θερμικό εναλλάκτη, στον οποίο χρησιμοποιείται ως πρωτεύον εργαζόμενο μέσο σε μια διάταξη δύο εργαζόμενων μέσων. Στον εναλλάκτη αυτόν ο ατμός αποδίδει θερμότητα στο δευτερεύον εργαζόμενο μέσο, το οποίο ατμοποιείται και οδηγείται στον δεύτερο ατμοστρόβιλο. Οι δύο ατμοστρόβιλοι είναι συνδεδεμένοι με μια ηλεκτρογεννήτρια την οποία και στρέφουν με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Εδώ να σημειώσουμε ότι στη περίπτωση που έχουμε συνδυασμό διατάξεων στιγμιαίας ατμοποίησης και ξεχωριστών εργαζόμενων μέσων, η απόδοση θερμότητας στη δεύτερη διάταξη γίνεται μέσω ενός πιο πολύπλοκου θερμικού εναλλάκτη. Στον εναλλάκτη αυτόν εκτός από τον ατμό που προέρχεται από τον πρώτο ατμοστρόβιλο, σαν πρωτεύον εργαζόμενο μέσο λειτουργεί και το θερμό νερό που έχει παραμείνει στον διαχωριστή μετά τη διαδικασία της ατμοποίησης.

Ο συμβατικός ατμοστρόβιλος λειτουργεί αποδοτικότερα όταν τροφοδοτείται με ατμό υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, ενώ η διάταξη ξεχωριστών εργαζόμενων μέσων έχει μεγαλύτερη απόδοση όταν χρησιμοποιεί πρωτεύον εργαζόμενο μέσο χαμηλότερης θερμοκρασίας. Οι δύο αυτές συνθήκες πληρούνται σε μια διάταξη συνδυασμένου κύκλου, επιτυγχάνοντας έτσι αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.

Τέλος, σε μια συμβατική γεωθερμική μονάδα παραγωγής, αντί η θερμότητα συμπύκνωσης του εργαζόμενου μέσου να απελευθερώνεται στο περιβάλλον, υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσής της για επιπρόσθετη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με αντικατάσταση του συστήματος συμπυκνωτή-πύργου ψύξης με μια διάταξη ξεχωριστών εργαζόμενων μέσων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

6.1 Εισαγωγή

Τα στοιχεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κάθε φορά που γίνεται εκτίμηση του κόστους ανάπτυξης και παραγωγής της γεωθερμικής-ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ περισσότερα και πιο σύνθετα σε σχέση με τις άλλες μορφές ενέργειας. Συνεπώς, θα πρέπει όλα αυτά τα στοιχεία να συλλέγονται και να αξιολογούνται πολύ προσεκτικά πριν την κατασκευή μιας γεωθερμικής μονάδας.

Το κόστος ανάπτυξης και παραγωγής της γεωθερμικής ενέργειας, για την καλύτερη κατανόηση της δομής του, χωρίζεται σε δυο τομείς. Ο πρώτος ονομάζεται κόστος κύριας επένδυσης και ο δεύτερος, δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης. Οι δύο αυτοί τομείς επηρεάζονται από μια σειρά παραμέτρων και έτσι λοιπόν, το συνολικό κόστος της γεωθερμικής ενέργειας εμφανίζει μεγάλη ποικιλομορφία. Παρακάτω παρουσιάζονται τα σημαντικότερα τμήματα των δαπανών και προσδιορίζονται οι βασικές παράμετροι που τις επηρεάζουν. Σε μερικές περιπτώσεις παρατίθενται οι διακυμάνσεις των δαπανών αυτών, έτσι ώστε να καταστεί αντιληπτό το εύρος διακύμανσης που χαρακτηρίζει τη τιμή της γεωθερμικής ενέργειας.

6.2 Κόστος κύριας επένδυσης

Το κόστος της αρχικής και κύριας επένδυσης περιλαμβάνει όλες τις δαπάνες σχετικά με την ανάπτυξη του έργου, μέχρις ότου τεθεί σε λειτουργία η μονάδα. Η ανάπτυξη αυτή αποτελείται από τρεις διαδοχικές φάσεις οι οποίες περιλαμβάνουν τον εντοπισμό του γεωθερμικού πεδίου (εξερεύνηση), την επιβεβαίωση της παραγωγικής του ικανότητας (επιβεβαίωση) και την κατασκευή των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας και των σχετικών υποδομών (εργασίες ανάπτυξης). Παρακάτω εξετάζουμε διαδοχικά κάθε φάση ανάπτυξης του έργου, προσδιορίζοντας τα βασικά σκέλη του κόστους και αναλύοντας τους παράγοντες που τα επηρεάζουν.

6.2.1 Εξερεύνηση

Η εξερεύνηση είναι η αρχική φάση ανάπτυξης και επιδιώκει να εντοπίσει ένα γεωθερμικό πεδίο που να παρέχει την ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία της μονάδας. Η φάση αυτή ξεκινά με διάφορα είδη γεωλογικών και γεωχημικών ερευνών και αναλύσεων σε περιοχές όπου υπάρχει υποψία γεωθερμικής δραστηριότητας και ολοκληρώνεται με την γεώτρηση του πρώτου φρεατίου παραγωγής. Η φάση εξερεύνησης περιλαμβάνει την αναγνώριση και την εξερεύνηση της περιοχής, στάδια τα οποία αναλύονται πιο κάτω.

Το συνολικό κόστος της εξερεύνησης μπορεί να κυμανθεί από 105 ως 225€ ανά εγκατεστημένο kW και αποτελεί περίπου το 5% του συνολικού κόστους της κύριας επένδυσης. Δεδομένου ότι ο τύπος των δραστηριοτήτων που απαιτούνται για τον εντοπισμό μιας νέας γεωθερμικής πηγής είναι ανεξάρτητος από το μέγεθος του έργου, ισχύουν σημαντικές οικονομίες κλίμακας όταν οι δαπάνες εξερεύνησης προσαρμόζονται σε ένα μεγαλύτερο έργο.

Στη φάση εξερεύνησης οι γεωτρήσεις αποτελούν το σημαντικότερο τμήμα των δαπανών, οπότε οι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος διάτρησης ουσιαστικά καθορίζουν και το κόστος της φάσης εξερεύνησης. Άλλες παράμετροι που έχουν επιπτώσεις στο κόστος εξερεύνησης είναι το ποσό των αρχικών διαθέσιμων πληροφοριών, η ακολουθία των μεθόδων και τεχνολογιών που περιλαμβάνονται σε κάθε στάδιο της εξερεύνησης, οι δαπάνες μισθώσεων, η απόσταση της περιοχής από το κεντρικό οδικό δίκτυο, η δυνατότητα πρόσβασης, η τοπογραφία καθώς επίσης και η γεωλογική εφαρμοσμένη μηχανική σχετική με ζητήματα στατικής σταθερότητας.

A. Αναγνώριση της περιοχής

Κατά το στάδιο αυτό ερευνάται μία περιοχή προκειμένου να περιοριστεί το πεδίο εστίασης και να προσδιοριστούν οι τομείς πιθανού ενδιαφέροντος. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης πραγματοποιούνται γεωλογικές μελέτες, ανάλυση των διαθέσιμων γεωφυσικών στοιχείων, καθώς και γεωχημικές έρευνες. Οι δαπάνες αναγνώρισης της περιοχής, οι οποίες ανέρχονται περίπου σε 75€ ανά εγκατεστημένο kW, επηρεάζονται καθοριστικά τόσο από το ποσό των διαθέσιμων πληροφοριών σχετικά με το γεωθερμικό πεδίο, όσο και από τη δυνατότητα πρόσβασης στα διάφορα σημεία ενδιαφέροντος της περιοχής.

B. Εξερεύνηση της περιοχής

Το στάδιο αυτό εφαρμόζεται σε πιο συγκεκριμένες και μικρότερης έκτασης περιοχές, σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουν προκύψει από το προηγούμενο στάδιο. Στόχος λοιπόν στο σημείο αυτό είναι η διάνοιξη μίας αρχικής γεώτρησης μικρής διαμέτρου ή ενός φρεατίου παραγωγής. Τα αποτελέσματα των γεωφυσικών

ερευνών, οι οποίες έχουν αναλυθεί στη παράγραφο 3.1.2 και οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις της γεώτρησης είναι τα σημαντικότερα στοιχεία αυτής της φάσης.

Ενθαρρυντικά αποτελέσματα από τα προγενέστερα βήματα εξερεύνησης μπορεί να οδηγήσουν στο πρώτο βαθύ φρεάτιο εξερεύνησης. Η πραγματοποίηση γεώτρησης είναι το ακριβότερο κομμάτι της φάσης εξερεύνησης της περιοχής, αλλά και ο μόνος διαθέσιμος τρόπος μέχρι σήμερα για να επιβεβαιωθεί η θερμοκρασία και η παραγωγική δυνατότητα του γεωθερμικού πεδίου. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειώσουμε ότι άλλοτε γίνεται γεώτρηση ενός παραγωγικού φρεατίου και άλλοτε πραγματοποιείται μια λεπτή γεώτρηση. Η λεπτή γεώτρηση παρέχει πολλές πληροφορίες σχετικά με τη στεγανότητα, τα μεταλλεύματα και άλλα χαρακτηριστικά του γεωθερμικού συστήματος. Το βασικό της μειονέκτημα όμως, εκτός του ότι σπάνια χρησιμεύει ως φρεάτιο παραγωγής ή επανεισαγωγής, είναι ότι η γεώτρηση αυτή είναι σχετικά ρηχή και δεν φθάνει πάντα μέχρι το βάθος του ταμιευτήρα, πράγμα το οποίο καθιστά αδύνατες τις λεπτομερείς δοκιμές ροής. Έτσι συχνά επιλέγεται να μην χρησιμοποιηθεί και να πραγματοποιηθεί στη θέση της πλήρης γεώτρησης ενός φρεατίου παραγωγής. Αν και το κόστος σε αυτή τη περίπτωση είναι διπλάσιο σε σχέση με τη διάνοιξη λεπτής γεώτρησης, το φρεάτιο παραγωγής θα χρησιμοποιηθεί για ακριβείς δοκιμές ροής και θα είναι διαθέσιμο για μελλοντική ενεργειακή παραγωγή.

Οι δαπάνες του συγκεκριμένου σταδίου ανέρχονται σε περίπου 80€ ανά εγκατεστημένο kW. Το κόστος της γεώτρησης, το οποίο αντιπροσωπεύει το συνολικό κόστος αυτού του σταδίου, επηρεάζεται καθοριστικά από τη γεωλογική κατάσταση της περιοχής και του γεωθερμικού συστήματος καθώς και από το βάθος των πηγών.

6.2.2 Επιβεβαίωση

Στη φάση αυτή θα πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι το δυναμικό του γεωθερμικού πεδίου είναι σε θέση να καλύψει το 25% των απαιτήσεων της μονάδας που μελετάται για εγκατάσταση. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιούνται γεωτρήσεις και ελέγχεται η παροχή τους μέχρι να ικανοποιηθεί η παραπάνω συνθήκη. Υπάρχει πάντα η πιθανότητα, σε μικρές κυρίως μονάδες, η συνθήκη αυτή να ικανοποιείται από τη γεώτρηση της φάσης εξερεύνησης. Η φάση επιβεβαίωσης περιλαμβάνει επίσης το σχεδιασμό του δικτύου μεταφοράς των ρευστών, καθώς και τη διάνοιξη μερικών γεωτρήσεων, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα επανεισαγωγής τους στον ταμιευτήρα μετά την πραγματοποίηση των απαραίτητων δοκιμών.

Εκτός από την επιβεβαίωση του ενεργειακού δυναμικού ενός γεωθερμικού πόρου, μία πολύ σημαντική παράμετρος σε αυτή τη φάση έχει να κάνει με την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης. Για να υπάρχει δυνατότητα δανειοδότησης του έργου, θα πρέπει να είναι ήδη επιβεβαιωμένο το 25% της συνολικής ισχύος της

μονάδας. Αυτό σημαίνει ότι, όπως και στη φάση εξερεύνησης, όλες οι δαπάνες κατά τη διάρκεια της φάσης επιβεβαίωσης πρέπει να χρηματοδοτηθούν με ίδια κεφάλαια.

Οι δαπάνες γεώτρησης αποτελούν συνήθως το 80% των συνολικών δαπανών στη φάση επιβεβαίωσης. Το υπόλοιπο 20% επιμερίζεται κυρίως στην ανάπτυξη των υποδομών της περιοχής, στον έλεγχο των φρεατίων, στην υποβολή αναφορών και εκθέσεων και στην διαδικασία αδειοδότησης. Ο προϋπολογισμός του κόστους επιβεβαίωσης για εμπορικά βιώσιμα, έργα, υπολογίζεται κατά μέσο όρο σε 130€ ανά εγκατεστημένο kW, μέγεθός που αντιπροσωπεύει το 4% του συνολικού κόστους κύριας επένδυσης. Οι προκύπτουσες δαπάνες επιβεβαίωσης μπορούν εντούτοις να παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των πηγών και το ποσοστό επιτυχίας των γεωτρήσεων. Άλλοι παράμετροι που επηρεάζουν το κόστος είναι η δυνατότητα πρόσβασης των διατρητικών μηχανημάτων στην περιοχή και οι πιθανές καθυστερήσεις λόγω ρυθμιστικών ή αδειοδοτικών ζητημάτων. Τα χρήματα που απαιτούνται στη φάση επιβεβαίωσης, όπως αναφέραμε και πιο πάνω, είναι συνήθως κεφάλαιο επιχειρηματικού κινδύνου (υψηλό ρίσκο) που συνεπάγεται υψηλό ποσοστό επιστροφής και επομένως έχει επιπτώσεις σε όλες τις συνιστώσες του κόστους του έργου. Οποιαδήποτε καθυστέρηση κατά τη διάρκεια ή και μετά από αυτήν τη φάση αντιστοιχεί σε αύξηση των πραγματικών δαπανών.

Στο σημείο αυτό, να σημειώσουμε ότι η διάκριση μεταξύ της εξερεύνησης και της επιβεβαίωσης είναι μερικές φορές δύσκολο να γίνει. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα μικρά έργα που δεν απαιτούν πολλά φρεάτια παραγωγής. Εάν εξετάζονταν από κοινού η εξερεύνηση και η επιβεβαίωση, το συνδυασμένο κόστος τους υπολογίζεται κατά μέσο όρο σε 270€ ανά εγκατεστημένο kW.

6.2.3 Έργα ανάπτυξης

Η φάση των έργων ανάπτυξης καλύπτει τα κόστη όλων των υπόλοιπων εργασιών και εξοπλισμού που απαιτούνται μέχρι να τεθεί η μονάδα σε λειτουργία και να συνδεθεί με το δίκτυο. Περιλαμβάνει λοιπόν, το κόστος των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας, των επιπλέον γεωτρήσεων και τον έλεγχο των φρεατίων (έως ότου καλυφθούν όλες οι απαιτήσεις της μονάδας σε γεωθερμικά ρευστά), των σωληνώσεων και αντλιών, της μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των συστημάτων μείωσης της ρύπανσης, του ηλεκτρικού υποσταθμού και της διασύνδεσης της μονάδας με το δίκτυο μεταφοράς, των κατασκευαστικών έργων (δρόμοι, κτήρια) και τέλος των αδειοδοτικών και νομικών διαδικασιών. Πιο συγκεκριμένα, η φάση αυτή χωρίζεται σε πέντε τομείς, οι οποίοι αναλύονται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

A. Γεωτρήσεις

Το κόστος γεώτρησης διαμορφώνεται από δύο κύριους παράγοντες: (α) το κόστος γεώτρησης ενός μεμονωμένου φρεατίου και, (β) τον αριθμό των φρεατίων που θα διανοιχθούν. Το κόστος ενός μεμονωμένου φρεατίου σχετίζεται κυρίως με το βάθος και τη διάμετρο των γεωτρήσεων, με τις ιδιότητες των πετρωμάτων που βρίσκονται πάνω από τον ταμιευτήρα, καθώς επίσης και με τη χημική σύσταση των γεωθερμικών ρευστών. Η σημαντικότερη βέβαια παράμετρος που επιδρά στο κόστος μιας γεώτρησης είναι το βάθος στο οποίο θα πρέπει να φτάνει το φρεάτιο παραγωγής. Ο αριθμός των γεωτρήσεων καθορίζεται από τη μέση παραγωγική ικανότητα των φρεατίων και το μέγεθος της μονάδας. Η παραγωγική ικανότητα των φρεατίων εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία και τη πίεση της πηγής, καθώς επίσης και από τη διαπερατότητα του πετρώματος.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η πρώτη γεώτρηση, στη φάση της εξερεύνησης, έχει 25% πιθανότητες να χρησιμοποιηθεί ως φρεάτιο παραγωγής. Οι πιθανότητες αυτές όμως βελτιώνονται σε 60% στη φάση της επιβεβαίωσης και σε 70 με 80% στη φάση των έργων ανάπτυξης. Ο λόγος στον οποίο οφείλεται αυτή η βελτίωση των πιθανοτήτων είναι ότι κάθε φάση τροφοδοτεί την επόμενη με πολύ χρήσιμα στοιχεία και πληροφορίες σχετικά με το γεωθερμικό πεδίο και τη συμπεριφορά του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της σημασίας των ερευνητικών δεδομένων ενός πεδίου είναι το γεγονός ότι το συνολικό κόστος γεώτρησης που αφορά την ανάπτυξη μιας νέας μονάδας σε ένα ήδη ερευνημένο γεωθερμικό πεδίο αναμένεται να είναι 37% χαμηλότερο από το αντίστοιχο κόστος για ένα άγνωστο γεωθερμικό πεδίο.

Εκτός από τους γεωλογικούς και γεωθερμικούς παράγοντες, το κόστος των γεωτρήσεων επηρεάζεται και από παραμέτρους της αγοράς. Δεδομένου ότι τόσο η βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου όσο και η γεωθερμική βιομηχανία χρησιμοποιούν την ίδια τεχνολογία και εξειδικευμένο εξοπλισμό γεωτρήσεων, μπορεί αυτός ο εξοπλισμός και τα μηχανήματα να μην είναι εύκολα διαθέσιμα μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Όταν οι συνθήκες στην αγορά και οι τιμές ενέργειας προκαλούν απαιτήσεις για περαιτέρω εξερεύνηση και ανάπτυξη και των δύο βιομηχανιών, ο περιορισμένος αριθμός εξοπλισμού γεωτρήσεων θα πρέπει να μοιραστεί μεταξύ τους, ενώ τα συνεργεία γεώτρησης θα προτιμήσουν τις καλύτερες προσφορές. Έτσι λοιπόν, σε περιόδους όπου υπάρχει αστάθεια στην αγορά λόγω μεταβολής της ισορροπίας μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης είναι πιθανόν το κόστος των υπηρεσιών γεώτρησης να εκτοξευθεί σημειώνοντας αύξηση της τάξης του 20% ή και περισσότερο. Η ίδια λογική ισχύει και στους άλλους παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος γεώτρησης. Η πρόσφατη εξέλιξη των τιμών του χάλυβα, του σκυροδέματος και των καυσίμων εξηγεί την αστάθεια του κόστους του εξοπλισμού και των υλικών που απαιτούνται για τη γεώτρηση.

Έτσι λοιπόν, στη φάση των έργων ανάπτυξης οι συνολικές δαπάνες των γεωτρήσεων και της κατασκευής των παραγωγικών φρεατίων κυμαίνονται από 670 έως 1.440€ ανά εγκατεστημένο kW με μία μέση τιμή γύρω στα 1.050€/kW. Οι δαπάνες αυτές αντιπροσωπεύουν περίπου το 32% του συνολικού κόστους της κύριας επένδυσης.

B. Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Ο σχεδιασμός των εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια σύνθετη δραστηριότητα, η οποία εκτός από την αρμονική λειτουργία της μονάδας, στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των δαπανών κατασκευής σε πρώτη φάση και των δαπανών λειτουργίας και συντήρησης στη φάση λειτουργίας της μονάδας. Αποτελείται από την επιλογή των καταλληλότερων τεχνολογιών, εξοπλισμού και δομικών υλικών (για τη κατασκευή των απαραίτητων υποδομών), έχοντας ως γνώμονα τα χαρακτηριστικά της γεωθερμικής πηγής και τις ιδιαιτερότητες της περιοχής. Η συγκεκριμένη φάση, το κόστος της οποίας κυμαίνεται από 980 έως 2.100€ ανά εγκατεστημένο kW, απαιτεί περίπου το 47% των χρημάτων της κύριας επένδυσης.

Η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού είναι η βασικότερη παράμετρος που επιδρά στο κόστος της εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς είναι εκείνη που καθορίζει το τύπο της τεχνολογίας που θα χρησιμοποιηθεί. Σε γεωθερμικές πηγές υψηλής θερμοκρασίας εφαρμόζονται τεχνολογίες οι οποίες είναι συνήθως απλούστερες και λιγότερο δαπανηρές. Το ειδικό κόστος εξοπλισμού των εγκαταστάσεων ξηρού ατμού ή στιγμιαίας ατμοποίησης αυξάνεται ραγδαία, καθώς η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού μειώνεται, ως συνέπεια της πτώσης της αποδοτικότητας τους, ενώ τα συστήματα ξεχωριστών εργαζόμενων μέσων γίνονται ανταγωνιστικά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Η χημική σύσταση του γεωθερμικού ρευστού είναι μια άλλη ουσιαστική παράμετρος που μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στη διαμόρφωση του κόστους της εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κύρια χημικά χαρακτηριστικά που πρέπει να μελετηθούν και να εξεταστούν στην αρχή της φάσης του σχεδιασμού της εγκατάστασης είναι τα εξής: η πιθανότητα δημιουργίας επικαθίσεων στον εξοπλισμό, το πόσο διαβρωτικό είναι το γεωθερμικό ρευστό, το κατά πόσο μπορεί να συμπυκνωθεί και η περιεκτικότητά του σε υδρόθειο (H₂S). Κάθε ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά μπορεί να απαιτήσει πρόσθετο εξοπλισμό για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων προβλημάτων που μπορεί να παρουσιαστούν ή μπορεί να επηρεάσει το μέγεθος κάποιων τμημάτων της εγκατάστασης. Οι επικείμενες επιπτώσεις στο κόστος του έργου μπορεί να είναι μερικές φορές πολύ σημαντικές.

Η διαθεσιμότητα ύδατος στη περιοχή κατασκευής της μονάδας είναι επίσης βασική παράμετρος που επηρεάζει το κόστος της εγκατάστασης παραγωγής. Αυτό

συμβαίνει καθώς ο παράγοντας αυτός έχει επιπτώσεις στην επιλογή του συστήματος απόρριψης θερμότητας. Πιο συγκεκριμένα λοιπόν, υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη συστημάτων ψύξης, τα αερόψυκτα και τα υδρόψυκτα. Τα υδρόψυκτα συστήματα έχουν σε γενικές γραμμές μικρότερο κόστος κατασκευής και λειτουργίας σε περίπτωση ύπαρξης φθηνού και εύκολα διαθέσιμου νερού. Αντίστοιχα σε ξηρές περιοχές, παρά τις υψηλότερες δαπάνες κατασκευής, ένα αερόψυκτο σύστημα απόρριψης θερμότητας μπορεί να είναι η πιο συμφέρουσα επιλογή από άποψη κόστους.

Επίσης να προσθέσουμε ότι οι τοπικές καιρικές συνθήκες μπορούν να προκαλέσουν καθυστερήσεις με άμεσες επιπτώσεις στις δαπάνες κατασκευής όταν το πρόγραμμα βρίσκεται σε περιοχή που χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα μεγάλες χρονικές περιόδους χιονιού.

Τέλος, η τοπική τοπογραφία και οι γεωλογικοί παράγοντες, όπως οι κλίσεις και η σταθερότητα του εδάφους, μπορούν να επηρεάσουν τις δαπάνες κατασκευής της εγκατάστασης κατά 2-5%.

Γ. Σύστημα συλλογής και διακίνησης γεωθερμικού ρευστού

Το σύστημα συλλογής και διακίνησης του γεωθερμικού ρευστού αποτελείται από το δίκτυο σωληνώσεων που συνδέουν την εγκατάσταση παραγωγής με όλα τα φρεάτια παραγωγής και επανεισαγωγής, το υποσύστημα επεξεργασίας του ρευστού, τις βαλβίδες ελέγχου της ροής και τις αντλίες, όπου αυτές κρίνονται απαραίτητες. Το κόστος για αυτές τις εγκαταστάσεις παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση και είναι άμεσα εξαρτημένο από την απόσταση μεταξύ της εγκατάστασης παραγωγής και των φρεατίων παραγωγής και επανεισαγωγής.

Επίσης το κόστος του συστήματος αυτού επηρεάζεται από την πίεση και τη χημική σύσταση του παραγόμενου γεωθερμικού ρευστού. Σε περίπτωση όπου τα χαρακτηριστικά του γεωθερμικού πεδίου δεν επιτρέπουν τη φυσική κυκλοφορία του ρευστού χρησιμοποιούνται αντλίες, οι οποίες αυξάνουν τη ροή του ενισχύοντας έτσι την παραγωγικότητα των φρεατίων. Η χρήση αντλιών, όπως είναι προφανές, αυξάνει το κόστος του συγκεκριμένου συστήματος. Στην πλειοψηφία των συστημάτων συλλογής και διακίνησης του γεωθερμικού ρευστού χρησιμοποιούνται σωληνώσεις από ανθρακούχο χάλυβα, ενώ σε περιπτώσεις ιδιαίτερα διαβρωτικών ρευστών γίνεται χρήση κραμάτων, όπως τα κράματα νικελίου τα οποία έχουν διπλάσιο ή και πενταπλάσιο κόστος από τον ανθρακούχο χάλυβα.

Το κόστος του συστήματος συλλογής και διακίνησης του γεωθερμικού ρευστού κυμαίνεται από 150 έως 310€ ανά εγκατεστημένο kW και αντιπροσωπεύει περίπου το 7% του συνολικού κόστους της κύριας επένδυσης.

Δ. Σύνδεση μονάδας με το δίκτυο

Πολλές φορές τα παραγωγικά γεωθερμικά πεδία δε βρίσκονται κοντά στο κεντρικό δίκτυο μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτή τη περίπτωση το κόστος κατασκευής μια νέας γραμμής μεταφοράς για τη σύνδεση της γεωθερμικής μονάδα με το κεντρικό δίκτυο προστίθεται στο συνολικό κόστος της κύριας επένδυσης. Οι γραμμές μεταφοράς είναι αρκετά ακριβές και έτσι το κόστος τους μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο στην ανταγωνιστικότητα του έργου.

Το κόστος σύνδεσης της μονάδας με το δίκτυο μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας είναι άμεσα συνδεδεμένο με το μέγεθος της μεταξύ τους απόσταση. Το κόστος αυτό επηρεάζεται επίσης από την τοπογραφία, τη σταθερότητα των κλίσεων, και τη δυνατότητα πρόσβασης στην συγκεκριμένη περιοχή. Τα έργα που θεωρούνται οικονομικά βιώσιμα έχουν κόστος διασύνδεσης το οποίο κυμαίνεται από 75 έως 180€ ανά εγκατεστημένο kW, με μία μέση τιμή της τάξης των 130€/kW, η οποία αντιστοιχεί στο 4% του συνολικού κόστους της κύριας επένδυσης.

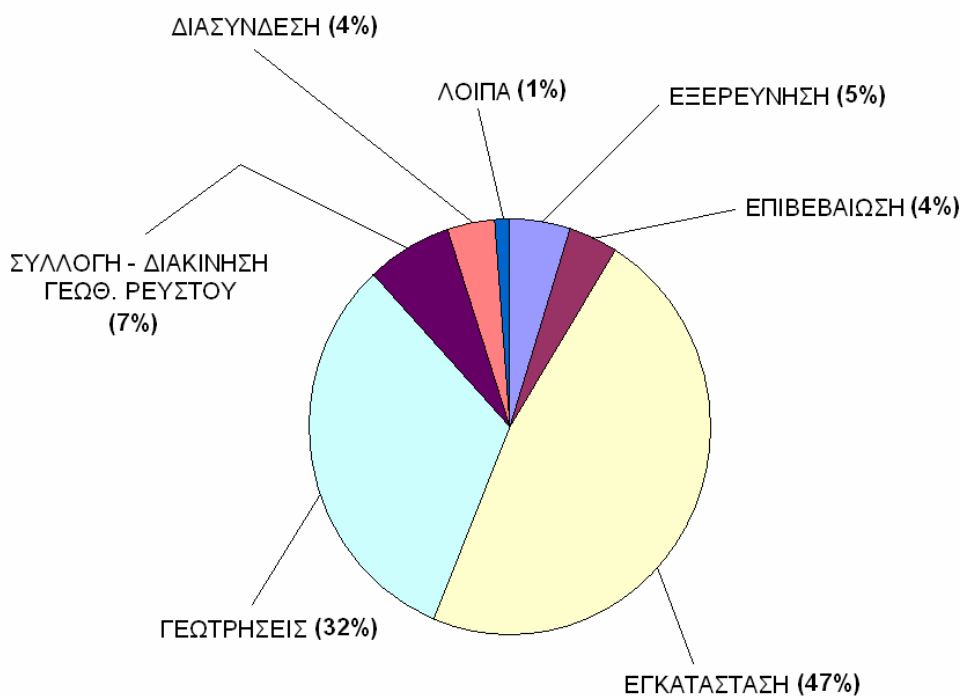
Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε ότι, όπως και με τις άλλες εργασίες υποδομής, οι οικονομίες κλίμακας είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τις δαπάνες διασύνδεσης. Εάν μια μονάδα των 10MW και μια των 100MW έχουν παρόμοιες απαιτήσεις μεταφοράς, τότε το ειδικό κόστος διασύνδεσης για τη μεγαλύτερη μονάδα θα είναι 10 φορές μικρότερο, δεδομένου ότι θα επιμεριστεί σε μεγαλύτερη παραγωγή.

Ε. Λοιπές δαπάνες

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει όλες τις δαπάνες σχετικές με νομικά και αδειοδοτικά θέματα, τεκμηρίωση και υποβολή εκθέσεων των δραστηριοτήτων. Στις δαπάνες αυτές, οι οποίες αντιπροσωπεύουν περίπου το 1% του συνολικού κόστους της κύριας επένδυσης, εντάσσεται και το κόστος των ανεπιτυχών επιχειρήσεων στη φάση της εξερεύνησης καθώς και παροχές για τυχόν απρογραμμάτιστα και απρόβλεπτα έξοδα [34].

Το κύριο κόστος επένδυσης μίας γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται σήμερα από 2.100 έως 4.500 € ανά εγκατεστημένο kW. Για έργα επέκτασης ήδη υπάρχουσας μονάδας το κόστος αυτό είναι ελαφρώς χαμηλότερο [35].

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 6.1), το συνολικό κόστος της κύριας επένδυσης χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα, τα οποία και έχουμε αναλύσει στις πιο πάνω παραγράφους του κεφαλαίου και τα οποία συμβάλλουν με διαφορετικό ποσοστό στο συνολικό κόστος.



Σχήμα 5.1: Το κόστος των επιμέρους τμημάτων της κύριας επένδυσης σε σχέση με το συνολικό

Όπως έχουμε αναφέρει και πιο πάνω, οι οικονομίες κλίμακας μπορούν να μειώσουν σημαντικά το ειδικό κόστος ορισμένων υποσυστημάτων ή δραστηριοτήτων της μονάδας. Το κύριο κόστος επένδυσης των γεωθερμικών μονάδων με εύρος ισχύος 5-150 MW μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της δυναμικότητά τους. Οι περισσότερες από αυτές τις οικονομίες κλίμακας σχετίζονται με δαπάνες εξοπλισμού, εργασιών και νομικών ζητημάτων που πραγματοποιούνται ανεξάρτητα από το μέγεθος ισχύος του έργου (π.χ. ανασκαφή, κατασκευή δρόμων, διασύνδεση με το δίκτυο, αδειοδοτήσεις κ.λπ.) [36].

6.3 Κόστος συντήρησης και λειτουργίας

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης αποτελείται από όλες τις δαπάνες που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της φάσης λειτουργίας της γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι δαπάνες αυτές εξαρτώνται από την ποιότητα και το σχεδιασμό των εγκαταστάσεων παραγωγής, τα χαρακτηριστικά της γεωθερμικής πηγής, τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς και τέλος τη δομή και την αποδοτικότητα της διεύθυνσης της μονάδας. Σημαντικές ακόμη παράμετροι που έχουν επιπτώσεις στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης σχετίζονται με τις δαπάνες

εργασίας, τη ποσότητα των χημικών ουσιών και των υπόλοιπων αναλωσίμων υλικών που χρησιμοποιούνται κατά τη λειτουργία, το μέγεθος των γεωτρήσεων συντήρησης που απαιτούνται, και το κόστος του εξοπλισμού που πρέπει να αντικατασταθεί στη διάρκεια ζωής του έργου.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι μονάδες ξηρού ατμού και στιγμιαίας ατμοποίησης παρουσιάζουν συνήθως ελαφρώς υψηλότερες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης από τις αντίστοιχες ξεχωριστών εργαζόμενων μέσων.

Επίσης, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι το κόστος λειτουργίας και συντήρησης μιας γεωθερμικής μονάδας δεν είναι σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της. Κατά τη διάρκεια των πρώτων ετών λειτουργίας, οι δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης αναμένονται να είναι σχετικά χαμηλές αλλά αυξάνονται σταδιακά, καθώς με την πάροδο του χρόνου αυξάνεται η ηλικία του εξοπλισμού, πράγμα που οδηγεί στην αύξηση του κόστους συντήρησης, ενώ συχνά απαιτούνται και αντικαταστάσεις ορισμένων τμημάτων.

Τέλος, να αναφέρουμε ότι το κόστος λειτουργίας και συντήρησης μιας γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται από 11 έως 28 € ανά παραγόμενη MWh. Το κόστος αυτό ισχύει για μονάδες με συντελεστή ισχύος 0,92 και πάνω. Ο συντελεστής ισχύος είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος, διότι καθορίζει τη ποσότητα των κιλοβατωρών (kWh) που θα παραχθούν από τη μονάδα μέσα στο έτος και άρα επηρεάζει το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, αφού το τελευταίο εκφράζεται σε € ανά παραγόμενη MWh [34].

6.3.1 Κόστος λειτουργίας

Το κόστος λειτουργίας περιλαμβάνει όλες τις δαπάνες που σχετίζονται με τη λειτουργία της μονάδας και αντιστοιχεί περίπου σε 3,5 - 7,5 € ανά παραγόμενη MWh.

Το κόστος εργασίας αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος των δαπανών αυτών. Να σημειώσουμε εδώ, ότι το ανθρώπινο εργατικό δυναμικό που είναι απαραίτητο για τη λειτουργία μιας γεωθερμικής μονάδας είναι ανεξάρτητο από το μέγεθός της, οπότε εξαιτίας της επίδρασης των οικονομιών κλίμακας το ειδικό κόστος λειτουργίας μιας μεγάλης ισχύος μονάδας είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο μιας μικρότερης ισχύος.

Άλλες δαπάνες που περιλαμβάνονται στο κόστος λειτουργίας έχουν να κάνουν με τα αναλώσιμα υλικά (λιπαντικά, χημικές ουσίες για τη μείωση του H₂S, καύσιμα οχημάτων κ.λπ.), τη φορολογία, τα δικαιώματα εκμετάλλευσης και διάφορες άλλες δραστηριότητες (π.χ. διάθεση αποβλήτων, φωτισμός και άλλες εσωτερικές χρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας).

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των γεωθερμικού πεδίου, μπορούν να υπάρξουν και άλλου τύπου δαπάνες, όπως παραδείγματος χάρη η ηλεκτρική

ενέργεια που καταναλώνουν οι αντλίες σε συστήματα τεχνητής κυκλοφορίας. Η γεωγραφική θέση και οι καιρικές συνθήκες μπορούν επίσης να προκαλέσουν πρόσθετα έξοδα, όπως αυτά των εργασιών αφαίρεσης χιονιού ή πρόληψης πυρκαγιάς. Επίσης σημαντική αύξηση παρουσιάστηκε τα τελευταία χρόνια στις δαπάνες ασφάλισης οι οποίες αποτελούν κι αυτές μέρος του λειτουργικού κόστους.

6.3.2 Κόστος συντήρησης

Το κόστος συντήρησης περιλαμβάνει όλες τις δαπάνες σχετικές με τη συντήρηση του εξοπλισμού (σωληνώσεις, στρόβιλος, γεννήτρια, οχήματα, κτήρια, κ.λπ.) για την ομαλή και αποδοτική λειτουργία της μονάδας.

Η συντήρηση μιας γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο περιλαμβάνει εργασίες, όπως η επιθεώρηση και επιδιόρθωση μηχανημάτων και η επισκευή οδικών και κτιριακών υποδομών, ενώ συχνά απαιτείται και υπερβολαβία από ειδικευμένους τεχνίτες για τη διεκπεραίωση εξειδικευμένων εργασιών συντήρησης. Το δεύτερο μέρος τώρα, περιλαμβάνει τις δαπάνες διάνοιξης γεωτρήσεων συντήρησης, οι οποίες έχουν ως στόχο να αντισταθμίσουν τη φυσική μείωση της παραγωγικότητας των αρχικών φρεατίων παραγωγής. Οι δαπάνες του πρώτου μέρους υπολογίζονται κατά μέσο όρο σε 4,5-11€ ανά παραγόμενη MWh, ενώ αυτές του δεύτερου μέρους σε 3,5-9 €/MWh.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ

7.1 Εισαγωγή

Μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο και κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1950 και 1960, όταν η μόλυνση του περιβάλλοντος ήταν ακόμα σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με σήμερα και ο άνθρωπος είχε σαφώς λιγότερες γνώσεις σχετικά με οποιαδήποτε περιβαλλοντική απειλή, η γεωθερμική ενέργεια θεωρούνταν ως μια καθαρής μορφής ενέργεια. Στην πραγματικότητα όμως, δεν υπάρχει τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή μετατροπής μιας μορφής ενέργειας σε άλλη για να χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο, που να μην προκαλεί κάποιες άμεσες ή έστω έμμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ακόμη και η παλαιότερη και πιο απλούστερη μορφή παραγωγής θερμικής ενέργειας, δηλαδή η καύση του ξύλου, έχει μακροπρόθεσμα καταστρεπτικές συνέπειες, ενώ η αποψίλωση των δασών, ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των τελευταίων ετών, ξεκίνησε όταν οι πρόγονοί μας έκοψαν τα πρώτα δέντρα για να μαγειρέψουν την τροφή τους και να ζεστάνουν τα καταλύματά τους. Έτσι λοιπόν, η αξιοποίηση της γεωθερμίας για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει όντως κάποιο αντίκτυπο στο περιβάλλον. Θα πρέπει όμως να τονίσουμε ότι πρόκειται για μια από τις πλέον καθαρές και ελάχιστα έως καθόλου ρυπογόνες μορφές ενέργειας.

Κατά τη διάρκεια εγκατάστασης και λειτουργίας μιας γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να αξιολογείται πολύ προσεκτικά κάθε μεταβολή στο οικοσύστημα της αντίστοιχης περιοχής και να αντιμετωπίζεται ή και να προλαμβάνεται, όπου αυτό είναι εφικτό. Κατά τη διαδικασία αυτή θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλοι οι σχετικοί νόμοι και περιβαλλοντικοί κανονισμοί, οι οποίοι σε κάποιες χώρες είναι ιδιαίτερα αυστηροί. Είναι προφανές λοιπόν, ότι η μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι απαραίτητη σε κάθε μεγάλο γεωθερμικό έργο, καθώς κάθε φαινομενικά ασήμαντη αλλαγή στο οικοσύστημα της περιοχής θα μπορούσε να προκαλέσει αλυσιδωτά φαινόμενα, των οποίων οι επιπτώσεις είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν πλήρως και να αναλυθούν εκ των προτέρων.

7.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Από τα αρχικά κιάλας στάδια κατασκευής μιας γεωθερμικής μονάδας παρατηρούνται οι πρώτες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και είναι συνδεδεμένες με τις γεωτρήσεις που πραγματοποιούνται στην αντίστοιχη περιοχή, ανεξάρτητα αν αυτές φτάνουν σε μικρά βάθη και αποσκοπούν στη μέτρηση της γεωθερμικής βαθμίδας κατά το στάδιο έρευνας, ή αν είναι γεωτρήσεις έρευνας-παραγωγής. Η εγκατάσταση ενός γεωτρητικού συγκροτήματος, που περιλαμβάνει και όλο το βοηθητικό εξοπλισμό του, πολλές φορές απαιτεί τη διάνοιξη ή επισκευή δρόμων, για την πρόσβαση στο σημείο των γεωτρήσεων, και την κατασκευή μιας γεωτρητικής εξέδρας. Οι εργασίες αυτές τροποποιούν ελαφρά την επιφανειακή μορφολογία της περιοχής, ενώ δεν αποκλείεται η πιθανότητα πρόκλησης μικρών ζημιών στη χλωρίδα και την πανίδα του οικοσυστήματος. Επιπροσθέτως, μπορεί να προκληθεί ρύπανση των επιφανειακών υδάτων από την απότομη έξοδο των γεωθερμικών ρευστών και για αυτό το λόγο, εάν αναμένονται υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, θα πρέπει να προβλεφθεί η εγκατάσταση συστήματος αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφάλειας ρευστών (blow-up preventers). Τέλος, κατά τη διάρκεια διάνοιξης των γεωτρήσεων ή των δοκιμών παραγωγής, υπάρχει κίνδυνος διαφυγής κάποιων ανεπιθύμητων αερίων στην ατμόσφαιρα. Σε κάθε περίπτωση, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται από τις γεωτρητικές εργασίες σταματούν με το πέρας αυτών. Εκτός αυτού, στη σημερινή εποχή, υπάρχει η τεχνολογία και η τεχνογνωσία ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα για να αποφευχθεί οποιασδήποτε μορφής ρύπανση κατά τη διάρκεια των γεωτρήσεων [37].

Το επόμενο στάδιο, που αποτελείται από την εγκατάσταση του δικτύου μεταφοράς των γεωθερμικών ρευστών και την κατασκευή των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, επηρεάζει κι αυτό με τη σειρά του σε ένα βαθμό τη πανίδα, τη χλωρίδα και την επιφανειακή μορφολογία της περιοχής. Το τοπίο της περιοχής μπορεί να αλλάξει ελαφρώς, παρόλο που σε κάποιες περιπτώσεις, όπως π.χ. στο Larderello της Ιταλίας, το δίκτυο των σωληνώσεων που διαπερνά την περιοχή και οι πύργοι ψύξης των μονάδων έχουν γίνει αναπόσπαστα τμήματα του τοπίου και αποτελούν πια ένα διάσημο τουριστικό αξιοθέατο της περιοχής.

Εκτός από τη στάδιο της εγκατάστασης, περιβαλλοντικά προβλήματα είναι δυνατόν να προκύψουν και στη φάση λειτουργίας μιας συμβατικής γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα γεωθερμικά ρευστά συνήθως περιέχουν αέρια, όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), υδρόθειο (H_2S), αμμωνία (NH_3), μεθάνιο (CH_4) και ίχνη από άλλα αέρια, καθώς και διαλυμένες χημικές ενώσεις, των οποίων η συγκέντρωση συνήθως αυξάνει με τη θερμοκρασία. Για παράδειγμα, το χλωριούχο νάτριο (NaCl), το βόριο (B), το αρσενικό (As) και ο υδράργυρος (Hg) είναι

χημικά στοιχεία και ενώσεις που πολλές φορές εντοπίζονται στα γεωθερμικά ρευστά και αποτελούν πηγές ρύπανσης αν διατεθούν στο επιφανειακό περιβάλλον. Η εκπομπή υδρόθειου αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή μόλυνσης. Το όριο οσμής για την παρουσία υδρόθειου στον αέρα είναι περίπου 5 p.p.b/k.ό., ενώ επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου παρατηρούνται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις [38]. Παρόλα αυτά, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μείωση των εκπομπών του αερίου αυτού, οπότε οι επιπτώσεις του συγκεκριμένου προβλήματος μπορούν να ελεγχθούν σχετικά εύκολα. Στα ρευστά που χρησιμοποιούνται σε μια γεωθερμική μονάδα μπορεί να βρεθεί, όπως αναφέραμε και πιο πάνω, διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), όμως, συγκριτικά με τις εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικά καύσιμα, η απελευθέρωση CO_2 είναι κατά πολύ μικρότερη. Συγκεκριμένα, απελευθερώνονται από 13 έως 380gr CO_2 για κάθε kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από μια γεωθερμική μονάδα ατμοσφαιρικής διάθεσης, ενώ τα αντίστοιχα ποσά για τις μονάδες που χρησιμοποιούν λιγνίτη είναι 1.042gr/kWh, για αυτές που χρησιμοποιούν πετρέλαιο, 906gr/kWh και τέλος για τις μονάδες φυσικού αερίου είναι 453gr/kWh [39]. Η βέλτιστη πρακτική για το μηδενισμό των εκπομπών CO_2 , καθώς και για την αντιμετώπιση και των υπόλοιπων επιβλαβών αερίων που αναφέραμε πιο πάνω είναι η τεχνική της ολικής επανεισαγωγής των γεωθερμικών ρευστών στον ταμιευτήρα από τον οποίο προήλθαν. Με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιείται η ρύπανση του περιβάλλοντος από τα επιβλαβή αέρια που περιέχονται στα γεωθερμικά ρευστά. Να σημειώσουμε εδώ ότι κατά τη διαδικασία της επανεισαγωγής πολλές φορές, όταν δεν ικανοποιούνται οι κατάλληλες χημικές θερμοκρασιακές, και υδρολογικές συνθήκες στο βάθος απόρριψης, η απόθεση πυριτίου και ανθρακικών αλάτων μπορεί να προκαλέσει αποφράξεις στις σχισμές των πετρωμάτων. Έτσι λοιπόν, πολλές φορές κρίνεται απαραίτητη η χημική επεξεργασία του γεωθερμικού ρευστού πριν την επανεισαγωγή του στον ταμιευτήρα.

Επίσης, υπάρχει πιθανότητα η άντληση μεγάλων ποσοτήτων ρευστών από τους γεωθερμικούς ταμιευτήρες να προκαλέσει φαινόμενα καθίζησης, δηλαδή σταδιακής βύθισης της επιφάνειας του εδάφους. Αυτό αποτελεί ένα μη αναστρέψιμο φαινόμενο, αλλά σε καμία περίπτωση δεν είναι καταστροφικό, καθώς πρόκειται για μια αργή διαδικασία που συνήθως επηρεάζει και κατανέμεται σε μεγάλες επιφάνειες. Με το πέρασμα των χρόνων βέβαια, η καθίζηση μπορεί να φτάσει σε μετρήσιμα επίπεδα και σε κάποιες περιπτώσεις ακόμη και σε μερικές δεκάδες εκατοστών ή και μέτρων. Σε αυτές τις περιπτώσεις το φαινόμενο αυτό θα πρέπει να παρακολουθείται συστηματικά, καθώς υπάρχει η πιθανότητα να επηρεάσει τη σταθερότητα όχι μόνο των κτιριακών εγκαταστάσεων των γεωθερμικών μονάδων αλλά και όλων των άλλων κτιρίων στη περιοχή. Ελάχιστες και σπάνιες είναι οι περιπτώσεις καθιζήσεων που έχουν παρατηρηθεί από την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας και συνήθως προκαλούνται μόνο σε περιοχές με πορώδεις ταμιευτήρες. Σε πολλές περιπτώσεις η

καθίζηση μπορεί να αποτραπεί, ή να μειωθεί σημαντικά, με την επανεισαγωγή των χρησιμοποιηθέντων γεωθερμικών ρευστών στον ταμειυτήρα από τον οποίο προήλθαν.

Η απελευθέρωση και η επανεισαγωγή των γεωθερμικών ρευστών μπορεί να προκαλέσει ή να αυξήσει τη συχνότητα των σεισμικών φαινομένων σε κάποιες περιοχές. Στην ουσία βέβαια πρόκειται μόνο για μικροσεισμικά γεγονότα, που μπορούν να γίνουν αντιληπτά μόνο από εξειδικευμένα καταγραφικά όργανα. Επίσης το φαινόμενο αυτό είναι εξαιρετικά σπάνιο, με αμφισβητούμενα περιστατικά σε παγκόσμιο επίπεδο, και έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να εμφανιστεί σε εφαρμογές εκμετάλλευσης θερμών και ξηρών πετρωμάτων. Η εκμετάλλευση των γεωθερμικών πόρων είναι απίθανο να προκαλέσει μεγάλα σεισμικά συμβάντα, μεγαλύτερα δηλαδή των 3 βαθμών της κλίμακας Richter, και μέχρι στιγμής δεν έχει αναφερθεί καμία τέτοια δραστηριότητα.

Ο θόρυβος που παράγεται σε μία γεωθερμική μονάδα αποτελεί μια μορφή περιβαλλοντικής ρύπανσης και χωρίζεται σε δυο στάδια. Το πρώτο αφορά το διάστημα κατασκευής και δοκιμών των γεωτρήσεων της μονάδας και ο θόρυβος που παράγεται στο στάδιο αυτό σπάνια ξεπερνά τα 100dBa. Αυτού του είδους η ηχορύπανση αντιμετωπίζεται με τη τοποθέτηση σιγαστήρων κρούσης. Το δεύτερο στάδιο έχει να κάνει με τη φάση λειτουργίας της μονάδας και συγκεκριμένα πρόκειται για το θόρυβο που προκαλείται από τη μεταφορά του ατμού μέσα από τους σωλήνες και από τη λειτουργία των ατμοστροβίλων και των ανεμιστήρων του πύργου ψύξης [40]. Αυτό το είδος ηχορύπανσης αντιμετωπίζεται με τη τοποθέτηση μόνιμων εγκαταστάσεων σιγαστήρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα η ανάγκη της ανθρωπότητας για ηλεκτρική ενέργεια αυξανόταν με εκθετικό ρυθμό. Το ίδιο συμβαίνει και στη σημερινή εποχή καθώς χώρες της Ασίας, της Αφρικής και της νοτίου Αμερικής βρίσκονται σε αναπτυξιακή τροχιά, πράγμα που μεταφράζεται σε υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Η διαφορά βέβαια, με τη σημερινή εποχή είναι ότι η ανθρωπότητα, έχοντας αποκτήσει περιβαλλοντική συνείδηση και προσπαθώντας να αποφύγει τη κλιματική αλλαγή μαθαίνοντας από τα λάθη του παρελθόντος, έχει αρχίσει να στρέφεται στη χρήση ανανεώσιμων μορφών ενέργειας. Η αξιοποίηση μιας τέτοιας μορφής ενέργειας, της γεωθερμίας, για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει πολλά και ενδιαφέροντα θετικά στοιχεία.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι οι γεωθερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δε χρειάζονται εξωγενή καύσιμα για τη λειτουργία τους και έτσι λοιπόν το κόστος λειτουργίας δεν επηρεάζεται από απρόβλεπτους παράγοντες όπως είναι οι διακυμάνσεις των τιμών ενέργειας που επικρατούν στην αγορά. Το αντίθετο συμβαίνει με τις μονάδες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Μετά το πέρας λοιπόν, της κατασκευής της μονάδας υπολογίζεται το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, το οποίο είναι σταθερό και προβλέψιμο. Οι μόνες παράμετροι που μπορούν να τροποποιήσουν το κόστος αυτό είναι οι δαπάνες εργασίας και αυτές των αναλώσιμων υλικών, οι οποίες επηρεάζονται από τις τιμές της αγοράς. Οι δαπάνες αυτές βέβαια δε παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του κόστους λειτουργίας, καθώς αποτελούν δευτερεύοντα συστατικά του. Έτσι λοιπόν, η σταθερότητα της τιμής της γεωθερμικής ενέργειας τη καθιστά ιδιαίτερα πολύτιμη ως σταθεροποιητή των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας μιας χώρας, καθώς αντισταθμίζει την εξάρτηση των υπολοίπων μονάδων από τα συμβατικά καύσιμα και την υψηλή αστάθεια που εμφανίζουν οι τιμές τους.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της γεωθερμίας είναι ότι οι χώρες, οι οποίες παρουσιάζουν πλούσιο γεωθερμικό δυναμικό, έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν τους ίδιους πόρους τους για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τους σε ηλεκτρική ενέργεια, αντί να εισάγουν ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο) για το σκοπό αυτό. Επίσης σε χώρες όπου διατίθενται πολλές εναλλακτικές πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης και της γεωθερμίας, αυτή προτιμάται να χρησιμοποιηθεί για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς δε μπορεί να μεταφερθεί προς πώληση. Με αυτό τον τρόπο επιτρέπεται η χρήση των συμβατικών καυσίμων για ανώτερες και πιο αποδοτικές εφαρμογές από τη ηλεκτροπαραγωγή.

Επιπροσθέτως, οι γεωθερμικοί σταθμοί μπορούν να ανεγερθούν ταχύτερα από αυτούς που χρησιμοποιούν συμβατικά και πυρηνικά καύσιμα, οι οποίοι, για οικονομοτεχνικούς λόγους, πρέπει να έχουν πολύ μεγάλο μέγεθος.

Είναι επίσης γνωστό ότι τα ηλεκτρικά συστήματα είναι πιο αξιόπιστα εάν οι πηγές τροφοδοσίας τους δεν συγκεντρώνονται σε ένα μικρό αριθμό συγκεκριμένων περιοχών. Οι ηλεκτροπαραγωγικές εφαρμογές της γεωθερμίας είναι προφανές ότι μπορούν να συμβάλουν στην διασπορά των ενεργειακών πηγών τροφοδοσίας του συστήματος μιας χώρας. Αυτό συμβαίνει, διότι η τοποθεσία των γεωθερμικών πεδίων είναι ανεξάρτητη από οικονομοτεχνικές και πολιτικές παραμέτρους.

Εάν αξιοποιηθεί σωστά, η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στο ενεργειακό ισοζύγιο αρκετών χωρών. Σε κάποιες περιπτώσεις, ακόμη και μικρής κλίμακας γεωθερμικοί πόροι είναι αρκετοί για την επίλυση πολλών τοπικών προβλημάτων και ικανοί για την άνοδο του βιοτικού επιπέδου μικρών και απομονωμένων κοινοτήτων.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιώντας τη γεωθερμία είναι ο υψηλός συντελεστής ισχύος που παρουσιάζουν οι γεωθερμικές μονάδες. Ο συντελεστής ισχύος (Capacity Factor, CF) αντιστοιχεί στην αναλογία μεταξύ του ποσού ενέργειας που αποδίδεται στο δίκτυο μεταφοράς και της πιθανής ενέργειας που θα μπορούσε είχε παραχθεί από τη μονάδα κατά τη διάρκεια μίας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου, η οποία αποτελείται από ένα έτος. Οι γεωθερμικές μονάδες εμφανίζουν τυπικές τιμές του συντελεστή ισχύος της τάξης του 94% και άνω, τιμές δηλαδή υψηλότερες από κάθε άλλη τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι οι γεωθερμικές μονάδες παραγωγής αποδίδουν πλήρη ισχύ κατά τη διάρκεια του 94% του έτους, ενώ οι διακοπές λειτουργίας (προγραμματισμένα και απρόοπτα γεγονότα) δεν επιτρέπουν την παραγωγή ισχύος κατά τη διάρκεια του υπόλοιπου χρόνου. Ο συντελεστής ισχύος καθορίζει την ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, τη ποσότητα δηλαδή των κιλοβαττωρών (kWh), στις οποίες θα κατανεμηθούν όλες οι δαπάνες (κύριες δαπάνες και δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης).

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Οι μικρής κλίμακας περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την αξιοποίηση της γεωθερμίας για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι στη σημερινή εποχή εύκολα αντιμετωπίσιμες. Η εξέλιξη της τεχνολογίας στο τομέα της προστασίας του περιβάλλοντος, η ανάπτυξη μεθόδων πρόληψης και ελέγχου, αλλά κυρίως η τεχνική επανεισαγωγής του γεωθερμικού ρευστού στον ταμειυτήρα δίνουν τη δυνατότητα αντιμετώπισης και εξάλειψης όλων σχεδόν των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν. Είναι προφανές λοιπόν, ότι η γεωθερμία αποτελεί μια από τις λιγότερο ρυπογόνες και πιο καθαρές μορφές ενέργειας που υπάρχουν στη φύση.

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Μέσα από την οικονομική ανάλυση του έκτου κεφαλαίου γίνεται φανερή η μεγάλη μεταβλητότητα που παρουσιάζουν οι τιμές των δαπανών σε ένα γεωθερμικό έργο. Όσον αφορά το κύριο κόστος επένδυσης, τα χαρακτηριστικά των περιοχών και των γεωθερμικών πηγών είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στις δαπάνες ανάπτυξης της μονάδας. Το μέγεθος και ο τύπος του έργου (νέα μονάδα ή επέκταση ήδη υπάρχουσας) έχουν μεγάλη επίδραση στο κύριο κόστος καθώς ισχύουν σημαντικές οικονομίες κλίμακας για μεγάλα έργα. Οι παράμετροι αγοράς ασκούν επίσης σημαντική επίδραση στο κύριο κόστος του έργου και συγκεκριμένα στη φάση της γεώτρησης και της κατασκευής των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας. Η μεγάλη ζήτηση για υπηρεσίες διάνοιξης γεωτρήσεων και δομικών υλικών αυξάνει τις τιμές με αποτέλεσμα να αυξάνονται και οι αντίστοιχες δαπάνες. Είναι επομένως σημαντικό να γίνει μια σαφής διάκριση μεταξύ των παραμέτρων του κόστους που επηρεάζονται από τις τιμές της αγοράς (π.χ. οι τιμές χάλυβα, υπηρεσίες διάνοιξης γεωτρήσεων, κ.λπ.) και εκείνων που είναι ανεξάρτητες από τις τιμές αυτές (π.χ. χαρακτηριστικά των πηγών, εξελίξεις τεχνολογίας, κ.λπ.).

Η επίδραση των χρηματοοικονομικών μεγεθών είναι ιδιαίτερα έντονη στις φάσεις εξερεύνησης και επιβεβαίωσης, οι οποίες χρηματοδοτούνται με ίδια κεφάλαια, αλλά ισχύει και για τις περισσότερες δαπάνες στη φάση των έργων ανάπτυξης. Επιπλέον, ο κίνδυνος που λαμβάνεται κατά τη φάση των δραστηριοτήτων εξερεύνησης είναι τέτοιος που οι επενδυτές του κεφαλαίου, το οποίο είναι υψηλού επιχειρηματικού κινδύνου, απαιτούν υψηλά ποσοστά επιστροφής. Κατά συνέπεια, πολύ λίγοι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη γεωθερμικών έργων ξοδεύουν στην πράξη χρήματα πάνω στα προγράμματα εξερεύνησης. Το κόστος κεφαλαίου επηρεάζει επίσης το χρηματικό ποσό που είναι πρόθυμος να διαθέσει, ο υπεύθυνος ανάπτυξης, για το σχεδιασμό της μονάδας και για τα δομικά υλικά, ακόμα κι αν η διοχέτευση

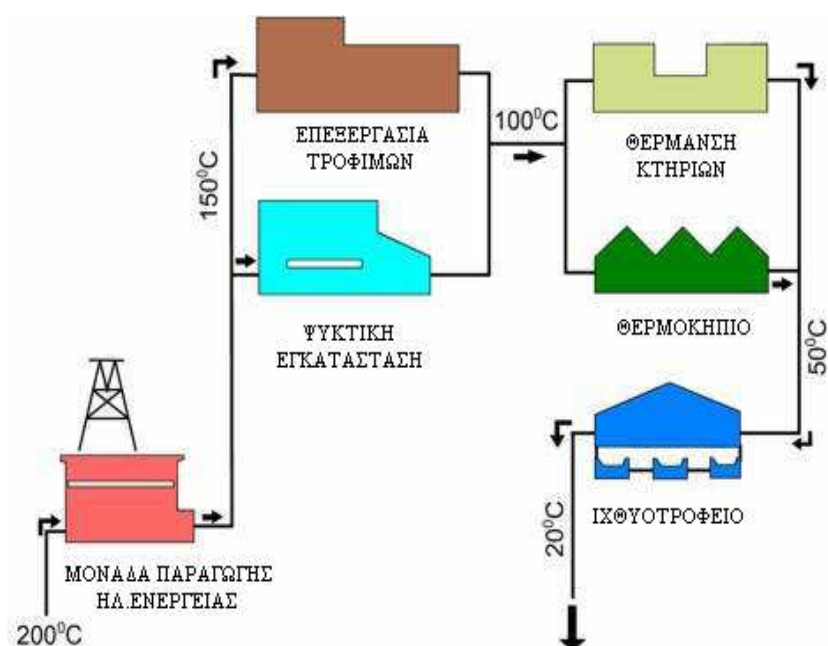
μικρότερου κεφαλαίου για τους δύο αυτούς τομείς, για λόγους οικονομίας, επιφέρει υψηλότερες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης. Ακόμα και οι υπεύθυνοι ανάπτυξης μικρών γεωθερμικών έργων αντιμετωπίζουν χαρακτηριστική δυσκολία στο να συλλέξουν το ποσό του κεφαλαίου που απαιτείται για την ολοκλήρωση του έργου. Έτσι βασικοί χρηματοοικονομικοί περιορισμοί και υψηλά επιτόκια δανεισμού μπορεί να ευνοήσουν την κατασκευή λιγότερο προσεκτικά σχεδιασμένων μονάδων, με φθηνότερα και ακατάλληλα δομικά υλικά προκειμένου να μειωθεί το κόστος της κύριας επένδυσης.

Το αρχικό κόστος επένδυσης μιας γεωθερμικής μονάδας είναι συνήθως μεγαλύτερο, και σε κάποιες περιπτώσεις πολύ ανώτερο, από αυτό που απαιτείται για τη κατασκευή μιας αντίστοιχης συμβατικής μονάδας. Αντίθετα, η ενέργεια που καταναλώνεται σε μια γεωθερμική εγκατάσταση κοστίζει πολύ λιγότερο από τα συμβατικά καύσιμα και αντιστοιχεί στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Έτσι λοιπόν, οι υψηλότερες αρχικές δαπάνες αντισταθμίζονται από την εξοικονόμηση που γίνεται στην φάση παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, η γεωθερμική μονάδα θα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να βρίσκεται σε λειτουργία για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, ικανό για να γίνει απόσβεση της αρχικής επένδυσης, και, αν είναι δυνατό, ακόμη μεγαλύτερο.

Οι περισσότερες παράμετροι που έχουν επιπτώσεις στο κύριο κόστος επηρεάζουν και τις δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης. Τόσο τα χαρακτηριστικά των γεωθερμικών πηγών όσο και το μέγεθος της μονάδας επιδρούν και στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση μεγάλων γεωθερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου ισχύουν σημαντικές οικονομίες κλίμακας, οι σχετικές δαπάνες εργασίας είναι αρκετά χαμηλότερες σε σχέση με μία αντίστοιχη μικρότερη μονάδα, καθώς η απαίτηση για ανθρώπινο δυναμικό παραμένει σταθερή. Η χημική σύσταση του γεωθερμικού ρευστού (π.χ. μη συμπυκνώσιμα αέρια, επικαθίσεις, διάβρωση, κ.λπ.) και το βάθος της γεωθερμικής πηγής, το οποίο επηρεάζει τις δαπάνες γεώτρησης συντήρησης, επιδρούν σημαντικά στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Όπως συμβαίνει με τις κύριες δαπάνες, έτσι και με τα αναλώσιμα υλικά και με τις εργασίες που πραγματοποιούνται με υπερβολικές, οι δαπάνες ποικίλουν σύμφωνα με τις συνθήκες που επικρατούν στην αγορά. Η ποιότητα του σχεδιασμού της μονάδας και των δομικών υλικών είναι μια άλλη παράμετρος που εξηγεί τη μεταβλητότητα των δαπανών λειτουργίας και συντήρησης που παρουσιάζεται μεταξύ των γεωθερμικών μονάδων.

Σημαντικά οικονομικά οφέλη μπορούν να προκύψουν από τη χρήση συνδυαστικών συστημάτων που παρέχουν μεγαλύτερους συντελεστές απόδοσης, όπως για παράδειγμα συστήματα διαδοχικής και κλιμακωτής εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας. Στα συστήματα αυτά οι γεωθερμικές εφαρμογές είναι συνδεδεμένες σε σειρά και η κάθε μια χρησιμοποιεί τα ρευστά που απορρίπτονται

από την προηγούμενη. Μετά τη τελευταία εφαρμογή τα ρευστά οδηγούνται μέσω του δικτύου επανεισαγωγής πίσω στον ταμιευτήρα. Μια τέτοιου είδους εφαρμογή είναι, για παράδειγμα, ο συνδυασμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κάποιες βιομηχανικές χρήσεις, με τη θέρμανση χώρων ή θερμοκηπίων και στη συνέχεια με αγροτικές χρήσεις (σχήμα 8.1).



Σχήμα 8.1: Σύστημα διαδοχικής και κλιμακωτής εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας [8]

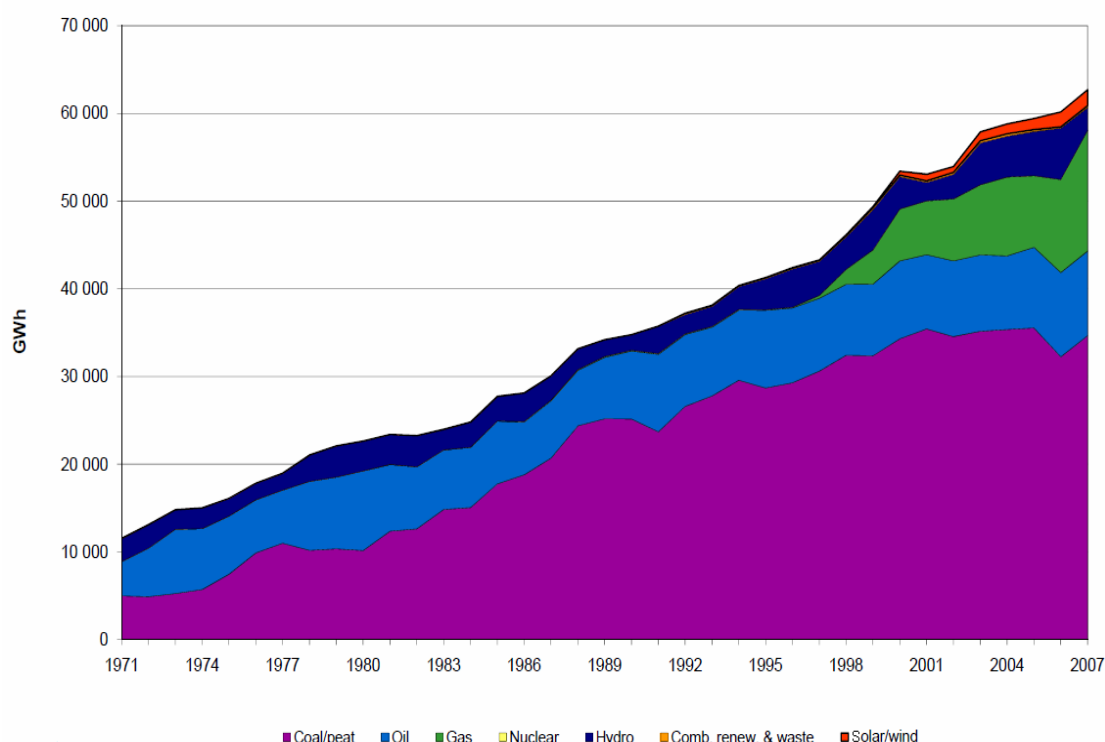
ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα, με τη δυναμική είσοδο των ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό ισοζύγιο (σχήμα 8.2) και την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η προοπτική αξιοποίησης της γεωθερμίας για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Βήματα προς αυτή τη κατεύθυνση όμως, έχουν γίνει κυρίως από την Δ.Ε.Η. Ανανεώσιμες, θυγατρική εταιρεία της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού. Στόχος της εταιρείας αυτής και του αντίστοιχου τμήματός της που ασχολείται με τη γεωθερμία, είναι σε διάστημα 4 ετών να έχει εγκαταστήσει και θέσει σε λειτουργία δύο γεωθερμικές μονάδες παραγωγής της τάξης των 5MW η κάθε μία, στη Μύλο και τη Νίσυρο, νησιά στα οποία έχουν εντοπιστεί τα μοναδικά γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας της χώρας. Στο σημείο αυτό βέβαια θα πρέπει να επισημάνουμε την αντίθεση των κατοίκων των δύο αυτών νησιών στην εγκατάσταση γεωθερμικών μονάδων παραγωγής. Το αρνητικό αυτό

κλίμα ως προς τη γεωθερμική ενέργεια, που επικρατεί στη Μήλο και τη Νίσυρο, δημιουργήθηκε τα τέλη της δεκαετίας του 1980. Αιτία ήταν ένα ατύχημα που συνέβη στις γεωθερμικές εγκαταστάσεις της Δ.Ε.Η. στη Μήλο (μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 2MW) και είχε ως αποτέλεσμα τη περιβαλλοντική ρύπανση του νησιού.

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ

ΕΛΛΑΔΑ



Σχήμα 8.2: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά ενεργειακή πηγή στην Ελλάδα από το 1971 μέχρι το 2007 [41]

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΑ

Λαμβάνοντας υπόψη τον υψηλό συντελεστή φορτίου και την εξαιρετική της αξιοπιστία, η γεωθερμική ενέργεια θεωρείται μια ιδανική πηγή ισχύος για φορτίο βάσης. Αυτό το πλεονέκτημά της τη καθιστά ως τη μοναδική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που μπορεί να καλύψει τις ανάγκες βάσης σε ένα ενεργειακό σύστημα. Με λίγα λόγια, η γεωθερμική ενέργεια συνδυάζει δυο πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα, την δυνατότητα να καλύπτει τα ενεργειακά φορτία βάσης και το γεγονός ότι αποτελεί μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Η μειωμένη κυβερνητική υποστήριξη και η αφθονία φθηνών συμβατικών καυσίμων (φυσικό αέριο, λιγνίτης, πετρέλαιο) εμπόδισαν την ανάπτυξη των γεωθερμικών μονάδων παραγωγής ενέργειας κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαπέντε ετών. Σήμερα, οι καλπάζουσα τιμή του πετρελαίου και τα κυβερνητικά κίνητρα δημιουργούν ένα οικονομικά βιώσιμο πλαίσιο για τη γεωθερμική ανάπτυξη. Η περιβαλλοντική συνειδητοποίηση και οι κυβερνητικές πρωτοβουλίες υποστήριξης (πράσινα πιστοποιητικά, φορολογικές διευκολύνσεις κ.λπ.) είναι βασικά στοιχεία που θα βοηθήσουν στην υπερπήδηση του εμποδίου του υψηλού κόστους της αρχικής και κύριας επένδυσης. Εντούτοις, αλλαγές στο νομοθετικό πλαίσιο που διέπει την ανάπτυξη των γεωθερμικών έργων (π.χ. πρόσβαση σε παροχές δανείων, αδειοδοτικές διαδικασίες, πρωτοβουλίες υποστήριξης της εξερεύνησης, εγγυήσεις για εύκολη πρόσβαση στο κεφάλαιο υψηλού επιχειρηματικού κινδύνου, κ.λπ.) θα ευνοούσαν την περαιτέρω ανάπτυξη της καθαρής αυτής ανανεώσιμης πηγής ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αρθούρος Ζερβός, 2007. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
2. <http://www.interacademycouncil.net/>
3. International Energy Agency, 2009. World energy outlook 2009
4. BULLARD, E.C., 1965. Historical introduction to terrestrial heat flow. In : Lee, W.H.K., ed. Terrestrial Heat Flow, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., 8, pp.1-6.
5. LUBIMOVA, E.A., 1968. Thermal history of the Earth. In: The Earth's Crust and Upper Mantle, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., 13, pp.63-77.
6. STACEY, F.D. and LOPER, D.E., 1988. Thermal history of the Earth: a corollary concerning non-linear mantle rheology. Phys. Earth. Planet. Inter. 53, 167-174.
7. ARMSTEAD, H.C.H., 1983. Geothermal Energy. E. & F. N. Spon, London, 404 pp.
8. <http://www.geothermal-energy.org/>
9. POLLACK, H.N., HURTER, S.J. and JOHNSON, J.R.,1993. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. Rev. Geophys. 31, 267-280.
10. <http://www.und.edu/>
11. HOCHSTEIN, M.P., 1990. Classification and assessment of geothermal - resources. In: Dickson, M.H. and Fanelli, M., eds., Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization, UNITAR, New York, pp. 31-57.
12. WHITE, D. E., 1973. Characteristics of geothermal resources. In: Kruger, P. and Otte, C., eds., Geothermal Energy, Stanford University Press, Stanford, pp. 69-94.
13. MUFFLER, P. and CATALDI, R., 1978. Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics* , 7, 53-89.

14. BENDERITTER, Y. and CORMY, G., 1990. Possible approach to geothermal research and relative costs. In: Dickson, M.H. and Fanelli, M., eds., *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization*, UNITAR, New York, pp. 59-69.
15. NICHOLSON, K., 1993. *Geothermal Fluids*. Springer Verlag, Berlin, XVIII - 264 pp.
16. AXELSSON, G. and GUNNLAUGSSON, E., 2000. Background: Geothermal utilization, management and monitoring. In: *Long-term monitoring of high- and low enthalpy fields under exploitation*, WGC 2000 Short Courses, Japan, 3-10.
17. GARNISH, J.D., ed., 1987. Proceedings of the First EEC/US Workshop on Geothermal Hot-Dry Rock Technology, *Geothermics* 16, 323-461.
18. TENZER, H., 2001. Development of hot dry rock technology. *Bulletin Geo-Heat Center*, 32, 4, 14-22.
19. STEFANSSON, V., 2000. The renewability of geothermal energy. *Proc. World Geothermal Energy, Japan*. On CD-ROM
20. WRIGHT, P.M., 1998. The sustainability of production from geothermal resources. *Bull. Geo-Heat Center*, 19, 2, 9-12.
21. LUMB, J. T., 1981. Prospecting for geothermal resources. In: Rybach, L. And Muffler, L.J.P., eds., *Geothermal Systems, Principles and Case Histories*, J. Wiley & Sons, New York, pp. 77—108.
22. COMBS, J. and MUFFLER, L.P.J., 1973. Exploration for geothermal resources. In : Kruger, P. and Otte, C., eds., *Geothermal Energy*, Stanford University Press, Stanford, pp.95—128.
23. MEIDAV, T., 1998. Progress in geothermal exploration technology. *Bulletin Geothermal Resources Council*, 27, 6, 178-181.
24. ΦΥΤΙΚΑΣ ΜΙΧΑΛΗΣ και ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΟΥ ΜΑΡΙΑ, Γεωθερμική ενέργεια στη Μήλο και αξιοποίηση της, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας
25. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών - Τομέας Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος - Διεύθυνση Γεωθερμίας και Θερμομεταλλικών Υδάτων, Τα γεωθερμικά πεδία της χώρας (χαρακτηρισμός σύμφωνα με ν. 3175/2003), Αθήνα 2007
26. <http://www.milos-island.gr/>
27. <http://www.rae.gr/>

28. <http://www.nisyros.gr/>
29. ΦΥΤΙΚΑΣ ΜΙΧΑΛΗΣ και ΑΝΔΡΙΤΣΟΣ ΝΙΚΟΣ, Γεωθερμικές εφαρμογές στις Κυκλάδες και εφαρμογές υψηλής ενθαλπίας, Συνέδριο IENE, Σύρος, 2008
30. MARY H. DICKSON and MARIO FANELLI, February 2004. What is Geothermal Energy?. Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR , Pisa, Italy
31. <http://www.geothermie.de/>
32. *Ruggero Bertani, Enel - International Division - Renewable Energy Business Development - Via Dalmazia 15, 00198 Rome, Italy*
33. Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ Αθήνα 2001 σύμφωνα με: Πρόγραμμα: LEONARDO DA VINCI 1999
Τίτλος : “Guide for the Training of Engineers in the Electricity Production Technologies from Renewable Energy Sources” Αριθμός συμβολαίου : EL/99/2/011015/PI/II.1.1.b/FPI
34. Κατσοπούρης Μιχαήλ, 2008. Ανάλυση κόστους γεωθερμικών εγκαταστάσεων για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
35. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, 2009. 2008 Geothermal Technologies - Market Report
36. Sanyal S. Cost of Geothermal Power and Factors that affect it, GeothermEx, 2004.
37. LUNIS, B. and BRECKENRIDGE, R., 1991. Environmental considerations. In: Lienau, P.J. and Lunis, B.C., eds., *Geothermal Direct Use, Engineering and Design Guidebook*, Geo-Heat Center, Klamath Falls, Oregon, pp.437—445
38. WERES, O., 1984. Environmental protection and the chemistry of geothermal fluids. *Lawrence Berkeley Laboratory, Calif.* , LBL 14403, 44 pp.
39. FRIDLEIFSSON, I.B., 2001. Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **5**, 299-312.
40. BROWN, K. L., 2000. Impacts on the physical environment. In: Brown, K.L., ed., *Environmental Safety and Health Issues in Geothermal Development*, WGC 2000 Short Courses, Japan, 43 - 56.
41. www.iea.org/