



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Όρυξη αβαθών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Ντεντόπουλος

Επιβλέπων: Βασίλειος Γαγάνης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Όρυξη αβαθών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Ντεντόπουλος

Επιβλέπων: Βασίλειος Γαγάνης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις ΗΜ/ΜΜ/ΕΤΟΣ

Βασίλειος Γαγάνης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

Σοφία Σταματάκη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

Ανδρέας Καλλιώρας, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2022

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε κατά το Ακαδημαϊκό Έτος 2021 – 2022, στα πλαίσια του Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών της Σχολής «Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Βασίλη Γαγάνη, Επ. Καθηγητή του τομέα Μεταλλευτικής της Σχολής «Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών», με συνεξεταστές την κα. Σοφία Σταματάκη, Καθηγήτρια του τομέα Μεταλλευτικής της Σχολής «Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών» και τον κ. Ανδρέα Καλλιώρα, Αναπληρωτή Καθηγητή του τομέα Γεωλογικών επιστημών της Σχολής «Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών».

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η καταγραφή και περιγραφή της διαδικασίας όρυξης αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας / θερμοκρασίας, αναλύοντας διαδοχικά όλες τις παραμέτρους που συντελούν στην υλοποίησή τους, με σκοπό τη βέλτιστη εκμετάλλευση των αντίστοιχων γεωθερμικών ταμιευτήρων.

Στο σημείο αυτό, λοιπόν, και με αφορμή την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας και κατ' επέκταση την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν για την εκπόνησή της. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλη Γαγάνη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα αρκετά ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον ίδιο και την κα. Ειρήνη Δημητρέλλου για την καθοδήγηση και την εποπτεία κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για τις χρήσιμες ιδέες και υποδείξεις. Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Καθηγήτρια κα. Σοφία Σταματάκη και Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ανδρέα Καλλιώρα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, με τίτλο «Όρυξη αβαθών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας», έχει ως αντικείμενο την εξέταση των μεθόδων, των τεχνικών, της τεχνολογίας και εν γένει των διαδικασιών και των πρακτικών που ακολουθούνται διεθνώς και στον ελλαδικό χώρο για όρυξη αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας / θερμοκρασίας. Μέσα από βιβλιογραφική επισκόπηση, πιο συγκεκριμένα, αναζητούνται, αναλύονται και εξετάζονται διαδοχικά οι βασικές παράμετροι που συντελούν στην επιτυχή υλοποίηση των συγκεκριμένων γεωτρήσεων, ξεκινώντας από τις μεθόδους, τις τεχνικές και τον εξοπλισμό που απαιτείται και καταλήγοντας στα προβλήματα που δύναται να προκύψουν κατά την όρυξή τους. Εξετάζεται, επίσης, το κόστος τους, ως μια ακόμα παράμετρος για τη βέλτιστη εκμετάλλευση των γεωθερμικών ταμιευτήρων χαμηλής ενθαλπίας / θερμοκρασίας.

Στόχος της εργασίας είναι η ανάδειξη και η αξιολόγηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών όρυξης των αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας, η οποία προκύπτει μέσω της συγκριτικής αξιολόγησής τους με βαθιές γεωτρήσεις σε πεδία υψηλής ενθαλπίας, καθώς και κυρίως με τις συμβατικές υδρογεωτρήσεις, αναλύοντας τις όποιες ομοιότητες και διαφορές και εξάγοντας τα κατάλληλα συμπεράσματα.

Η διπλωματική εργασία είναι δομημένη σε δύο μέρη: Ένα γενικό μέρος που αφορά στην εξέταση των ορισμών και των εννοιών που σχετίζονται με τη γεωθερμική ενέργεια, τους γεωθερμικούς ταμιευτήρες και τους υπόγειους υδροφορείς, καθώς και με τις γεωτρήσεις προσπέλασης και αξιοποίησης αυτών και αφορούν σε αβαθείς γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας, βαθιές γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας και υδρογεωτρήσεις. Ακολουθώς, στο ειδικό μέρος, γίνεται αξιολόγηση των τριών αυτών τύπων γεωτρήσεων, ώστε να διευκολυνθεί η μεταξύ τους σύγκριση. Αρχικά, πραγματοποιείται η σύγκριση μεταξύ των αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας με τις βαθιές γεωθερμικές γεωτρήσεις σε πεδία υψηλής ενθαλπίας και ακολουθεί η σύγκριση με τις κοινές υδρογεωτρήσεις.

Στόχος αυτής της σύγκρισης είναι η ανάδειξη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών και της πολυπλοκότητας όρυξης γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας, που αποτελεί και το θέμα αυτής της διπλωματικής εργασίας. Στο τέλος, εξάγονται ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά την όρυξη των αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων, σχετικά με τον κατάλληλο εξοπλισμό που θα πρέπει να χρησιμοποιείται, την κατάρτιση του προσωπικού και τα προβλήματα που πρέπει να αποφευχθούν ή να αντιμετωπιστούν, για την ασφαλή και αποτελεσματική όρυξή τους και τη βιωσιμότητα του κάθε γεωθερμικού έργου.

ABSTRACT

The present thesis, entitled “Drilling shallow wells in low enthalpy fields”, aims at the examination of methods, techniques, technology, procedures and practices, that are used internationally as well as in the Greek area to successfully drill shallow geothermal wells in low enthalpy / temperature fields. Through a literature review, the key parameters that are important to achieve a successful drilling process, are sought, analyzed and examined, starting from the methods, techniques and equipment required and ending with the problems that may arise during the drilling process. The cost of such projects is also examined, as another parameter for the optimal exploitation of low enthalpy / temperature geothermal reservoirs.

The aim of the thesis is to highlight and evaluate the special features of the drilling processes that occur during drilling shallow geothermal wells in low enthalpy fields. Those features are derived from the comparative evaluation of shallow wells in low enthalpy fields against deep wells in high enthalpy fields, as well as with conventional water wells, analyzing at the same time similarities and differences and drawing appropriate conclusions.

The present thesis consists of two parts: A general part that concerns the examination of the definitions and concepts related to geothermal energy, geothermal reservoirs, underground aquifers, as well as the access and exploitation boreholes that concern low enthalpy shallow wells, high enthalpy deep wells and water wells. Subsequently, an evaluation of these three types of wells is made, in order to facilitate the comparison between them, in the following part. In the second part, a comparison is firstly made between shallow geothermal wells in low-enthalpy fields and deep geothermal wells in high-enthalpy fields, followed by a comparison with conventional water wells.

The aim of this comparison is to highlight the particular features and complexity of drilling wells in low enthalpy fields, which is also the subject of this thesis. In the end, some useful conclusions are drawn regarding the drilling process of shallow geothermal wells, the appropriate equipment that should be used, the training of personnel and the problems that need to be avoided or dealt with, all resulting in a safe and effective drilling process which will also ensure the viability of the geothermal project.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Στόχος και αντικείμενο της εργασίας	11
1.2 Μεθοδολογία.....	11
1.3 Δομή εργασίας.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	15
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
2.2 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ.....	16
2.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ & ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	18
2.4 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	22
2.4.1 Θερμά ξηρά πετρώματα	22
2.4.2 Αβαθής γεωθερμία	22
2.4.3 Υδροθερμική ενέργεια – Υδροθερμικές πηγές.....	22
2.4.4 Υδροφόροι οριζόντες χαμηλής θερμοκρασίας/ενθαλπίας	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΒΑΘΕΙΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ.....	25
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	25
3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΡΥΞΗΣ ΑΒΑΘΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ & ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	27
3.2.1 Μέθοδος όρυξης.....	27
3.2.2 Περιστροφικό γεωτρύπανο	29
3.2.3 Διατρητική στήλη.....	31
3.2.4 Κοπτικά άκρα	31
3.2.5 Ρευστά διάτρησης.....	33
3.2.6 Λοιπός εξοπλισμός.....	35
3.2.7 Σωλήνωση	36
3.2.8 Τσιμέντωση.....	40
3.3 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ	42
3.3.1 Σωληνώσεις φίλτρων	42
3.3.2 Χαλικόφιλτρο	45
3.3.3 Ανάπτυξη γεωθερμικών γεωτρήσεων χαμηλής ενθαλπίας.....	46

3.4	ΚΟΣΤΟΣ ΑΒΑΘΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ		51
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	51
4.2	ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΟ	53
4.3	ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΗ ΣΤΗΛΗ	56
4.4	ΚΟΠΤΙΚΑ ΑΚΡΑ	58
4.5	ΡΕΥΣΤΑ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ	58
4.6	ΣΩΛΗΝΩΣΗ.....	61
4.7	ΤΣΙΜΕΝΤΩΣΗ.....	63
4.8	ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	64
4.9	ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ.....	65
4.10	ΚΟΣΤΟΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ		69
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	69
5.2	ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΝΕΡΟΥ	69
5.2.1	Τύποι υπόγειων υδροφορέων	70
5.3	ΡΟΗ ΕΝΤΟΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ – ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ DARCY	71
5.3.1	Υδραυλικές παράμετροι των υπόγειων υδροφορέων	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ.....		79
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	79
6.2	ΜΕΘΟΔΟΙ & ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΟΡΥΞΗΣ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ - ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	81
6.2.1	Κρουστική όρυξη με χρήση συρματοσχοινου	81
6.2.2	Περιστροφική όρυξη.....	83
6.2.3	Κρουστικοπεριστροφική όρυξη	86
6.2.4	Μηχανολογικός εξοπλισμός περιστροφικής όρυξης υδρογεωτρήσεων.....	89
6.2.5	Ρευστά διάτρησης.....	92
6.3	ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ	97
6.3.1	Ολοκλήρωση υδρογεώτρησης.....	97
6.3.2	Ανάπτυξη υδρογεώτρησης	102
6.4	ΣΥΝΗΘΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΟΡΥΞΗ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.....	103
6.5	ΚΟΣΤΟΣ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.....	105

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΑΙ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ.....	107
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	107
7.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ.....	107
7.3 ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	109
7.3.1 Γεωτρύπανο.....	109
7.3.2 Διατρητική στήλη.....	110
7.3.3 Κοπτικά άκρα.....	111
7.3.4 Ρευστά διάτρησης.....	111
7.3.5 Σωλήνωση.....	112
7.3.6 Τσιμέντωση.....	113
7.4 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.....	113
7.5 ΣΥΝΗΘΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ.....	114
7.6 ΚΟΣΤΟΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.....	114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ.....	117
8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	117
8.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ.....	117
8.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΡΥΞΗΣ.....	118
8.4 ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	119
8.4.1 Γεωτρύπανο.....	119
8.4.2 Διατρητική στήλη.....	120
8.4.3 Κοπτικά άκρα.....	120
8.4.4 Λοιπός εξοπλισμός.....	121
8.4.5 Ρευστά διάτρησης.....	121
8.4.6 Σωλήνωση.....	122
8.4.7 Τσιμέντωση.....	123
8.5 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.....	124
8.5.1 Ολοκλήρωση.....	124
8.5.2 Ανάπτυξη.....	124
8.6 ΣΥΝΗΘΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....	125

8.7 ΚΟΣΤΟΣ.....	126
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	129
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	135

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1 Ταξινόμηση των γεωθερμικών συστημάτων σε σχέση με το είδος των γεωθερμικών πόρων (Ανδρίτσος & Φύτικας, Γεωθερμία, 2004).....	21
Πίνακας 3-1 Μέσο κόστος ερευνητικών γεωθερμικών γεωτρήσεων (Βρέλλης, Αρβανίτης, & Μπίμπου - Μπακούλα, 2009)	48
Πίνακας 3-2 Μέσο κόστος παραγωγικών γεωθερμικών γεωτρήσεων με μεγάλη διάμετρο (Βρέλλης, Αρβανίτης, & Μπίμπου - Μπακούλα, 2009)	48
Πίνακας 4-1 Μέσα κόστη παραγωγικών γεωθερμικών γεωτρήσεων μεγάλης διαμέτρου και μεγάλου βάθους (Βρέλλης, Αρβανίτης, & Μπίμπου - Μπακούλα, 2009).....	67
Πίνακας 6-1 Μέθοδοι όρυξης υδρογεωτρήσεων και απόδοσή τους σε διαφορετικούς τύπους πετρωμάτων (Κελεσίδης, 2011).....	82
Πίνακας 6-2 Εύρη τιμών βάρους επί του κοπτικού και ταχύτητας περιστροφής σε σχηματισμούς διαφορετικής σκληρότητας (Πηγή: https://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/5-484/Ch5.htm).....	92
Πίνακας 6-3 Ενδεικτικές τιμές κόστους ανά μέτρο βάθους όρυξης υδρογεωτρήσεων αλλά και διεύρυνσης διαμέτρου αυτών ανάλογα με τη σκληρότητα των σχηματισμών σύμφωνα με τις τιμολογήσεις του Ελληνικού Δημοσίου. (Πηγή: http://deyakat.gr/wp-content/uploads/2020/05/4.-%CE%A4%CE%B9%CE%BC%CE%BF%CE%BB%CF%8C%CE%B3%CE%B9%CE%BF.pdf).....	105

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1. Γεωθερμικό μοντέλο χαμηλής ενθαλπίας σε λεκάνη από τεκτονική βύθιση (Ανδρίτσος & Φυτίκας, 2004).....	24
Εικόνα 3-1. Φωτογραφίες γεωτρύπανου της ΕΑΓΜΕ κατά την ανόρυξη γεωθερμικής γεώτρησης παραγωγής στην περιοχή της Αριδαίας (Βρέλλης, 2009).....	28
Εικόνα 3-2. Γεωτρύπανο περιστροφικής τράπεζας με ύψος πύργου περίπου 55 m (Finger & Blankenship, 2010).....	30
Εικόνα 3-3. Σύστημα περιστρεφόμενης κεφαλής - Top drive (Finger & Blankenship, 2010).....	30
Εικόνα 3-4. Σχεδιάγραμμα της διατρητικής στήλης (διατρητικά στελέχη και κατώτερη συνδεσμολογία) (Ahmed, 2020).....	31
Εικόνα 3-5. Κοπτικά με τρία ή περισσότερα κοπτικά ελάσματα (Σταματάκη, 2003).....	32
Εικόνα 3-6. Αδαμαντοκορώνες με εφαρμογή σε παραγωγή αλλά και σε έρευνα (Χρηστάρας, 2003).....	32
Εικόνα 3-7. Τύποι τρίκωνων κοπτικών άκρων ανάλογα με τη σκληρότητα των σχηματισμών (Σταματάκη, 2003).....	33
Εικόνα 3-8. Στα αριστερά απεικονίζεται το σχεδιάγραμμα του συστήματος BOP σε γεώτρηση χαμηλής ενθαλπίας (Ανδρίτσος & Φυτίκας, Γεωθερμία, 2004). Στα δεξιά απεικονίζεται ένας ανιχνευτής υδρόθειου (H ₂ S).....	36
Εικόνα 3-9. Σχηματική αναπαράσταση παραγωγικής γεώτρησης σε περιοχή με πίεση σχηματισμών μικρότερη της αρτεσιανής (Α) και με αρτεσιανή πίεση (Β). (Tomaszewska, Sowizdział, & Chmielowska, 2018).....	43
Εικόνα 3-10. Τύποι σχισμών που συναντώνται στις φιλτροσωληνώσεις (Καρυδάκης Γ. , 2005).....	44
Εικόνα 3-11. Διατομή γεώτρησης, πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την τοποθέτηση του χαλικόφιλτρου (Πηγή: https://www.weatherford.com/documents/catalog/gravel-pack-systems/).....	46
Εικόνα 4-1. Τυπικά παραδείγματα σχεδιασμού γεώτρησης υψηλής ενθαλπίας (Sungkar, Simanjuntak, Isa, Ashadi, & Hartono, 2020).....	52
Εικόνα 4-2 Σχηματική αναπαράσταση των μελών ενός συμβατικού περιστροφικού γεωτρύπανου με περιστροφική τράπεζα (αριστερά) (Klempa, n.d.) και ενός περιστροφικού γεωτρύπανου με περιστροφική κεφαλή (δεξιά) (Hagen & Pawlus, 2017).....	53
Εικόνα 4-3 Αντλίες διακίνησης του ρευστού διάτρησης (Balac, 2019).....	54
Εικόνα 4-4 Σύστημα καθαρισμού του ρευστού διάτρησης από τα παραγόμενα θρύμματα κατά την όρυξη γεώτρησης.....	55
Εικόνα 4-5 Τυπική διάταξη αντικρηκτικού μηχανισμού (B.O.P.) (Potter, 2018).....	55
Εικόνα 4-6 Σχηματική απεικόνιση κεκλιμένων γεωτρήσεων παραγωγής (κόκκινο) και εισπίεσης (μπλε) κατά την εκμετάλλευση ενός γεωθερμικού συστήματος (Πηγή: https://www.vox.com/energy-and-environment/2020/10/21/21515461/renewable-energy-geothermal-egs-ags-supercritical).....	57
Εικόνα 4-7 Ενδεικτικά προγράμματα σωλήνωσης βαθιών γεωθερμικών γεωτρήσεων υψηλής ενθαλπίας στον ελλαδικό χώρο (Βρέλλης, Αρβανίτης, & Μπίμπου - Μπακούλα, 2009).....	63

Εικόνα 5-1 Σχηματική αναπαράσταση τριών τύπων πρωτεύοντος πορώδους (πάνω σειρά) και δύο τύπων δευτερεύοντος πορώδους (κάτω σειρά) (Πηγή: https://www-ig.unil.ch/geophysa/c_res11a.htm)	74
Εικόνα 5-2 Μετρήσεις τιμών K από α) μικρά δείγματα εργαστηρίου, που παρέχουν πληροφορίες για την έκταση και την κατανομή ζωνών υψηλής και χαμηλής K σε εξεταζόμενο πεδίο, αλλά δεν παρέχουν δεδομένα για τη διασύνδεση των τμημάτων στα οποία υφίσταται υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα και β) μετρήσεις πεδίου με μεγαλύτερο όγκο δείγματος που καταφέρνουν να αναδείξουν το συνολικό μέγεθος της K . Πολύ σημαντικό για την ανάπτυξη των υδροφορέων καθώς γίνεται αντιληπτή η συμπεριφορά όλου του συστήματος κατά την άντληση. (Woessner & Poeter, 2020)	75
Εικόνα 5-3 Σχηματική αναπαράσταση του ορισμού της μεταβιβασιμότητας σε σχέση με την υδραυλική αγωγιμότητα σε ένα τμήμα υδροφορέα εγκιβωτισμένης ροής. (Πηγή: https://www.enviro.wiki/index.php?title=File:Kirkman1w2Fig3.png)	76
Εικόνα 5-4 Συμπεριφορά ενός υδροφορέα ελεύθερης ροής (αριστερά) και ενός υδροφορέα εγκιβωτισμένης ροής (δεξιά) ύστερα από την εξαγωγή του ίδιου όγκου νερού και από τους δύο. (Πηγή: http://www.connectedwaters.unsw.edu.au/schools-resources/fact-sheets/groundwater-levels-and-aquifer-storage)	77
Εικόνα 6-1 Σχεδιάγραμμα μιας παραγωγικής υδρογεώτρησης με αναφορά στα επιμέρους τμήματά της (Πηγή: http://www.clean-water-for-laymen.com/water-well-diagram.html)	80
Εικόνα 6-2 Σχηματική αναπαράσταση των τμημάτων κρουστικού γεωτρήσανου, το οποίο πραγματοποιεί την όρυξη με χρήση συρματοσχοίνου (Cruse, 1979)	83
Εικόνα 6-3 Σχηματική αναπαράσταση περιστροφικού γεωτρήσανου που πραγματοποιεί την όρυξη της γεώτρησης με συμβατική κυκλοφορία ρευστού διάτρησης (Cruse, 1979)	85
Εικόνα 6-4. Σχηματική αναπαράσταση περιστροφικού γεωτρήσανου που πραγματοποιεί την όρυξη της γεώτρησης με ανάστροφη κυκλοφορία ρευστού διάτρησης (Cruse, 1979)	86
Εικόνα 6-5. Σχηματική αναπαράσταση ενός γεωτρήσανου κρουστικοπεριστροφικής όρυξης και των τμημάτων του (Cruse, 1979)	88
Εικόνα 6-6 Αυτοκινούμενο τροχοφόρο γεωτρήσανο με ονομασία PSM – 8 της εταιρείας Soilmech, το οποίο έχει αξιοποιηθεί από το ΕΑΓΜΕ για την όρυξη υδρογεωτρήσεων.	89
Εικόνα 6-7 Σχεδιάγραμμα επιλογής του κατάλληλου κοπτικού άκρου και γεωτρήσανου ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος κατά την όρυξη υδρογεωτρήσεων (Πηγή: https://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/5-484/Ch5.htm)	90
Εικόνα 6-8 Σχεδιάγραμμα επιλογής του κατάλληλου τρίκωνου κοπτικού άκρου είτε με ενσωματωμένα είτε με ένθετα δόντια, βάσει της τυποποίησής τους κατά IADC, σε σχέση με την σκληρότητα του σχηματισμού. (Πηγή: https://kcbits.com/drill-bit-education/atlas-copco/)	91
Εικόνα 6-9 Σχεδιάγραμμα της μεθόδου περιστροφικής όρυξης με ανάστροφη κυκλοφορία αέρα (Zhang, 2019)	94
Εικόνα 6-10. Χρήση αφρού ως ρευστού διάτρησης (Πηγή: https://www.asecexport.org/drilling-chemicals/)	96
Εικόνα 6-11. Ολοκλήρωση ανοιχτού τύπου με τοποθέτηση φίλτρου (Πηγή: http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=124691)	98

<i>Εικόνα 6-12. Τυφλή σωλήνωση και φιλτροσωλήνες υδρογεωτρήσεων (Κανέλλος, 2014).....</i>	<i>99</i>
<i>Εικόνα 6-13. Τύποι ανοιγμάτων για φιλτροσωλήνες υδρογεωτρήσεων: α) ανοίγματα κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής, β) κατακόρυφα ανοίγματα, γ) & δ) οριζόντια ανοίγματα, ε) ανοίγματα τύπου περσίδας, ς) ανοίγματα συνεχούς σχισμής, ζ) ανοίγματα τύπου γέφυρας (Κανέλλος, 2014).....</i>	<i>100</i>
<i>Εικόνα 6-14 Χαλίκωση γεώτρησης με ανάστροφη κυκλοφορία ρευστού διάτρησης (Βαφειάδης, 1979)</i>	<i>101</i>
<i>Εικόνα 7-1 Σχεδιαγράμματα προγραμμάτων σωλήνωσης τριών διαφορετικών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία υψηλής ενθαλπίας (Πηγή: https://www.geoenergymarketing.com/tag/casing-design/)</i>	<i>108</i>
<i>Εικόνα 7-2 Ενδεικτικά σχεδιαγράμματα προγραμμάτων σωλήνωσης τριών διαφορετικών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας. Τα συγκεκριμένα προγράμματα αφορούν γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην Ισλανδία (Gombo, 2010).....</i>	<i>109</i>
<i>Εικόνα 8-1 Ενδεικτικά σχεδιαγράμματα προγράμματος σωλήνωσης σε συμβατικής υδρογεώτρηση (Αριστερά) (Πηγή: https://www.pnws-awwa.org/uploads/PDFs/conferences/2012/May%203rd%20Engineering.pdf) και σε αβαθή γεωθερμική γεώτρηση χαμηλής ενθαλπίας (Δεξιά) (Βρέλλης, Αρβανίτης, & Μπίμπου - Μπακούλα, 2009)</i>	<i>118</i>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Στόχος και αντικείμενο της εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η εξέταση των μεθόδων, των τεχνικών, της τεχνολογίας και εν γένει των διαδικασιών που ακολουθούνται διεθνώς και των πρακτικών στον ελλαδικό χώρο για την όρυξη αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας / θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα, μέσα από τη βιβλιογραφική επισκόπηση αναζητούνται, αναλύονται και εξετάζονται διαδοχικά οι βασικές παράμετροι που συντελούν στην επιτυχή υλοποίηση των συγκεκριμένων γεωτρήσεων, ξεκινώντας από τις μεθόδους, τις τεχνικές και τον εξοπλισμό που απαιτείται και καταλήγοντας στα προβλήματα που δύναται να προκύψουν κατά την όρυξή τους. Εξετάζεται, επίσης, το κόστος αυτών των γεωτρήσεων, ως μια ακόμα παράμετρος για τη βέλτιστη εκμετάλλευση των γεωθερμικών ταμιευτήρων χαμηλής ενθαλπίας / θερμοκρασίας.

Η εκτέλεση γεωθερμικών γεωτρήσεων εν γένει (έρευνας, παραγωγής και επανεισαγωγής) γίνεται για την έρευνα και μελέτη των ιδιοτήτων και της στρωματογραφίας και για τον εντοπισμό, την περιχάραξη και την εν τέλει την εκμετάλλευση των γεωθερμικών ταμιευτήρων. Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου όρυξης είναι σημαντική για την επιτυχημένη συλλογή των δεδομένων που προσδιορίζουν με επαρκή αξιοπιστία τα χαρακτηριστικά ενός γεωθερμικού πεδίου, με στόχο την ορθολογική και βιώσιμη εκμετάλλευσή του.

Η συχνή ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων αερίων στα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας στην Ελλάδα (κυρίως CO₂) εγείρει ορισμένες δυσκολίες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό και την εκτέλεση των γεωτρήσεων σε αυτά τα πεδία, την άντληση και τη μεταφορά των γεωθερμικών ρευστών και γενικότερα όλη την εκμετάλλευση του γεωθερμικού πεδίου.

Στόχος της εργασίας είναι η ανάδειξη και η αξιολόγηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών όρυξης των αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας, η οποία προκύπτει και μέσω της συγκριτικής αξιολόγησής τους με βαθιές γεωτρήσεις σε πεδία υψηλής ενθαλπίας, καθώς και κυρίως με τις συμβατικές υδρογεωτρήσεις, αναλύοντας τις όποιες ομοιότητες και διαφορές και εξάγοντας τα κατάλληλα συμπεράσματα.

1.2 Μεθοδολογία

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται ουσιαστικά σε δύο μέρη: Ένα γενικό μέρος που αφορά στην εξέταση των ορισμών και των εννοιών που σχετίζονται με τη γεωθερμική ενέργεια, τους γεωθερμικούς ταμιευτήρες, αλλά και τους υπόγειους υδροφορείς, καθώς και με τις γεωτρήσεις

προσπέλασης και αξιοποίησης αυτών. Δηλαδή, εξετάζονται οι μέθοδοι, η τεχνολογία, ο εξοπλισμός, αλλά και τα προβλήματα που ανακύπτουν κατά την όρυξή τους. Ακολουθεί ένα ειδικό μέρος που εστιάζει στη σύγκριση μεταξύ των τριών τύπων γεωτρήσεων που εξετάστηκαν (αβαθείς & βαθιές γεωθερμικές γεωτρήσεις και υδρογεωτρήσεις).

Μετά την οριστικοποίηση των στόχων της εργασίας, διενεργήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση της ελληνικής και διεθνούς βιβλιογραφίας με στόχο τη συγκέντρωση και ανάλυση της καταγεγραμμένης γνώσης που αφορά στο γενικό μέρος της. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στα θέματα όρυξης αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας, καθώς είναι και ο τύπος γεώτρησης που αποτελεί το θέμα της παρούσας εργασίας.

Ακολούθως, γίνεται αξιολόγηση των τριών τύπων γεωτρήσεων που εξετάστηκαν, ώστε να διευκολυνθεί η μεταξύ τους σύγκριση, στο ειδικό μέρος. Αρχικά, λαμβάνει χώρα η σύγκριση μεταξύ των αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας με τις βαθιές γεωθερμικές γεωτρήσεις σε πεδία υψηλής ενθαλπίας, ενώ στη συνέχεια, πραγματοποιείται και η σύγκριση με τις κοινές υδρογεωτρήσεις.

1.3 Δομή εργασίας

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται, όπως προαναφέρθηκε, σε δύο μέρη και σε εννέα διακριτά μεταξύ τους κεφάλαια:

Το 1^ο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή, όπου πραγματοποιείται περιγραφή του αντικειμένου, των στόχων της εργασίας, της διαδικασίας εκπόνησής της και της δομής της.

Ακολουθεί το Γενικό Μέρος που περιλαμβάνει τα Κεφάλαια 2 έως 6 ως εξής:

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις βασικές έννοιες γύρω από τη γεωθερμία. Αναπτύσσονται με συντομία βασικοί ορισμοί της γεωθερμικής ενέργειας, πώς αυτή ταξινομείται, από πού προέρχεται και πώς γίνεται η εκμετάλλευσή της.

Το 3^ο κεφάλαιο αφορά τις αβαθείς γεωθερμικές γεωτρήσεις σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας. Γίνεται εκτενής αναφορά στις μεθόδους όρυξής τους, στον εξοπλισμό που απαιτείται, καθώς και στα προβλήματα που δύναται να προκληθούν.

Το 4^ο κεφάλαιο εξετάζει τις βαθιές γεωθερμικές γεωτρήσεις σε πεδία υψηλής ενθαλπίας. Και εδώ γίνεται αναφορά στις μεθόδους όρυξής τους, στον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται, και στα προβλήματα που δύναται να προκληθούν.

Στο 5^ο κεφάλαιο αναφέρονται μερικοί βασικοί ορισμοί και έννοιες που περιγράφουν τους υπόγειους υδροφορείς.

Το 6^ο κεφάλαιο αναφέρεται στις συμβατικές υδρογεωτρήσεις. Παρουσιάζονται, οι μέθοδοι όρυξης τους και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται, καθώς και τα προβλήματα που δύναται να προκύψουν.

Ακολουθεί το Ειδικό Μέρος που περιλαμβάνει τα Κεφάλαια 7 έως 8 ως εξής:

Στο 7^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται η πρώτη σύγκριση, μεταξύ των αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας με τις βαθιές γεωθερμικές γεωτρήσεις σε πεδία υψηλής ενθαλπίας.

Στο 8^ο κεφάλαιο λαμβάνει χώρα η δεύτερη σύγκριση, μεταξύ των αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας και των κοινών υδρογεωτρήσεων.

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με το 9^ο κεφάλαιο, στο οποίο γίνεται παρουσίαση των βασικών συμπερασμάτων που προκύπτουν από τις συγκρίσεις του ειδικού μέρους της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο Γεωθερμία αναφερόμαστε στον εφαρμοσμένο επιστημονικό κλάδο που περιλαμβάνει όλο το φάσμα της έρευνας, από τη μελέτη της γήινης ροής θερμότητας, τις συνθήκες κατανομής των θερμοκρασιών στο υπέδαφος, τον μηχανισμό της κυκλοφορίας των υπόγειων θερμών ρευστών σε συνδυασμό με τις γεωλογικές συνθήκες, καθώς και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους, μέχρι τον εντοπισμό και την αξιολόγηση των γεωθερμικών πεδίων με κατάλληλες μεθόδους. (Ανδρίτσος & Φυτίκας, 2004)

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμική ενέργεια που παράγεται και αποθηκεύεται στο εσωτερικό της Γης. Εκτιμάται ότι έχει δημιουργηθεί από την πρωτογενή θερμότητα που εκλύθηκε όταν διαμορφώθηκε ο πλανήτης και συντηρείται από τη ραδιενεργή αποσύνθεση ασταθών ατόμων και τις εξώθερμες χημικές αντιδράσεις στον πυρήνα της Γης, αλλά και την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που φτάνει στη Γη από τον Ήλιο (Τζανής, 2010). Η θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια του πυρήνα της Γης εκτιμάται ότι ανέρχεται σε 3500 έως 4,500°C. Επίσης, εμπεριέχεται σε φυσικούς επιφανειακούς ή υπόγειους ατμούς, με ή χωρίς αέρια, σε θερμά νερά ή σε μίγματα των παραπάνω, καθώς και σε ξηρά-θερμά πετρώματα. (Ανδρίτσος & Φυτίκας, 2004)

Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του πυρήνα και της επιφάνειας της Γης διαμορφώνει τη γεωθερμική βαθμίδα, με την οποία μετράται ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας με το βάθος. Η γεωθερμική βαθμίδα διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή και εξαρτάται από την τεκτονική, την ηφαιστειότητα και τη γεωλογική δομή της κάθε περιοχής. Συνεπώς, η θερμοκρασία αυξάνεται με το βάθος ανάλογα με την τοπική γεωθερμική βαθμίδα. Υψηλή γεωθερμική βαθμίδα εντοπίζεται σε περιοχές όπου υπάρχει είτε απόκλιση των τεκτονικών πλακών, είτε σύγκρουση των τεκτονικών πλακών, οπότε σχηματίζονται ηφαιστειακά τόξα, όπως αυτό του Αιγαίου, και συνακόλουθη άνοδος μαγματικού υλικού από το εσωτερικό της Γης. Χαμηλή γεωθερμική βαθμίδα εντοπίζεται σε περιοχές όπου ο ωκεάνιος φλοιός βυθίζεται κάτω από τον ηπειρωτικό, ενώ σε τεκτονικά σταθερές περιοχές (όπως π.χ. μεγάλες ιζηματογενείς λεκάνες), η μέση γεωθερμική βαθμίδα ανέρχεται σε 15-30°C/km. (Τζανής, 2010)

Σε περιοχές με σχετικά πρόσφατη ηφαιστειότητα παρουσιάζεται το φαινόμενο διάπυρο υλικό από το εσωτερικό της γης να έχει κινηθεί προς την επιφάνεια και το υπέδαφος να έχει θερμανθεί. Η θερμότητα αυτή μεταφέρεται σε τυχόν υδροφόρους σχηματισμούς της περιοχής. Τα νερά θερμαίνονται και κυκλοφορούν μέσα στα περατά πετρώματα φθάνοντας σε πολλές περιπτώσεις μέχρι την επιφάνεια, αφού προηγουμένως έχουν εμπλουτιστεί από άλατα των πετρωμάτων

(θερμές πηγές, ατμίδες), ενώ κάποιες άλλες φορές τα νερά εγκλωβίζονται σε μη υδροπερατά πετρώματα και αποκτούν θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 350°C.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μία ήπια, πρακτικά ανεξάντλητη και, συνεπώς, ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, υπό την έννοια ότι βρίσκεται αποθηκευμένη σε αφθονία στο σώμα του πλανήτη και η εκμετάλλευσή της από τον άνθρωπο δεν μπορεί να την εξαντλήσει. Η καταναλισκόμενη γεωθερμική ενέργεια ανανεώνεται από την εσωτερική πλανητική δεξαμενή και είναι απεριόριστη από ανθρώπινη άποψη αν χρησιμοποιείται με βιώσιμο τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, αν ο ρυθμός κατανάλωσής της είναι ίσος ή μικρότερος από τον ρυθμό ανανέωσής της.

Η γεωθερμική ενέργεια που ανακτάται από διαφορετικά βάθη κάτω από την επιφάνεια της Γης παρέχει διαφορετικές δυνατότητες χρήσης. Κατά συνέπεια, η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας μπορεί να προέρχεται από διαφορετικά γεωθερμικά συστήματα τα οποία είναι είτε αβαθή (βρίσκονται δηλ. κοντά στην επιφάνεια), είτε βρίσκονται βαθιά στο υπέδαφος.

2.2 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

Οι βασικοί ορισμοί που σχετίζονται με την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας σε αυτή την υποενότητα προέρχονται από τον Ν. 4602/Α'45/09.03.2019 σχετικά με την έρευνα, εκμετάλλευση και διαχείριση του γεωθερμικού δυναμικού της χώρας και άλλες διατάξεις, καθώς και από τα συγγράμματα «Γεωθερμία» των Ανδρίτσου και Φυτίκα και «Γεωθερμική Ενέργεια» του Καρυδάκη.

Γεωθερμία ή γεωθερμική ενέργεια: Ονομάζεται η ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης με μορφή νερών, ατμών, αερίων ή μιγμάτων αυτών ή ακόμη και ως ενέργεια από τα πετρώματα και αποτελεί μια σημαντική Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας (Α.Π.Ε.). Είναι η φυσική ενέργεια της γης που διαρρέει το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια. (Ανδρίτσος & Φυτίκας, 2004)

Γεωθερμικά ρευστά: Ονομάζονται τα μέσα μεταφοράς της γήινης θερμότητας και μπορεί να είναι ζεστό νερό ή ζεστό νερό και αέρια (κυρίως διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο) ή ζεστό νερό με ατμούς ή μόνο ατμοί. (Καρυδάκης Γ. , 2005)

Γεωθερμική βαθμίδα: Είναι ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της γης ανά μονάδα μήκους με μέση τιμή 3°C/100m, η οποία και χαρακτηρίζεται ως κανονική γεωθερμική βαθμίδα. (Καρυδάκης Γ. , 2005)

Θετική γεωθερμική ανωμαλία: Χαρακτηρίζεται η ύπαρξη μιας τοπικά αυξημένης θερμικής ροής με συνέπεια την εμφάνιση μεγαλύτερων τιμών γεωθερμικής βαθμίδας σε σχέση με την κανονική. (Καρυδάκης Γ. , 2005)

Γεωθερμικό δυναμικό: Είναι το σύνολο των γηγενών φυσικών θερμών ρευστών, επιφανειακών ή υπογείων και της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών, που η θερμοκρασία τους υπερβαίνει τους 30°C. (N. 4602/19)

Γεωθερμικό πεδίο: Είναι ο ενιαίος μεταλλευτικός χώρος μέσα στον οποίο έχει εντοπιστεί γεωθερμικό δυναμικό. Επίσης, ορίζεται ως μια γεωθερμική περιοχή, η οποία με κριτήριο την ποσότητα, τη θερμοκρασία και το βάθος των γεωθερμικών ρευστών χαρακτηρίζεται εκμεταλλεύσιμη κυρίως με οικονομικά κριτήρια. (Καρυδάκης Γ. , 2005)

Περιοχή γεωθερμικού ενδιαφέροντος: Είναι ο ευρύτερος χώρος μέσα στον οποίο υπάρχουν ενδείξεις παρουσίας γεωθερμικού δυναμικού θερμοκρασίας έως 90°C. (N. 4602/19)

Προϊόν του γεωθερμικού δυναμικού: Θεωρείται το αξιοποιήσιμο θερμοενεργειακό του περιεχόμενο. (N. 4602/19)

Παραπροϊόντα του γεωθερμικού δυναμικού: Θεωρούνται άλλα προϊόντα που συμπαράγονται κατά την εκμετάλλευση εκτός από το θερμοενεργειακό περιεχόμενο του γεωθερμικού δυναμικού. (N. 4602/19)

Υποπροϊόν του γεωθερμικού δυναμικού: Θεωρείται το γεωθερμικό ρευστό που απομένει, ύστερα από την απόληψη των κατά τα ανωτέρω προϊόντων και παραπροϊόντων. (N. 4602/19)

Εκμετάλλευση του γεωθερμικού δυναμικού: Αποτελεί το σύνολο των δραστηριοτήτων που αποσκοπούν στην παραγωγική (άντληση) απόληψη του προϊόντος και παραπροϊόντων και την ασφαλή διάθεση του υποπροϊόντος. (N. 4602/19)

Διαχείριση του γεωθερμικού δυναμικού: Είναι το σύνολο των δραστηριοτήτων που ρυθμίζουν την εκμετάλλευση του γεωθερμικού ρευστού από τα υπόγεια γεωθερμικά συστήματα, με σκοπό τη βιώσιμη – ορθολογική και ολοκληρωμένη αξιοποίησή του. Η διαχείριση αναφέρεται στο σύνολο του γεωθερμικού πεδίου. (N. 4602/19)

Τέλος, ο όρος «γεωθερμικό σύστημα» περιγράφει μια περιοχή στην οποία η θερμική ενέργεια της Γης είναι επαρκώς συγκεντρωμένη, ώστε να δημιουργεί μια εκμεταλλεύσιμη ενεργειακή πηγή. (Τζανής, 2010). Ως γεωθερμικό σύστημα ορίζεται ένας γεωλογικός σχηματισμός 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 μεγαλύτερη 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 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 θερμότητας σε μια δεξαμενή θερμότητας, η οποία συνήθως είναι μια ελεύθερη επιφάνεια. 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 πολύ υψηλής θερμοκρασίας (>600°C) μαγματική διείσδυση που έχει φθάσει σε σχετικά μικρά βάθη (5-10 km), είτε στα χαμηλής θερμοκρασίας συστήματα, όπου εμφανίζεται η κανονική θερμοκρασία των πετρωμάτων του εσωτερικού της γης, η οποία αυξάνεται με το βάθος. Ο ταμιευτήρας είναι ένας σχηματισμός από θερμά υδροπερατά πετρώματα, που επιτρέπουν την κυκλοφορία των ρευστών και από τα οποία το ρευστό αντλεί θερμότητα. Ο ταμιευτήρας πολλές φορές συνδέεται σε μια επιφανειακή περιοχή τροφοδοσίας, διαμέσου 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. (Ανδρίτσος & Φυτίκας, 2004)

Ως γεωθερμικός πόρος ορίζεται ουσιαστικά η θερμή ενέργεια (δυναμικό) που βρίσκεται αποθηκευμένη κάτω από μια συγκεκριμένη περιοχή, μεταξύ της επιφάνειας της Γης και ενός ορισμένου βάθους στον 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 λιγότερα 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 στην 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. (Ανδρίτσος & Φυτίκας, 2004)

2.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ & ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Σύμφωνα με τον Ν.4602/19, τα γεωθερμικά πεδία διακρίνονται ως τοπικού και εθνικού ενδιαφέροντος. Στα τοπικού ενδιαφέροντος η θερμοκρασία του προϊόντος κυμαίνεται από 30°C έως και 90°C. Στα εθνικού ενδιαφέροντος η θερμοκρασία του προϊόντος υπερβαίνει τους 90°C.

Ωστόσο, τα γεωθερμικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορα κριτήρια, όπως είναι το είδος των γεωθερμικών πόρων, ο τύπος και η θερμοκρασία των ρευστών, ο τύπος του πετρώματος που φιλοξενεί τα ρευστά, το είδος της εστίας θερμότητας, ο τρόπος μετάδοσης της θερμότητας κ.α..

1. Ανάλογα με το γεωλογικό τους περιβάλλον τα γεωθερμικά συστήματα ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Υδροθερμικά συστήματα ή πόροι, δηλαδή τα φυσικά υπόγεια θερμά ρευστά που βρίσκονται σε έναν ή περισσότερους ταμιευτήρες, θερμαίνονται από μια εστία θερμότητας και συχνά εμφανίζονται στην επιφάνεια της γης με τη μορφή θερμών εκδηλώσεων. Τα συστήματα αυτά συχνά ταυτίζονται με το σύνολο σχεδόν των γεωθερμικών πεδίων. Επίσης, ονομάζονται και συστήματα συναγωγής ή δυναμικά συστήματα επειδή η θερμότητα μεταδίδεται κυρίως με το μηχανισμό της συναγωγής. Η κατηγορία αυτή αφορά σχεδόν όλα τα γεωθερμικά συστήματα που αξιοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. (Ανδρίτσος & Φυτίκας, 2004)
- Κυκλοφορικά συστήματα, τα οποία συναντώνται εντός πετρωμάτων χαμηλού πορώδους, ρηξιγενούς υδραυλικής διαπερατότητας, σε περιοχές υψηλής ως και κανονικής περιφερειακής θερμικής ροής. Συνήθως συνδέονται με μαγματισμό, αλλά επίσης απαντώνται και σε περιοχές ελεύθερες προσφάτου μαγματικής δραστηριότητας ως αποτέλεσμα βαθιάς κατείδυσης και κυκλοφορίας μετεωρικού ύδατος σε περιοχές υψηλής περιφερειακής θερμικής ροής. Η δημιουργία τους προϋποθέτει την παρουσία θραυσιγενών ζωνών επαρκούς υδραυλικής διαπερατότητας για τη διευκόλυνση κυκλοφορίας του ρευστού. (Τζανής, 2010)
- Υδροφόροι οριζόντες χαμηλής θερμοκρασίας/ενθαλπίας. Είναι μια πολλά υποσχόμενη κατηγορία γεωθερμικής ενέργειας κατά την οποία λαμβάνονται ποσότητες ενέργειας από μικρά βάθη με την ανακυκλοφορία νερού σε κλειστές υδροφόρες ή ξηρές γεωτρήσεις ή σε ρηχές επιφάνειες εδάφους/πετρωμάτων. Όταν τέτοιου τύπου υδροφόροι οριζόντες είναι εκτεταμένοι, έχουν αξιόλογο ενεργειακό δυναμικό για εφαρμογές όπως θέρμανση οικιών και θερμοκηπίων. (Τζανής, 2010)
- Θερμά ξηρά πετρώματα. Είναι θερμά πετρώματα σε βάθος από 3 μέχρι 10 km χωρίς φυσική κυκλοφορία ρευστών λόγω της μικρής διαπερατότητάς του, από τα οποία μπορεί να ανακτηθεί ενέργεια χρησιμοποιώντας νερό που διοχετεύεται από την επιφάνεια μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων, και ανακτάται θερμότερο με τη μορφή νερού ή ατμού μέσω άλλων γεωτρήσεων. Γενικά εφαρμόζεται η τεχνική υδραυλικής ρωγμάτωσης ή διέγερσης των θερμών πετρωμάτων ώστε να δημιουργηθούν οι επιφάνειες ανταλλαγής θερμότητας. (Ανδρίτσος & Φυτίκας, 2004)
- Γεωπιεσμένα & μαγματικά συστήματα. Τα πρώτα αποτελούνται από ρευστά εγκλεισμένα σε μεγάλα βάθη, βρίσκονται περιορισμένα από μη περατά πετρώματα και η πίεσή τους υπερβαίνει την υδροστατική. Συγκρατούνται στα στατικά συστήματα και συνυπάρχουν

με υδρογονάνθρακες. Τα μαγματικά συστήματα, αναφέρονται στην απόληψη θερμότητας με κατάλληλες γεωτρήσεις σε μαγματικές διεισδύσεις, που βρίσκονται σε μικρό σχετικά βάθος. (Ανδρίτσος & Φυτίκας, 2004)

2. Τα γεωθερμικά πεδία ανάλογα με το θερμοκρασιακό επίπεδό τους διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Υψηλής θερμοκρασίας / ενθαλπίας (>150°C) που χρησιμοποιούνται συνήθως για παραγωγή ηλεκτρισμού. Τα ρευστά αυτά αποτελούνται στις περισσότερες περιπτώσεις από μίγμα υγρού ατμού και θερμού νερού.
- Μέσης θερμοκρασίας / ενθαλπίας (100 έως 150°C) που χρησιμοποιούνται για θέρμανση ή και ξήρανση ξυλείας και αγροτικών προϊόντων, καθώς και μερικές φορές και για την παραγωγή ηλεκτρισμού.
- Χαμηλής θερμοκρασίας / ενθαλπίας (50 έως 100°C) που χρησιμοποιούνται για θέρμανση χώρων, για θέρμανση θερμοκηπίων, για ιχθυοκαλλιέργειες και παραγωγή γλυκού νερού.

Η ενθαλπία, η οποία σε γενικές γραμμές θεωρείται ότι είναι ανάλογη της θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται για να εκφράσει την περιεχόμενη θερμική ενέργεια των ρευστών και δίνει μια γενική εικόνα της ενεργειακής αξίας τους. (Καρυδάκης Γ. , 2005)

3. Η μετάδοση της θερμότητας πραγματοποιείται με δύο τρόπους:

- Με αγωγή από το εσωτερικό προς την επιφάνεια με ρυθμό 0.04 – 0.06 W/m².
- Με ρεύματα μεταφοράς που περιορίζονται όμως στις ζώνες κοντά στα σύνορα των λιθοσφαιρικών πλακών, λόγω ηφαιστειακών και υδροθερμικών φαινομένων.

Οπότε προκύπτουν τα μεταφορικά συστήματα και τα μεταδοτικά συστήματα. Τα πρώτα χαρακτηρίζονται από φυσική κυκλοφορία του ενδιαμέσου ρευστού, ούτως ώστε το πλείστο της θερμότητας να μεταφέρεται από αυτό και μικρό ποσοστό αυτού να άγεται μέσω της μάζας των πετρωμάτων. Τα μεταδοτικά συστήματα, χαρακτηρίζονται από θερμικό καθεστώς που οφείλεται μόνο σε αγωγή της θερμότητας μέσω των πετρωμάτων. (Τζανής, 2010)

Ένας άλλος διαχωρισμός των γεωθερμικών συστημάτων είναι αυτός που βασίζεται στην κατάσταση ισορροπίας στον ταμιευτήρα σύμφωνα με τον οποίο λαμβάνονται υπόψη η κυκλοφορία των ρευστών του ταμιευτήρα και ο μηχανισμός μεταφοράς της θερμότητας.

Στα δυναμικά συστήματα ο ταμιευτήρας τροφοδοτείται συνεχώς με νερό, το οποίο θερμαίνεται. Στη συνέχεια, ο ταμιευτήρας αποφορτίζεται, είτε γιατί το θερμό ρευστό ανέβηκε μέχρι την επιφάνεια, είτε γιατί άρχισε να γεμίζει τους υδροπερατούς 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 καμία τροφοδοσία του ταμιευτήρα και η μεταφορά θερμότητας γίνεται μόνο με τη βοήθεια του μηχανισμού αγωγής.

4. Τέλος τα γεωθερμικά πεδία βάσει του βάθους στο οποίο συναντώνται παρουσιάζουν δύο κατηγορίες.

Η τεχνολογία για την άντληση γεωθερμικής ενέργειας διαφοροποιείται σε αβαθή γεωθερμική σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και σε βαθιά γεωθερμική στις υψηλότερες θερμοκρασίες. Αβαθής γεωθερμική ενέργεια είναι η αποθηκευμένη σε μορφή θερμότητας ενέργεια του φλοιού της γης, σε βάθη έως 150m, με θερμοκρασίες υπεδάφους έως τους 180°C.

Η άντληση της ενέργειας από τα βαθύτερα στρώματα της γης, η λεγόμενη βαθιά γεωθερμική ενέργεια, απαιτεί τη διάνοιξη γεωτρήσεων σε μεγάλο βάθος. Τα πιθανά θερμά υπόγεια ύδατα μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Συχνά γίνεται διάκριση ανάμεσα στα γεωθερμικά συστήματα όπου το κυρίαρχο ρευστό είναι το νερό στην υγρή φάση και σε εκείνα όπου το κυρίαρχο ρευστό είναι ο ατμός. Στα συστήματα όπου επικρατεί το νερό, η υγρή φάση είναι αυτή όπου ελέγχει συνεχώς την πίεση. Μέσα στη φάση αυτή μπορεί να περιέχονται και κάποια αέρια με τη μορφή μικρών φυσαλίδων. (Ανδρίτσος & Φυτίκας, 2004).

Πίνακας 2-1 Ταξινόμηση των γεωθερμικών συστημάτων σε σχέση με το είδος των γεωθερμικών πόρων (Ανδρίτσος & Φυτίκας, Γεωθερμία, 2004)

Τύπος Συστημάτων	Χαρακτηριστικά	Θερμοκρ. (°C)
1. ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΑ		
1α. Συστήματα συναγωγής	Περατοί σχηματισμοί με φυσική κυκλοφορία ρευστών	
A) Συστήματα που περιέχουν ατμό	Κλειστά κυκλώματα συναγωγής, ατμοί παγιδευμένοι από στεγανά καλύμματα, T>200°C, μέχρι 1,5 km	-240
B) Συστήματα που περιέχουν θερμό νερό		
i) Υψηλής θερμοκρασίας	Κλειστά ή ανοικτά κυκλώματα συναγωγής, μέχρι τα 3 km	> 150
ii) Μέσης θερμοκρασίας	Σχεδόν οριζόντιοι υδροφόροι με τοπική αποστράγγιση ψυχρού νερού ή κυκλοφορία θερμού νερού υπό πίεση	90-150
iii) Χαμηλής θερμοκρασίας	Όπως προηγούμενο, με χαμηλότερη θερμοκρασία νερού, με μικρή ή καθόλου πίεση	< 90
1β. Συστήματα αγωγής	Μη-περατοί σχηματισμοί, με μεγάλο πορώδες και περατότητα, σε βάθος 1-3 km με εγκλωβισμένα νερά	60-150
2. ΑΒΑΘΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ	Από 1 m βάθος μέχρι 100 m, με ή χωρίς νερό	<40
2. ΘΕΡΜΑ-ΞΗΡΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	Μη περατοί σχηματισμοί πετρωμάτων χωρίς φυσική κυκλοφορία ρευστών. Τεχνητή κυκλοφορία νερών με σύστημα δύο τουλάχιστον γεωτρήσεων	
i) Υψηλής θερμοκρασίας	T>250°C μέχρι 3 km	>250
ii) Μέσης-χαμηλής θερμοκρασίας	T<150°C μέχρι 3 km	<150
3. ΓΕΩΠΕΠΙΣΜΕΝΑ	Έγκλειστα υδροφόρα στρώματα υπό μεγάλη πίεση, παρουσία υδρογονανθράκων (συστήματα αγωγής)	150-200
4. ΜΑΓΜΑΤΙΚΑ	Η θερμοκρασία >500°C σε μερικά χιλιόμετρα βάθος λόγω μαγματικών διεισδύσεων	>500

2.4 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

2.4.1 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 ρευστού και ταμιευτήρα. Για την αξιοποίηση των θερμών ξηρών πετρωμάτων πραγματοποιούνται ειδικές γεωτρήσεις εφαρμόζοντας την τεχνική της τεχνητής εισαγωγής 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 ρωγματώσεις που δημιουργήθηκαν και ερχόμενο σε επαφή με τις μεγάλες επιφάνειες θερμού πετρώματος αντλεί θερμότητα από αυτόν τον μεγάλο σε όγκο σχηματισμό, ο οποίος πλέον λειτουργεί ως ένας φυσικός ταμιευτήρας. Στη συνέχεια, ο ταμιευτήρας διαπερνάται από μια δεύτερη γεώτρηση μέσα από την οποία αντλείται το νερό που θερμάνθηκε.

2.4.2 Αβαθής γεωθερμία

Καλείται η ενέργεια που προέρχεται από την εκμετάλλευση της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται από γεωθερμικό δυναμικό και βρίσκονται σε μικρό βάθος. Οι θερμοκρασίες των πετρωμάτων και υπόγειων νερών, που αναπτύσσει η ομαλή γεωθερμική ενέργεια σε βάθη 0-200 m, είναι κατά το πλείστο κατώτερες από 25°C. Αυτή η ενέργεια προέρχεται από την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τη γήινη επιφάνεια, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία στα γεωγραφικά πλάτη της εύκρατης ζώνης, κάτω από κάποιο βάθος, να παραμένει περίπου σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Η σταθερή και μόνιμη αυτή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί το χειμώνα για θέρμανση νερού κεντρικής θέρμανσης, το καλοκαίρι για ψύξη νερού κλιματισμού, όπως επίσης και καθ' όλη τη διάρκεια του έτους για ζεστό νερό χρήσης.

2.4.3 Υδροθερμική ενέργεια – Υδροθερμικές πηγές

Σε όλο τον κόσμο αξιοποιούνται οι λεγόμενες υδροθερμικές πηγές (hydrothermal resources) που περιλαμβάνουν κοιτάσματα θερμού νερού ή ατμού στο υπέδαφος. Προκύπτουν από τη διείδυση νερού μέσω των ρηγμάτων και των πόρων των πετρωμάτων στο υπέδαφος όπου εκεί συναντούν θερμά πετρώματα και ακολούθως εμφανίζονται στην επιφάνεια μέσα από

διαφορετικές διόδους. Τα βάθη των υδροθερμικών πηγών ποικίλουν, από την επιφάνεια έως τα 5 km. Τα ρηγά κοιτάσματα έχουν θερμοκρασία $<100^{\circ}\text{C}$ και η χρήση τους ως πηγής ενέργειας είναι κυρίως για θέρμανση χώρων και γενικά εφαρμογές θέρμανσης. Η πρόσβαση στο είδος αυτών των κοιτασμάτων γίνεται με τυπικές αβαθείς γεωτρήσεις και η ολοκλήρωση αυτών καθώς και η παραγωγή από αυτές προσομοιάζει στις τεχνικές των υδρογεωτρήσεων. Τα βαθύτερα κοιτάσματα, μεταξύ 1 και 5 km, είναι θερμότερα ($200 - 500^{\circ}\text{C}$) και χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η διάνοιξη και ολοκλήρωση των γεωτρήσεων προσπέλασης σε αυτά τα κοιτάσματα είναι δαπανηρότερη έναντι των αβαθών γεωτρήσεων. Για πολλά βαθιά κοιτάσματα το κόστος γεώτρησης και ολοκλήρωσης είναι ο κυριότερος παράγων που συνεισφέρει στο συνολικό κόστος των γεωθερμικών εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι υδροθερμικές πηγές απαιτούν τρία βασικά χαρακτηριστικά:

- Μια θερμική πηγή (π.χ. κρυσταλλωμένο μάγμα)
- Έναν υδροφόρο ορίζοντα που περιέχει το προσπελάσιμο νερό
- Ένα στεγανό πέτρωμα που σφραγίζει τον υδροφόρο ορίζοντα.

Η γεωθερμική ενέργεια αντλείται με τη διάτρηση του υδροφόρου ορίζοντα και την εξαγωγή του θερμού νερού ή ατμού. Οι υψηλής θερμοκρασίας υδροθερμικές πηγές (με θερμοκρασίες από 180°C έως 350°C) συνήθως θερμαίνονται από θερμό τηγμένο πέτρωμα, ενώ οι χαμηλής θερμοκρασίας πηγές (από 100°C έως 180°C) μπορούν να δημιουργηθούν με οποιαδήποτε διαδικασία.

Ανάλογα με τη φυσική κατάσταση του ρευστού των πόρων, δύο είδη γεωθερμικών συστημάτων συναγωγής μπορούν να διακριθούν:

- Υπερίσχυσης υγρού, στα οποία όλοι οι πόροι και οι ρωγμές γεμίζουν με υγρό νερό που βρίσκεται σε θερμοκρασίες αρκετά υψηλότερες από αυτή του βρασμού υπό ατμοσφαιρική πίεση, εξαιτίας της πίεσης του υπερκείμενου νερού.
- Υπερίσχυσης ατμού, όπου οι μεγαλύτεροι πόροι και οι ρωγμές είναι πλήρεις ατμού. Οι ταμειυτήρες υπερίσχυσης υγρού παράγουν είτε νερό, είτε μίγμα νερού και ατμού, ενώ οι ταμειυτήρες υπερίσχυσης ατμού παράγουν μόνο ατμό, ως επί το πλείστο υπέρθερμο.

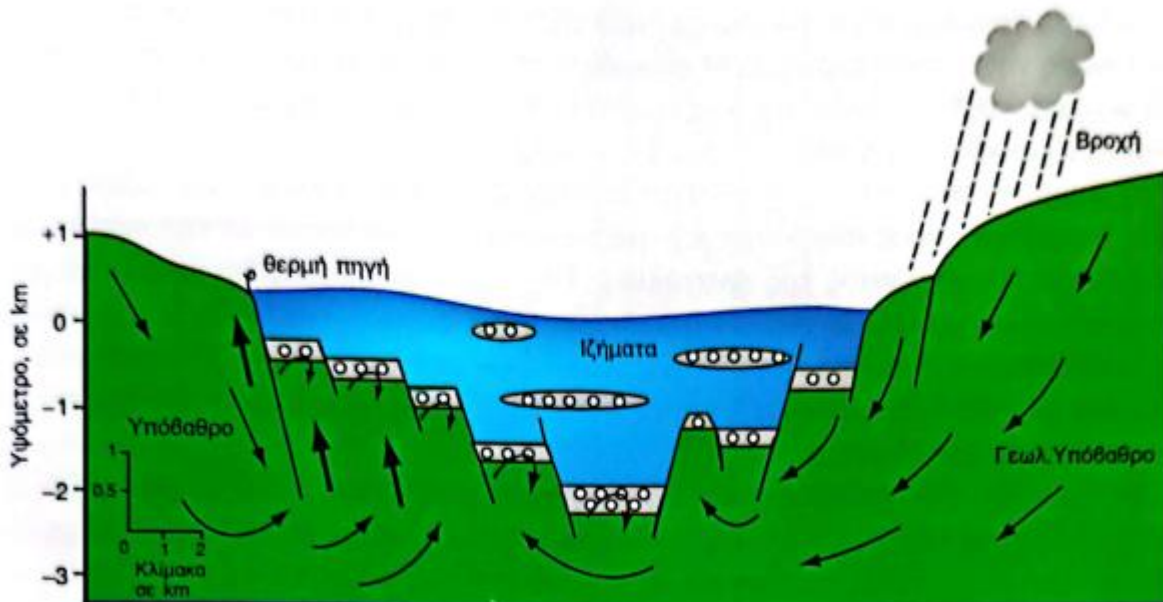
2.4.4 Υδροφόροι οριζόντες χαμηλής θερμοκρασίας/ενθαλπίας

Σε περιοχές με εφελκυστικού τύπου τεκτονική, που δημιουργούν πρόσφατης ηλικίας λεκάνες, έχουμε μικρή θερμική ανωμαλία εξ αιτίας των «ανοικτών» ρηγμάτων που επιτρέπουν τη σύντομη άνοδο θερμών ρευστών βαθύτερης προέλευσης και τη μεταφορά προς τα πάνω

ΟΡΥΞΗ ΑΒΑΘΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΠΕΔΙΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

σημαντικών ποσοτήτων ενέργειας. Δημιουργούνται έτσι ευνοϊκές σχετικά συνθήκες και εφόσον συντρέχουν και οι υπόλοιποι παράγοντες, όπως κατάλληλος ταμιευτήρας, στεγανό κάλυμμα κ.ά., έχουμε συνήθως γεωθερμικά πεδία χαμηλής θερμοκρασίας / ενθαλπίας. Σε παλαιότερες λεκάνες ή άλλες γεωλογικές περιοχές, γεωτεκτονικά σταθερές, με γεωθερμική βαθμίδα κανονική ή και μικρότερη της μέσης γήινης και ανάλογες λοιπές συνθήκες (ταμιευτήρας, καλύμματος), μπορεί επίσης να εντοπιστούν πεδία χαμηλής θερμοκρασίας / ενθαλπίας. (Ανδρίτσος & Φυτίκας, 2004)

Υδροφορείς αυτού του τύπου συναντώνται σε περιοχές κανονικής ως ελαφρά αυξημένης θερμικής ροής. Η θερμοκρασία των ρευστών των πόρων είναι κρίσιμος παράγοντας αξιολόγησης της εκμεταλλευσιμότητας των υδροφορέων. Ένας δεύτερος κρίσιμος παράγοντας είναι η αλατότητα, η οποία συχνά είναι εξαιρετικά αυξημένη. Στον συγκεκριμένο τύπο γεωθερμικού πεδίου λαμβάνονται ποσότητες ενέργειας από μικρά βάθη με την ανακυκλοφορία νερού σε κλειστές υδροφόρες ή ξηρές γεωτρήσεις ή σε ρηχές επιφάνειες εδάφους/πετρωμάτων. (Τζανής, 2010)



Εικόνα 2-1. Γεωθερμικό μοντέλο χαμηλής ενθαλπίας σε λεκάνη από τεκτονική θύθιση (Ανδρίτσος & Φυτίκας, 2004)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΒΑΘΕΙΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως αβαθείς γεωτρήσεις για την αξιοποίηση γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας / θερμοκρασίας, ορίζονται οι γεωτρήσεις που φτάνουν σε βάθος όχι μεγαλύτερο από 200-250m. Σπανιότερα, μπορούν να φτάσουν και μέχρι τα 400m ή ακόμα και τα 600m. Δεν θα πρέπει να συγχέονται με τις κατακόρυφες αβαθείς γεωτρήσεις για την αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας, οι οποίες ορύσσονται με σκοπό την εγκατάσταση σε αυτές γεωεναλλακτών. Σε αντίθεση με τις κατακόρυφες γεωτρήσεις αβαθούς γεωθερμίας που δεν υπερβαίνουν σε βάθος τα 150m, οι γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας ορύσσονται για τη διακίνηση γεωθερμικών ρευστών (άντληση/παραγωγή και επανεισπίεση).

Με τον όρο «Κανονική ή Αβαθής Γεωθερμική Ενέργεια» ορίζουμε τη θερμότητα των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται ως γεωθερμικό δυναμικό. Στο άρθρο 2 (γ) της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2009/28/EK η αβαθής γεωθερμική ενέργεια αναφέρεται κανονικά σε ένα βάθος μέχρι 400 m (και στις περισσότερες πραγματικές περιπτώσεις σε βάθη που δεν ξεπερνούν τα 100 m). (Βραχόπουλος, Κούκου, & Καρύτσας, 2015)

Τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας συνήθως αφορούν σε υδροφόρους ορίζοντες με θερμοκρασίες 30 – 100°C σε μικρά σχετικά βάθη. Στην Ελλάδα, τέτοια γεωθερμικά πεδία απαντώνται κυρίως κοντά σε θερμές πηγές, όπως: Λουτρά Σαμοθράκης (80-100°C), Πολυχνίτος-Αργενός Λέσβου, Νένητα Χίου, Αρίστηνο Αλεξανδρούπολης και Αιδηψός (80-90°C), το Νέο Εράσμιο και η Νέα Κεσσάνη Ξάνθης (40-60°C), η Νιγρίτα, το Σιδηρόκαστρο και η Ηράκλεια Σερρών (35-60 °C), ο Λαγκαδάς, η Νέα Απολλωνία και η Θέρμη Θεσσαλονίκης (30-40°C), η Νέα Τρίγλια Χαλκιδικής (30-35 °C) και πολλά άλλα. Γενικά αβαθείς χαμηλής ενθαλπίας θεωρούνται οι ταμιευτήρες ως 200m και από 250 ως 600m πολύ βαθείς. (Βραχόπουλος, Κούκου, & Καρύτσας, 2015)

Η έρευνα και η εκμετάλλευση κάθε γεωθερμικού πεδίου απαιτεί την εκτέλεση γεωτρήσεων, οι οποίες ανάλογα με τον σκοπό και τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά διακρίνονται σε γεωτρήσεις έρευνας, γεωτρήσεις παραγωγής και γεωτρήσεις επανεισαγωγής.

Γεωτρήσεις έρευνας: Αποτελούν το τελικό στάδιο έρευνας σε μια περιοχή γεωθερμικού ενδιαφέροντος και πραγματοποιούνται μετά από λεπτομερή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της γεωλογικής τεκτονικής, γεωχημικής, γεωφυσικής και θερμομετρικής έρευνας. Η επιλογή των θέσεων, του αριθμού και του βάθους των ερευνητικών γεωτρήσεων, αλλά και του γεωτρητικού

εξοπλισμού που θα χρησιμοποιηθεί, γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή λόγω του υψηλού κόστους εκτέλεσής τους. Στόχος των ερευνητικών γεωτρήσεων είναι γενικά:

- Η γεωλογική χαρτογράφηση των υπεδάφικων σχηματισμών: λιθοστρωματογραφία, περατότητα κλπ.
- Η καταγραφή των θερμικών παραμέτρων, όπως θερμοκρασία, θερμική ροή και γεωθερμική βαθμίδα.
- Η χωροθέτηση του γεωθερμικού ταμιευτήρα εντός του υπεδάφους: βάθος, πάχος και έκταση.
- Ο προσδιορισμός της χημικής σύστασης (χημισμού) των γεωθερμικών ρευστών.
- Η εκτίμηση των υδραυλικών παραμέτρων του ταμιευτήρα και των ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων των γεωθερμικών ρευστών.

Γεωτρήσεις παραγωγής: Εκτελούνται με σκοπό την άντληση των γεωθερμικών ρευστών και την αξιοποίησή τους. Είναι μεγαλύτερης διαμέτρου από τις ερευνητικές γεωτρήσεις και τα τεχνικά χαρακτηριστικά, οι θέσεις και ο αριθμός τους καθορίζονται με βάση τα στοιχεία της γεωτρητικής έρευνας που έχει προηγηθεί. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γεωτρήσεων παραγωγής αφορούν στις διαμέτρους όρυξης και σωλήνωσης, στις τεχνικές και τα ύψη της τσιμέντωσης, στην ποιότητα των σωληνώσεων που θα τοποθετηθούν εντός της γεώτρησης, στον τύπο και τη θέση των φιλτροσωληνώσεων, καθώς και στον ρυθμό άντλησης. Η απόδοση αυτών των γεωτρήσεων εξαρτάται από το βάθος, τη θερμοκρασία, την πίεση και τα εν γένει γεωχημικά χαρακτηριστικά του γεωθερμικού ταμιευτήρα.

Γεωτρήσεις επανεισαγωγής: Μετά τη θερμική αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών, η διάθεσή τους πρέπει να γίνεται με περιβαλλοντικά συμβατό τρόπο και με σκοπό τη βιώσιμη και ορθολογική του γεωθερμικού πεδίου. Έτσι, στην περίπτωση που ο χημισμός και η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών μετά την αξιοποίηση του θερμικού τους περιεχομένου δύναται να προκαλέσουν περιβαλλοντικά προβλήματα δεν μπορούν να διατεθούν στο επιφανειακό σύστημα απορροής. Στην περίπτωση αυτή, όπως και σε κάθε περίπτωση που κρίνεται απαραίτητο, η διάθεσή τους γίνεται με γεωτρήσεις επανεισαγωγής στην ευρύτερη περιοχή του ταμιευτήρα. Οι συγκεκριμένες γεωτρήσεις θα πρέπει να τοποθετούνται σε περιοχές με χαμηλή βαθμίδα πίεσης, μακριά από ρήγματα τροφοδοσίας του ταμιευτήρα και μακριά από τις γεωτρήσεις παραγωγής. Ο σχεδιασμός τους δεν διαφέρει ουσιαστικά από αυτόν των γεωτρήσεων παραγωγής, ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, με τη βασική τους διαφορά να αφορά ότι σε αυτές γίνεται εισαγωγή αντί εξαγωγή ρευστών.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας το ενδιαφέρον εστιάζεται στις γεωτρήσεις παραγωγής. Επομένως, στις ενότητες που ακολουθούν εξετάζονται ο μηχανολογικός εξοπλισμός και η μέθοδος όρυξης, ολοκλήρωσης και ανάπτυξης αβαθών γεωτρήσεων σε γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας, ο ειδικός εξοπλισμός που απαιτείται προκειμένου η γεώτρηση να επιτελέσει

τον σκοπό της (παραγωγή/επανεισαγωγή), καθώς και ορισμένα στοιχεία κόστους αυτών των γεωτρήσεων.

3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΡΥΞΗΣ ΑΒΑΘΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ & ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Ο κύριος στόχος που τίθεται κατά τον σχεδιασμό κάθε γεώτρησης, ανεξάρτητα από το πεδίο εφαρμογής της και τον σκοπό που θα επιτελέσει, είναι να διανοιχτεί στο υπέδαφος μια γεώτρηση σταθερή που θα διαρκέσει πολλά χρόνια και θα περιέχει αρκετό χώρο για την εγκατάσταση στο εσωτερικό της για την εγκατάσταση του ειδικού εξοπλισμού που απαιτείται σε κάθε περίπτωση (αντλίες, σωλήνες παραγωγής κ.ά.).

Τα στάδια κατασκευής μιας γεώτρησης, ανεξάρτητα από τον σκοπό της, είναι παρόμοια και γενικά περιλαμβάνουν:

- Προσδιορισμός της ακριβούς θέσης τοποθέτησης της γεώτρησης & σχεδιασμός της γεώτρησης.
- Όρυξη της γεώτρησης κατά στάδια με τη χρήση του κατάλληλου μηχανολογικού εξοπλισμού (γεωτρύπανο, διατρητική στήλη, κοπτικά άκρα) στο κατάλληλο βάθος. Επένδυση της γεώτρησης και τσιμεντώση της επένδυσης σε κάθε στάδιο όρυξης και μέχρι το τελικό βάθος.
- Ολοκλήρωση/ανάπτυξη της γεώτρησης με τη χρήση του κατάλληλου ειδικού εξοπλισμού (χαλικόφιλτρα, σωλήνες παραγωγής, αντλίες κλπ.), ανάλογα με τον σκοπό της.

Ο συνήθης μηχανολογικός εξοπλισμός για την όρυξη μιας γεώτρησης περιλαμβάνει:

- Το γεωτρύπανο
- Τη διατρητική στήλη
- Τα κοπτικά άκρα
- Τα ρευστά διάτρησης
- Λοιπό εξοπλισμό

3.2.1 Μέθοδος όρυξης

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου όρυξης σε μια γεωθερμική γεώτρηση χαμηλής ενθαλπίας εξαρτάται από τους γεωλογικούς σχηματισμούς, το βάθος και τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα. Αφού αξιολογηθούν τα γεωλογικά, γεωφυσικά κ.τ.λ. δεδομένα της περιοχής, σχεδιάζεται το πρόγραμμα όρυξης.

Υπάρχουν τρεις μέθοδοι όρυξης:

- Κρουστική όρυξη. Αποτελεί την παλαιότερη μέθοδο όρυξης, η οποία χρησιμοποιείται πλέον μόνο σε λίγες ειδικές περιπτώσεις.
- Περιστροφική όρυξη. Κατά τη μέθοδο αυτή η αποσύνθεση του πετρώματος επιτυγχάνεται με εφαρμογή βάρους (πίεσης) επί του κοπτικού άκρου και ταυτόχρονη περιστροφή (Εικόνα 3-1).
- Κρουστικοπεριστροφική όρυξη. Κατά τη μέθοδο αυτή, προκαλείται κατακερματισμός του πετρώματος με κρούση του κοπτικού άκρου (αερόσφυρα), ενώ αυτό περιστρέφεται.



Εικόνα 3-1. Φωτογραφίες γεωτρύπανου της ΕΑΓΜΕ κατά την ανόρυξη γεωθερμικής γεώτρησης παραγωγής στην περιοχή της Αριδαίας (Βρέλλης, 2009)

Στα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας η μέθοδος όρυξης που εφαρμόζεται ευρέως είναι η περιστροφική. Η κρουστικοπεριστροφική όρυξη εφαρμόζεται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις που αφορούν σε γεωτρήσεις μέχρι μέσου βάθους, εντός συμπαγών σχηματισμών, σε ταμιευτήρες όπου το γεωθερμικό ρευστό είναι μόνο το νερό, δεν εμφανίζουν έντονο αρτεσιανισμό και δεν περιέχουν αέρια (CO_2 , H_2S , CH_4 κ.λπ.). Όμως, η πλειονότητα των γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας στον Ελλαδικό χώρο παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Βρίσκονται συνήθως σε ιζηματογενείς λεκάνες, όπου οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι χαλαροί και απαιτείται ιδιαίτερη προστασία των τοιχωμάτων της γεώτρησης.
- Υπάρχει συχνά έντονος αρτεσιανισμός των γεωθερμικών ρευστών (ταμιευτήρες υπό υπερπίεση).
- Ο ταμιευτήρας περιέχει αέρια σε μεγάλη συγκέντρωση, κυρίως διοξείδιο του άνθρακα, αλλά και επικίνδυνα αέρια σε πιο χαμηλές συγκεντρώσεις, όπως υδρόθειο (τοξικό) και μεθάνιο (εύφλεκτο)

Για την ασφαλή διαχείριση των παραπάνω συνθηκών καθίσταται επιβεβλημένη η περιστροφική όρυξη με χρήση ρευστού διάτρησης (πολφός ή λάσπη διάτρησης) αυξημένης πυκνότητας (νερό, μπεντονίτης & πρόσθετα) και κατάλληλου κοπτικού. Είναι η ίδια μέθοδος που εφαρμόζεται και στην όρυξη γεωτρήσεων γεωθερμίας μεγάλου βάθους και στηρίζεται στην τεχνολογία όρυξης των γεωτρήσεων υδρογονανθράκων.

Κατά την εκτέλεση γεωθερμικών γεωτρήσεων σε ιζηματογενείς σχηματισμούς συχνά απαιτείται η αντιμετώπιση της πλαστικής αργίλου που εκτός των τεχνικών προβλημάτων διάτρησης, δημιουργεί και έντονα προβλήματα στη σωλήνωση και την τσιμέντωση. Γίνεται ειδική αναφορά σε αυτό το πρόβλημα γιατί συναντάται σε αρκετά γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας στον Ελλαδικό χώρο και χαρακτηρίζεται ως ένα ειδικό πρόβλημα, που χρειάζεται ιδιαίτερη αντιμετώπιση, σύμφωνα με την οποία, πριν τη σωλήνωση και την τσιμέντωση, πρέπει να γίνεται απομάκρυνση της πλαστικής αργίλου. (Καρυδάκης Γ. Ι., 2003)

3.2.2 Περιστροφικό γεωτρύπανο

Το περιστροφικό γεωτρύπανο επιτελεί γενικά τις παρακάτω λειτουργίες: (Σταματάκη, 2003)

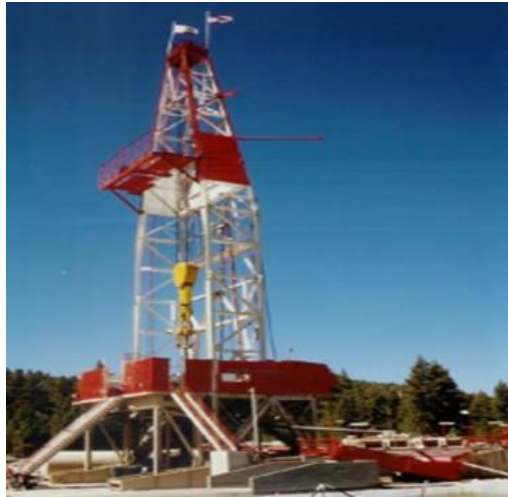
- Εφαρμογή περιστροφής και βάρους επί του κοπτικού
- Διακίνηση του ρευστού διάτρησης προς και από τη γεώτρηση
- Διαχείριση γεωτρητικού εξοπλισμού (ανέλκυση και καθέλκυση διατρητικής στήλης, αλλαγή κοπτικού άκρου)
- Καταγραφή και έλεγχος των παραμέτρων της όρυξης
- Ασφαλής λειτουργία του εξοπλισμού και έλεγχος της εκτέλεσης της γεώτρησης

Το μέγεθος και τα ειδικά τεχνικά χαρακτηριστικά του περιστροφικού γεωτρύπανου καθορίζονται από τη ροπή στρέψης, την ταχύτητα περιστροφής, τη δυναμικότητα ανέλκυσης και τον τύπο του συστήματος περιστροφής και ανέλκυσης. Ανάλογα με το τεχνικό πρόγραμμα εκτέλεσης της γεώτρησης επιλέγεται και ο κατάλληλος τύπος περιστροφικού γεωτρύπανου:

- Γεωτρύπανα περιστροφικής τράπεζας: Η περιστροφή της διατρητικής στήλης γίνεται από την περιστροφική τράπεζα (rotary table) δια μέσου ενός ειδικού στελέχους (kelly), ενώ η καθέλκυση και ανέλκυση της διατρητικής στήλης γίνεται με χρήση συρματοσχοίνου και βαρούλκου. Όλες οι γεωτρήσεις μεγάλου βάθους (>1000 m), είτε πρόκειται για γεωτρήσεις υδρογονανθράκων είτε γεωθερμίας, εκτελούνται από γεωτρύπανα περιστροφικής τράπεζας (Εικόνα 3-2).

Στην όρυξη γεωθερμικών γεωτρήσεων χαμηλής ενθαλπίας σε μικρό έως μέσο βάθος (<1,000 m) αποφεύγεται η χρήση αυτού του τύπου γεωτρυπάνου, στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν ρευστά υπό πίεση και επικίνδυνα αέρια. Ο λόγος είναι ότι σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται η τοποθέτηση πρόσθετου συστήματος στον αντικρηκτικό μηχανισμό ασφαλείας

(B.O.P.) στην κεφαλή της γεώτρησης για τη στεγανοποίηση του kelly, γεγονός που αυξάνει το κόστος όρυξης της γεώτρησης.



Εικόνα 3-2. Γεωτρύπανο περιστροφικής τράπεζας με ύψος πύργου περίπου 55 m (Finger & Blankenship, 2010)

- Γεωτρύπανα περιστρεφόμενης κεφαλής (rotary head): Η περιστροφή της διατρητικής στήλης γίνεται δια μέσου υδραυλικού συστήματος στην κεφαλή του γεωτρύπανου στη θέση του τροφοδότη (Εικόνα 3-3). Τα γεωτρύπανα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως στην εκτέλεση υδρογεωτρήσεων, και είναι κατάλληλα και για την εκτέλεση γεωθερμικών γεωτρήσεων για βάθη μέχρι 1,000 m. Τα γεωτρύπανα περιστρεφόμενης κεφαλής, ανάλογα με το βάθος διάτρησης, διακρίνονται σε:
- Γεωτρύπανα μικρού βάθους, μέχρι 250 m.
 - Γεωτρύπανα μέσου βάθους, μέχρι 500 m.
 - Γεωτρύπανα μεγάλου βάθους, μέχρι 1,000 m.

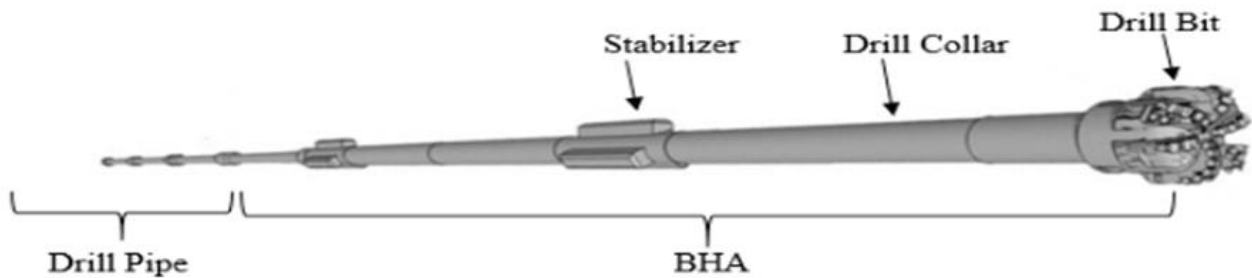


Εικόνα 3-3. Σύστημα περιστρεφόμενης κεφαλής - Top drive (Finger & Blankenship, 2010)

3.2.3 Διατρητική στήλη

Η διατρητική στήλη αποτελεί μια συνδεσμολογία κοίλων σωλήνων που μεταφέρουν τις εντολές από το γεωτρώπανο στο κοπτικό άκρο και επιτρέπουν την κυκλοφορία του πολφού διάτρησης. Τα βασικά μέρη της διατρητικής στήλης είναι (Εικόνα 3-4):

- Το τετραγωνικό ή εξαγωνικό στέλεχος (kelly), το οποίο τοποθετείται στην κορυφή της διατρητικής στήλης και για τη μετάδοση της περιστροφής από την περιστροφική τράπεζα στη διατρητική στήλη. Υπάρχει μόνο στα γεωτρώπανα περιστροφικής τράπεζας.
- Τα διατρητικά στελέχη, συνθέτουν το μεγαλύτερο τμήμα της διατρητικής στήλης και έχουν μήκος το καθένα από 3 έως 9 m και εξωτερική διάμετρο από 2 3/8'' έως 6'', αντίστοιχα.
- Τα αντίβαρα είναι κοίλοι σωλήνες μεγαλύτερης διαμέτρου και βάρους από τα διατρητικά στελέχη. Εξασφαλίζουν το απαραίτητο βάρος επί του κοπτικού. Χρησιμοποιούνται πάντα σε γεωτρήσεις μεγάλου βάθους και διαμέτρου, ενώ σε γεωτρήσεις μικρού βάθους η χρήση τους εξαρτάται από τις απαιτήσεις της διάτρησης. Στα δειγματοληπτικά γεωτρώπανα δεν χρησιμοποιούνται.
- Οι σταθεροποιητές για να διατηρούν τα αντίβαρα σε κατακόρυφη θέση. Χρησιμοποιούνται σε γεωτρήσεις μεγάλου βάθους.
- Η βαλβίδα αντεπιστροφής, τοποθετείται πάνω από το κοπτικό άκρο. Κρίνεται απαραίτητη αφού δεν επιτρέπει την είσοδο θρυμμάτων στη διατρητική στήλη και την έξοδο των γεωθερμικών ρευστών και επικίνδυνων αερίων κατά την καθέλκυση και ανέλκυση της διατρητικής στήλης.



Εικόνα 3-4. Σχεδιάγραμμα της διατρητικής στήλης (διατρητικά στελέχη και κατώτερη συνδεσμολογία) (Ahmed, 2020)

3.2.4 Κοπτικά άκρα

Η επιλογή του κατάλληλου κοπτικού άκρου επηρεάζει άμεσα την ταχύτητα διάτρησης και φυσικά το κόστος των γεωτρητικών εργασιών. Οι βασικοί τύποι κοπτικών άκρων που χρησιμοποιούνται στην περιστροφική διάτρηση είναι οι ακόλουθοι:

- Κοπτικά με ελάσματα, τρίφυλλα ή τετράφυλλα: Κατασκευάζονται από χαλύβδινο σώμα με κοπτικές ακμές από πλακίδια καρβιδίων (Εικόνα 3-5). Χρησιμοποιούνται σε μικρά βάθη και μαλακούς σχηματισμούς κυρίως αργιλικούς, αφού είναι ευαίσθητα σε πιέσεις, κραδασμούς και γενικά σε καταπόνηση. Η χρήση τους είναι περιορισμένη.



Εικόνα 3-5. Κοπτικά με τρία ή περισσότερα κοπτικά ελάσματα (Σταματάκη, 2003)

- Κορώνες: Είναι χαλύβδινοι κύλινδροι που στο κατώτερο άκρο φέρουν εμφυτευμένα πλακίδια καρβιδίων ή βιομηχανικούς αδάμαντες (Εικόνα 3-6). Χρησιμοποιούνται κυρίως στην έρευνα για την αξιολόγηση των γεωλογικών σχηματισμών που συναντώνται στον ταμειυτήρα.



Εικόνα 3-6. Αδαμαντοκορώνες με εφαρμογή σε παραγωγή αλλά και σε έρευνα (Χρηστάρας, 2003)

- Κοπτικά με περιστρεφόμενους κώνους – Τρίκωνα: Το βασικό κοπτικό άκρο που χρησιμοποιείται σήμερα στις γεωτρήσεις γεωθερμίας και στις υδρογεωτρήσεις για μεγάλα βάθη και διαμέτρους. Αποτελούνται από:

- Το κυρίως σώμα
- Τους κώνους πάνω στους οποίους βρίσκονται κοπτήρες (δόντια)
- Τα ρουλεμάν στήριξης των κώνων
- Τα ακροφύσια του πολφού διάτρησης

Ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος (μαλακό, μέτρια σκληρό, σκληρό, πολύ σκληρό) επιλέγεται και ο κατάλληλος τύπος οδόντων (μέγεθος, σχήμα, ποιότητα υλικού) και ρουλεμάν. Οι κοπτήρες (δόντια) είναι από σκληρομέταλλο (ειδικός χάλυβας) ή εμφυτευμένα καρβίδια (Εικόνα 3-7). Υπάρχει κωδικοποίηση των τρίκωνων κατά IADC. Η φθορά τους εξαρτάται από τη φθορά των οδόντων, των ρουλεμάν και της διαμέτρου. Στα τρίκωνα κοπτικά για μαλακούς σχηματισμούς οι κοπτήρες είναι μεγάλου μεγέθους, αιχμηροί και αραιοί, όσο όμως τα πετρώματα γίνονται σκληρότερα οι οδόντες μειώνονται σε μέγεθος, έχουν πιο στρογγυλεμένη απόληψη και πιο πυκνή διάταξη. Τα τρίκωνα κοπτικά με κοπτήρες από σκληρομέταλλο χρησιμοποιούνται για μαλακά έως μέτρια σκληρά πετρώματα, ενώ αυτά από καρβίδια για μέτρια σκληρά έως πολύ σκληρά.



Εικόνα 3-7. Τύποι τρίκωνων κοπτικών άκρων ανάλογα με τη σκληρότητα των σχηματισμών (Σταματάκη, 2003)

3.2.5 Ρευστά διάτρησης

Η περιστροφική διάτρηση με χρήση πολφού (νερό – μπεντονίτης, κυρίως) είναι η πλέον συνήθης μέθοδος όρυξης γεωτρήσεων σε γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας στον Ελλαδικό χώρο, λόγω του είδους των γεωλογικών σχηματισμών (κυρίως ιζηματογενείς - χαλαροί) και των ειδικών συνθηκών των ταμιευτήρων.

Βασικός παράγοντας για τη σωστή εκτέλεση μιας οποιασδήποτε γεώτρησης (όχι μόνο γεωθερμικής) είναι η κατάλληλη επιλογή και σύνθεση του ρευστού διάτρησης. Το ρευστό διάτρησης επιτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Καθαρισμός της γεώτρησης από τα θρύμματα που προκύπτουν από την αποσύνθεση του πετρώματος και μεταφορά τους στην επιφάνεια.
- Απομάκρυνση των θρυμμάτων από τον πολφό που επιστρέφει στην επιφάνεια, πριν την επανεισαγωγή του στη γεώτρηση.
- Διατήρηση των απαγόμενων θρυμμάτων σε αιώρηση μέσα στη γεώτρηση κατά την προσωρινή διακοπή της κυκλοφορίας του ρευστού διάτρησης.
- Προστασία των τοιχωμάτων της γεώτρησης με τη δημιουργία πλακούντα, για την αποφυγή καταπτώσεων, και τη διατήρηση σταθερής διαμέτρου.
- Καθαρισμός, ψύξη και λίπανση του κοπτικού άκρου και αποφυγή διάβρωσης του μηχανολογικού εξοπλισμού μέσα στη γεώτρηση (διατρητικά στελέχη, αντίβαρα, σταθεροποιητές κ.λπ.).
- Έλεγχος των πιέσεων των ρευστών που υπάρχουν στους γεωλογικούς σχηματισμούς και των διαφόρων αερίων (CO₂, CH₄, H₂S).
- Δειγματοληψία των διατρυόμενων γεωλογικών σχηματισμών.

Οι παράμετροι του πολφού που επηρεάζουν τις παραπάνω λειτουργίες είναι η χημική σύστασή του, το ιξώδες του, η πυκνότητά του και η ταχύτητα κυκλοφορίας του κατά την επιστροφή του στην επιφάνεια. Στα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας η επιλογή του είδους του πολφού εξαρτάται από τους γεωλογικούς σχηματισμούς που θα συναντηθούν, το βάθος της γεώτρησης και τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα. Στις γεωτρήσεις μικρού βάθους, εντός συμπαγών σχηματισμών με ταμιευτήρες όπου το γεωθερμικό ρευστό είναι μόνο ζεστό νερό, χωρίς αρτεσιανισμό και αέρια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πολφός διάτρησης μόνο νερό ή/και αέρας (με αφριστικά).

3.2.5.1 *Ιξώδες πολφού διάτρησης*

Το ιξώδες ενός ρευστού διάτρησης χαρακτηρίζει την αντίστασή του στη ροή. Επηρεάζει άμεσα τον καθαρισμό της γεώτρησης, αλλά και τη δυνατότητα απομάκρυνσης των θρυμμάτων από αυτό πριν την επανεισαγωγή του στη γεώτρηση. Το αυξημένο ιξώδες δρα θετικά στον καθαρισμό της γεώτρησης, ενώ επηρεάζει αρνητικά την ταχύτητα διάτρησης.

Ο μπεντονίτης, μίγμα διαφόρων ένυδρων αργιλοπυριτικών ορυκτών, είναι το βασικό πρόσθετο στο νερό για τη δημιουργία πολφού κατάλληλου ιξώδους και πλακούντα στα τοιχώματα της γεώτρησης. Μικρή αύξηση της πυκνότητας του πολφού με μπεντονίτη αυξάνει έντονα την τιμή του ιξώδους, δημιουργώντας προβλήματα στην ταχύτητα κυκλοφορίας του και στην προχώρηση της γεώτρησης. Στις ιζηματογενείς λεκάνες (συνήθεις σε πεδία στον Ελλαδικό χώρο) εμφανίζεται το πρόβλημα της συνεχούς αύξησης του ιξώδους, που οφείλεται στους αργιλικούς

σηματισμούς και στα λεπτόκοκκα στερεά που εισέρχονται στον πολφό κατά την επαφή του με τους υπό όρυξη σχηματισμούς.

3.2.5.2 Πυκνότητα πολφού διάτρησης

Η πυκνότητα του πολφού βρίσκεται σε αντιστοιχία με το ιξώδες, όταν πρόκειται για μίγμα νερού και μπεντονίτη. Η αύξησή της επηρεάζει θετικά τον καθαρισμό της γεώτρησης και την προστασία των τοιχωμάτων της, αλλά αρνητικά την ταχύτητα διάτρησης, ενώ επίσης δημιουργεί κίνδυνο φραγμού των υδροπερατών σχηματισμών. Στα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας, όπου συναντούμε συχνά ρευστά διφασικής ροής (νερό και διοξείδιο του άνθρακα κυρίως) με έντονο αρτεσιανισμό (ταμειυτήρες υπό υπερπίεση), ο έλεγχος των πιέσεων γίνεται με τη ρύθμιση της πυκνότητας, ώστε η υδροστατική πίεση του πολφού να υπερνικήσει την υπερπίεση των ρευστών του ταμειυτήρα.

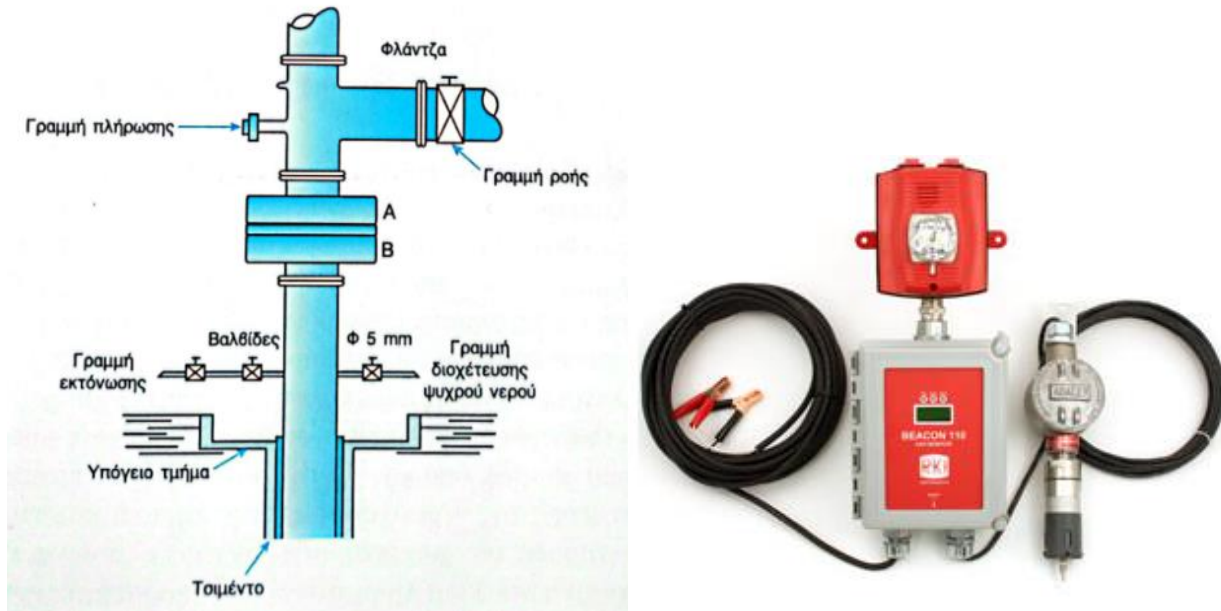
Η αύξηση της πυκνότητας του ρευστού διάτρησης επιτυγχάνεται με προσθήκη μπεντονίτη (χωρίς να αυξάνεται αισθητά πάνω από τα επιτρεπτά όρια το ιξώδες, ώστε να είναι λειτουργικός ο πολφός), άλλως απαιτείται η προσθήκη «υλικού επιβάρυνσης». Τα υλικά επιβάρυνσης που χρησιμοποιούνται έχουν μεγάλο ειδικό βάρος και δεν θα πρέπει να δημιουργούν προβλήματα στις άλλες ιδιότητες του πολφού. Το πιο συνηθισμένο από τα υλικά επιβάρυνσης που χρησιμοποιείται στην ελληνική αγορά είναι η βαρυτίνη με πυκνότητα 3.8 kg/l.

3.2.6 Λοιπός εξοπλισμός

Κατά την εκτέλεση των γεωθερμικών γεωτρήσεων χαμηλής ενθαλπίας πρέπει να διατίθεται, όταν οι συνθήκες του ταμειυτήρα το απαιτούν, πρόσθετος εξοπλισμός για λόγους ασφάλειας του προσωπικού, της γεώτρησης και του εξοπλισμού. Τέτοιος εξοπλισμός είναι ο αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφάλειας (Blow Out Preventer - BOP), ανιχνευτές αερίων (H_2S , CH_4 κ.λπ.), όργανα μέτρησης θερμοκρασίας κ.λπ. (Εικόνα 3-8)

Στις γεωτρήσεις γεωθερμίας η ρύθμιση και παρακολούθηση του πολφού, κυρίως σε ταμειυτήρες υπό πίεση και σε βαθιές γεωτρήσεις, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή εκτέλεσή τους. Ο εξοπλισμός που απαιτείται για τη λειτουργία του κυκλώματος κυκλοφορίας του ρευστού διάτρησης αποτελείται από αντλίες (duplex κ.λπ.), κόσκινα, κυκλώνες, δεξαμενές κ.λπ.

Τέλος, δύναται να απαιτηθεί και βοηθητικός εξοπλισμός (παρελκόμενα) για την υποστήριξη διαφόρων εργασιών, όπως τη συντήρηση των μηχανημάτων και την αλίευση της διατρητικής στήλης και των κοπτικών άκρων σε περίπτωση απώλειάς τους στον πυθμένα της γεώτρησης.



Εικόνα 3-8. Στα αριστερά απεικονίζεται το σχεδιάγραμμα του συστήματος BOP σε γεώτρηση χαμηλής ενθαλπίας (Ανδρίτσος & Φύτικας, Γεωθερμία, 2004). Στα δεξιά απεικονίζεται ένας ανιχνευτής υδρόθειου (H₂S).

3.2.7 Σωλήνωση

Η σωλήνωση ουσιαστικά είναι η επένδυση της γεώτρησης από την επιφάνεια μέχρι τον πυθμένα με κοίλους χαλύβδινους σωλήνες, με πιθανή εξαίρεση τον ταμιευτήρα, όταν ο σχηματισμός του είναι αρκετά σταθερός. Αποτελεί καθοριστική φάση για τη σωστή εκτέλεση και λειτουργία της γεώτρησης. Η σωλήνωση γίνεται τμηματικά (συνήθως) και εξαρτάται από τους σχηματισμούς που συναντιόνται (χαλαροί, υδροφόροι κ.λπ.), τις τεχνικές ανάγκες, το βάθος της γεώτρησης και τις συνθήκες του γεωθερμικού ταμιευτήρα. Οι βασικές λειτουργίες της σωλήνωσης είναι:

- Η συγκράτηση των χαλαρών τοιχωμάτων της γεώτρησης.
- Η ομαλή κυκλοφορία του ρευστού διάτρησης και η αποφυγή απωλειών του.
- Η διακοπή επικοινωνίας του γεωθερμικού ταμιευτήρα με ανεπιθύμητους άλλους υδροφόρους και η ασφάλεια της γεώτρησης από ανεξέλεγκτες διαρροές ρευστών, σε συνδυασμό πάντα με την απαραίτητη τσιμεντώσή της (στεγανοποίηση).
- Η σωστή και ασφαλής άντληση των γεωθερμικών ρευστών, κυρίως σε συνθήκες έντονου αρτεσιανισμού αυτόματης ροής (με υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες).
- Και η ασφαλής τοποθέτηση του αντιεκρηκτικού μηχανισμού (B.O.P.) στην κεφαλή της γεώτρησης (με φλάντζες στεγανότητας πάνω στη σωλήνωση).

Ανάλογα με το βάθος έδρασης και τη σκοπιμότητά τους διακρίνονται οι ακόλουθοι τύποι σωλήνωσης:

- Επιφανειακή ή περιφραγματική σωλήνωση (με τσιμέντωση): Τοποθετείται στο άνω μέρος της γεώτρησης μέχρι βάθους 5-10m για την προστασία του γεωτρητικού εξοπλισμού από τυχόν καταπτώσεις και καθιζήσεις.
- Ενδιάμεσες σωληνώσεις (με τσιμέντωση): Τοποθετούνται για την απομόνωση των ανεπιθύμητων επιφανειακών υδροφορέων, τη συγκράτηση των χαλαρών τοιχωμάτων της γεώτρησης, τη σωστή και ασφαλή άντληση των ρευστών και την καλή κυκλοφορία του πολφού με την αποφυγή απωλειών του. Σε γεωτρήσεις μικρού βάθους (<500 m) απαιτείται σχεδόν πάντα μια στήλη ενδιάμεσης σωλήνωσης, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη τουλάχιστον δύο. Οι ενδιάμεσες σωληνώσεις φθάνουν πάντα μέχρι την επιφάνεια και είναι τσιμεντωμένες. Στην τελική ενδιάμεση σωλήνωση τοποθετείται ο μηχανισμός ασφάλειας (B.O.P.).
- Τελική σωλήνωση ή σωλήνωση παραγωγής: Το μεγαλύτερο τμήμα της καλύπτει τον ταμιευτήρα με τα απαραίτητα φίλτρα (φιλτροσωλήνωση). Η σωλήνωση παραγωγής είτε φθάνει μέχρι την επιφάνεια, είτε με ένα ειδικό σύστημα (hanger) αναρτάται στην τελική ενδιάμεση σωλήνωση. Συχνά, στις γεωτρήσεις μικρού βάθους, η σωλήνωση παραγωγής εισέρχεται μερικά μέτρα και λύνεται με συστολικό (συνήθως αριστερόστροφο), που διαθέτει κώνο στεγανοποίησης του διάκενου μεταξύ των δυο σωληνώσεων.

Η κατακορυφότητα και η ευθυγραμμία της γεώτρησης επηρεάζουν τη σωστή και εύκολη τοποθέτηση των σωληνώσεων και ειδικά την επιτυχή τσιμέντωσή τους, όπως και τη σωστή λειτουργία των στροβιλοφόρων αντλητικών συγκροτημάτων. Η κατακορυφότητα και η ευθυγραμμία της γεώτρησης επιτυγχάνονται με τη χρήση αντίβαρων κατά την όρυξη, την άσκηση του απαιτούμενου βάρους επί του κοπτικού άκρου και τη χρήση σταθεροποιητών, ενώ τα διατρητικά στελέχη διατηρούνται πάντα υπό εφελκυσμό. (Καρυδάκης Γ. Ι., 2003)

3.2.7.1 Τεχνικές προδιαγραφές σωληνώσεων

Οι τεχνικές προδιαγραφές των σωληνώσεων των γεωτρήσεων εξαρτώνται από την ποιότητα του υλικού, το πάχος και τη διάμετρο, τον τρόπο κατασκευής και τον τύπο των φίλτρων. Αναφέρονται δε στις μηχανικές αντοχές στις διάφορες πιέσεις που ασκούνται (στις συνθήκες ταμιευτήρα, άντλησης και τσιμέντωσης), στις αντοχές τους στη θερμοκρασία (<100°C) και στη διαβρωτική συμπεριφορά των γεωθερμικών ρευστών και στη διάρκεια ζωής τους.

Οι μηχανικές αντοχές εξαρτώνται από την ποιότητα του υλικού των σωληνώσεων, το πάχος, τη διάμετρο και τον τρόπο κατασκευής και σύνδεσης μεταξύ τους. Η αντοχή στη διάβρωση εξαρτάται από την ποιότητα του υλικού των σωληνώσεων, τον τρόπο κατασκευής και σύνδεσης μεταξύ τους, τον χημισμό και την ταχύτητα των γεωθερμικών ρευστών και γενικά τις συνθήκες λειτουργίας τους. Τα βασικά είδη των διαβρώσεων που εμφανίζονται στις μεταλλικές

σωληνώσεις από τα κυκλοφορούντα ρευστά είναι η γενική διάβρωση, η διάβρωση με βελονισμού και η μηχανική διάβρωση.

Οι κατηγορίες των σωληνώσεων που χρησιμοποιούνται στις γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας είναι :

- Μεταλλικές σωληνώσεις με καλές μηχανικές αντοχές, αλλά ευάλωτες σε διάβρωση. Είναι συνήθως από χάλυβα και για αντιμετώπιση των αυξημένων προβλημάτων διάβρωσης επικαλύπτονται με προστατευτικά στρώματα ή χρησιμοποιούνται ανοξείδωτοι χάλυβες.
- Μη μεταλλικές σωληνώσεις (κυρίως πλαστικές) με μικρές μηχανικές αντοχές, που μειώνονται με τη θερμοκρασία, αλλά με καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά.

Σωληνώσεις από χάλυβα

Αν και είναι ευάλωτες σε διάβρωση, ανάλογα με τον χημισμό των ρευστών, εντούτοις το χαμηλό κόστος και οι αυξημένες μηχανικές αντοχές που παρουσιάζουν τις καθιστούν ως την κύρια επιλογή στις γεωθερμικές γεωτρήσεις. Στις γεωθερμικές γεωτρήσεις οι σωληνώσεις από χάλυβα παρουσιάζουν αυξημένη διάβρωση στην περιοχή της στάθμης του ρευστού, όπου έρχεται σε επαφή με το οξυγόνο του αέρα. Το οξυγόνο είναι ένα από τα πλέον διαβρωτικά στοιχεία και σε υψηλές θερμοκρασίες ο ρυθμός διάβρωσης πολλαπλασιάζεται, αφού αυξάνεται το ποσοστό των υδρατμών. Η πιο πρακτική αντιμετώπιση της διάβρωσης αυτής είναι η στεγανοποίηση της κεφαλής της γεώτρησης ώστε να αποφεύγεται η είσοδος αέρα (και επομένως οξυγόνου). Η αύξηση της θερμοκρασίας γενικά πολλαπλασιάζει τον ρυθμό διάβρωσης.

Οι σωληνώσεις με ραφή έχουν γενικά μικρότερες μηχανικές αντοχές και είναι πιο ευάλωτες σε διάβρωση (στην περιοχή της ραφής) σε σχέση με τις χωρίς ραφή.

Η αντιμετώπιση της διάβρωσης του χάλυβα από τα γεωθερμικά ρευστά μπορεί να γίνει:

- Με αλλαγή του διαβρωτικού μέσου με μείωση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ρευστού, με απομάκρυνση του οξυγόνου ή αλλαγή της συγκέντρωσης μιας ή περισσότερων διαβρωτικών ουσιών.
- Με χρήση αναστολέων που ελαττώνουν τον ρυθμό διάβρωσης προστιθέμενοι σε μικρές συγκεντρώσεις.
- Με επικάλυψη από προστατευτικά στρώματα, διαχωρίζοντας το μέταλλο από τα διαβρωτικά ρευστά και έτσι μειώνοντας αισθητά τη διάβρωση.

Συνήθως η αντιμετώπιση του προβλήματος εστιάζεται στη χρήση αναστολέων (αμίνες) και κυρίως στην επικάλυψη με προστατευτικά στρώματα, όπως μεταλλικές επικαλύψεις, επικαλύψεις από ανόργανα υλικά και επικαλύψεις από οργανικά υλικά. Γενικά, ο πιο πρακτικός

και φθηνός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος με επικάλυψη είναι τα ελαστικά (καουτσούκ), κυρίως όμως η εποξική βαφή, αν και έχουν παρατηρηθεί προβλήματα σε απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας.

Σωληνώσεις από ανοξείδωτο χάλυβα

Η υψηλή τιμή τους καθιστά συνήθως απαγορευτική τη χρήση τους στις γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας. όμως, σε έντονα διαβρωτικά ρευστά και σε μικρά βάθη και διαμέτρους πιθανώς να αποτελέσουν μια αναγκαία οικονομική επιβάρυνση για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Χαρακτηριστικό τους είναι η περιεκτικότητα σε χρώμιο ($Cr > 1\%$), που αποδίδει τις αντιδιαβρωτικές ιδιότητες. Οι προσθήκες σε νικέλιο (Ni) και μολυβδαίνιο (Mo) τροποποιούν τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες, όπως και τον βαθμό διάβρωσης.

Η παρουσία υδρόθειου και διοξειδίου του άνθρακα δεν δημιουργεί ιδιαίτερα προβλήματα, ενώ αντίθετα τα χλωριόντα σε αυξημένη θερμοκρασία και περιεκτικότητα δημιουργούν σχετικά προβλήματα διάβρωσης με βελονισμούς, που αντιμετωπίζονται με την αύξηση σε περιεκτικότητα χρωμίου και μολυβδαίνιου (6.25%) (τύπος 316-L). Θα πρέπει πάντως να αποφεύγεται η παρουσία οξυγόνου.

Μη μεταλλικές σωληνώσεις

Τα μη μεταλλικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικό κατασκευής σωληνώσεων με πολύ καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά ακόμη και στο οξυγόνο, είναι βασικά τα πλαστικά, που διακρίνονται σε:

- **Θερμοπλαστικά:** Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, αλλά μικρές μηχανικές αντοχές σε εφελκυσμό, σύνθλιψη και εσωτερική πίεση (πίεση διάρρηξης), που μειώνονται αισθητά με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ εμφανίζουν δε το φαινόμενο της γήρανσης με τον χρόνο και τη θερμοκρασία. Εμφανίζουν μεγάλο συντελεστή θερμικής διαστολής, επταπλάσιο από τις σωληνώσεις χάλυβα, που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη χρήση τους. Σωληνώσεις γεωτρήσεων από θερμοπλαστικά στην Ελλάδα υπάρχουν μόνο του τύπου πολυβινυλοχλωρίδιου (PVC).
- **Σωληνώσεις γεωτρήσεων από πολυβινυλοχλωρίδιου (PVC):** Χρησιμοποιούνται στις γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας για μικρά βάθη και χαμηλές θερμοκρασίες. Διεθνώς τυποποιούνται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM Standard F-480, που βασίζεται στη μέθοδο υπολογισμού της πίεσης σύνθλιψης. Είναι σκληρό θερμοπλαστικό υλικό για εφαρμογές μέχρι 60°C (ενώ ο τύπος CPVC αντέχει μέχρι 100°C), όμως η πίεση λειτουργίας του μειώνεται αισθητά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Διατίθεται σε διαμέτρους 5-1000 mm και πάχη 1-300 mm. Στην ελληνική αγορά διατίθεται ο τύπος U.PVC-100.

- Θερμοσκληρυνόμενα: Είναι σωληνώσεις θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης ενισχυμένες με ίνες υαλονήματος (FRP, Fiberglass Reinforced Plastic). Έχουν μεγάλη χρήση διεθνώς στις γεωθερμικές εφαρμογές, λόγω της αυξημένης αντιδιαβρωτικής συμπεριφοράς και των καλύτερων μηχανικών αντοχών συγκριτικά με τα μη μεταλλικά υλικά. Αντέχουν μέχρι 120°C, αν και άνω των 80°C θα πρέπει να ελέγχεται η χρήση τους. Η ανώτερη πίεση λειτουργίας για 20-50°C είναι 16 bar και για 50-80°C τα 10 bar. Στον Ελλαδικό χώρο η χρήση τους είναι περιορισμένη.

3.2.7.2 Επικαθίσεις αλάτων στις σωληνώσεις

Ιδιαίτερο πρόβλημα στις σωληνώσεις των γεωθερμικών γεωτρήσεων είναι οι επικαθίσεις αλάτων, δηλ. η συσσώρευση υλικών στην εσωτερική επιφάνεια των σωληνώσεων που έρχεται σε επαφή με τα γεωθερμικά ρευστά. Η εμφάνιση ή μη επικαθίσεων εξαρτάται από τον χημισμό και τις συνθήκες των ρευστών. Ο πλέον συνηθισμένος τύπος επικαθίσεων είναι λόγω κρυστάλλωσης με τη δημιουργία σκληρών επιφανειών που δύσκολα καθαρίζονται. Οι επικαθίσεις βοηθούν στην αρχική διάβρωση και αυξάνουν την πτώση πίεσης των ρευστών μέσα στη γεώτρηση.

Καθαλατώσεις (scaling) χαρακτηρίζονται οι επικαθίσεις αλάτων με αντίστροφη διαλυτότητα, η οποία μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, όπως με το CaCO_3 . Οι επικαθίσεις στις γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας είναι κυρίως οι ανθρακικές. Η εμφάνιση των ανθρακικών επικαθίσεων αρχίζει από το σημείο εκτόνωσης του γεωθερμικού ρευστού, που μπορεί να συμβεί σε κάποιο βάθος μέσα στη σωλήνωση. Η αντιμετώπιση γίνεται συνήθως με χημικούς αναστολείς, κυρίως οργανοφωσφονικές ενώσεις, παράγωγα πολυμηλεϊνικού ανυδρίτη, πολυμεθακρυλικού και πολυακρυλικού οξέος. Απαιτείται συνεχής προσθήκη αναστολέα δια μέσου σωληνίσκου που εισέρχεται σε μια μόνιμη εξωτερική πλευρική σωλήνωση (1") σε βάθος κάτω από το σημείο εκτόνωσης του ρευστού.

3.2.8 Τσιμέντωση

Για την επιτυχή εκτέλεση μιας γεωθερμικής γεώτρησης απαραίτητη προϋπόθεση θεωρείται η τσιμέντωση (στεγανοποίηση) του διάκενου μεταξύ των τοιχωμάτων της γεώτρησης και της σωλήνωσης (ολική ή μερική τσιμέντωση). Ο σκοπός της τσιμέντωσης γενικά είναι:

- Η διακοπή επικοινωνίας του γεωθερμικού ορίζοντα με κρύους επιφανειακούς υδροφορείς.
- Η ασφάλεια της γεώτρησης για την αντιμετώπιση του (συνήθως) έντονου αρτεσιανισμού των γεωθερμικών ρευστών.
- Η προστασία των σωληνώσεων από διαβρωτικά ρευστά.

- Επίσης τσιμεντώσεις γίνονται και κατά την εγκατάλειψη μιας γεώτρησης.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη τσιμεντώση είναι το τσιμέντο, το νερό και οι προσθήκες διαφόρων υλικών. Όλοι οι τύποι τσιμέντου κατασκευάζονται με τον ίδιο τρόπο και τα ίδια υλικά, αλλά σε διαφορετικές αναλογίες. Οι διάφορες προσθήκες λειτουργούν ως επιταχυντές ή επιβραδυντές της πήξης του τσιμεντοπολτού, αλλά και βελτιώνουν τις ιδιότητές του ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Οι υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες, αλλά και η διαβρωτικότητα ορισμένων ρευστών που συναντιούνται στους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς, οδήγησαν στην κατασκευή διάφορων κατηγοριών τσιμέντου. Οι κατηγορίες τσιμέντου διαφέρουν ως προς την αντοχή στη θλίψη και τον εφελκυσμό μετά την πήξη, που επηρεάζονται από τη θερμοκρασία της γεώτρησης, την πίεση του σχηματισμού και τον χημισμό των ρευστών.

Το κοινό τσιμέντο Portland (τύπου A) για γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας ($T < 110^{\circ}\text{C}$ και βάθη τσιμεντώσης < 1800 m) συνήθως καλύπτει τις ανάγκες μιας σωστής τσιμεντώσης, όταν δεν υπάρχουν κάποιες ειδικές συνθήκες. Το τσιμέντο αυτό δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για θερμοκρασίες $> 110^{\circ}\text{C}$ λόγω μείωσης της αντοχής και αύξησης της διαπερατότητας, που αντιμετωπίζεται με προσθήκη διοξειδίου του πυριτίου. Η αντοχή του τσιμέντου Portland σε θερμοκρασίες $35\text{-}43^{\circ}\text{C}$ φθάνει $4,670 - 5,840$ psi μετά από χρόνο αναμονής 72 ωρών.

Μερικές από τις προσθήκες υλικών που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των ιδιοτήτων της τσιμεντώσης είναι:

- Πυριτικό νάτριο: Ελαττώνει το χρόνο πήξης.
- Μπεντονίτης: Ελαττώνει το ειδικό βάρος, αυξάνει την ρευστότητα και την αντοχή του.
- Περγλίτης: Ελαττώνει το ειδικό βάρος του τσιμέντου και τις απώλειες.
- Βαρύτης: Αυξάνει το ειδικό βάρος του τσιμέντου.
- Χλωριούχο νάτριο : Ελαττώνει το χρόνο πήξης.
- Χλωριούχο ασβέστιο: Ελαττώνει το σημείο πήξης.
- Θηραϊκή γη: Ελαττώνει το ειδικό βάρος και αυξάνει το χρόνο πήξης.
- Γη διατόμων: Ελαττώνει το ειδικό βάρος.

Οι συνήθεις προσθήκες (που εύκολα βρίσκονται στην αγορά) για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του τσιμέντου Portland είναι ο μπεντονίτης, το χλωριούχο ασβέστιο, ο βαρύτης και το νερό.

Η επίδραση του χημισμού των υδροφόρων οριζόντων που βρίσκονται σε επαφή με την τσιμεντώση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, κυρίως όταν υπάρχουν ποσότητες σε θειικά και

ανθρακικά άλατα. Τα θειικά άλατα του Na και Mg δρουν στο τσιμέντο και δημιουργούν ρωγμές και θραύσματα. Η δράση τους είναι έντονη σε χαμηλές θερμοκρασίες (<82°C) και κυρίως 30-50°C, ενώ σε μεγαλύτερες είναι αμελητέα. Τα διοξείδιο του άνθρακα είναι σύνηθες αέριο σε αρκετά μεγάλες ποσότητες στα γεωθερμικά πεδία της Ελλάδας. Επομένως στα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας, όπου οι θερμοκρασίες είναι <100°C, οι επιδράσεις του στη διάβρωση του τσιμέντου δεν είναι ιδιαίτερα αισθητές. Τσιμέντα μεγάλης πυκνότητας και υψηλού ποσοστού σε υδροξείδιο του ασβεστίου είναι πιο ανθεκτικά στη διάβρωση έναντι του διοξειδίου του άνθρακα.

3.2.8.1 Μέθοδοι τσιμεντώσης

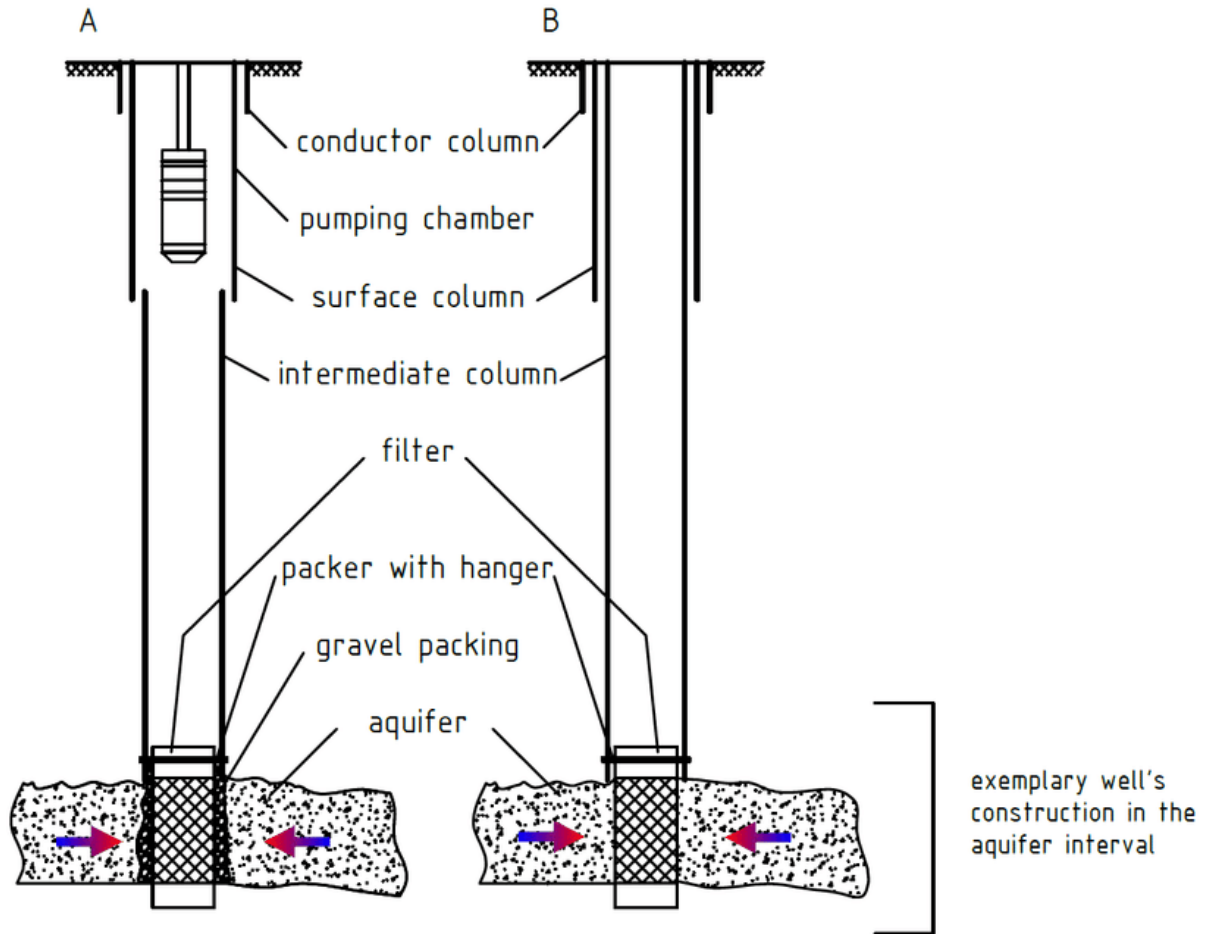
Η επιλογή της μεθόδου τσιμεντώσης στις γεωτρήσεις γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας εξαρτάται από το βάθος, τις γεωλογικές συνθήκες, τα γεωθερμικά χαρακτηριστικά του πεδίου και τις τεχνικές και οικονομικές δυνατότητες του συνεργείου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι τσιμεντώσης αυτών των γεωτρήσεων:

- Τσιμεντώση περιφραγματικής σωλήνωσης: Για τη τσιμεντώση περιφραγματικών σωληνώσεων σε μικρά βάθη.
- Τσιμεντώση με εσωτερική σωλήνωση (1-2'') και σύστημα στεγανότητας: Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για σχετικά μεγαλύτερα βάθη.
- Τσιμεντώση με πλευρική σωλήνωση (1-2'') και πώμα: Η μέθοδος εφαρμόζεται για σχετικά μικρά βάθη, συνήθως μέχρι 100-200 m.
- Τσιμεντώση με εσωτερική σωλήνωση (1-2'') και βαλβίδα αντεπιστροφής: Η μέθοδος εφαρμόζεται για μεσαία βάθη.
- Τσιμεντώση με διαχωριστικά πώματα. Πρόκειται για μέθοδο που προέρχεται από τις γεωτρήσεις υδρογονανθράκων.

3.3 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

3.3.1 Σωληνώσεις φίλτρων

Στη σωστή λειτουργία της γεωθερμικής γεώτρησης βασική προϋπόθεση είναι η κατάλληλη τοποθέτηση και επιλογή των σωληνώσεων φίλτρων. Εξαρτώνται από το βάθος, το πάχος και την υδραυλική αγωγιμότητα (K) του ταμιευτήρα, τον χημισμό των ρευστών, τον εκμεταλλεύσιμο ρυθμό άντλησης και την πτώση στάθμης (ή πίεσης του ταμιευτήρα).



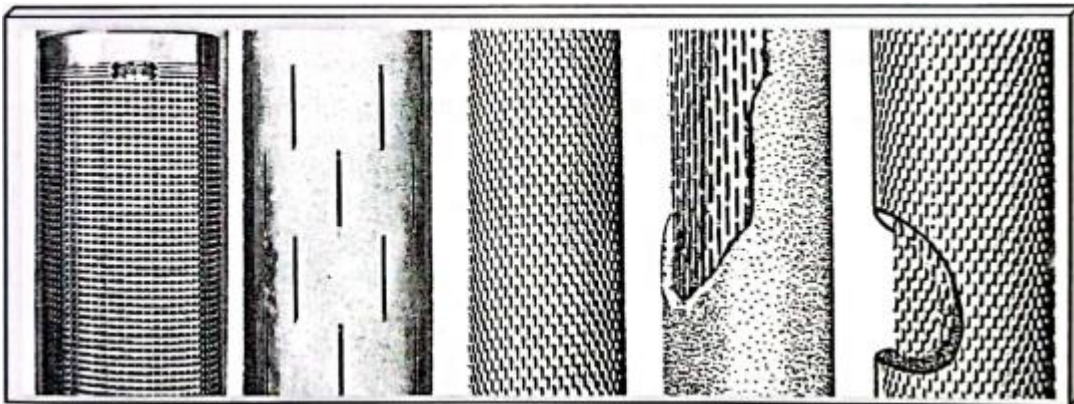
Εικόνα 3-9. Σχηματική αναπαράσταση παραγωγικής γεώτρησης σε περιοχή με πίεση σχηματισμών μικρότερη της αρτεσιανής (Α) και με αρτεσιανή πίεση (Β). (Tomaszewska, Sowizdżał, & Chmielowska, 2018)

Οι παράμετροι που προσδιορίζουν τις φιλτροσωληνώσεις είναι η ποιότητα υλικού κατασκευής (αντοχή σε διάβρωση, εφελκυσμό, σύνθλιψη και εσωτερική πίεση), το ποσοστό ανοικτής επιφάνειας σε σχέση με την ολική, το σχήμα και οι διαστάσεις σχισμών, η διάμετρος, το μήκος και η θέση τοποθέτησής τους. Η ποιότητα του υλικού εξαρτάται από τις απαιτήσεις σε αντιδιαβρωτικές και μηχανικές αντοχές το οποίο αναφέρθηκε ιδιαίτερα στις προηγούμενες παραγράφους.

Για μεγάλα βάθη επιλέγονται σχεδόν πάντα φιλτροσωληνώσεις άνευ ραφής ποιότητας (κατά API) J-55 με φίλτρα κατακόρυφων διακοπτόμενων σχισμών. Για διάφορα βάθη η επιλογή μπορεί να είναι ποιότητας STAL-37 ή 44 ή 52, H-40 με ή χωρίς ραφή, ενώ από μη μεταλλικά υλικά η ποιότητα είναι PVC με εγκάρσιες σχισμές.

Τύποι σχισμών:

- Φίλτρα συνεχών σχισμών περιέλιξης, έχουν ποσοστό ανοίγματος 2-60% για ανοίγματα σχισμής 0.15-4 mm, αντίστοιχα.
- Φίλτρα οριζόντιων ή κατακόρυφων διακοπτόμενων σχισμών, έχουν ποσοστό ανοίγματος 1-12%, για ανοίγματα σχισμής 0.5 - 5 mm, αντίστοιχα.
- Φίλτρα γεφυρωτών σχισμών, έχουν ποσοστό ανοίγματος 3-33%, για ανοίγματα σχισμής 0.5-5 mm.
- Φίλτρα με ενσωματωμένο αμμώδη μανδύα χρησιμοποιούνται όταν υπάρχουν ειδικές συνθήκες.



Εικόνα 3-10. Τύποι σχισμών που συναντώνται στις φιλτροσωληνώσεις (Καρυδάκης Γ. , 2005)

Το άνοιγμα κάθε σχισμής εξαρτάται από την κοκκομετρία του υλικού του σχηματισμού του ταμιευτήρα, ενώ όταν τοποθετηθεί χαλκόφιλτρο το άνοιγμα καθορίζεται βασικά από την κοκκομετρία του. Ποσοστό ανοίγματος >20% θεωρείται ιδανικό, συνήθως είναι 10%, ενώ <4% θεωρείται ακατάλληλο. Στις γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας η επιλογή του τύπου σχισμών εξαρτάται και από την ποιότητα του υλικού, το πάχος και τον τρόπο κατασκευής, που συνδέονται με τον χημισμό των ρευστών και τις απαιτήσεις σε μηχανική και αντιδιαβρωτική συμπεριφορά.

3.3.1.1 Θέσεις τοποθέτησης της φιλτροσωληνώσεως

Στους ελεύθερους ομοιογενείς ταμιευτήρες οι φιλτροσωληνώσεις καλύπτουν το κατώτερο τμήμα τους ανάλογα με τις αντλητικές απαιτήσεις, ενώ στους ελεύθερους ανομοιογενείς τοποθετούνται στους πιο περατούς ορίζοντες κάτω από τη στάθμη άντλησης. Στους υπό πίεση ταμιευτήρες, συνήθεις στα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας, οι φιλτροσωληνώσεις καλύπτουν σχεδόν όλο το πάχος ώστε να αυξηθεί η ειδική παροχή. Η θέση τοποθέτησής τους στοχεύει στην επίτευξη ακτινωτής ροής του ρευστού από όλες τις διευθύνσεις και θέσεις του ταμιευτήρα με

διάτρηση όλου του πάχους του, ώστε να έχουμε τη μέγιστη απόδοση άντλησης με μικρές απώλειες φορτίου, αλλά και τη μείωση των αποθέσεων αλάτων και της διάβρωσης. Στους συμπαγείς ταμιευτήρες συνήθως δεν κρίνεται αναγκαία η τοποθέτηση φιλτροσωληνώσεων.

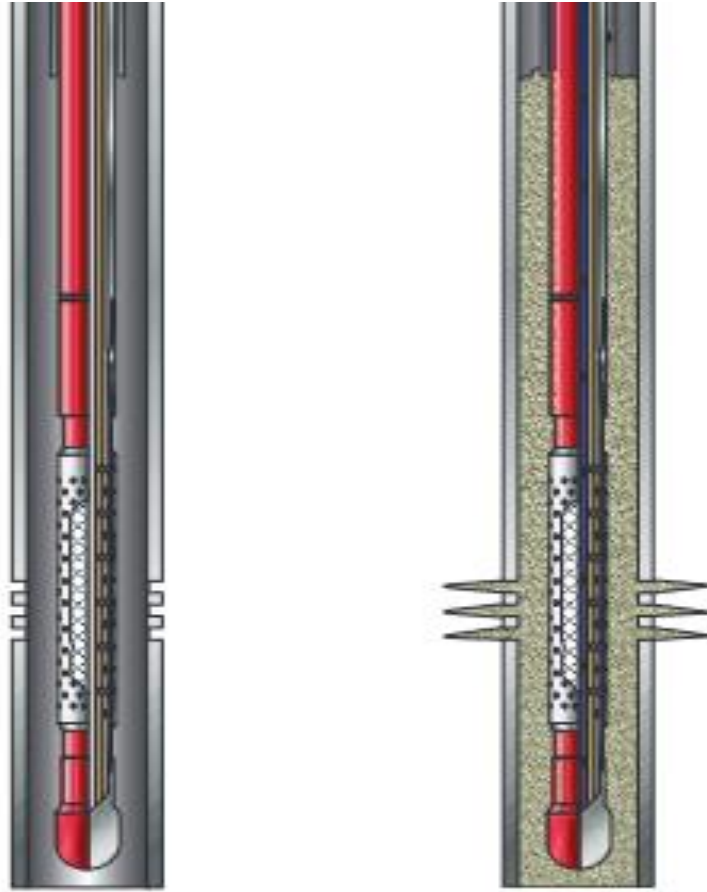
3.3.2 Χαλικόφιλτρο

Η τοποθέτηση χαλίκων έχει ως στόχο:

- Την αποφυγή καταπτώσεων χαλαρών σχηματισμών στο διάκενο μεταξύ γεώτρησης και φιλτροσωλήνωσης, που θα μειώσουν την ανοικτή επιφάνειά της.
- Τη συγκράτηση άμμου που υπάρχει στον ταμιευτήρα.
- Την εύκολη και κατακόρυφη κίνηση του νερού για να εισέλθει στα φίλτρα.
- Την αύξηση του ανοίγματος των σχισμών των φίλτρων.
- Την αύξηση του ειδικού ρυθμού ροής κατά την άντληση της γεώτρησης, λόγω μείωσης των απωλειών φορτίου με την αύξηση της ενεργού διαμέτρου της.

Η επιλογή των κατάλληλων χαλίκων εξαρτάται από την ορυκτολογική σύσταση, το σχήμα και την κοκκομετρία τους. Το πάχος του χαλικόφιλτρου πρέπει να υπερβαίνει τα 3 cm, πολύ μεγαλύτερα πάχη θεωρούνται θετικά, όμως πιθανόν να δημιουργήσουν πρόβλημα στον καθαρισμό και ανάπτυξη της γεώτρησης. Η μεγαλύτερη διάμετρος χαλίκων δεν υπερβαίνει το 1 cm, ενώ η μικρότερη υπερβαίνει το άνοιγμα των σχισμών. Για τη δυνατότητα τοποθέτησής του απαιτείται ικανό διάκενο (>3 cm) ανάλογα με την κοκκομετρία του.

Στους ταμιευτήρες με αδρομερή υλικά δημιουργείται φυσικό χαλικόφιλτρο από τον ίδιο τον σχηματισμό (κατά την ανάπτυξη), ενώ σε συμπαγείς σχηματισμούς αποφεύγεται ακόμη και η τοποθέτηση φιλτροσωλήνωσης. Το ύψος των χαλίκων πρέπει να φθάσει πάνω από τη φιλτροσωλήνωση (Εικόνα 3-11). Αρκετοί ταμιευτήρες γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας στον Ελλαδικό χώρο βρίσκονται στα κροκαλοπαγή της οροφής του υπόβαθρου ή σε συνεκτικούς ψαμμιτικούς σχηματισμούς, όπου δεν τοποθετείται συνήθως χαλικόφιλτρο και οι γεωτρήσεις λειτουργούν σωστά. Όμως, έχουν συναντηθεί και ταμιευτήρες με εναλλαγές άμμου - αργίλου ή εύθρυπτου ψαμμίτη όπου η τοποθέτηση τεχνητού χαλικόφιλτρου είναι απαραίτητη.



Εικόνα 3-11. Διατομή γεώτρησης, πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την τοποθέτηση του χαλκίκοφίλτρου (Πηγή: <https://www.weatherford.com/documents/catalog/gravel-pack-systems/>)

3.3.3 Ανάπτυξη γεωθερμικών γεωτρήσεων χαμηλής ενθαλπίας

Κατά την όρυξη των γεωτρήσεων δημιουργείται πλακούντας στα τοιχώματά τους, ενώ πολφός ή άργιλος μαζί με λεπτόκοκκα θρύμματα διεισδύουν στους πόρους του ταμιευτήρα (απώλειες πολφού) και του χαλκίκοφίλτρου και εμποδίζουν την ελεύθερη επικοινωνία των ρευστών του ταμιευτήρα με τη γεώτρηση. Με τη διαδικασία της ανάπτυξης της γεώτρησης απομακρύνονται ο πολφός, η άργιλος και τα λεπτόκοκκα θρύμματα, αναδιατάσσονται και καθαρίζονται οι χάλικες εξωτερικά των φίλτρων και αποκαθίσταται η κανονική ροή των ρευστών του ταμιευτήρα προς τη γεώτρηση, ενώ με πρόσθετες παρεμβάσεις αυξάνεται και η διαπερατότητα του σχηματισμού γύρω από τη γεώτρηση.

Η συχνή ύπαρξη πλαστικής αργίλου σε αρκετές ιζηματογενείς λεκάνες στον Ελλαδικό χώρο, που φιλοξενούν γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας, δημιουργεί πρόσθετα προβλήματα στην ανάπτυξη της γεώτρησης, αν δεν έχει απομακρυνθεί πλήρως κατά το στάδιο της όρυξης. Η

παραμονή της εντός της γεώτρησης υπό μορφή πλαστικών κυλίνδρων πολλών μέτρων έχει ως συνέπεια να συμπαρασύρεται κατά την κάθοδο της φιλτροσωλήνωσης και να καλύπτει το διάκενο με τη γεώτρηση, δημιουργώντας αδυναμία καθόδου του χαλικοφίλτρου, ενώ το στάδιο της ανάπτυξης καθίσταται χρονοβόρο και απαιτεί την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων.

Η σωστή ανάπτυξη προσδιορίζεται από τον υπολογισμό των απωλειών φορτίου στη γεώτρηση (κατασκευαστικά χαρακτηριστικά) και του συντελεστή μηχανικού τραυματισμού της γεώτρησης. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι ανάπτυξης σε γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας είναι :

- Ανάπτυξη με εμβολισμούς
- Ανάπτυξη με αέρα υπό πίεση (air lift pumping)
- Ανάπτυξη με υδραυλική ρωγμάτωση του ταμιευτήρα
- Ανάπτυξη με χημικά πρόσθετα
- Ανάπτυξη με άλλες μεθόδους (εκτόξευση νερού υπό πίεση κατά μήκος της φιλτροσωλήνωσης δια μέσου της διατηρητικής στήλης στο άκρο της οποίας τοποθετείται πλευρικός εκτοξευτής νερού και με άντληση κατά βαθμίδες)

Στις γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας μικρού βάθους χωρίς ιδιαίτερο αρτεσιανισμό μπορούν να εφαρμοστούν όλες οι πιο πάνω μέθοδοι, ανάλογα τα υδραυλικά και πετρολογικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα. Στις γεωτρήσεις μικρού βάθους με έντονο αρτεσιανισμό (υπό πίεση) διφασικής ροής ρευστών, που είναι συνήθως οι περισσότερες μέχρι τώρα στον Ελλαδικό χώρο, μετά την πλύση με νερό και απομάκρυνση του πολφού, υπήρξε αυτόματη ενεργοποίηση. Όμως, κρίνεται απαραίτητη τουλάχιστον η εκτέλεση εμβολισμών για τη σωστή ανάπτυξη όλου του πάχους του ταμιευτήρα. Η ύπαρξη του αντεκρηκτικού μηχανισμού ασφάλειας (B.O.P.) στην κεφαλή της γεώτρησης είναι απαραίτητη κατά τη φάση της ανάπτυξης.

Τέλος, όσον αφορά τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής, πρέπει να επισημανθούν ορισμένα στοιχεία, τα οποία αφορούν στις ιδιαιτερότητες κατασκευής και ανάπτυξής τους:

- Οι ενδιάμεσες σωληνώσεις πρέπει να φθάνουν ακριβώς πάνω από τον αποδέκτη ταμιευτήρα, τσιμενταρισμένες για την αποφυγή διείσδυσης των γεωθερμικών αποβλήτων σε επιφανειακούς υδροφορείς.
- Η επιφάνεια ανοίγματος των φίλτρων θα πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη της επιφάνειας της αντίστοιχης παραγωγικής γεώτρησης σε συνάρτηση και με τη διαπερατότητα του ταμιευτήρα.

- Η πίεση εισόδου πρέπει να διατηρείται σταθερή και η κεφαλή της γεώτρησης κλειστή, ώστε να αποφεύγονται αλλαγές στη χημική ισορροπία των εισαγόμενων ρευστών, για να μην υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης των σωληνώσεων και επικάθισης αλάτων. Γενικά δεν θα πρέπει να εισάγεται ρευστό με ανοικτή κεφαλή στη γεώτρηση.
- Χρειάζεται επαρκής ανάπτυξη για αποφυγή διείδυσης θρυμμάτων και πολφού στον ταμιευτήρα. (Κελεσιδής, 2011)

3.4 ΚΟΣΤΟΣ ΑΒΑΘΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

Το κόστος των αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων χαμηλής ενθαλπίας, όπως και όλων των γεωτρήσεων γενικά, εξαρτάται από το βάθος που θα φτάσει η γεώτρηση, την τελική της διάμετρο και τον τύπο των σωληνώσεων που θα εγκατασταθούν σε αυτή, τα πετρώματα από τα οποία θα διέλθει και τη διατηρησιμότητά τους, τα φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά των ρευστών διάτρησης που πρέπει να χρησιμοποιηθούν κ.ά.

Ενδεικτικά, για τις γεωθερμικές γεωτρήσεις παραγωγής βάθους μέχρι 500m, αναφέρεται ότι κοστίζουν από 50 έως 100 ευρώ ανά μέτρο (τιμές 2000) (Ανδρίτσος & Φύτικας, Γεωθερμία, 2004). Επίσης, από υπάρχοντα στοιχεία και εμπειρικές εκτιμήσεις προκύπτει ότι το μέσο κόστος γεωθερμικών σε μικρά σχετικά βάθη διαμορφώνεται όπως αναγράφεται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 3-1 Μέσο κόστος ερευνητικών γεωθερμικών γεωτρήσεων (Βρέλλης, Αρβανίτης, & Μπίμπου - Μπακούλα, 2009)

Βάθος (σε m)	Κόστος (€/m)	Κόστος (€/γεώτρηση)
0 - 250	40 - 50	5.000 - 12.500
250 - 400	50 - 60	12.500 - 24.000
400 - 600	90 - 110	36.000 - 66.000

Πίνακας 3-2 Μέσο κόστος παραγωγικών γεωθερμικών γεωτρήσεων με μεγάλη διάμετρο (Βρέλλης, Αρβανίτης, & Μπίμπου - Μπακούλα, 2009)

Βάθος (σε m)	Κόστος (€/m)	Κόστος (€/γεώτρηση)
200	180 - 200	36.000 - 40.000
500	200 - 250	100.000 - 125.000

Τα γεωθερμικά περιβάλλοντα, πιο συγκεκριμένα, βρίσκονται συνήθως υπό πίεση και οι τιμές του πορώδους και της διαπερατότητας που τα χαρακτηρίζουν μπορεί να μεταβάλλονται σε μεγάλο ποσοστό μεταξύ μερικών μέτρων βάθους. Αυτή η μεταβλητότητα πολλές φορές οδηγεί σε απώλειες κυκλοφορίας ρευστού διάτρησης, πρόβλημα που η αντιμετώπισή του συμβάλει

κατά μέσο όρο στο 10 – 20% του συνολικού κόστους όρυξης της γεώτρησης. Επίσης, η μεγάλη λιθολογική ανομοιογένεια που συναντάται στις γεωθερμικές γεωτρήσεις, απαιτεί τη σταθεροποίηση των τοιχωμάτων της με χρήση πολλαπλών στηλών σωλήνωσης, γεγονός που αυξάνει κατακόρυφα τους χρόνους όρυξης και το συνολικό κόστος, κυρίως στις αβαθείς γεωθερμικές γεωτρήσεις.

Επιπλέον, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν, απαιτείται η χρήση ειδικού εξοπλισμού παρακολούθησης της γεώτρησης και ειδικών πρόσθετων για τη σύνθεση του πολφού διάτρησης. Ο τσιμεντοπορφός πρέπει να καλύπτει ολόκληρο το μήκος της σωλήνωσης από το πέλμα της μέχρι την επιφάνεια, με στόχο την αντιμετώπιση της θερμικής διαστολής της και την επίτευξη σταθερών τοιχωμάτων. Τέλος, οι σωληνώσεις πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές ώστε να είναι ανθεκτικές και στο διαβρωτικό περιβάλλον που επικρατεί.

Όλοι αυτοί οι παραπάνω παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διότι αυξάνουν το κόστος κατά πολύ σημαντικό ποσοστό συγκριτικά με μια γεώτρηση υδρογονανθράκων, πολύ δε περισσότερο συγκριτικά με μια απλή υδρογεώτρηση σε παρόμοιο βάθος. (Lukawski, et al., 2014)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι γεωλογικές συνθήκες στις γεωτρήσεις για την αξιοποίηση γεωθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας / θερμοκρασίας είναι γενικότερα πολύ πιο αντίξοες και προβληματικές σε σχέση με τις αβαθείς γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Προσομοιάζουν περισσότερο με τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν σε ταμιευτήρες υδρογονανθράκων και, μάλιστα, ειδικότερα κατά κάποιο τρόπο με τις γεωτρήσεις υδρογονανθράκων σε συνθήκες υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας (HPHT: high pressure - high temperature wells), όπως είναι γνωστές από την πετρελαϊκή βιομηχανία. Ως εκ τούτου, απαιτείται προσεκτικός και λεπτομερής, κατά το δυνατόν, σχεδιασμός αυτών των γεωτρήσεων, καθώς και ορθή και πλήρως ελεγχόμενη όρυξη της γεώτρησης.

Σε αυτό το πλαίσιο, ο σχεδιασμός της σωλήνωσης, ειδικότερα, απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και μελέτη, καθώς για τη μείωση του ρίσκου απαιτούνται όσο το δυνατό πληρέστερα δεδομένα σχετικά με το γεωλογικό περιβάλλον όρυξης της γεώτρησης, γεγονός που δύναται να αυξήσει το κόστος των ερευνητικών εργασιών (αρχικό κόστος). Κατά τον τρόπο αυτό, όμως, το τεχνικό πρόγραμμα όρυξης της γεώτρησης καταρτίζεται με μεγαλύτερη αξιοπιστία και, ως εκ τούτου, μειώνεται το κόστος δυνητικών αστοχιών. Ο ιδανικός σχεδιασμός, συνεπώς, είναι αυτός που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος (αρχικό + αστοχιών), και πρέπει να ακολουθείται για τη διάνοιξη γεωτρήσεων σε ταμιευτήρες υψηλής ενθαλπίας και μεγάλου βάθους.

Ένας από τους κύριους στόχους αυτών των γεωτρήσεων είναι η επίτευξη όσο το δυνατόν μικρότερης καταπόνησης των σχηματισμών του ταμιευτήρα, από τους οποίους θα πρέπει να διέλθει η γεώτρηση, καθώς επηρεάζεται αρνητικά η διαπερατότητά του. Η οικονομική βιωσιμότητα αυτών των γεωτρήσεων βασίζεται στην παραγωγή μεγάλου όγκου θερμού νερού ή/και ατμού και, επομένως, η καταπόνηση αυτή πρέπει να βρίσκεται υπό έλεγχο και να είναι όσο το δυνατόν πιο περιορισμένη.

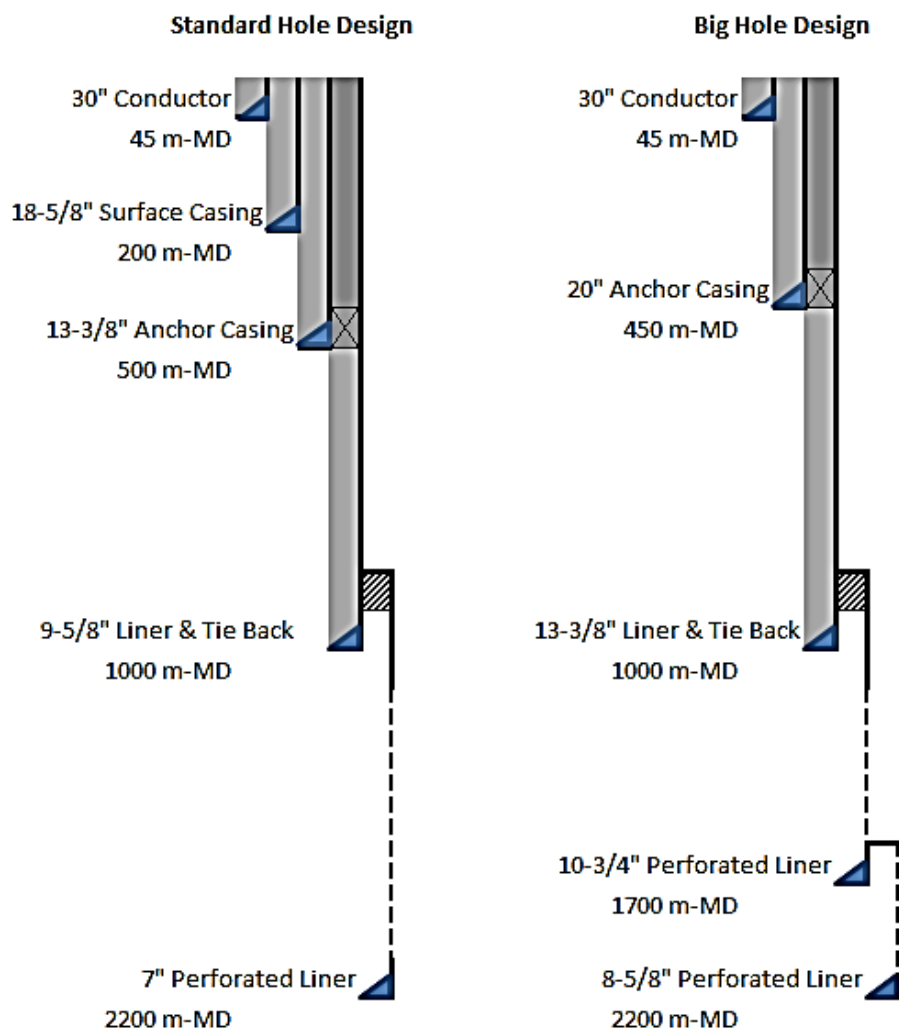
Όπως προαναφέρθηκε, οι γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας/θερμοκρασίας προσομοιάζουν με τις γεωτρήσεις υδρογονανθράκων και ορύσσονται με τη μέθοδο της περιστροφικής διάτρησης. Το τεχνικό πρόγραμμα εκτέλεσης αυτού του τύπου των γεωτρήσεων περιλαμβάνει:

- Την επιλογή του κατάλληλου τύπου γεωτροπάνου
- Τον σχεδιασμό της διατρητικής στήλης
- Την επιλογή των κατάλληλων κοπτικών άκρων

ΟΡΥΞΗ ΑΒΑΘΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΠΕΔΙΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

- Το πρόγραμμα όρυξης (στάδια όρυξης, διάμετροι και βάθη έδρασης των στηλών σωλήνωσης)
- Τον σχεδιασμό των ρευστών διάτρησης (ιδιότητες) & το υδραυλικό πρόγραμμα της γεώτρησης (αντλίες, πίεση και παροχή)
- Τον σχεδιασμό της σωλήνωσης και της τσιμέντωσης
- Την ολοκλήρωση της γεώτρησης και τη δοκιμαστική άντληση.

Στην Εικόνα 4-1 παρουσιάζονται ενδεικτικά τυπικά παραδείγματα σχεδιασμού γεωθερμικών γεωτρήσεων υψηλής ενθαλπίας. Ο αριθμός των στηλών σωλήνωσης που θα τοποθετηθούν, οι διάμετροί τους και τα βάθη έδρασής τους εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων, όπως η γεωλογία, το βάθος και τα χαρακτηριστικά του γεωθερμικού ταμιευτήρα, ο τύπος και η ικανότητα του γεωτρυπάνου κ.λπ.



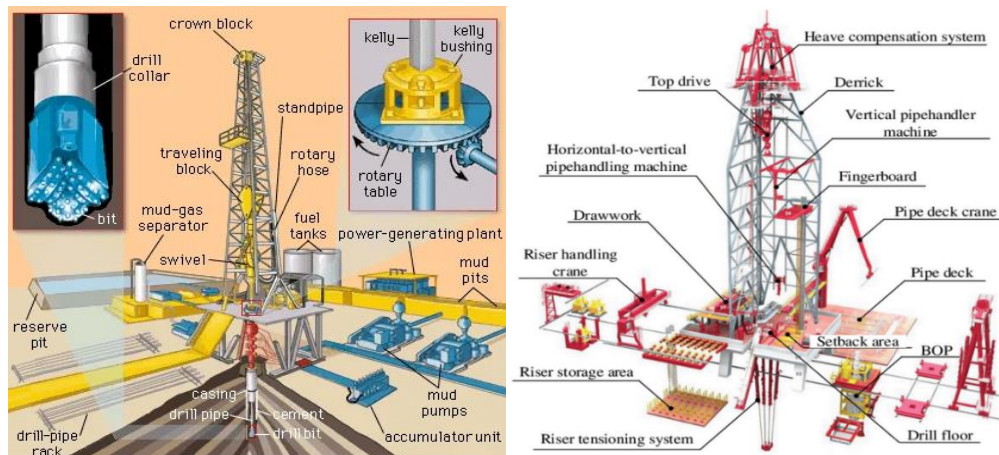
Εικόνα 4-1. Τυπικά παραδείγματα σχεδιασμού γεώτρησης υψηλής ενθαλπίας (Sungkar, Simanjuntak, Isa, Ashadi, & Hartono, 2020)

4.2 ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΟ

Κάθε γεωτρύπανο περιλαμβάνει συστήματα που ελέγχουν την ανέλκυση και καθέλκυση της διατρητικής στήλης, τη μετάδοση της περιστροφικής κίνησης στο κοπτικό άκρο, την κυκλοφορία του ρευστού διάτρησης και την ψύξη αυτού όταν είναι απαραίτητο, αλλά και συστήματα μηχανισμών ασφαλείας, που θα απομονώνουν τη γεώτρηση, αν και όταν παραστεί ανάγκη. Στον συγκεκριμένο τύπο γεωτρήσεων, καθώς η όρυξη προχωρά σε μεγάλα βάθη και, ως εκ τούτου, απαιτούνται μεγάλες διαμέτροι, η πιο συνηθισμένη επιλογή είναι ένα συμβατικό περιστροφικό γεωτρύπανο. Επίσης, εξαιτίας της χαμηλής αξίας του παραγόμενου ρευστού (ατμός ή θερμό νερό), οι γεωθερμικές γεωτρήσεις πρέπει να παράγουν μεγάλους όγκους, επομένως πρέπει να έχουν μεγαλύτερες διαμέτρους συγκριτικά με τις γεωτρήσεις υδρογονανθράκων.

Παλαιότερα, χρησιμοποιούνταν τα «παραδοσιακά» περιστροφικά γεωτρύπανα με περιστροφική τράπεζα και Kelly (Εικόνα 4-2), όμως τα τελευταία χρόνια έχει κερδίσει έδαφος η εφαρμογή της τεχνικής top-drive, κατά την οποία ο κινητήρας που δίδει την περιστροφική κίνηση αναρτάται από τον πύργο του γεωτρύπανου (Εικόνα 4-2). Ο λόγος που έχει συμβεί αυτό είναι γιατί η τεχνική top-drive παρουσιάζει δύο σημαντικά πλεονεκτήματα.

- Προσφέρει εξοικονόμηση χρόνου, διότι δεν χρειάζεται πλέον να προστίθενται ένα-ένα τα διατρητικά στελέχη καθώς προχωράει η σύνθεση και καθέλκυση της διατρητικής στήλης μέσα στη γεώτρηση.
- Δεν σταματάει ποτέ η περιστροφική κίνηση και η κυκλοφορία του ρευστού διάτρησης, γεγονός πολύ σημαντικό για τη διάτρηση σε βαθείς γεωθερμικούς ταμειυτήρες, καθώς υπάρχει επιπλέον προστασία στον εξοπλισμό εντός της γεώτρησης από τις υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 4-2 Σχηματική αναπαράσταση των μελών ενός συμβατικού περιστροφικού γεωτρύπανου με περιστροφική τράπεζα (αριστερά) (Klempa, n.d.) και ενός περιστροφικού γεωτρύπανου με περιστροφική κεφαλή (δεξιά) (Hagen & Pawlus, 2017)

Τα γεωτρύπανα που χρησιμοποιούν την τεχνολογία top-drive είναι πιο ακριβά για την ενοικίασή τους. Ανεξάρτητα από τον τύπο του περιστροφικού γεωτρυπάνου και το σύστημα μετάδοσης της περιστροφικής κίνησης που αυτό διαθέτει, κάθε γεωτρύπανο πρέπει να περιλαμβάνει επίσης και τα ακόλουθα συστήματα:

- Το σύστημα κυκλοφορίας των ρευστών διάτρησης (Εικόνα 4-3). Περιλαμβάνει τις αντλίες οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη διακίνηση του ρευστού διάτρησης μέσα στη γεώτρηση και την επιστροφή τους πίσω στην επιφάνεια. Είναι αρκετά ισχυρές μηχανές οι οποίες εξασφαλίζουν πολύ μεγάλες παροχές σε συνδυασμό με μεγάλες πιέσεις και μάλιστα απαιτούν για τη λειτουργία τους το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας που παράγεται στο γεωτρύπανο από το σύστημα ισχύος του (ηλεκτροκινητήρες ή/και μηχανές εσωτερικής καύσης) συγκριτικά με τον υπόλοιπο εξοπλισμό. Συνήθως χρησιμοποιούνται 2 με 3 αντλίες σε παράλληλη σύνδεση για ικανοποιητική παροχή πολφού.



Εικόνα 4-3 Αντλίες διακίνησης του ρευστού διάτρησης (Balac, 2019)

- Το σύστημα καθαρισμού του ρευστού διάτρησης που επιστρέφει από τη γεώτρηση από τα θρύμματα, έτσι ώστε να μην αυξάνεται η πυκνότητα της λάσπης όταν θα επιστρέψει πίσω στη γεώτρηση, αποφεύγοντας την πρόκληση φθορών στις αντλίες και τις σωληνώσεις. Το σύστημα καθαρισμού περιλαμβάνει κόσκινα και υδροκυκλώνες (Εικόνα 4-4).



Εικόνα 4-4 Σύστημα καθαρισμού του ρευστού διάτρησης από τα παραγόμενα θρύμματα κατά την όρυξη γεώτρησης

- Το σύστημα ασφάλειας της γεώτρησης που αναφέρεται και ως αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας (B.O.P.) και περιλαμβάνει τη διάταξη απομόνωσης της γεώτρησης σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Αποτελείται από δύο μέρη που δρουν ως ισχυρές σύνθετες βαλβίδες. Το ένα, το οριζόντιο, φέρει δακτυλιοειδή έμβολα και είναι σχεδιασμένο να διακόπτει τη λειτουργία οποιουδήποτε μέρους του εξοπλισμού διέρχεται από αυτό. Το δεύτερο, το κατακόρυφο, αποτελεί μια συνδεσμολογία τύπων εμβόλων τα οποία συνδέονται το ένα επί του άλλου και εξυπηρετούν σε συγκεκριμένες διαμέτρους και τύπους στελεχών. Επομένως, ανάλογα με τη προχώρηση της γεώτρησης προστίθενται διαδοχικά τμήματα που συνθέτουν αυτό τον εξοπλισμό (Εικόνα 4-5).



Εικόνα 4-5 Τυπική διάταξη αντιεκρηκτικού μηχανισμού (B.O.P.) (Potter, 2018)

4.3 ΔΙΑΤΡΗΤΙΚΗ ΣΤΗΛΗ

Στις γεωτρήσεις μεγάλου βάθους η διαδικασία σύνθεσης της διατρητικής στήλης, στο μεγαλύτερο μήκος της που αποτελείται από διατρητικά στελέχη, είναι μια περίπλοκη διαδικασία και απαιτεί την εξέταση των παρακάτω παραμέτρων:

- **Αντοχή των διατρητικών στελεχών:** Εξετάζεται κυρίως η αντοχή σε εφελκυσμό και σε στρέψη, έτσι ώστε να είναι ασφαλής η ανέλκυση και καθέλκυση της στήλης καθώς και η μεταφορά της κατάλληλης ροπής για την περιστροφή του κοπτικού.
- **Μέγεθος των διατρητικών στελεχών:** Η εσωτερική διάμετρος των στελεχών της διατρητικής στήλης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να αποφευχθεί εκτεταμένη πτώση πίεσης στο διατρητικό ρευστό. Επίσης, η εσωτερική διάμετρος πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να διέρχονται μέσω αυτής τα απαραίτητα εργαλεία καταγραφής δεδομένων (logging tools).
- **Αντοχή σε διάβρωση:** Πολλά από τα ρευστά που συναντώνται κατά την όρυξη γεωθερμικών γεωτρήσεων και ιδιαίτερα σε πεδία υψηλής ενθαλπίας είναι διαβρωτικά. Επομένως, τα διατρητικά στελέχη θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από κράματα μετάλλων σχεδιασμένα για να έχουν καλύτερες αντοχές σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Ως εκ τούτου, κατά τον σχεδιασμό της διατρητικής στήλης θα πρέπει να επιλέγονται ειδικές κατηγορίες χάλυβα.
- **Η παρουσία υδρόθειου (H₂S) επιβάλλει ο σχεδιασμός της διατρητικής στήλης να ακολουθεί τον Κανονισμό NACE 0175¹ ή/και τον ακόμα πιο αυστηρό IRP 1².**
- **Αντοχή σε φθορά:** Λόγω της φύσης των γεωθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας, τα οποία αποτελούνται από αρκετά λειαντικούς σχηματισμούς, δηλαδή πιο σκληρούς σχηματισμούς από το υλικό κατασκευής των διατρητικών στελεχών, η στήλη τείνει να φθείρεται πολύ πιο γρήγορα σε σύγκριση με άλλων τύπων γεωτρήσεων.

¹ Εκδόθηκε από τον οργανισμό National Association of Corrosion Engineers με στόχο τον καθορισμό των υλικών τα οποία είναι κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλοντα που περιλαμβάνεται υδρόθειο (H₂S) και τη θέσπιση ορίων αντοχής όσον αφορά την αστοχία των υλικών αυτών λόγω της διάβρωσης που προκαλείται από το H₂S, κυρίως κατά την όρυξη γεωτρήσεων υδρογονανθράκων, όμως σήμερα βρίσκει πλήρη εφαρμογή και στις γεωθερμικές γεωτρήσεις.

² Industry Recommended Practice (IRP), αναπτύχθηκε από τον οργανισμό Canadian Association of Petroleum Producers' (CAPP) και Drilling and Completions Committee (DACC) σε συνεργασία με σχετικούς νομοθέτες. Αποτελεί ένα σύνολο οδηγιών και συμβουλών με στόχο την αποφυγή εκρήξεων (blowout) κατά την όρυξη όξινων φρεάτων και πιο συγκεκριμένα φρέατα με μεγάλη συγκέντρωση H₂S. Αρχικά είχε εφαρμογή σε γεωτρήσεις υδρογονανθράκων, όμως σήμερα εφαρμόζεται και στις γεωθερμικές γεωτρήσεις.

Όσον αφορά την κατώτερη συνδεσμολογία³, επειδή, στο μεγαλύτερο μέρος της συμπίεζεται είναι πιο επιρρεπής στο να αστοχήσει σε σχέση με την υπόλοιπη διατρητική στήλη (σειρά διατρητικών στελεχών). Το αυξημένο συνθλιπτικό φορτίο που δέχεται καθιστά τα αντίβαρα πιο ευαίσθητα στη διαβρωτική δράση του H_2S , απαιτώντας με αυτόν τον τρόπο ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των κατάλληλων κατηγοριών χάλυβα.

Επιπροσθέτως, πολλές φορές η τροχιά της γεώτρησης δεν είναι αυστηρά κατακόρυφη, αλλά από ορισμένο βάθος και κάτω προχωρά υπό κλίση, εξαιτίας είτε νομικών, είτε τοπογραφικών, είτε γεωλογικών ζητημάτων που μπορεί να προκύψουν κατά την επιλογή της θέσης της γεώτρησης, με αποτέλεσμα το γεωτρήσιμο να μην είναι δυνατό να βρίσκεται ακριβώς πάνω από τον σχηματισμό ενδιαφέροντος. Ειδικά στις γεωθερμικές γεωτρήσεις η ανάπτυξη κλίσης καθίσταται απαραίτητη καθώς απαιτείται η εγγύτητα των κεφαλών των γεωτρήσεων παραγωγής και εισπίεσης στην επιφάνεια και ταυτόχρονα η μεγάλη απόσταση των στόχων των γεωτρήσεων στον ταμιευτήρα (Εικόνα 4-6). Ακόμη, στις γεωθερμικές γεωτρήσεις είναι σημαντικό αυτές να τέμνουν όσο το δυνατόν περισσότερες ρωγμές των σχηματισμών ενδιαφέροντος. Για να επιτευχθεί λοιπόν το συγκεκριμένο αποτέλεσμα, συνήθως χρησιμοποιείται ένας κινητήρας πυθμένα (η περιστροφή επιτυγχάνεται μέσω της ροής πολφού διαμέσου του κινητήρα) ο οποίος περιστρέφει το κοπτικό άκρο χωρίς να περιστρέφεται η διατρητική στήλη. Στον συγκεκριμένο τύπο γεώτρησης όμως προκύπτουν αρκετές δυσκολίες δεδομένου ότι τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την παρακολούθηση της τροχιάς της γεώτρησης, αλλά και τα ελαστομερή στοιχεία του κινητήρα είναι ευαίσθητα στις υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 4-6 Σχηματική απεικόνιση κεκλιμένων γεωτρήσεων παραγωγής (κόκκινο) και εισπίεσης (μπλε) κατά την εκμετάλλευση ενός γεωθερμικού συστήματος (Πηγή: <https://www.vox.com/energy-and-environment/2020/10/21/21515461/renewable-energy-geothermal-egs-ags-supercritical>)

³ Είναι μια αρκετά πολύπλοκη συνδεσμολογία εξαρτημάτων που τοποθετούνται πάνω από το κοπτικό άκρο και καταλαμβάνουν μήκος από 150m έως 300m. Αποτελείται από βαριά διατρητικά στελέχη (HWDP), αντίβαρα (drill collars), σταθεροποιητές (stabilizers) και αποξεστήρες (reamers). Κύριος σκοπός της είναι η αποτελεσματική φόρτιση του κοπτικού με το βάρος των αντιβάρων, ώστε να εξασφαλίζεται ομαλή διατομή σε όλο το μήκος της γεώτρησης, να βελτιώνεται η απόδοση του κοπτικού και να ελαχιστοποιούνται οι κραδασμοί και τα προβλήματα διάτρησης.

4.4 ΚΟΠΤΙΚΑ ΑΚΡΑ

Τα κοπτικά άκρα που χρησιμοποιούνται συνήθως σε τέτοιου τύπου γεωτρήσεις είναι τα κοπτικά με περιστρεφόμενους κώνους και τα κοπτικά με ελάσματα, τα οποία παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Η πλειοψηφία των κοπτικών με περιστρεφόμενους κώνους, σήμερα, αποτελούνται από τρεις κώνους (τρίκωνα κοπτικά). Οι οδόντες των τριγώνων είτε είναι ενσωματωμένοι πάνω στον κώνο και κατασκευασμένοι από το ίδιο μέταλλο με αυτόν, είτε είναι ένθετοι, από καρβίδιο του βολφραμίου. Τα κοπτικά με ελάσματα είναι πιο οικονομικά, αλλά έχουν εφαρμογή μόνο σε χαλαρούς σχηματισμούς. Τα τρίκωνα κοπτικά χρησιμοποιούνται σε σχηματισμούς μέσης και μεγάλης σκληρότητας. Περιλαμβάνουν, επίσης, ειδικά ρουλεμάν και λιπαντικά υγρά, τα οποία πρέπει να είναι ανθεκτικά στις μεγάλες θερμοκρασίες που θα παρουσιαστούν κατά τη διάτρηση. Γενικότερα, τα τρίκωνα κοπτικά κυριαρχούν στις γεωθερμικές γεωτρήσεις, λόγω της ικανότητάς τους να αποσυνθέτουν αποτελεσματικά σκληρά και ρωγματωμένα πετρώματα, τα οποία συναντώνται συχνά σε γεωθερμικούς ταμιευτήρες.

Μια νέα σχετικά κατηγορία κοπτικών άκρων είναι τα πολυκρυσταλλικά συμπαγή αδαμαντοκοπτικά (PDC), τα οποία προέρχονται από τις γεωτρήσεις υδρογονανθράκων. Εμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 γνώρισαν ευρεία εξάπλωση εξαιτίας της ταχύτερης διάτρησης που επέτυγχαναν και της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής που παρουσιάζουν κατά τη διάτρηση μαλακών και μέσης σκληρότητας σχηματισμών. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι ότι δεν έχουν κινούμενα μέρη, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν περιορισμοί λόγω θερμοκρασίας, όσον αφορά τα ρουλεμάν και τα λιπαντικά υγρά, όπως στα τρίκωνα κοπτικά. Ωστόσο, τα πολυκρυσταλλικά αδαμαντοκοπτικά εισήχθησαν προς χρήση στις γεωθερμικές γεωτρήσεις πριν μια δεκαετία περίπου. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες βελτίωσής τους ώστε να είναι πιο αποδοτικά και σε σκληρούς σχηματισμούς αρχίζοντας έτσι να κερδίζουν έδαφος στις γεωθερμικές γεωτρήσεις.

Τέλος, σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και αδαμαντοκορώνες, όταν όμως απαιτείται η εφαρμογή υψηλών ταχυτήτων περιστροφής. Αυτά τα κοπτικά χρησιμοποιούνται συνήθως όταν κανένας από τους παραπάνω τύπους δεν παρουσιάζει καλή απόδοση. Στα μειονεκτήματά τους περιλαμβάνεται ο χαμηλός ρυθμός προχώρησης, το υψηλό κόστος και ότι δεν μπορούν να επισκευαστούν.

4.5 ΡΕΥΣΤΑ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ

Τα ρευστά διάτρησης που χρησιμοποιούνται στις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας μπορεί να είναι υγρά ή αέρια. Οι μεγάλες διαμέτροι και οι συχνές απώλειες κυκλοφορίας ρευστού που συμβαίνουν σε αυτού του τύπου τις γεωθερμικές γεωτρήσεις έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην αύξηση του κόστους. Δεδομένα από αρκετές γεωτρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στο

παρελθόν έχουν αναδείξει τυπικά εύρη τιμών για τα ρευστά διάτρησης στις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας (Finger & Blankenship, 2010):

- Πυκνότητα 1.03 – 1.15 g/cm³
- Ιξώδες 35 – 55 cp
- pH 9.5 -11.5
- Σημείο διαρροής 35 – 125 kPa

Ο πολφός διάτρησης παρασκευάζεται με χρήση τριών βασικών συστατικών:

- Υγρή βάση: Μπορούν γενικά να χρησιμοποιηθούν πετρέλαιο, γλυκό νερό και θαλασσινό νερό. Ειδικά, όμως, στις γεωθερμικές γεωτρήσεις το γλυκό νερό είναι αυτό που χρησιμοποιείται ως υγρή βάση για τα ρευστά διάτρησης.
- Ενεργά στερεά: Περιλαμβάνουν την άργιλο και τα πολυμερή που προστίθενται στο νερό με στόχο τη δημιουργία ενός κολλοειδούς αιωρήματος. Σε γενικές γραμμές καθορίζουν το ιξώδες του πολφού.
- Αδρανή στερεά: Είναι τα στερεά που προστίθενται στον πολφό είτε κατά της διαδικασίας της διάτρησης, δηλαδή θρύμματα των σχηματισμών που ορύσσονται, είτε μέσω του εργατικού προσωπικού, π.χ. χρήση βαρύτη. Έχουν ως στόχο την αύξηση της πυκνότητας (ειδικούς βάρους) του πολφού χωρίς να επηρεάζουν το ιξώδες.

Οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες που παρουσιάζονται σε γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας επηρεάζουν τη δράση των αργίλων και των πρόσθετων στα ρευστά διάτρησης δημιουργώντας δυσκολίες στην όρυξη. Συνεπώς, οι παρακάτω ιδιότητες θα πρέπει να ελέγχονται συστηματικά κατά τη διάρκεια της όρυξης:

- Η πυκνότητα της λάσπης ελέγχεται με την προσθήκη αδρανών στερεών. Η πυκνότητα πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα με τις πιέσεις των πόρων. Στους γεωθερμικούς ταμιευτήρες οι πιέσεις είναι συνήθως χαμηλές και, σε κάθε περίπτωση, η πυκνότητα του ρευστού θα πρέπει να διατηρείται χαμηλότερη από την πίεση ρωγμάτωσης για να αποτραπεί τυχόν διαρροή ρευστού διάτρησης εντός του ταμιευτήρα.
- Το ιξώδες πρέπει να είναι επαρκώς υψηλό ώστε να μεταφέρει τα θρύμματα στην επιφάνεια, για να διατηρείται καθαρός ο πυθμένας, να αποφεύγεται απώλεια κυκλοφορίας και άλλα προβλήματα. Το κύριο πρόσθετο που χρησιμοποιείται στις γεωθερμικές γεωτρήσεις είναι ο μπεντονίτης (μοντμοριλλονίτης), όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3.

- Η αλκαλικότητα (υψηλό pH) του πολφού ελέγχει τις πιθανές επιπτώσεις από ρύπους όπως το H₂S και το CO₂ πάνω στο διατρητικό εξοπλισμό, περιορίζει τη διάβρωση και αυξάνει τη διαλυτότητα κάποιων από τα συστατικά του πολφού (λιγνίτης και πολυμερή). Η προσθήκη καυστικής σόδας (NaOH) αποτελεί την παραδοσιακή μέθοδο αύξησης του pH, όμως και η προσθήκη καυστικής ποτάσας (KOH) χρησιμοποιείται ολοένα και πιο συχνά στις γεωθερμικές γεωτρήσεις εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που προσφέρει στη ρύθμιση του pH της γεώτρησης, εξαιτίας του όξινου περιβάλλοντος που πολλές φορές επικρατεί λόγω του H₂S. Προτείνεται γενικά το pH να διατηρείται κοντά στην τιμή 10.5.
- Σε υψηλές θερμοκρασίες (>150 °C) τα στερεά εντός της λάσπης τείνουν να απορροφούν μεγάλες ποσότητες νερού με αποτέλεσμα να αυξάνεται το ιξώδες, επομένως προκαλούνται τάσεις ζελατινοποίησης του ρευστού, δηλαδή γίνεται πιο παχύρευστο και κολλώδες, δυσκολεύοντας έτσι το έργο του κοπτικού άκρου με αποτέλεσμα τη μείωση των ρυθμών διάτρησης. Έτσι, μια ομαλή και αποτελεσματική διαδικασία διαχωρισμού του ρευστού από τα στερεά είναι απαραίτητη στην επιφάνεια.
- Στο παρελθόν ο λιγνίτης αποτελούσε το πιο σύνηθες πρόσθετο μείωσης της απώλειας νερού στις γεωθερμικές γεωτρήσεις, όμως τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να αντικαθίσταται από πολυμερή που είναι ανθεκτικά στις έντονες μεταβολές θερμοκρασίας.
- Σε περιπτώσεις κεκλιμένων γεωτρήσεων, όπου το κοπτικό έρχεται σε επαφή με το τοίχωμα της γεώτρησης, χρειάζεται επιπλέον λίπανση και ψύξη του για την επίτευξη ικανοποιητικού ρυθμού προχώρησης. Σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες μόνο ο γραφίτης ή το TORKease⁴ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως λιπαντικά.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου είναι επιθυμητό η διάτρηση να πραγματοποιηθεί με καθαρό νερό ή ρευστά διάτρησης που δεν περιλαμβάνουν αργίλους, κυρίως εντός των παραγωγικών ζωνών όπου τα συμβατικά ρευστά που περιέχουν αργίλους δύναται να προκαλέσουν ζημιά στους σχηματισμούς του ταμιευτήρα. Σε αυτές τις περιπτώσεις η διάτρηση πραγματοποιείται χωρίς την επιστροφή του ρευστού στην επιφάνεια, γεγονός που περιπλέκει τη διαδικασία, καθώς απαιτούνται ειδικές τεχνικές τσιμέντωσης και μια άφθονη πηγή νερού.

Σε πολλές περιπτώσεις, στις γεωθερμικές γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας ως ρευστό διάτρησης χρησιμοποιείται αφρός ως ρευστό διάτρησης, όντας πιο ελαφρύς και με λιγότερα στερεά

⁴ Μη επιβλαβές και φιλικό προς το περιβάλλον (βιοδιασπώμενο) λιπαντικό το οποίο ξεκίνησε να χρησιμοποιείται από το 1974 και στις μέρες μας έχει την παγκόσμια αποδοχή ως το υπέρτατο λιπαντικό. Αποτελείται από ένα μίγμα με βάση το κάλιο K⁺ στην οποία έχουν προστεθεί τασιενεργές ουσίες και παράγοντες αντιστεροποίησης κάνοντάς το διαλυτό σε οποιοδήποτε ρευστό διάτρησης με βάση το νερό. Είναι πολύ αποτελεσματικό είτε σε κατακόρυφες είτε σε κεκλιμένες γεωτρήσεις, μειώνοντας τις τριβές και καταπονήσεις που δέχεται η διατρητική στήλη και περιπτώσεις διαφορικού κολλήματος.

σωματίδια, κατά την όρυξη εντός της παραγωγικής ζώνης, με σκοπό να αποφευχθεί το φράξιμο των ρωγμών του ταμιευτήρα από τις οποίες θα ρέει προς την επιφάνεια το γεωθερμικό ρευστό. Τέλος, λόγω υποπίεσης στον ταμιευτήρα, μπορεί να είναι αναγκαίο, σε ορισμένες περιπτώσεις, η όρυξη να πραγματοποιείται με χρήση συμπιεσμένου αέρα.

4.6 ΣΩΛΗΝΩΣΗ

Το βάθος έδρασης κάθε στήλης σωλήνωσης καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως προαναφέρθηκε, συμπεριλαμβανομένων των χαρακτηριστικών των σχηματισμών, των ρευστών εντός των σχηματισμών και νομοθετικών περιορισμών. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι που επιβάλλουν την τοποθέτηση σωλήνωσης σε συγκεκριμένα τμήματα (βάθη) μιας γεώτρησης:

- Προστασία ενός υδροφορέα: Η νομοθεσία απαιτεί την απομόνωση των υδροφορέων που συναντιόνται με σκοπό να αποφευχθεί τυχόν μόλυνσή τους από τα ρευστά διάτρησης.
- Έλεγχος της γεώτρησης σε πιθανή περίπτωση αιφνίδιας εισροής ρευστών του σχηματισμού (kick): Πρόκειται για ανεπιθύμητα ρευστά τα οποία εισέρχονται εντός της γεώτρησης και το οποίο πρέπει να απομακρύνεται με ασφάλεια χωρίς να ξεπεραστεί η πίεση ρωγμάτωσης στο πέλμα της τελευταίας τσιμεντωμένης σωλήνωσης.
- Απομόνωση προβληματικών σχηματισμών: Δηλαδή ασταθών σχηματισμών και ζωνών που προκαλούν εκτενή απώλεια κυκλοφορίας ρευστού.
- Έλεγχος της πίεσης των ρευστών: Η αύξηση της πυκνότητας του πολφού μπορεί να οδηγήσει σε ορισμένο βάθος στην άσκηση από το ρευστό διάτρησης πίεσης μεγαλύτερης της πίεσης ρωγμάτωσης του σχηματισμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκληθεί ρωγμάτωση του σχηματισμού, απώλεια ρευστού διάτρησης μέσα στον σχηματισμό και επομένως επιπλέον κόστη.
- Οριοθέτηση της παραγωγικής ζώνης: Στους γεωθερμικούς ταμιευτήρες μπορεί να υπάρχουν περισσότερες από μια παραγωγικές ζώνες. Επομένως, σε ορισμένες περιπτώσεις, τοποθετείται σωλήνωση κατά τρόπο που επιτρέπει την παραγωγή από την εκάστοτε επιθυμητή ζώνη.

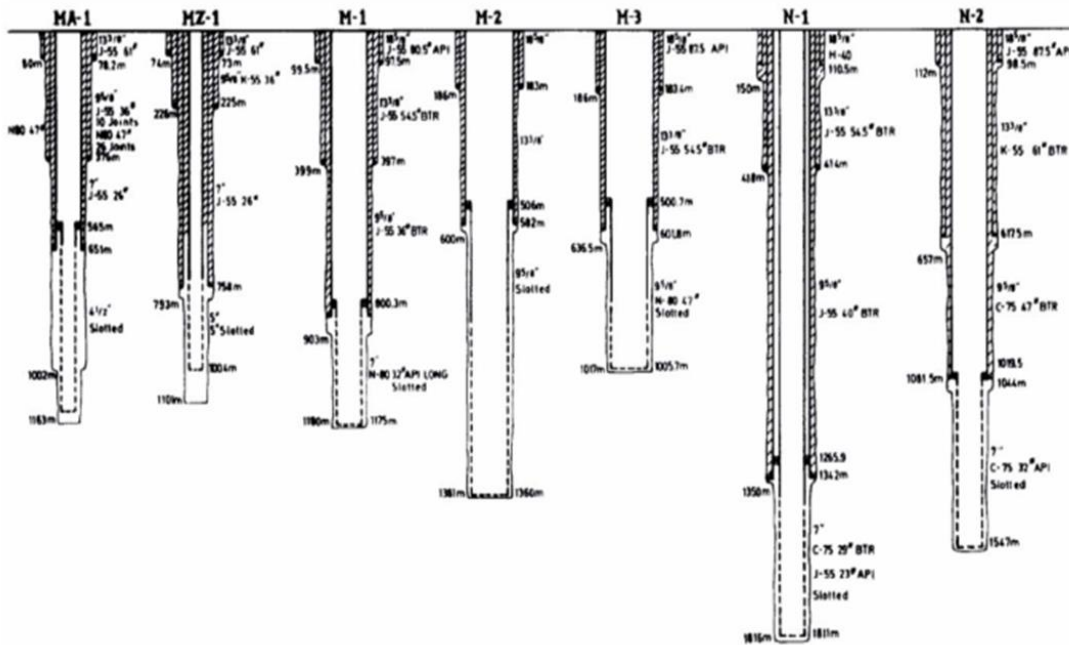
Αφού καθοριστούν τα βάθη έδρασης κάθε στήλης σωλήνωσης (προφίλ της σωλήνωσης), θα πρέπει να επιλεγούν για κάθε τμήμα της γεώτρησης η διάμετρος, το βάρος και η κατηγορία (κατηγορίες) του χάλυβα που θα χρησιμοποιηθεί. Η κατηγορία του χάλυβα αφορά κυρίως στην αντοχή του υλικού κατασκευής σε εφελκυσμό. Ωστόσο, στις γεωθερμικές γεωτρήσεις εξίσου σημαντικό ρόλο έχει και η μεταλλουργική κατεργασία που έχει υποστεί ο χάλυβας προκειμένου να αντέχει τη διάβρωση λόγω του χημισμού των ρευστών που συναντώνται.

Ο σχεδιασμός της σωλήνωσης, συνολικά, έχει σημαντική επιρροή στο συνολικό κόστος της γεώτρησης. Εξαιτίας των μεγάλων διαμέτρων σωληνώσεων, η σωλήνωση και η τσιμέντωση αντιστοιχούν στο 40% του συνολικού κόστους μιας γεώτρησης υψηλής ενθαλπίας και ο περιορισμός του συνολικού αριθμού σωληνώσεων έστω και κατά ένα μπορεί να επιφέρει σημαντική μείωση του κόστους μιας γεωθερμικής γεώτρησης. Όμως, σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να γίνεται στάθμιση του κόστους με τον απαραίτητο συντελεστή ασφαλείας, ώστε να περιορίζεται μεν το κόστος, χωρίς όμως να αυξάνεται σημαντικά το ρίσκο.

Ορισμένα επιπλέον ζητήματα που αφορούν τη σωλήνωση σε γεωθερμικές γεωτρήσεις είναι τα ακόλουθα:

- **Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες:** Τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται στις συμβατικές σωληνώσεις χάνουν την αντοχή τους με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτή η απώλεια αντοχής είναι εμφανέστερη στις υψηλότερες κατηγορίες χάλυβα σωληνώσεων. Για παράδειγμα, η αντοχή σε εφελκυσμό της σωλήνωσης K-55 μειώνεται από 388 MPa στους 25 °C σε 359 MPa στους 371 °C, ενώ η εφελκυστική αντοχή της L-80 μειώνεται από 632 MPa στα 484 MPa, στο ίδιο εύρος θερμοκρασιών.
- **Διαθεσιμότητα σωληνώσεων:** Δεν είναι καθόλου ασυνήθιστο να υπάρχει μεγάλος χρόνος αναμονής για την προμήθεια των απαραίτητων σωληνώσεων, κυρίως όταν απαιτούνται ειδικές κατηγορίες και μη συνηθισμένα μεγέθη. Υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης εναλλακτικών, αλλά με αυτό τον τρόπο αυξάνεται πολύ το ρίσκο ακόμα και το κόστος.
- **Αντοχή στη διάβρωση:** Όλοι σχεδόν οι γεωθερμικοί ταμιευτήρες περιέχουν υδρόθειο (H₂S). Αυτό το γεγονός από μόνο του περιορίζει τις επιλογές στις σωληνώσεις. Οι χάλυβες που πληρούν τις προϋποθέσεις αντοχής σε αυτό ανήκουν στις χαμηλότερες κατηγορίες. Επίσης, σε ταμιευτήρες υψηλής ενθαλπίας παρατηρούνται έντονα διαβρωτικά άλατα.

Σε γενικές γραμμές, στις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας απαιτείται πολλές φορές ιδιαίτερος σχεδιασμός του προγράμματος σωλήνωσης (Εικόνα 4-7), λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών, που καταπονούν τις σωληνώσεις πέρα από το όριο διαρροής τους. Παρόλο που έχουν δημιουργηθεί ειδικά λογισμικά που βοηθούν στην επιλογή της σωλήνωσης, η κρίση του μηχανικού παραμένει πολύ σημαντική. Επομένως, ένας μηχανικός γεωτρήσεων με μεγάλη εμπειρία σε γεωθερμικές γεωτρήσεις είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την υλοποίηση τέτοιων γεωτρήσεων.



Εικόνα 4-7 Ενδεικτικά προγράμματα σωλήνωσης βαθιών γεωθερμικών γεωτρήσεων υψηλής ενθαλπίας στον ελλαδικό χώρο (Βρέλλης, Αρβανίτης, & Μπίμπου - Μπακούλα, 2009)

4.7 ΤΣΙΜΕΝΤΩΣΗ

Οι σωληνώσεις τσιμεντώνονται στη θέση τους με την εισπίεση υπολογισμένου όγκου τσιμέντου, το οποίο εισέρχεται μέσα από τη διατρητική στήλη. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια κατάλληλου εμβόλου το οποίο τοποθετείται πάνω από τον όγκο του τσιμέντου και το οποίο στη συνέχεια ωθείται από το ρευστό διάτρησης που εισπνέζεται από πάνω του, μεταφέροντας έτσι το τσιμέντο στον πυθμένα της γεώτρησης και από εκεί στον δακτύλιο μεταξύ των τοιχωμάτων της γεώτρησης και της σωλήνωσης. Στις γεωθερμικές γεωτρήσεις η τσιμεντώση πρέπει να είναι πλήρης από κάτω μέχρι πάνω.

Η τσιμεντώση εκπληρώνει δύο σημαντικές λειτουργίες. Αρχικά παρέχει στη σωλήνωση μηχανική υποστήριξη στις έντονες θερμοκρασίες και προστατεύει την εξωτερική επιφάνεια των σωληνώσεων από τα διαβρωτικά ρευστά. Για τον σκοπό αυτό απαιτείται η εφαρμογή σωστών τεχνικών τσιμεντώσης με σκοπό την επίτευξη τσιμεντώσης χωρίς κενά και ατέλειες που θα παρέχει ισχυρή επαφή μεταξύ τσιμέντου και σωλήνωσης. Επιπλέον, το τσιμέντο θα πρέπει να είναι ελαφρύ σε βάρος, λόγω των ζωνών απώλειας κυκλοφορίας που συναντώνται συχνά. Εάν ο σχηματισμός είναι αδύνατο να αντέξει την πίεση του ρευστού διάτρησης, τότε είναι απίθανο να αντέξει και την πίεση ενός τσιμέντου κανονικού βάρους ώστε αυτό να ανέλθει και να πληρώσει

όλο το διάκενο μεταξύ γεώτρησης και σωλήνωσης μέχρι την επιφάνεια. Μια λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η χρήση τσιμέντου το οποίο εμπεριέχει αέρα. όμως, ακόμη και με τσιμέντα μικρού βάρους, μπορεί να καταστεί δύσκολη η τσιμέντωση. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται κολάρα που πραγματοποιούν τη διαδικασία σε στάδια ασκώντας έτσι μικρότερη πίεση στον σχηματισμό.

Τα συμβατικά τσιμέντα που χρησιμοποιούνται σε γεωτρήσεις υδρογονανθράκων δεν είναι μόνο πολύ βαριά για τις γεωθερμικές γεωτρήσεις, αλλά είναι επίσης επιρρεπή σε διάβρωση από οξέα και διοξείδιο του άνθρακα, τα οποία υποβαθμίζουν τη σφραγιστική ικανότητα και την αντοχή του τσιμέντου. Ο βασικός τύπος τσιμέντου που χρησιμοποιείται στις γεωθερμικές γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας είναι Portland και κλάσης G, όπως συνιστάται και από το API (American Petroleum Institute). Αναμιγνύεται με πρόσθετα για τον έλεγχο των ιδιοτήτων του. Η πυριτική παιπάλη (silica flour) προστίθεται για να βελτιωθεί η αντοχή του τσιμέντου σε θλίψη, καθιστώντας το πολύ πιο ανθεκτικό στον χρόνο και τις υψηλές θερμοκρασίες.

4.8 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

Ανεξάρτητα από την προϋπόθεση ύπαρξης ή όχι μιας καλής ποιότητας τσιμέντωσης γύρω από τη σωλήνωση, οι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό της ολοκλήρωσης της γεώτρησης αφορούν την παρουσία αλάτων και αν ο παραγωγικός σχηματισμός της γεώτρησης θα παραμείνει μη σωληνωμένος (open hole) ή θα σωληνωθεί με διάτρητο liner.

Ο χημισμός των αλάτων οδηγεί σε επικαθίσεις και εσωτερικά της σωλήνωσης, αλλά και στο παραγωγικό τμήμα, ένα πρόβλημα που συναντάται σε όλες τις γεωθερμικές γεωτρήσεις ανά τον κόσμο και απαιτεί επιπλέον εργασίες για την απομάκρυνσή τους. Σε ακραίες καταστάσεις οι επικαθίσεις μπορούν να μειώσουν το εμβαδόν ροής του γεωθερμικού ρευστού εντός της σωλήνωσης στο μισό σε διάστημα μόλις μερικών μηνών. Οι επικαθίσεις μπορούν να απομακρυνθούν με εισπίεση νερού υπό μεγάλη πίεση, αλλά τις περισσότερες φορές χρειάζεται να διατρηθούν εκ νέου, όταν τα άλατα έχουν καλύψει τον παραγωγικό σχηματισμό. Ιδανικά προτιμάται η πρόληψη και η ανάσχεση των επικαθίσεων αλάτων, παρά η απομάκρυνσή τους, που συνήθως γίνεται με τη χρήση τεχνικών που περιλαμβάνουν χημικές ουσίες.

Όταν τσιμεντώνεται η σωλήνωση είναι μεγάλης σημασίας η αποφυγή παγιδεύσεων νερού μεταξύ σωλήνωσης και τσιμέντου, διότι το νερό θα υποστεί θερμική διαστολή όταν η γεώτρηση περάσει στη φάση παραγωγής και θα αναπτυχθούν σε αυτό μεγάλες θερμοκρασίες. Είναι σχεδόν βέβαιο σε τέτοιες περιπτώσεις ότι η σωλήνωση θα αστοχήσει. Τέτοιες αστοχίες είναι πολύ σοβαρές δεδομένου ότι θα επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τον ρυθμό παραγωγής γεωθερμικού ρευστού και την ασφάλεια του φρέατος.

Τέλος, είναι σημαντική η απόφαση για το αν ο παραγωγικός σχηματισμός είναι αρκετά συνεκτικός και ικανός να αφεθεί χωρίς σωλήνωση (open hole completion) ή να σωληνωθεί με χρήση διάτρητου liner για να αποφευχθούν καταρρεύσεις των τοιχωμάτων του ή εμφράξεις του κατώτατου μέρους της γεώτρησης. Η λήψη της σωστής απόφασης βασίζεται στην ανάλυση και μελέτη των γεωλογικών δειγμάτων (πυρήνων) που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια όρυξης της γεώτρησης, ή σε ειδικές διαγραφίες αν είναι διαθέσιμες. Τις περισσότερες φορές η επιλογή βασίζεται σε δεδομένα που υπάρχουν από άλλες γεωτρήσεις σε όμοιους ταμιευτήρες.

Το τελευταίο στάδιο ολοκλήρωσης της γεώτρησης για τη μετατροπή της σε παραγωγικό σύστημα αποτελεί η εγκατάσταση στην κορυφή της γεώτρησης του εξοπλισμού ο οποίος συνδέει τον πυθμένα της με τις εγκαταστάσεις διαχωρισμού και επεξεργασίας στην επιφάνεια και είναι γνωστός με το όνομα Christmas tree. Ο εξοπλισμός αυτός αποτελεί το σύστημα ελέγχου και ρύθμισης της ροής των γεωθερμικών ρευστών και αποτελείται κυρίως από βαλβίδες, μανόμετρα, όργανα ρύθμισης παροχής και ροόμετρα.

4.9 ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

Οι γεωθερμικοί ταμιευτήρες συχνά διεγείρονται πέριξ των γεωτρήσεων με σκοπό να αυξηθεί η παραγωγικότητά τους. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται στις γεωθερμικές γεωτρήσεις και μπορούν να διακριθούν με βάση την έκταση της επιρροής τους στον παραγωγικό σχηματισμό. Αυτές που αφορούν μια περιοχή μερικών δεκάδων μέτρων μακριά από το φρέαρ είναι η χρήση οξέων και η θερμική ρωγμάτωση. Από την άλλη, η μοναδική τεχνική που εφαρμόζεται και μπορεί να επηρεάσει μια περιοχή αρκετών εκατοντάδων μέτρων μακριά από το φρέαρ είναι η υδραυλική ρωγμάτωση.

- **Υδραυλική ρωγμάτωση:** Χρησιμοποιείται ρευστό που έχει υποστεί κατάλληλη επεξεργασία για να αυξηθεί το ιξώδες του. Το ρευστό εισπνέζεται μέσα στη γεώτρηση, διεισδύει στις ρωγμές και τους πόρους του παραγωγικού σχηματισμού και διευρύνει και επιμηκύνει τις ρωγματώσεις και με κατάλληλα πρόσθετα τις διατηρεί ανοιχτές κατά το δυνατόν.
- **Θερμική ρωγμάτωση:** Επιτυγχάνεται είτε αυξάνοντας τη διαπερατότητα γύρω από το φρέαρ, η οποία μπορεί να έχει ελαττωθεί από τις εργασίες όρυξης, είτε ανοίγοντας υδραυλικές διόδους σε φυσικά διαπερατές ζώνες, οι οποίες δεν έχουν τμηθεί από τη γεώτρηση. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε με το άνοιγμα ρωγμών που προϋπήρχαν, αλλά πιθανότατα σφραγίστηκαν ή με τη δημιουργία νέων ρωγμών μέσω άσκησης θερμικών τάσεων με εισπίεση κρύου νερού σε ταμιευτήρες υψηλών θερμοκρασιών προκαλώντας θερμική συστολή στο πέτρωμα οδηγώντας έτσι μεγάλες αλλαγές στη διαπερατότητα.

- Χρήση οξέων: Χρησιμοποιείται υδροφθορικό ή υδροχλωρικό οξύ ή/και μίγμα των δύο. Στο οξύ προστίθενται και ειδικά πρόσθετα για τον περιορισμό της διάβρωσης των χαλύβδινων εξαρτημάτων της γεώτρησης. Στις γεωθερμικές γεωτρήσεις η χρήση των οξέων γίνεται για τη ενίσχυση των ρωγμών, αλλά και περιστασιακά για την απομάκρυνση των επικαθίσεων.

4.10 ΚΟΣΤΟΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

Ο στόχος των συγκεκριμένων γεωτρήσεων δεν αφορά μόνο την πρόσβαση στον ταμιευτήρα με τον πιο ασφαλή τρόπο, αλλά και με το λιγότερο δυνατό κόστος. Οι συνέπειες της μείωσης του κόστους γεώτρησης είναι πολύ σημαντικές για την εκμετάλλευση του εκάστοτε γεωθερμικού ρευστού, διότι η όρυξη και η ολοκλήρωση της γεώτρησης αντιστοιχούν περίπου στις μισές δαπάνες που απαιτούνται για το εγχείρημα αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας. Δύο είναι οι βασικοί λόγοι που εκτοξεύουν το κόστος αυτών των γεωτρήσεων:

- Οι γεωθερμικοί ταμιευτήρες, οι οποίοι βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, περιέχουν πολύ διαβρωτικά ρευστά σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που οδηγεί στην επιστράτευση ειδικών τεχνικών και εξοπλισμού για την όρυξη των γεωτρήσεων σε τόσο δύσκολες συνθήκες ταμιευτήρα.
- Επίσης, επειδή το παραγόμενο ρευστό (θερμό νερό) είναι από τη φύση του χαμηλής ενεργειακής αξίας, απαιτούνται μεγάλες παροχές και επομένως μεγάλες διαμέτροι σωληνώσεων στις παραγωγικές γεωτρήσεις.

Οι γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας πραγματοποιούνται για την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας για θέρμανση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαδικασία όρυξης βαθιών έως πολύ βαθιών γεωτρήσεων σε πεδία υψηλής ενθαλπίας αποτελεί τον πιο ακριβό τύπο γεωθερμικής γεώτρησης. Είναι προφανές λοιπόν ότι το κόστος της όρυξης έχει μεγάλο αντίκτυπο στον οικονομικό σχεδιασμό όλου του γεωθερμικού έργου και επομένως πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη σημασία σε κάθε παράμετρο που μπορεί να επηρεάσει το τελικό κόστος.

Κατά την υλοποίηση μιας γεώτρησης τέτοιου τύπου ο σωστός σχεδιασμός της έχει σημαντική επίδραση στο συνολικό κόστος. Η εμπειρία από την πετρελαϊκή βιομηχανία καταδεικνύει την άμεση σχέση μεταξύ του συνολικού όγκου διατρυθέντος πετρώματος και του τελικού κόστους μιας γεώτρησης. Στις γεωθερμικές γεωτρήσεις αυτή η σχέση μεταφράζεται στην επιρροή της διαμέτρου της γεώτρησης στο συνολικό κόστος. Αυτό αναδεικνύει τον κομβικό ρόλο του σχεδιασμού της σωλήνωσης. Γενικά οι διαμέτροι των γεωθερμικών γεωτρήσεων μεγάλου βάθους είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των γεωτρήσεων υδρογονανθράκων στα αντίστοιχα βάθη. Η αιτία είναι η ανάγκη για μεγαλύτερες παροχές γεωθερμικού ρευστού ώστε

το γεωθερμικό έργο να είναι οικονομικά βιώσιμο, δεδομένου ότι το νερό που είναι το παραγόμενο ρευστό (είτε σε υγρή, είτε σε αέρια μορφή) έχει συγκριτικά πολύ μικρότερη οικονομική αξία από κάθε τύπο παραγόμενων υδρογονανθράκων.

Επιπλέον, δεν είναι σπάνιες οι περιπτώσεις όπου οι γεωθερμικές γεωτρήσεις να προσεγγίσουν ιδιαίτερους στόχους, όπως ρήγματα. Καθώς μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να γίνει είτε με κατακόρυφα φρέατα, είτε με κεκλιμένα προκύπτουν δυνητικά εναλλακτικές προσεγγίσεις. Συνεπώς, επιβάλλεται η ενδελεχής μελέτη και ανάλυση όλων των εναλλακτικών που μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε περίπτωση, έτσι ώστε να αναδειχθεί η ιδανικότερη από άποψη ασφάλειας αλλά και κόστους.

Πίνακας 4-1 Μέσα κόστη παραγωγικών γεωθερμικών γεωτρήσεων μεγάλης διαμέτρου και μεγάλου βάθους (Βρέλλης, Αρβανίτης, & Μπίμπου - Μπακούλα, 2009)

Βάθος (σε m)	Κόστος (€/m)	Κόστος (€/γεώτρηση)
1.000	500 - 600	500.000 - 600.000
2.500	700 - 800	1.750.000 - 2.000.000

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη των γεωλογικών στρωμάτων που φέρουν νερό (υπόγειοι υδροφορείς) είναι σημαντική πριν από την εκτέλεση οποιουδήποτε έργου υδροληψίας από αυτούς. Στο παρόν Κεφάλαιο εξετάζονται συνοπτικά οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία αυτών των σχηματισμών και την αποδοτικότητα των έργων υδροληψίας.

5.2 ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΝΕΡΟΥ

Σχεδόν όλο το υπεδafικό νερό που τροφοδοτεί τους υπόγειους υδροφορείς προέρχεται από το νερό που πέφτει στη επιφάνεια της γης μέσω των βροχοπτώσεων και του χιονιού (μετεωρικό νερό). Ένα τμήμα αυτού εμπλουτίζει τους ποταμούς και τις λίμνες (επιφανειακά νερά) και το υπόλοιπο κατεισδύει στο έδαφος. Από το νερό που κατεισδύει στο έδαφος, ένα μέρος μόνο τροφοδοτεί (recharges) τους υπόγειους υδροφορείς. Το υπόλοιπο είτε χάνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής (εξάτμιση του νερού που συγκρατείται στις ανώτερες εδαφικές στρώσεις ή ανέρχεται μέσω της τριχοειδούς ανύψωσης, απορρόφηση από τα φυτά κ.λπ.), είτε χάνεται κινούμενο προς βαθύτερους υδροφόρους ορίζοντες, είτε συγκρατείται στην ανώτερη μερικώς κορεσμένη ζώνη για να αντικαταστήσει προηγούμενες απώλειες στη ζώνη αυτή λόγω εξατμισοδιαπνοής. Η έννοια του κορεσμού ενός υπεδafικού σχηματισμού περιγράφει το ποσοστό των διάκενων εντός της στερεής μάζας του σχηματισμού (πόροι, κενά, ρωγμές) που πληρώνονται από ένα ρευστό, στη συγκεκριμένη περίπτωση το νερό.

Από πλευράς ευχέρειας στη διήθηση του υπόγειου νερού (δηλαδή ευχέρειας στην κίνηση του νερού εντός του εδάφους) οι γεωλογικοί σχηματισμοί, όταν βρίσκονται κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: (Καββαδάς, 2013)

1. Υδροφορείς (aquifers). Πρόκειται για αρκετά κορεσμένους και διαπερατούς από νερό γεωλογικούς σχηματισμούς που επιτρέπουν την ευχερή διήθηση του υπόγειου νερού διαμέσου της μάζας τους. Πρόκειται, δηλαδή, για τους σχηματισμούς που παρουσιάζουν υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα. Είναι προφανές ότι η απαίτηση “υψηλής” υδραυλικής αγωγιμότητας περιγράφει πρακτικά τη δυνατότητα εκμετάλλευσης ενός υπόγειου υδροφορέα. Συνεπώς, ως υπόγειοι υδροφορείς ορίζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επιτρέπουν την εκμετάλλευση του υπόγειου νερού που διακινείται διαμέσου της μάζας τους. Οι πιο συνηθισμένοι υδροφορείς αποτελούνται από μη συνεκτικές άμμους και χαλίκια. όμως, μπορούν επίσης να χαρακτηρισθούν ως υπόγειοι υδροφορείς και

διαπερατά ιζηματογενή πετρώματα, όπως ψαμμίτες και ασβεστόλιθοι, καθώς και έντονα κερματισμένα ηφαιστειακά και κρυσταλλικά πετρώματα.

2. Σχηματισμοί περιορισμένης υδροφορίας (aquitards). Επιτρέπουν περιορισμένη μόνο κίνηση του υπόγειου νερού διαμέσου της μάζας τους και, συνεπώς, δεν προσφέρονται πάντοτε για την εκμετάλλευση του υπόγειου νερού που περιέχεται σε αυτούς. Δηλαδή, δεν είναι αρκετά διαπερατοί ώστε να μεταφέρουν σημαντικές ποσότητες νερού. Ανάλογα με την παραγωγική τους ικανότητα (παροχή και χρονικό διάστημα αποδοτικής λειτουργίας) αξιολογούνται ως προς τη δυνατότητα εκτέλεσης έργων υδροληψίας από αυτούς. Οι συνηθέστεροι γεωλογικοί σχηματισμοί περιορισμένης υδροφορίας περιλαμβάνουν άργιλους και σχιστόλιθους.
3. Στεγανοί σχηματισμοί (aquicludes). Είναι αδιαπέρατοι γεωλογικοί σχηματισμοί που πρακτικά δεν επιτρέπουν την κίνηση του υπόγειου νερού διαμέσου της μάζας τους και συνεπώς δεν προσφέρονται καθόλου για την εκμετάλλευση του υπόγειου νερού. Τυπικοί στεγανοί σχηματισμοί είναι τα συμπαγή και μη ρωγματοωμένα μαγματικά ή μεταμορφωμένα πετρώματα.

5.2.1 Τύποι υπόγειων υδροφορέων

Ανάλογα με την κίνηση του νερού εντός του υδροφορέα, την οριοθέτηση και την επικοινωνία του με το γεωλογικό περιβάλλον, οι υπόγειοι υδροφορείς διακρίνονται σε: (Kruseman & de Ridder, 2000)

1. Υδροφορείς ελεύθερης ροής (unconfined aquifers)

Ένας υδροφορέας ελεύθερης ροής (water table aquifer – υδροφόρος ορίζοντας), οριοθετείται από την κάτω μεριά του από έναν στεγανό σχηματισμό (aquiclude), ενώ ταυτόχρονα δεν περιορίζεται από κάποιο γεωλογικό στρώμα από την πάνω μεριά του. Το άνω όριο του ταυτίζεται με τη φρεάτιο στάθμη του νερού (water table), η οποία ανεβοκατεβαίνει ελεύθερα. Το νερό σε μια γεώτρηση που διαπερνά έναν τέτοιο υδροφορέα διαθέτει ελεύθερη στάθμη, δηλαδή βρίσκεται σε πίεση ίση με την ατμοσφαιρική και δεν ανέρχεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

2. Υδροφορείς εγκιβωτισμένης ροής (confined aquifers)

Ένας υδροφορέας εγκιβωτισμένης ροής οριοθετείται πάνω και κάτω από στεγανούς σχηματισμούς και δεν διαθέτει φρεάτιο στάθμη. Εντός αυτού του υδροφορέα η πίεση του νερού είναι συνήθως υψηλότερη της ατμοσφαιρικής, οπότε αν διανοιχθεί γεώτρηση άντλησης εντός του, η ελεύθερη στάθμη του νερού σε αυτό θα βρίσκεται πάνω από άνω όριο του υδροφορέα ή

ακόμα και πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (αρτεσιανισμός). Οπότε σε αυτή την περίπτωση μιλάμε για αρτεσιανή γεώτρηση ελεύθερης ροής.

3. Υδροφορείς ημι-εγκιβωτισμένης ροής (leaky aquifers)

Ένας υδροφορέας ημι-εγκιβωτισμένης ροής είτε οριοθετείται και από πάνω και από κάτω από σχηματισμούς περιορισμένης υδροφορίας (aquitards), είτε το ένα του όριο είναι σχηματισμός περιορισμένης υδροφορίας (aquitard) και το άλλο στεγανός σχηματισμός (aquiclude). Το νερό σε αυτή την περίπτωση είναι ελεύθερο να μετακινείται μέσω των σχηματισμών περιορισμένης υδροφορίας (aquitards), είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω. Αν ο υδροφορέας βρίσκεται σε υδραυλική ισορροπία, το ύψος του νερού εντός μιας γεώτρησης άντλησης μπορεί να ταυτιστεί με τον υδροφόρο ορίζοντα. Το ύψος του νερού μπορεί επίσης να βρίσκεται πάνω ή κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης ή αποφόρτισης του υδροφορέα.

5.3 ΡΟΗ ΕΝΤΟΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ – ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ DARCY

Υπάρχουν δύο καταστάσεις που περιγράφουν τη ροή εντός των υπόγειων ταμιευτήρων κατά την άντληση ρευστών από αυτούς μέσω γεωτρήσεων: η κατάσταση σταθερής ροής και η κατάσταση μη σταθερής ροής.

Η **κατάσταση σταθερής ροής** είναι ανεξάρτητη του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι το επίπεδο του νερού σε μια γεώτρηση άντλησης και στους πιεζομετρητές⁵ που την περιβάλλουν δεν αλλάζει με την πάροδο του χρόνου. Η κατάσταση σταθερής ροής συμβαίνει, για παράδειγμα, όταν ο υδροφορέας από τον οποίο γίνεται άντληση επαναφορτίζεται από κάποια εξωτερική πηγή, η οποία μπορεί να είναι η βροχή, η ροή από σχηματισμούς περιορισμένης ροής (aquitards) από ανώτερους ή κατώτερους υδροφορείς. Στην πράξη λέγεται ότι η κατάσταση σταθερής ροής επιτυγχάνεται αν οι αλλαγές στο επίπεδο του νερού εντός της γεώτρησης και στους πιεζομετρητές είναι τόσο μικρές που δεν λαμβάνονται υπόψη.

Η κατάσταση μη σταθερής ροής λαμβάνει χώρα από τη στιγμή που ξεκινάει η άντληση μέχρι να επιτευχθεί κατάσταση σταθερής ροής. Συνεπώς, αν ένας υδροφορέας εγκιβωτισμένης ροής με άπειρη οριζόντια εξάπλωση και σταθερό πάχος αντλείται με σταθερό ρυθμό, θα παρουσιάζει συνεχώς κατάσταση μη σταθερής ροής. Στην πράξη, η κατάσταση ροής θεωρείται ως μη σταθερή όσο οι αλλαγές στο επίπεδο του νερού εντός της γεώτρησης και των πιεζομετρητών παραμένουν μετρήσιμες (Kruseman & de Ridder, 2000). Ο Darcy ύστερα από αρκετές

⁵ Έχουν τη μορφή σωλήνων οι οποίοι τοποθετούνται εντός του εδάφους, σε βάθη κάτω από το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα και εκτείνονται μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της πίεσης του υπόγειου νερού.

πειραματικές μελέτες διατύπωσε τον νόμο του που περιγράφει τη ροή του νερού εντός ενός πορώδους μέσου, δηλαδή εντός των υπόγειων ταμιευτήρων, έναν νόμο που βοηθάει να εκτιμήσουμε τις δυνατότητες ενός υδροφορέα.

Πιο συγκεκριμένα, ο νόμος του Darcy αναφέρει ότι η ταχύτητα ροής (v) εντός ενός πορώδους μέσου είναι ανάλογη του υδραυλικού φορτίου και αντιστρόφως ανάλογη του μήκους ροής και γράφεται:

$$v = \frac{Q}{A} = K \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Όπου:

$v = Q/A$, ονομάζεται **ταχύτητα Darcy** ή **ειδική παροχή** και αφορά τον λόγο της παροχής Q προς το εμβαδόν A (όγκος νερού που διέρχεται από την κάθετη διατομή του υδροφορέα)

Δh είναι το υδραυλικό φορτίο, το οποίο ορίζεται ως $\Delta h = h_2 - h_1$ (διαφορά του υδραυλικού φορτίου που μετράται σε δύο διαφορετικά σημεία 1 και 2)

K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του πορώδους μέσου.

Ο λόγος $\Delta h/\Delta l$ ονομάζεται **υδραυλική κλίση** και ο παραπάνω τύπος μπορεί να γραφτεί και υπό την μορφή:

$$Q = K \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \cdot A$$

Ο νόμος του Darcy ισχύει μόνο σε καταστάσεις που υπάρχει στρωτή ροή και όχι τυρβώδης ροή. Ο αριθμός Reynolds (N_R) είναι ένας αδιάστατος αριθμός που ορίζεται ως, ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις ιξώδους και ποσοτικοποιεί την μεταξύ τους σημαντικότητα για μια συγκεκριμένη κατάσταση ροής, δηλαδή αν μια ροή είναι στρωτή η τυρβώδης και ορίζεται ως εξής:

$$N_R = \rho \cdot \frac{v \cdot d}{\mu}$$

Όπου:

v είναι η ειδική παροχή ή ταχύτητα Darcy όπως προαναφέρθηκε

ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού (kg/m)

d αντιπροσωπεύει τη χαρακτηριστική διάσταση του πορώδους μέσου, η οποία συνήθως λαμβάνεται ως η μέση διάμετρος των πόρων (m)

μ είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού (Pa · s ή N · s / m ή kg / (m · s))

Η στρωτή ροή προκύπτει για χαμηλούς αριθμούς Reynolds, όπου είναι κυρίαρχες οι δυνάμεις ιξώδους και χαρακτηρίζεται από ομαλή, σταθερή κίνηση του ρευστού, ενώ η τυρβώδης ροή προκύπτει για υψηλούς αριθμούς Reynolds, όπου είναι κυρίαρχες οι δυνάμεις αδράνειας, οι οποίες παράγουν χαοτικές δίνες και άλλες αστάθειες στη ροή. Πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι ο νόμος του Darcy ισχύει όταν ο αριθμός Reynolds έχει τιμή $N_R < 1$, ενώ δεν παρουσιάζει σημαντικά σφάλματα για τιμές μέχρι $N_R = 10$. (Kruseman & de Ridder, 2000)

5.3.1 Υδραυλικές παράμετροι των υπόγειων υδροφορέων

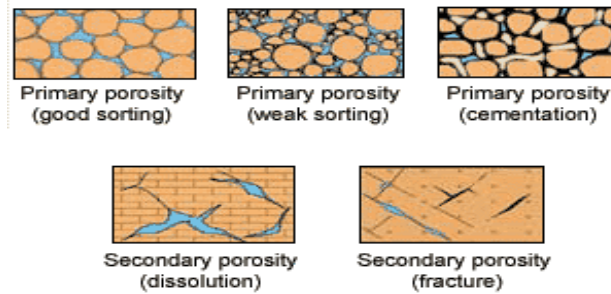
Για την έρευνα και αξιολόγηση των υπόγειων υδροφορέων ως προς τη δυνατότητα να παράγουν νερό, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων και παραμέτρων του εκάστοτε υδροφορέα. Στη συνέχεια περιγράφονται ορισμένες υδραυλικές παράμετροι ενός υπόγειου υδροφορέα, οι οποίες αφορούν το μέγεθος και τη χωρητικότητά του (πορώδες, αποθηκευτικότητα) και την ταχύτητα που το ρευστό δύναται να αναπτύξει εντός του (αγωγιμότητα, μεταβιβαστικότητα).

5.3.1.1 Πορώδες

Η κίνηση του υπόγειου νερού εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά των υπεδαφικών σχηματισμών. Πιο συγκεκριμένα, εξαρτάται από τα κενά τα οποία είτε σχηματίζονται μεταξύ των κόκκων του σχηματισμού (πρωτεύον πορώδες), είτε αναπτύσσονται με τη μορφή ρωγμών, διακλάσεων, ρηγματώσεων, καρστικών εγκοίλων κ.λπ. εντός της μάζας των σχηματισμών (δευτερεύον πορώδες) (Εικόνα 5-1).

Ποσοτικά, το πορώδες (n) εκφράζεται ως το ποσοστό των κενών (V_v) στο σύνολο του όγκου (V) του πετρώματος. Οι τιμές του πορώδους στους υπεδαφικούς σχηματισμούς ποικίλουν σημαντικά και κυμαίνονται μεταξύ 0-5% σε υγιείς κρυσταλλικούς σχηματισμούς με μικρό βαθμό κερματισμού έως και 45-50% σε αργιλικούς σχηματισμούς.

Το ενεργό πορώδες εκφράζεται ως το ποσοστό των κενών διαμέσου των οποίων μπορεί να κινηθεί το υπόγειο νερό ως προς το σύνολο του όγκου του εδάφους. Η διαφορά μεταξύ των δυο τύπων πορώδους που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι ότι οι πόροι που είναι απομονωμένοι και δεν επικοινωνούν μεταξύ τους δεν αποτελούν δίοδο κίνησης του υπόγειου νερού και δεν συνεισφέρουν στο ενεργό πορώδες.



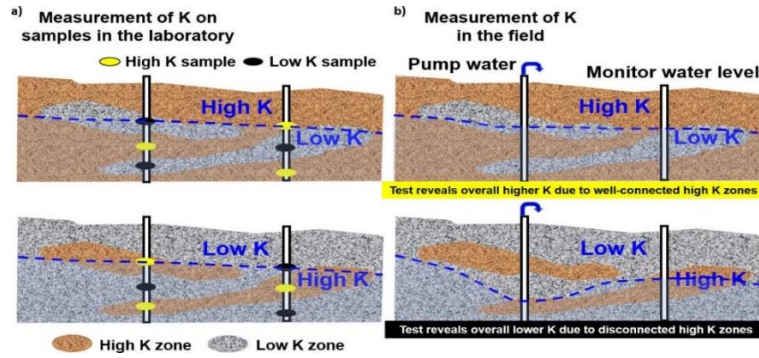
Εικόνα 5-1 Σχηματική αναπαράσταση τριών τύπων πρωτεύοντος πορώδους (πάνω σειρά) και δύο τύπων δευτερεύοντος πορώδους (κάτω σειρά) (Πηγή: https://www-ig.unil.ch/geophysa/c_res11a.htm)

5.3.1.2 Υδραυλική αγωγιμότητα (K)

Η υδραυλική αγωγιμότητα ορίζεται ως ο όγκος του νερού που θα κινηθεί μέσα σε ένα πορώδες μέσο σε μοναδιαίο χρόνο και μοναδιαία υδραυλική κλίση διαμέσου μιας μοναδιαίας επιφάνειας κάθετης στη διεύθυνση της ροής. Είναι η σταθερά αναλογίας στον νόμο του Darcy. Η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα του ρευστού που ρέει και το πλάτος των ρωγμών που υφίστανται σε ένα πέτρωμα και διαμέσου αυτών διακινείται το ρευστό. Γενικά, οι γεωλογικοί σχηματισμοί ανάλογα με την υδραυλική τους αγωγιμότητα, διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Πολύ υδροπερατοί, $K \geq 10^{-1}$ m/s
- Υδροπερατοί. $10^{-6} < K < 10^{-1}$ m/s
- Λίγο υδροπερατοί, $10^{-9} < K < 10^{-6}$ m/s
- Πρακτικά στεγανοί, $K \leq 10^{-9}$ m/s

Ο προσδιορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι σημαντικός, διότι αν δεν διαθέτουμε δεδομένα της δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν ούτε απλοί αναλυτικοί υπολογισμοί, αλλά ούτε και πιο σύνθετες προσομοιώσεις της υπόγειας ροής του νερού μέσω κατάλληλων λογισμικών. Ως αποτέλεσμα, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι με σκοπό τον χαρακτηρισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας εντός των υπόγειων σχηματισμών. Οι μέθοδοι αυτοί δύναται να είναι είτε εργαστηριακές είτε εμπειρικές, οι οποίες παρέχουν μεν μια γενική εικόνα του πεδίου, αλλά δεν μπορούν να πραγματοποιήσουν επακριβή πρόβλεψη για ολόκληρο το σύστημα του υπόγειου νερού. Συνήθως, οι μετρήσεις στο πεδίο περιλαμβάνουν άντληση μιας γεώτρησης με ταυτόχρονη παρατήρηση του επιπέδου του νερού στις γειτονικές γεωτρήσεις. Αυτές οι μετρήσεις πεδίου παρέχουν τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας που βοηθάνε στην αναγνώριση διασυνδεδεμένων ζωνών μεγάλης και μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας (Εικόνα 5-2).



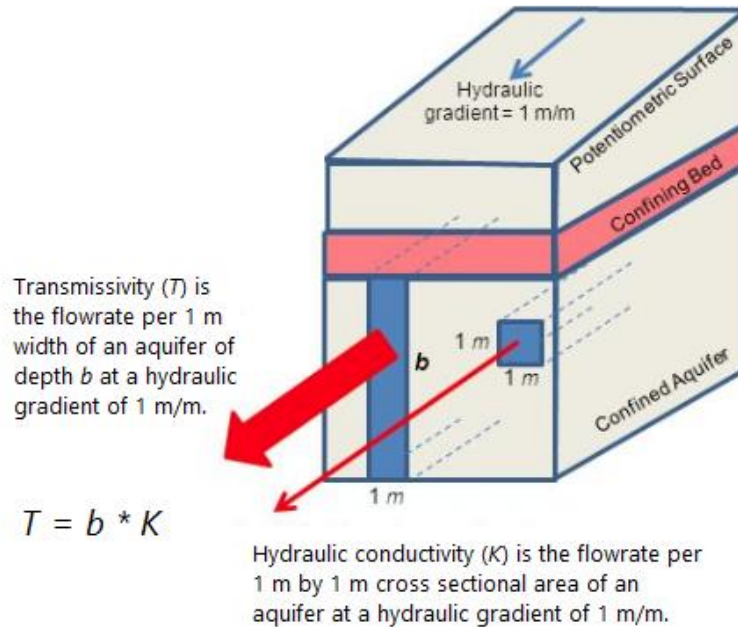
Εικόνα 5-2 Μετρήσεις τιμών K από α) μικρά δείγματα εργαστηρίου, που παρέχουν πληροφορίες για την έκταση και την κατανομή ζωνών υψηλής και χαμηλής K σε εξεταζόμενο πεδίο, αλλά δεν παρέχουν δεδομένα για τη διασύνδεση των τμημάτων στα οποία υφίσταται υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα και β) μετρήσεις πεδίου με μεγαλύτερο όγκο δείγματος που καταφέρνουν να αναδείξουν το συνολικό μέγεθος της K . Πολύ σημαντικό για την ανάπτυξη των υδροφορέων καθώς γίνεται αντιληπτή η συμπεριφορά όλου του συστήματος κατά την άντληση. (Woessner & Poeter, 2020)

5.3.1.3 Μεταβιβαστικότητα (Transmissivity)

Αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές υδραυλικές παραμέτρους για έναν υδροφόρο ορίζοντα καθώς αντιπροσωπεύει την ικανότητά να μεταβιβάζει νερό, ελέγχοντας επομένως τη διέλευση του νερού μέσα σε αυτόν. Η μεταβιβαστικότητα T ενός υδροφόρου ορίζοντα ορίζεται ως το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) επί το πάχος του υδροφόρου ορίζοντα (b) (Εικόνα 5-3):

$$T = b \cdot K$$

Πρόκειται για ιδιότητα που εν πολλοίς καθορίζει τη συνολική απόδοση ενός υπόγειου υδροφορέα. Σημειώνεται ότι, καθώς η υδραυλική αγωγιμότητα και το πάχος ενός υδροφόρου ορίζοντα δεν είναι σταθερά σε όλη την έκτασή του και δύναται να μεταβάλλονται από περιοχή σε περιοχή, και η τιμή της μεταβιβαστικότητας δύναται να μεταβάλλεται εντός ενός υδροφορέα.



Εικόνα 5-3 Σχηματική αναπαράσταση του ορισμού της μεταβιαστικότητας σε σχέση με την υδραυλική αγωγιμότητα σε ένα τμήμα υδροφορέα εγκλιωτισμένης ροής. (Πηγή: <https://www.enviro.wiki/index.php?title=File:Kirkman1w2Fig3.png>)

5.3.1.4 Αποθηκευτικότητα (Storability)

Η αποθηκευτικότητα ή συντελεστής εναποθήκευσης ή υδροχωρητικότητα (S) ορίζεται ως ο όγκος νερού που ένας υδροφορέας μπορεί να αποθηκεύσει σε ή να αποδεσμεύσει από ένα κατακόρυφο πρίσμα με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου. Συνεπώς, αν ΔV είναι ο όγκος νερού που αποθηκεύεται (ή αποδεσμεύεται) από μοναδιαία οριζόντια επιφάνεια A , εξαιτίας μοναδιαίας αύξησης (ή μείωσης) φορτίου κατά Δh , η αποθηκευτικότητα S δίνεται από τη σχέση:

$$S = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta h}$$

Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό, αν ο ρυθμός ταπείνωσης της στάθμης ($\Delta h/\Delta t$) σε έναν υδροφορέα επιφάνειας A , ο οποίος έχει αποθηκευτικότητα S , για άντληση με παροχή Q , χωρίς να λαμβάνει χώρα εμπλουτισμός του υδροφορέα (αναπλήρωση του νερού που αντλείται), δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{Q}{S \cdot A}$$

Η αποθηκευτικότητα είναι αδιάστατος αριθμός και στους ελεύθερους υδροφορείς λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 1% έως 30%, ενώ στους υπό πίεση από 0,0001% έως 0,5%. Η διαφορά αυτή οφείλεται στον διαφορετικό μηχανισμό αποδέσμευσης νερού από αυτούς τους τύπους υδροφορέων (Εικόνα 5-4). Στους υπό πίεση υδροφορείς η αποδέσμευση ή η αποθήκευση νερού οφείλεται σε διόγκωση του νερού και συμπίεση του υδροφορέα και, συνεπώς, η αποθηκευτικότητα είναι συνάρτηση της ελαστικότητας του υδροφορέα και της συμπιεστότητας του περιεχόμενου σε αυτόν υπόγειου νερού. Αυτό, πρακτικά σημαίνει ότι για να παρθούν αξιόλογες ποσότητες ρευστών από έναν υδροφορέα υπό πίεση απαιτείται σημαντική πτώση της πιεζομετρικής στάθμης σε μεγάλη έκταση του υδροφορέα.

Η αποθηκευτικότητα S στους ελεύθερους υδροφορείς ταυτίζεται με το ενεργό πορώδες, ενώ για τους υπό πίεση υδροφορείς ισχύει (Βουδούρης, 2006):

$$S = \gamma \cdot b \cdot (\alpha + \beta \cdot n)$$

Όπου:

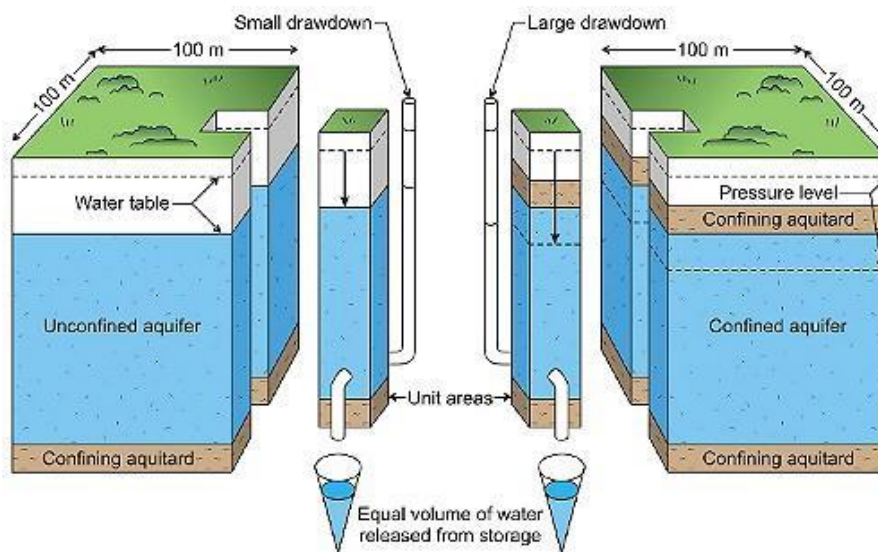
γ = το ειδικό βάρος του νερού,

b = το πάχος του υδροφορέα,

n = το ενεργό πορώδες,

α = ο συντελεστής συμπιεστότητας του υδροφορέα, και

β = ο συντελεστής συμπιεστότητας του νερού



Εικόνα 5-4 Συμπεριφορά ενός υδροφορέα ελεύθερης ροής (αριστερά) και ενός υδροφορέα εγκλιωτισμένης ροής (δεξιά) ύστερα από την εξαγωγή του ίδιου όγκου νερού και από τους δύο. (Πηγή: <http://www.connectedwaters.unsw.edu.au/schools-resources/fact-sheets/groundwater-levels-and-aquifer-storage>)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι υδρογεωτρήσεις είναι οι γεωτρήσεις που ορύσσονται για την εκμετάλλευση του υπόγειου νερού. Ανάλογα με το γεωλογικό περιβάλλον, διανοίγονται με διάφορες μεθόδους, επενδύονται με χαλύβδινους σωλήνες (σωλήνωση), όπως και οι γεωθερμικές γεωτρήσεις που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, ολοκληρώνονται και αναπτύσσονται με κατάλληλες τεχνικές με στόχο η γεώτρηση να λειτουργήσει για πολλά χρόνια. Η ολοκλήρωση και ανάπτυξη των υδρογεωτρήσεων γίνεται κατά τρόπο που εξασφαλίζει την ασφαλή εγκατάσταση του εξοπλισμού παραγωγής (αντλίες κ.λπ.), την ομαλή ροή νερού, χωρίς αιωρούμενα στερεά, από το υπέδαφος ως την επιφάνεια, με κατάλληλη παροχή, ενώ, παράλληλα, αποτρέπεται η ανάπτυξη μικροοργανισμών υπεύθυνων για την καταστροφή των υλικών με την πάροδο του χρόνου.

Η εκτέλεση των υδρογεωτρήσεων αναλαμβάνεται από εξειδικευμένο εργολάβο και στους όρους της σχετικής σύμβασης καταγράφονται και τα στάδια κατασκευής της υδρογεώτρησης τα οποία οπωσδήποτε περιλαμβάνουν:

- Σαφή ορισμό της θέσης της γεώτρησης & ημερομηνίες έναρξης και λήξης των εργασιών.
- Προβλεπόμενο βάθος στο οποίο θα φτάσει η όρυξη και τελική διάμετρος αυτής.
- Διάμετρος και τύπος σωλήνων επένδυσης της γεώτρησης (σωλήνωσης) και φίλτρων.
- Κατακορυφότητα της γεώτρησης, η οποία είναι σημαντική για την τοποθέτηση και ασφαλή λειτουργία της αντλίας (πομόνας).
- Είδος γεωτρυπάνου, ανάλογα με τη μέθοδο όρυξης της γεώτρησης και τύποι ρευστών διάτρησης.
- Είδος χαλίκων για το χαλικόφιλτρο, μέθοδος χαλίκωσης και τσιμεντώσης αν απαιτούνται.
- Μέθοδος ανάπτυξης της γεώτρησης.

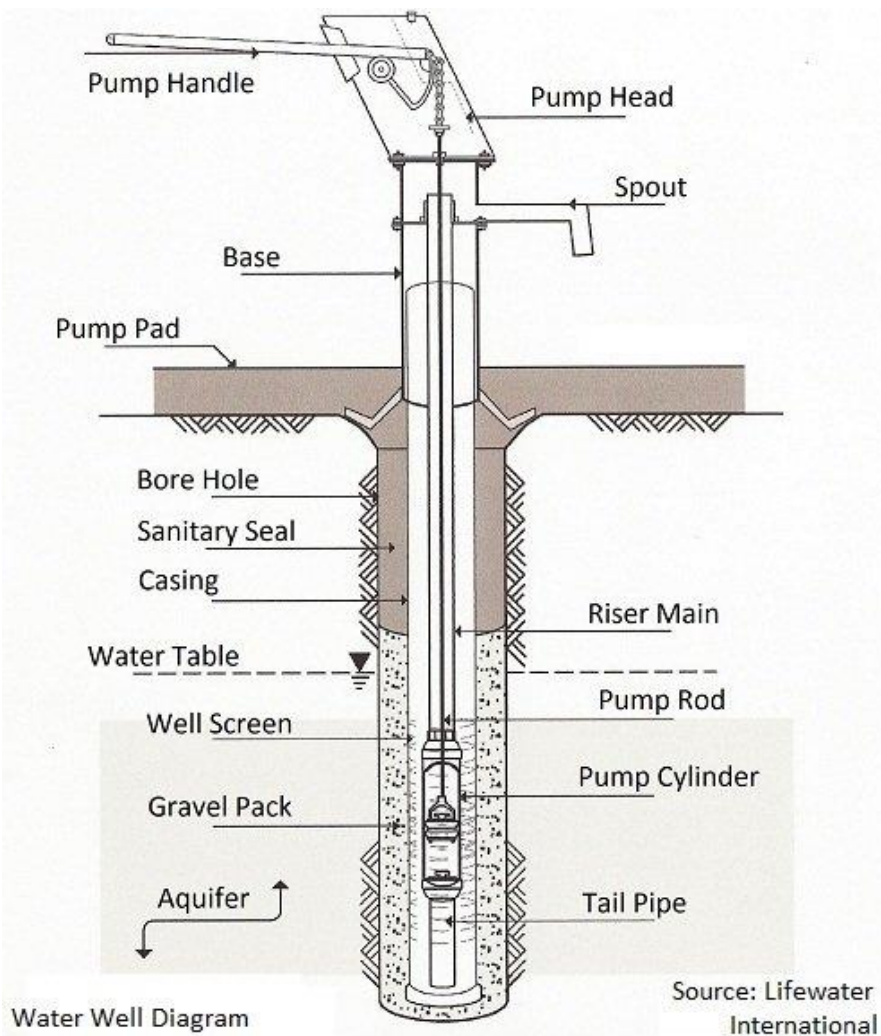
Ενίοτε προβλέπεται και η κατασκευή τσιμεντένιας βάσης γύρω από τη γεώτρηση για να διατηρείται καθαρή αυτή η περιοχή γύρω από την γεώτρηση, καθώς και η απολύμανση της γεώτρησης για την καταστροφή τυχόν βακτηρίων που πιθανόν αναπτύχθηκαν κατά την όρυξη.

Τα κύρια μέρη μιας τυπικής υδρογεώτρησης, μετά την ανάπτυξή της, παρουσιάζονται στην Εικόνα 6-1 και περιλαμβάνουν τη ζώνη άντλησης από τον υπόγειο υδροφορέα (aquifer), φιλτροσωλήνες με κατάλληλα ανοίγματα (well screen) και επένδυση (σωλήνωση - casing) που

ΟΡΥΞΗ ΑΒΑΘΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΠΕΔΙΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

στο κατώτερο τμήμα της γεώτρησης περιβάλλεται από χαλίκι (gravel pack), καθώς και κατάλληλη διάταξη στην επιφάνεια για μόνωση και προστασία του υπεδάφους.

Σημειώνεται ότι στις συνήθειες υδρογεωτρήσεις δεν απαιτείται η μόνιμη τοποθέτηση πολλών επάλληλων στηλών σωλήνωσης, παρά μόνο της τελικής σωλήνωσης. Ως εκ τούτου, η τελική σωλήνωση εξετάζεται στην ενότητα που αναφέρεται στην ολοκλήρωση της γεώτρησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, δύναται να απαιτηθεί η τοποθέτηση προσωρινής σωλήνωσης, η οποία όμως απομακρύνεται κατά τη φάση ολοκλήρωσης της γεώτρησης. Αναφορικά με την τσιμεντώση, δεν αποτελεί διακριτή φάση της όρυξης των υδρογεωτρήσεων και εφαρμόζεται σε ειδικές περιπτώσεις για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων προβλημάτων, τα οποία αναφέρονται στη σχετική ενότητα.



Εικόνα 6-1 Σχεδιάγραμμα μιας παραγωγικής υδρογεώτρησης με αναφορά στα επιμέρους τμήματά της (Πηγή: <http://www.clean-water-for-laymen.com/water-well-diagram.html>)

6.2 ΜΕΘΟΔΟΙ & ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΟΡΥΞΗΣ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ - ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Η όρυξη των υδρογεωτρήσεων εκτελείται με διαφορετικές μεθόδους, οι οποίες διακρίνονται μεταξύ τους ανάλογα με τον τρόπο που επιτυγχάνεται η αποσύνθεση του πετρώματος. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου λαμβάνει υπόψη το είδος των πετρωμάτων που θα διατρηθούν, την επιθυμητή τελική διάμετρο της γεώτρησης και το τελικό βάθος αυτής, ενώ εξετάζονται επίσης (ενίοτε και συγκριτικά μεταξύ τους) και παράμετροι όπως ο ρυθμός διάτρησης (προχώρησης της γεώτρησης) και το κόστος. Στον Πίνακα 6-1 παρουσιάζονται οι μέθοδοι όρυξης υδρογεωτρήσεων που έχουν καταγραφεί παγκοσμίως και η απόδοσή τους σε διάφορους τύπους πετρωμάτων.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάζονται οι τρεις βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στον ελλαδικό χώρο για την όρυξη υδρογεωτρήσεων και είναι:

- Η κρουστική όρυξη με χρήση συρματόσχοινου (cable tool percussion drilling)
- Η περιστροφική όρυξη με:
 - συμβατική κυκλοφορία ρευστού διάτρησης (direct circulation rotary drilling) ή
 - ανάστροφη κυκλοφορία ρευστού διάτρησης (reverse circulation rotary drilling).
- Η κρουστικοπεριστροφική όρυξη (“down-the-hole” hammer drilling).

6.2.1 Κρουστική όρυξη με χρήση συρματόσχοινου

Αποτελεί την παλαιότερη ίσως μέθοδο όρυξης υδρογεωτρήσεων (Εικόνα 6-2). Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου βασίζεται στην ελεύθερη πτώση ενός κοπτικού άκρου πάνω στο πέτρωμα. Μια σειρά εργαλείων αναρτώνται από ένα χαλύβδινο συρματόσχοινο (steel wire rope) το οποίο αναρτάται και διαχειρίζεται κατάλληλα από τον πύργο του γεωτρήπανου. Η σειρά των εργαλείων περιλαμβάνει (από κάτω προς τα πάνω) το κοπτικό άκρο (drill bit), διατρητικά στελέχη (stem), διατρητικά ελατήρια (jars) και περιστρεπτό στέλεχος (swivel).

Η σειρά των εργαλείων ανέρχεται και κατέρχεται μέσα στη γεώτρηση με τη βοήθεια του συρματόσχοινου και το πέτρωμα αποσυντίθεται υπό κρούση, κάθε φορά που το κοπτικό προσκρούει στο μέτωπο. Τα θρύμματα που παράγονται παραμένουν στη θέση τους μέχρι ο χειριστής του γεωτρήπανου να τα απομακρύνει. Αυτό γίνεται με ένα εργαλείο που ονομάζεται κάδος καθαρισμού (bailer). Συνήθως, ωστόσο, απαιτείται η χρήση νερού (ή ρευστού διάτρησης) που εισέρχεται στη γεώτρηση από την επιφάνεια με σκοπό την ψύξη του κοπτικού και την ευκολότερη απομάκρυνση των θρυμμάτων.

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συμπεριλαμβάνονται το χαμηλό κόστος και η ευκολία μεταφοράς και χρήσης του εξοπλισμού σε απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές. Επίσης,

ΟΡΥΞΗ ΑΒΑΘΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΠΕΔΙΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

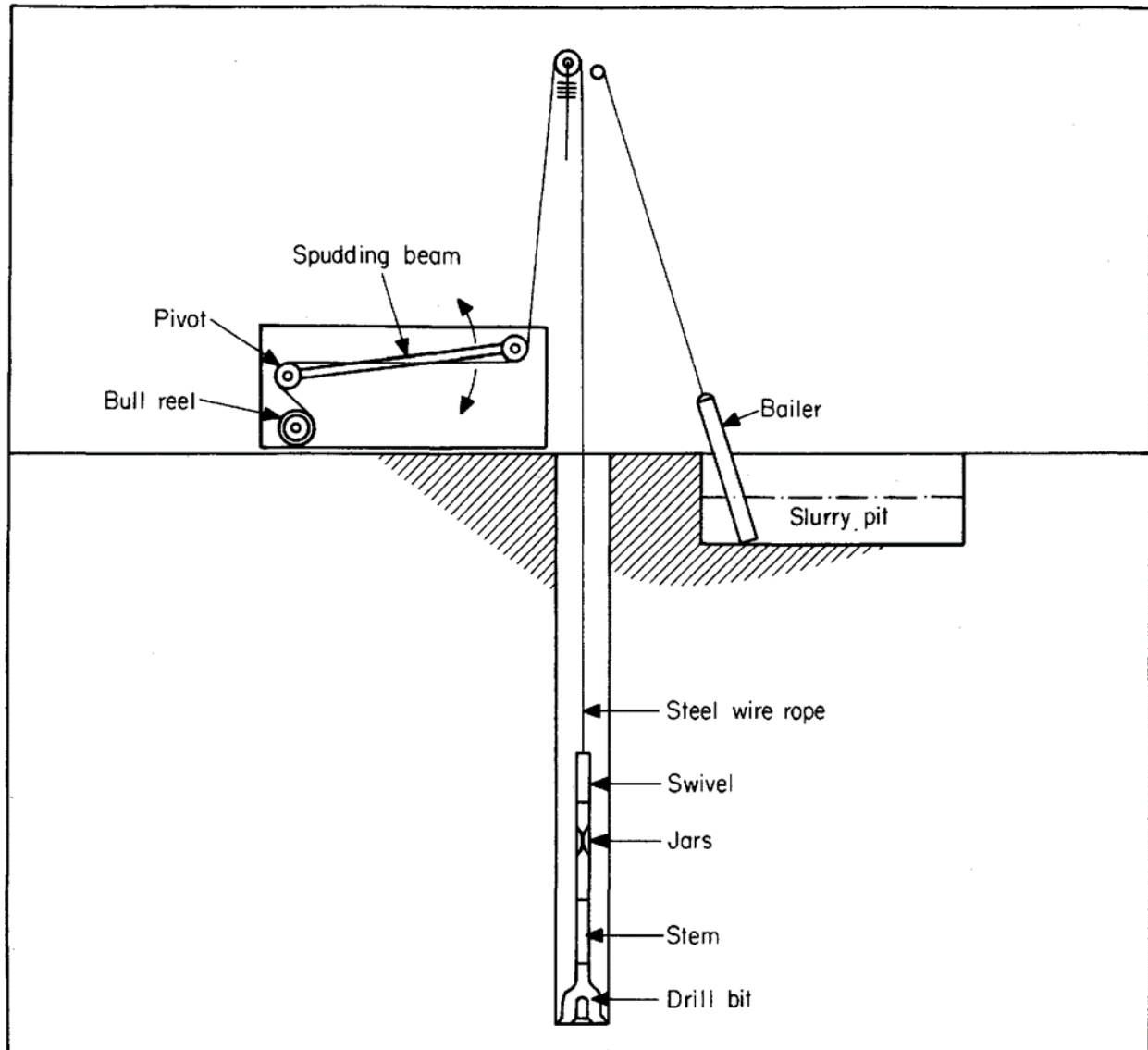
το κρουστικό γεωτρύπανο καταναλώνει ελάχιστα καύσιμα και έχει εύκολη συντήρηση. Η ανάγκη επένδυσης της γεώτρησης με σωλήνωση, στην περίπτωση που συναντηθούν ασταθείς σχηματισμοί, αποτελεί μειονέκτημα της μεθόδου, καθώς αυξάνει το κόστος όρυξης (μεταφορά και τοποθέτηση της σωλήνωσης, επιμήκυνση του χρόνου όρυξης). Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται επίσης οι κρότοι της κρούσης, ο πολύ αργός ρυθμός προχώρησης της γεώτρησης και ο περιορισμοί στις διαμέτρους και το βάθος της γεώτρησης. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος περιορίζεται σε διαμέτρους μικρότερες των 75cm και βάθη ως 600m. (Κελεσιδής, 2011)

Πίνακας 6-1 Μέθοδοι όρυξης υδρογεωτρήσεων και απόδοσή τους σε διαφορετικούς τύπους πετρωμάτων (Κελεσιδής, 2011)

Τύπος πετρώματος	Κρούση με συρματόσχοινο	Περιστροφική με υγρό	Περιστροφική με αέρα	Περιστροφική υπεδάφια σφύρα	Περιστροφική με επένδυση & σφύρα	Ανάστροφη περιστροφική με υγρά	Ανάστροφη περιστροφική με αέρα διπλών τοιχωμάτων	Υδραυλική σφύρα	Με υδραυλική πίεση (jetting)
Αμμόδεις λόφοι	2	5	-	-	6	5*	6	5	5
Χαλαρή άμμος & χαλίκι	2	5	-	-	6	5*	6	5	5
Ρέουσα άμμος	2	5	-	-	6	5*	6	5	5
Χαλαρές πέτρες σε ποτάμια, ριπίδια (fluvial fans)	3-2	2-1	-	-	5	2-1	4	1	1
Άργιλοι και ιλύς	3	5	-	-	5	5	5	3	3
Συμπαγής σχιστόλιθος	5	5	-	-	5	5	5	3	-
Κολλώδης σχιστόλιθος	3	5	-	-	5	3	5	3	-
Ψαθρός σχιστόλιθος	5	5	-	-	5	5	5	3	-
Ψαμίτης χαλαρά τσιμεντωμένος	3	4	-	-	-	4	5	4	-
Ψαμίτης καλώς τσιμεντωμένος	3	3	5	-	-	3	5	3	-
Κόνδυλοι (chert)	5	3	3	-	-	3	3	5	-
Ασβεστόλιθος	5	5	5	6	-	5	5	5	-
Ασβεστόλιθος με κόνδυλους (chert)	5	3	5	6	-	3	3	5	-
Ασβεστόλιθος με μικρές ραγιές	5	3	5	6	-	2	5	5	-
Ασβεστόλιθος με ολιβίνη	5	3-1	2	5	-	1	5	1	-
Δολομίτης	5	5	5	6	-	5	5	5	-
Βασάλτης - λεπτά στρώματα σε ιζηματογενή πετρώματα	5	3	5	6	-	3	5	5	-
Βασάλτης - παχιά στρώματα	3	3	4	5	-	3	4	3	-
Βασάλτης πολύ ρηγματωμένος με ζώνες απωλειών	3	1	3	3	-	1	4	1	-
Μεταμορφωσιγενή πετρώματα	3	3	4	5	-	3	4	3	-
Γρανίτης	3	3	5	5	-	3	4	3	-

* Με την υπόθεση ότι υπάρχει απαραίτητη υδραυλική πίεση.

ΡΥΘΜΟΙ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ: 1 Αδύνατον, 2 Δύσκολα, 3 Αργά, 4 Μέτρια, 5 Γρήγορα, 6 Πολύ γρήγορα



Εικόνα 6-2 Σχηματική αναπαράσταση των τμημάτων κρουστικού γεωτρήπανου, το οποίο πραγματοποιεί την όρυξη με χρήση συρματοσχοινίου (Cruse, 1979)

6.2.2 Περιστροφική όρυξη

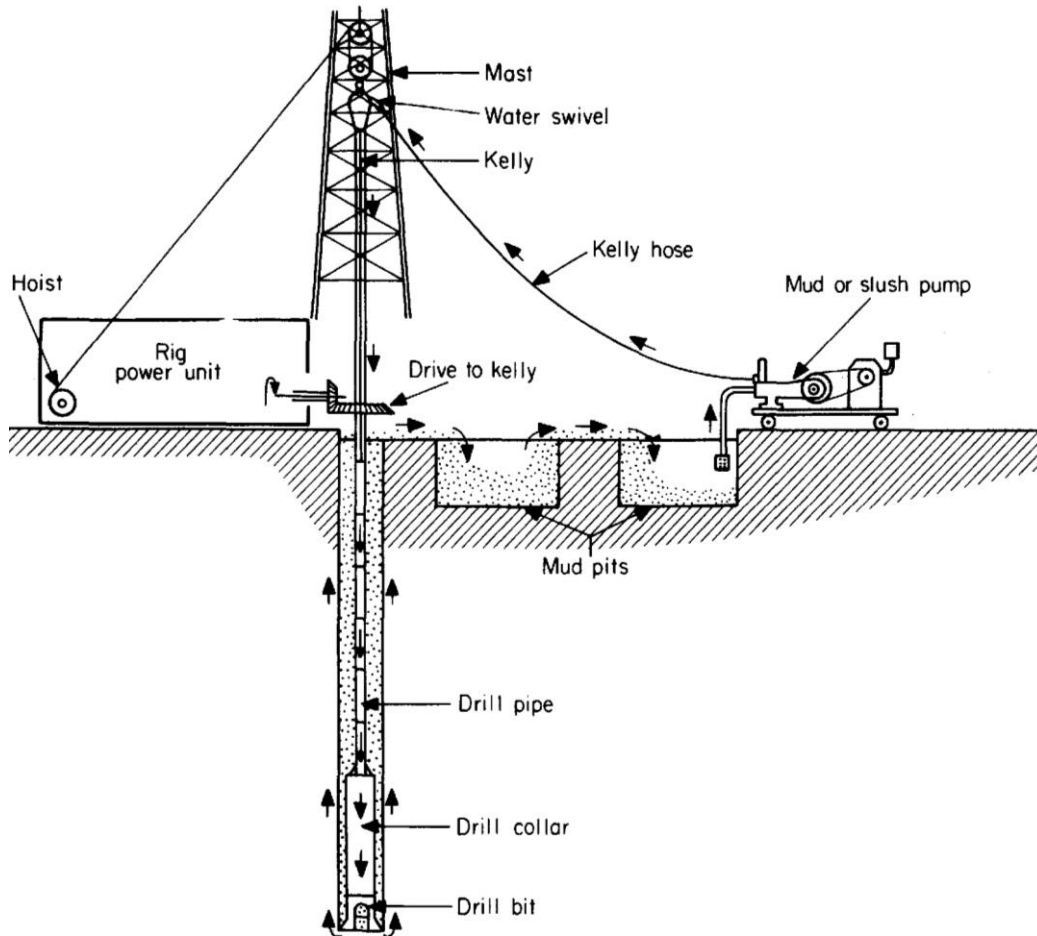
Αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνική όρυξης υδρογεωτρήσεων σε όλο τον κόσμο. Αυτό συμβαίνει λόγω των υψηλών αποδόσεων των σύγχρονων περιστροφικών γεωτρημάτων σε συνδυασμό με το σχετικά χαμηλό κόστος ενοικίασης και λειτουργίας τους. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στην εφαρμογή κατακόρυφης δύναμης πάνω στο κοπτικό άκρο (Weight-On-Bit - WOB) και στη συνεχή περιστροφή της διατρητικής στήλης (rotation) ενόσω πραγματοποιείται κυκλοφορία του ρευστού διάτρησης. Έτσι, το κοπτικό αποσυνθέτει το πέτρωμα υπό τη

συνδυαστική δράση του βάρους που ασκείται πάνω του και μέσω αυτού στο πέτρωμα και της περιστροφής.

Ανάλογα με τον τρόπο κυκλοφορίας του ρευστού διάτρησης, η περιστροφική όρυξη διακρίνεται σε: α) όρυξη με συμβατική κυκλοφορία ρευστού διάτρησης (direct circulation rotary drilling), και β) όρυξη με ανάστροφη κυκλοφορία ρευστού διάτρησης.

Η περιστροφική όρυξη με συμβατική κυκλοφορία ρευστού διάτρησης είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος περιστροφικής όρυξης γεωτρήσεων όλων των τύπων (Εικόνα 6-3). Σύμφωνα με αυτή το ρευστό διάτρησης παρασκευάζεται και αποθηκεύεται σε δεξαμενές (mud pits), από όπου αντλείται και διοχετεύεται με κατάλληλο σύστημα σωλήνων στον περιστρεπτό τροφοδότη (swivel), ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το τετραγωνικό στέλεχος (kelly). Μέσα από το kelly το ρευστό διάτρησης διοχετεύεται στο εσωτερικό της διατρητικής στήλης, μέσω της οποίας φτάνει στο κοπτικό, από το οποίο εξέρχεται στο μέτωπο της όρυξης υπό υψηλή πίεση, μέσα από τα ακροφύσια. Αφού συμπαρασύρει τα θρύμματα της όρυξης, ανέρχεται στην επιφάνεια μέσω του δακτυλίου μεταξύ της διατρητικής στήλης και των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Στην επιφάνεια το ρευστό διάτρησης καθαρίζεται από τα θρύμματα πριν επιστρέψει στις δεξαμενές.

Στα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου περιλαμβάνεται η μεγάλη ευελιξία και προσαρμογή της σε ποικίλες γεωλογικές συνθήκες, διαμέτρους γεώτρησης και μεγάλα βάθη, καθώς και οι ταχείς ρυθμοί προχώρησης που μπορεί να επιτύχει. Εξασφαλίζει σταθερότητα των τοιχωμάτων σε μεγάλη βάθη καθώς εξισορροπεί τις πιέσεις των σχηματισμών με την υδροστατική πίεση του ρευστού διάτρησης, ενώ η δημιουργία πλακούντα διήθησης (filter cake) πάνω στα τοιχώματα της γεώτρησης (όταν γίνεται χρήση μπεντονίτη) δεν επιτρέπει την εύκολη διαφυγή του ρευστού διάτρησης στους υπεδαφικούς σχηματισμούς. Στις υδρογεωτρήσεις, ωστόσο, η δημιουργία πλακούντα στα τοιχώματα της γεώτρησης επιδρά αρνητικά στις υδραυλικές ιδιότητες του σχηματισμού ενδιαφέροντος. Στα μειονεκτήματά της περιλαμβάνονται, επίσης, η διάβρωση των μη συνεκτικών σχηματισμών στα τοιχώματα της γεώτρησης, εξαιτίας της υψηλής ταχύτητας ανόδου του ρευστού διάτρησης στον δακτύλιο της γεώτρησης, το αυξημένο κόστος και η μεγάλη ποσότητα αποβλήτων που παράγει.

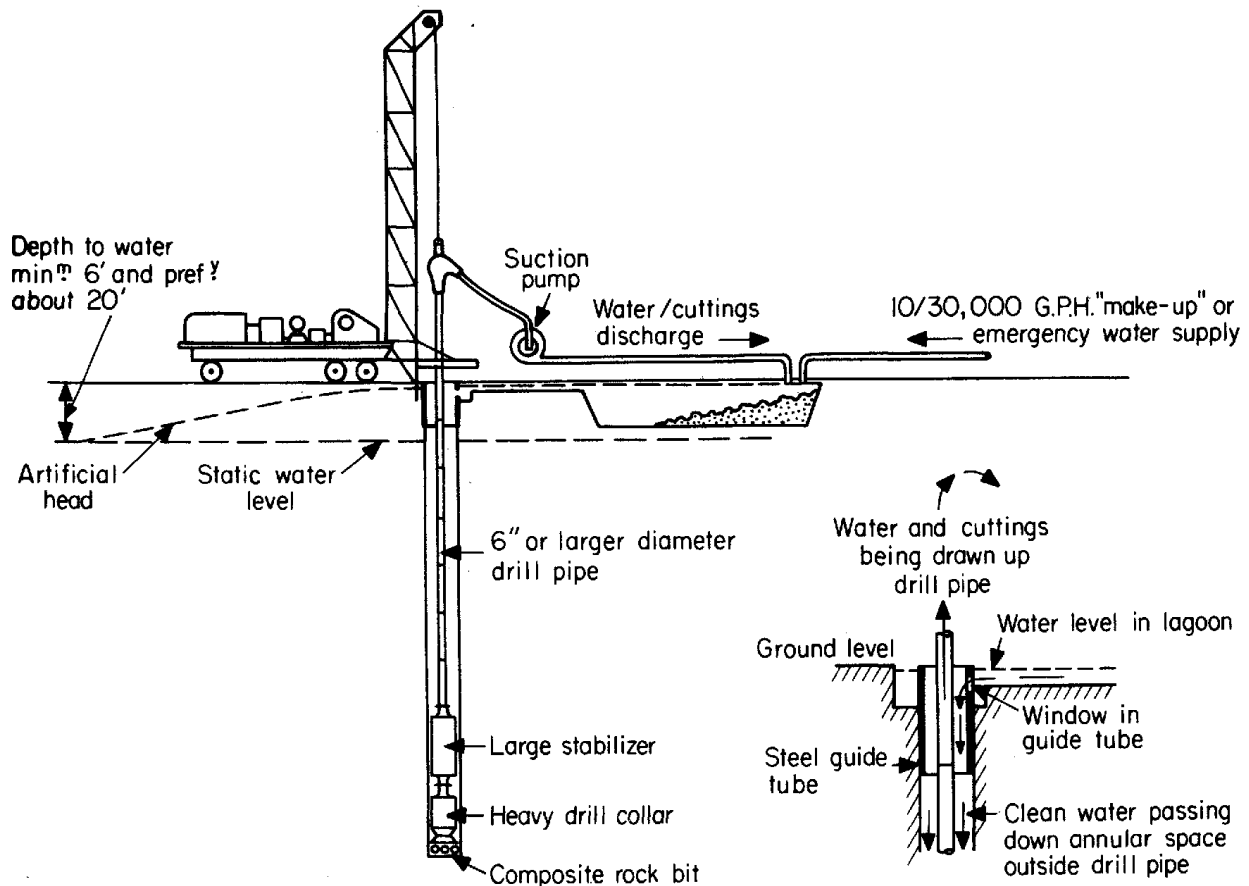


Εικόνα 6-3 Σχηματική αναπαράσταση περιστροφικού γεωτρήσανου που πραγματοποιεί την όρυξη της γεώτρησης με συμβατική κυκλοφορία ρευστού διάτρησης (Cruse, 1979)

6.2.2.1 Περιστροφική όρυξη με ανάστροφη κυκλοφορία ρευστού διάτρησης

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε αρχικά για γεωτρήσεις μεγάλης διαμέτρου (>40cm) εντός μη συνεκτικών σχηματισμών, κυρίως λόγω δυσκολίας καθαρισμού αυτών των γεωτρήσεων από τα παραγόμενα θρύμματα με τη συμβατική κυκλοφορία ρευστού διάτρησης (Κελεσιδής, 2011). Η βασική αρχή λειτουργίας της μεθόδου παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-4, σύμφωνα με την οποία το ρευστό διάτρησης (στην Εικόνα 6-4 είναι το νερό) από τη δεξαμενή του διοχετεύεται στον δακτύλιο της γεώτρησης μεταξύ της διατρητικής στήλης και των τοιχωμάτων της γεώτρησης και με φυσική ροή κατέρχεται στον πυθμένα. Εκεί παρασύρει τα θρύμματα που παράγονται στο μέτωπο της όρυξης και ανέρχεται μαζί με αυτά μέσα από τη διατρητική στήλη (αντλείται με τη βοήθεια αεροσυμπιεστή), μέχρι την επιφάνεια οπότε και εξέρχεται από την κορυφή αυτής. Είναι προφανές ότι στη μέθοδο αυτή όλοι οι σωλήνες που απαρτίζουν τη διατρητική στήλη θα πρέπει να έχουν επαρκή εσωτερική διάμετρο.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η γρήγορη προχώρηση σε γεωτρήσεις μεγάλης διαμέτρου (ως 60in), λόγω ταχύτερης απομάκρυνσης των θρυμμάτων της όρυξης, κυρίως σε αμμοχαλικώδεις ή αμμοϊλυώδεις σχηματισμούς (Βαφειάδης, 1979). Όταν η όρυξη γίνεται με χρήση νερού ή περιορισμένη ποσότητα μπεντονίτη, ο πλακούντας διήθησης (filter cake) στα τοιχώματα της γεώτρησης απομακρύνεται εύκολα στη φάση ανάπτυξης της γεώτρησης. Το βασικό μειονέκτημά της είναι το υψηλό κόστος του εξοπλισμού και η περιορισμένη εμπορική του διαθεσιμότητα, καθώς και η παραγωγή μεγάλου όγκου αποβλήτων, κυρίως λόγω της χρήσης κοπτικών μεγάλης διαμέτρου. (Κελεσιδής, 2011)



Εικόνα 6-4. Σχηματική αναπαράσταση περιστροφικού γεωτρήσανου που πραγματοποιεί την όρυξη της γεώτρησης με ανάστροφη κυκλοφορία ρευστού διάτρησης (Cruse, 1979)

6.2.3 Κρουστικοπεριστροφική όρυξη

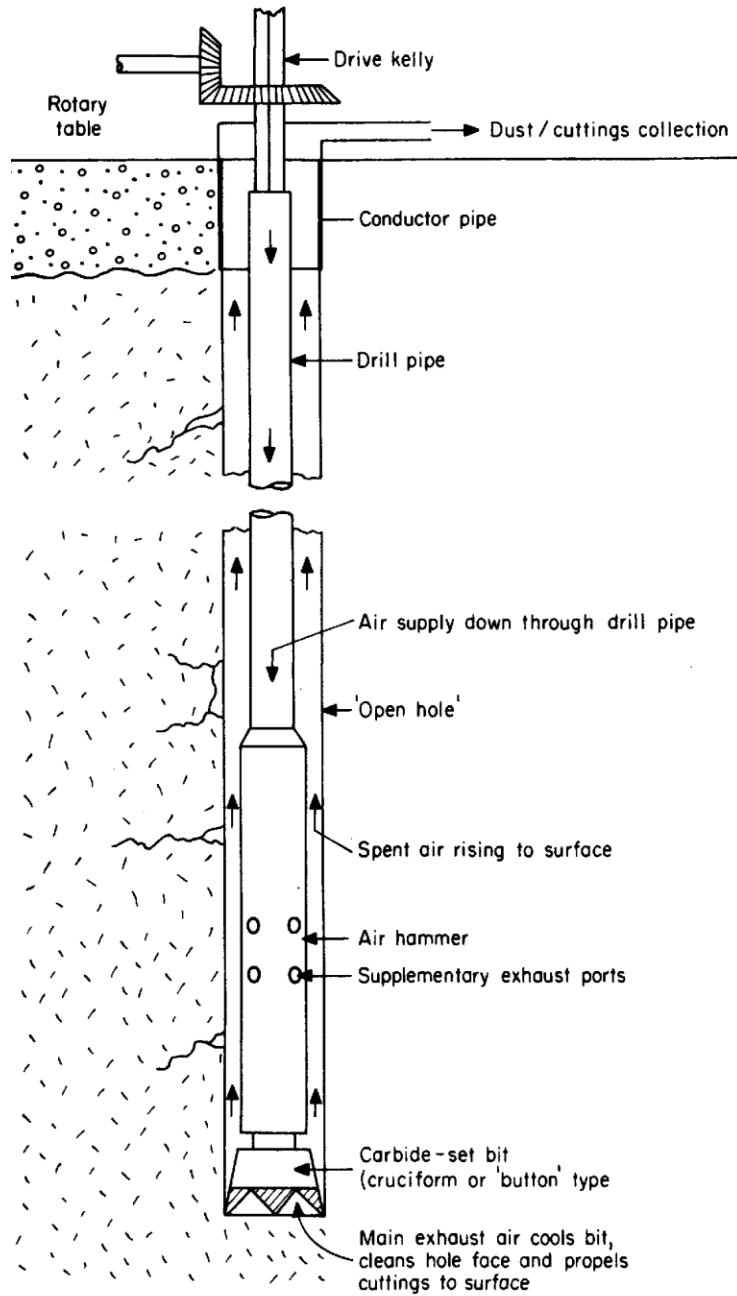
Αποτελεί εξέλιξη της μεθόδου της κρουστικής όρυξης και αναπτύχθηκε για την όρυξη σκληρότερων σχηματισμών (εκτός του πεδίου εφαρμογής της κρουστικής όρυξης με χρήση συρματόσχοινου). Εκτελείται με σφύρα (hammer) η οποία περιστρέφεται αργά (20-50 στροφές

ανά λεπτό), φέρει στο κάτω μέρος κατάλληλο κοπτικό άκρο και λειτουργεί με πεπιεσμένο αέρα. (Εικόνα 6-5). Η αποσύνθεση του πετρώματος επιτυγχάνεται με πρόσκρουση του κοπτικού πάνω του, ενώ η αργή περιστροφή του συμβάλλει στην ταχύτερη προχώρηση της γεώτρησης, ακόμα και εντός σκληρών σχηματισμών. Ο πεπιεσμένος αέρας που χρησιμοποιείται για την παλινδρομική κίνηση του εμβόλου που κινεί το κοπτικό άκρο (αερόσφουρα), χρησιμοποιείται και για την απομάκρυνση των θρυμμάτων.

Ανάλογα με τη θέση παραγωγής του πεπιεσμένου αέρα, διακρίνονται δύο είδη αερόσφουρας (air hammer): 1) η ενδοδιατρηματική ή ενδογεωτρητική αερόσφουρα (Down-the-hole – DTH) ή απλά αερόσφουρα DTH και 2) η εξωδιατρηματική αερόσφουρα ή αερόσφουρα επιφάνειας (Top-Hammer-Drill) ή απλά αερόσφουρα THD.

Το μέγιστο βάθος λειτουργίας μιας αερόσφουρας εξαρτάται από την παροχή του αέρα για την ευχερή απομάκρυνση των θρυμμάτων και από το ύψος του πύργου του γεωτροπάνου (ανέλκυση όλης της διατρητικής στήλης). Το σύνηθες πεδίο εφαρμογής αφορά διαμέτρους ως 40cm (αν και υπάρχουν αερόσφυρες για μεγαλύτερες διαμέτρους), αλλά εκεί που η κρουστικοπεριστροφική όρυξη με αερόσφουρα υπερτερεί έναντι των άλλων μεθόδων όρυξης είναι στην όρυξη πολύ σκληρών σχηματισμών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για την όρυξη μιας γεώτρησης διαμέτρου 15cm εντός σκληρού σχηματισμού, η μέθοδος της κρουστικής όρυξης επιτυγχάνει ρυθμό 1m/10h, ενώ η κρουστικοπεριστροφική αερόσφουρα επιτυγχάνει 3m/h.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο μηχανολογικός εξοπλισμός για την περιστροφική όρυξη υδρογεωτρήσεων, στη βάση της οποίας θα γίνει η σύγκριση μεταξύ των γεωθερμικών γεωτρήσεων χαμηλής και υψηλής ενθαλπίας και των υδρογεωτρήσεων στα επόμενα Κεφάλαια.



Εικόνα 6-5. Σχηματική αναπαράσταση ενός γεωτρήπανου κρουστικοπεριστροφικής όρυξης και των τμημάτων του (Cruse, 1979)

6.2.4 Μηχανολογικός εξοπλισμός περιστροφικής όρυξης υδρογεωτρήσεων

6.2.4.1 Γεωτρύπανο

Τα γεωτρύπανα που χρησιμοποιούνται για την όρυξη υδρογεωτρήσεων μπορεί να είναι από πολύ απλά έως πολυσύνθετα. Ο τύπος του γεωτρυπάνου που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε υδρογεώτρηση εξαρτάται κυρίως από το βάθος και την τελική διάμετρο της γεώτρησης, το γεωλογικό περιβάλλον εντός του οποίου θα ορυχθεί και την ευκολία προσπέλασης στη θέση διάνοιξής της.

Σε κάθε περίπτωση, το περιστροφικό γεωτρύπανο θα πρέπει να διαθέτει το σύστημα παροχής ισχύος, το σύστημα κυκλοφορίας του ρευστού διάτρησης, το σύστημα περιστροφής της διατρητικής στήλης και το σύστημα ανέλκυσης και καθέλκυσης της διατρητικής στήλης. Ανάλογα με τον τρόπο περιστροφής της διατρητικής στήλης διακρίνονται δύο βασικοί τύποι γεωτρυπάνων: α) τα μηχανικά και β) τα υδραυλικά γεωτρύπανα. Στην όρυξη υδρογεωτρήσεων τα υδραυλικά τείνουν να προτιμώνται έναντι των μηχανικών γεωτρυπάνων, διότι επιτυγχάνουν υψηλότερες ταχύτητες προχώρησης. Ωστόσο, για τη λειτουργία τους απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό και κοστίζουν ακριβότερα.

Τα περιστροφικά γεωτρύπανα για την εκτέλεση υδρογεωτρήσεων, ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς τους διακρίνονται σε::

- Αυτοκινούμενα (τροχοφόρα ή ερπυστριοφόρα)
- Συρόμενα (τροχοφόρα ή επί ελκίθρου)



Εικόνα 6-6 Αυτοκινούμενο τροχοφόρο γεωτρύπανο με ονομασία PSM – 8 της εταιρείας Soilmech, το οποίο έχει αξιοποιηθεί από το ΕΑΓΜΕ για την όρυξη υδρογεωτρήσεων.

6.2.4.2 Κοπτικά άκρα

Στην περιστροφική όρυξη υδρογεωτρήσεων χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι κοπτικών άκρων, οι οποίοι αναφέρθηκαν στις αντίστοιχες ενότητες των Κεφαλαίων 3 και 4 (τρίκωνα κοπτικά και πολυκρυσταλλικά αδαμαντοκοπτικά). Το είδος του κοπτικού που θα χρησιμοποιηθεί σε μια υδρογεώτρηση εξαρτάται κυρίως από τη σκληρότητα του πετρώματος που θα διατρηθεί. Σε όλα τα κοπτικά υπάρχουν ακροφύσια, συνήθως 3 ή 4, μέσα από τα οποία το ρευστό διάτρησης εξέρχεται στο μέτωπο της γεώτρησης, ψύχει το κοπτικό και απομακρύνει τα θρύμματα στην επιφάνεια. Στην Εικόνα 6-7 παρουσιάζεται ένας οδηγός επιλογής κοπτικού ανάλογα με το βάθος της υδρογεώτρησης και τη σκληρότητα των υπεδαφικών σχηματισμών.

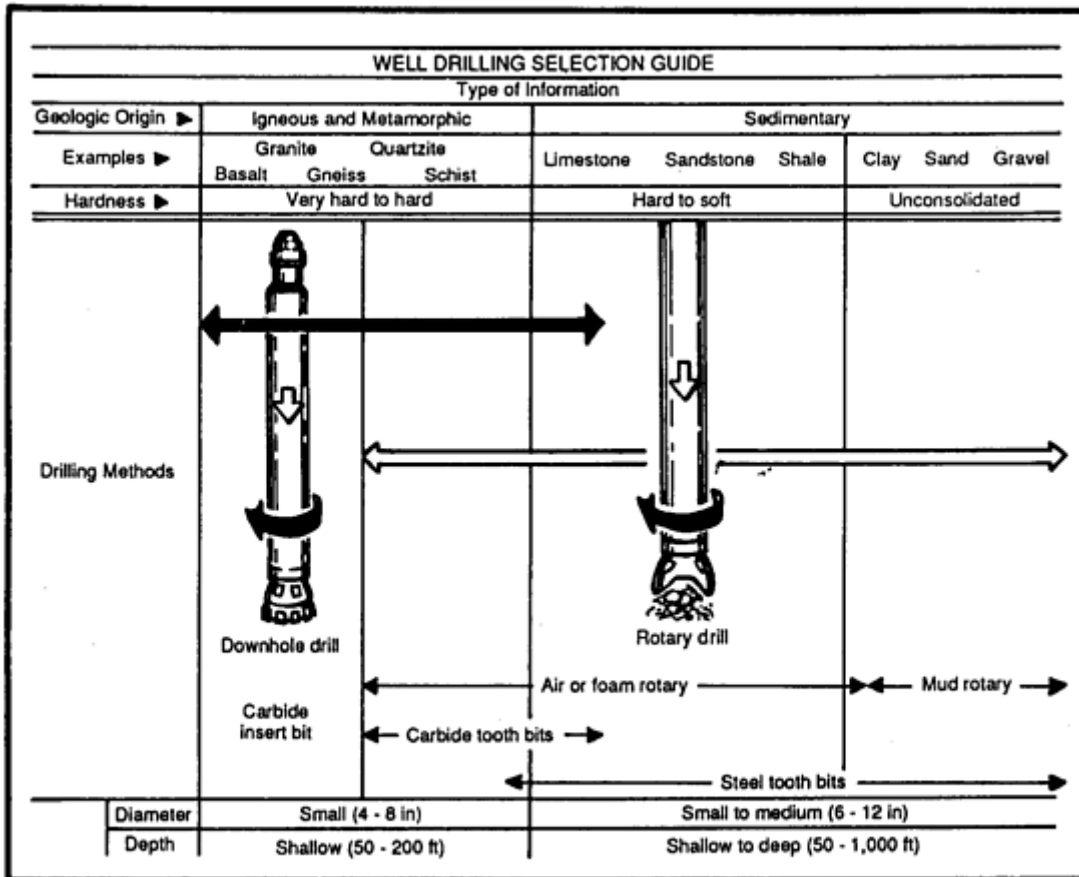
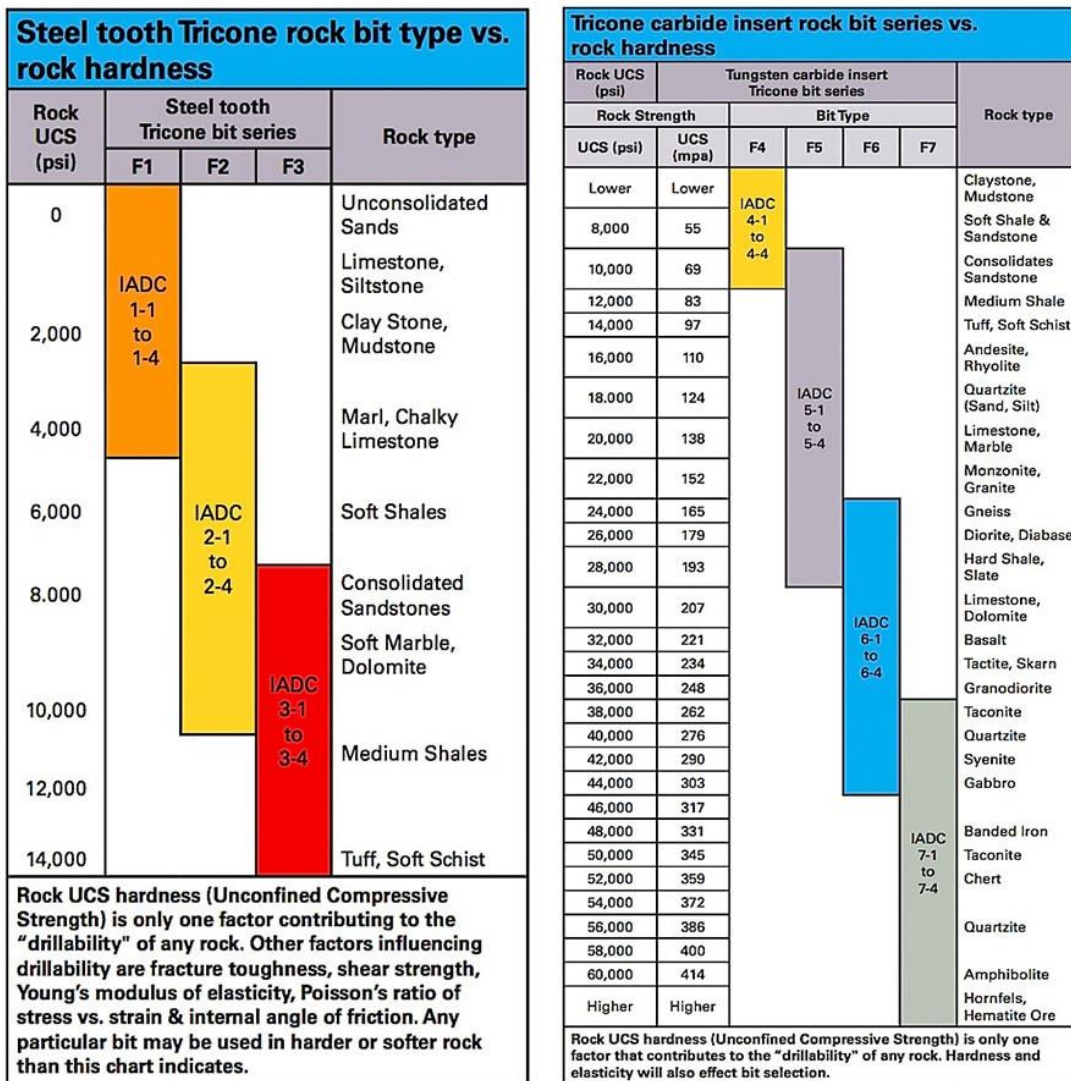


Figure 5-2. Guide for bit selection

Εικόνα 6-7 Σχεδιάγραμμα επιλογής του κατάλληλου κοπτικού άκρου και γεωτρήπανου ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος κατά την όρυξη υδρογεωτρήσεων (Πηγή: <https://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/5-484/Ch5.htm>)

Στις υδρογεωτρήσεις χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον κοπτικά με περιστρεφόμενους κώνους (τρίκωνα), τα οποία διατίθενται σε μεγάλη ποικιλία τύπων, διαστάσεων και σχεδιασμών, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν εκτεταμένο πεδίο εφαρμογής σε ποικιλία σχηματισμών. Στην Εικόνα 6-8 παρουσιάζεται η αντιστοίχιση των διαφόρων τύπων τριγωνών κοπτικών με ενσωματωμένα και με ένθετα δόντια από καρβίδιο του βολφραμίου, βάσει της τυποποίησής τους κατά IADC, με τη σκληρότητα των σχηματισμών (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη). Σπανιότερα κατά τα τελευταία χρόνια δύναται να χρησιμοποιηθούν στις υδρογεωτρήσεις πολυκρυσταλλικά αδαμαντοκοπτικά (PDC bits), κυρίως για την όρυξη ιζηματογενών σχηματισμών και σχηματισμών μικρής σκληρότητας, όπως ψαμμίτες με μεγάλο πορώδες και αργίλους.



Εικόνα 6-8 Σχεδιάγραμμα επιλογής του κατάλληλου τριγωνού κοπτικού άκρου είτε με ενσωματωμένα είτε με ένθετα δόντια, βάσει της τυποποίησής τους κατά IADC, σε σχέση με την σκληρότητα του σχηματισμού. (Πηγή: <https://kcbits.com/drill-bit-education/atlas-copco/>)

Τέλος, σημειώνεται ότι για την αποδοτική περιστροφική όρυξη μιας υδρογεώτρησης, όπως και κάθε γεώτρησης, δεν αρκεί η ορθή επιλογή κοπτικού άκρου, αλλά θα πρέπει και οι μηχανικές παράμετροι της όρυξης (βάρος επί του κοπτικού και ταχύτητα περιστροφής) να ρυθμίζονται κατάλληλα. Πιο συγκεκριμένα, το βάρος που πρέπει να ασκείται στο κοπτικό άκρο ώστε να προκληθεί θραύση του σχηματισμού εξαρτάται από τη σχεδίαση του κοπτικού άκρου και τη σκληρότητα του σχηματισμού. Τα κοπτικά άκρα με περιστρεφόμενους κώνους, για παράδειγμα, απαιτούν μια ελάχιστη πίεση της τάξεως των 2000 psi για την όρυξη χαλαρών σχηματισμών και μια μέγιστη πίεση της τάξεως των 6000 psi για την όρυξη σκληρών σχηματισμών. Πριν τη διάτρηση είναι σημαντική η προσθήκη αντιβάρων (drill collars) αντί διατρητικών στελεχών, με στόχο την άσκηση του κατάλληλου φορτίου πάνω στο κοπτικό άκρο για τη σωστή θραύση του σχηματισμού. Στον Πίνακα 6-2 αναγράφονται ορισμένες ενδεικτικές τιμές για το βάρος επί του κοπτικού και την ταχύτητα περιστροφής ανάλογα με τη σκληρότητα του σχηματισμού:

Πίνακας 6-2 Εύρη τιμών θάρους επί του κοπτικού και ταχύτητας περιστροφής σε σχηματισμούς διαφορετικής σκληρότητας (Πηγή: <https://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/5-484/Ch5.htm>)

Table 5-4. Weight on bit and rotary speed

Bit Classification	Weight per in/cm of Bit Diameter		Rotary Speed (RPM)
	lb/in	kg/cm	
Soft formation	3,400 to 6,750	609 to 1,210	250 to 100
	4,050 to 7,800	725 to 1,400	180 to 60
Medium formation	4,500 to 9,000	806 to 1,610	120 to 40
Hard milled tooth bit	5,600 to 11,250	1,000 to 2,010	70 to 35
Hard insert bit	2,250 to 5,600	403 to 1,000	70 to 35
	4,500 to 9,000	806 to 1,610	65 to 35
Hard friction bearing bit	4,500 to 6,750	806 to 1,210	60 to 35

(Ingersoll-Rand)

6.2.5 Ρευστά διάτρησης

Το πρώτο καταγεγραμμένο ρευστό διάτρησης που χρησιμοποιήθηκε ποτέ σε υδρογεωτρήσεις είναι βεβαίως το νερό, το οποίο διοχετευόταν μέσω κοίλων σωλήνων κατά την κρουστική διάτρηση, σε μια προσπάθεια να απομακρύνονται τα θρύμματα χωρίς να χρειάζεται η ανέλκυση των διατρητικών εργαλείων, πρακτική που αύξανε σημαντικά τους μη παραγωγικούς χρόνους. Αργότερα προστέθηκε και κάποιο είδος αργίλου για την αύξηση του ιξώδους του υδατικού αιωρήματος, έτσι ώστε να υποβοηθάται η ανύψωση και απομάκρυνση των θρυμμάτων από το μέτωπο της όρυξης (Cruse, 1979).

Στην περιστροφική όρυξη μια από τις βασικές αρχές λειτουργίας της είναι η χρήση ενός κυκλοφορούντος ρευστού το οποίο και στις υδρογεωτρήσεις επιτελεί τις ακόλουθες βασικές λειτουργίες:

- Διατηρεί καθαρό το μέτωπο της όρυξης, απομακρύνοντας τα θρύμματα που παράγονται.

- Ψύχει και λιπαίνει το κοπτικό άκρο.
- Ελέγχει τις πιέσεις πόρων των διατρυόμενων σχηματισμών ασκώντας κατάλληλη υδροστατική πίεση σε κάθε βάθος και αποτρέποντας έτσι την εισροή ρευστών από τους διατρυόμενους σχηματισμούς μέσα στη γεώτρηση.
- Προστατεύει τα τοιχώματα στο μη σωληνωμένο τμήμα της γεώτρησης από καταπτώσεις, κατά την όρυξη μαλακών, μη συνεκτικών σχηματισμών, δημιουργώντας πλακούντα διήθησης πάνω στα τοιχώματα της γεώτρησης.

Στις σύγχρονες υδρογεωτρήσεις που τρεις είναι οι χρησιμοποιούμενοι βασικοί τύποι ρευστών διάτρησης:

- Αέρας
- Αφρός
- Νερό ή πολφός με βάση το νερό (με μπεντονίτη ή/και χημικά πολυμερή)

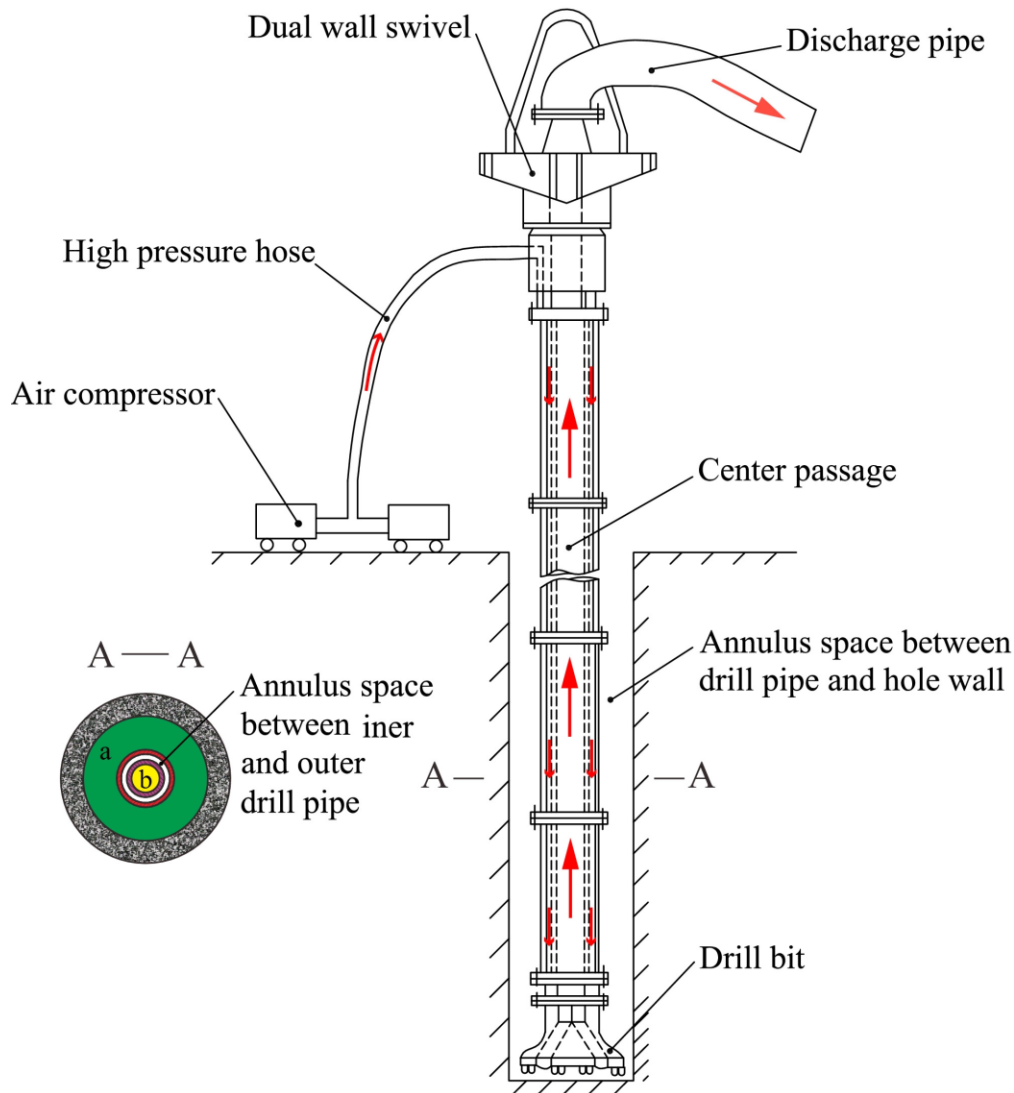
6.2.5.1 Αέρας

Ο αέρας ως ρευστό διάτρησης χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στη μεταλλευτική βιομηχανία για να επιλύσει προβλήματα που σχετίζονταν με τη δυσκολία μεταφοράς νερού στο μέτωπο και το πάγωμα αυτού όταν επικρατούσαν χαμηλές θερμοκρασίες. Αποδείχθηκε επιτυχής επιλογή και, υπό κατάλληλες συνθήκες, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του κοπτικού, ταχύτερη προχώρηση, ταχεία μεταφορά των θρυμμάτων στην επιφάνεια κ.λπ. (Cruse, 1979)

Ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι γενικά όμοιος με αυτόν για πολφό διάτρησης με βάση το νερό, με μικρές διαφοροποιήσεις, όπως για παράδειγμα, στον σχεδιασμό των κοπτικών άκρων και στον περιστρεπτό τροφοδότη (swivel). Προφανώς απαιτείται χρήση αεροσυμπιεστών οι οποίοι παράγουν την απαιτούμενη ποσότητα αέρα στην απαιτούμενη πίεση, στοιχείο που αυξάνει το κόστος.

Ο αέρας, ως ρευστό διάτρησης, είναι πολύ χρήσιμος κατά τη διάτρηση πολύ σκληρών πετρωμάτων, καθώς και έντονα ρωγματισμένων σχηματισμών χωρίς το ρίσκο να εμφανιστεί απώλεια κυκλοφορίας του ρευστού. Μειονεκτεί σημαντικά, ωστόσο, σε σχηματισμούς που παρουσιάζουν σπηλαιώσεις, καθώς δεν μπορεί να υποστηρίξει σε αυτές τις περιπτώσεις τα τοιχώματα της γεώτρησης. Προβλήματα δύναται να εμφανιστούν επίσης αν συμβούν περιορισμένες εισροές νερού οι οποίες μπορούν να επιφέρουν συσσωμάτωση των θρυμμάτων. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να κυκλοφορήσει νερό για να τα απομακρύνει.

Χρησιμεύει τόσο στην περιστροφική όρυξη όσο και στην όρυξη με αερόσφουρα, σε συνδυασμό με τα κατάλληλα κοπτικά άκρα. Στην Εικόνα 6-9 παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου περιστροφικής όρυξης με ανάστροφη κυκλοφορία αέρα.



Εικόνα 6-9 Σχεδιάγραμμα της μεθόδου περιστροφικής όρυξης με ανάστροφη κυκλοφορία αέρα (Zhang, 2019)

6.2.5.2 Αφρός

Η χρήση ρευστού διάτρησης με αφριστικό παράγοντα αναπτύχθηκε για να αντιμετωπιστούν καταστάσεις όπου είτε ο πολφός διάτρησης δεν μπορεί να κυκλοφορήσει αποδοτικά μέσα στη γεώτρηση, λόγω απώλειας κυκλοφορίας ή δυσκολία εξεύρεσης νερού, είτε η ταχύτητα ανόδου του αέρα (ως ρευστού διάτρησης) μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης δεν είναι επαρκής για την αποδοτική απομάκρυνση των θρυμμάτων. Μια υδρογεώτρηση μπορεί να ορυχθεί εξ ολοκλήρου με αφρό, αλλά συνήθως η χρήση αφρού ως ρευστού διάτρησης γίνεται επιλεκτικά, όπου χρειάζεται.

Η εισαγωγή προσθέτων στον συμπιεσμένο αέρα δεν είναι καινούργια ιδέα. Ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1960 χρησιμοποιήθηκαν απορρυπαντικά με στόχο την αποτροπή

συσσωμάτωσης των θρυμμάτων σε γεωτρήσεις που υπήρχε περιορισμένη ροή νερού από τον σχηματισμό. Μια δεκαετία αργότερα δοκιμάστηκε η χρήση ενός γαλακτώματος αφρού και μπεντονίτη το οποίο εξασφάλιζε επαρκή στήριξη των τοιχωμάτων της γεώτρησης, αλλά και πάλι απαιτούσε σχετικά υψηλή ταχύτητα κυκλοφορίας του ρευστού και ισχύ του αεροσυμπιεστή. (Cruse, 1979)

Στις σύγχρονες υδρογεωτρήσεις η χρήση αφρού αποτρέπει τη συσσωμάτωση των θρυμμάτων, μειώνει τα φαινόμενα ανάσχεσης της περιστροφής του κοπτικού (bit balling) λόγω επιφανειακής τάσης που παρουσιάζεται κατά την όρυξη αργιλικών σχηματισμών, βοηθάει στην απομάκρυνση του τυχόν εισρέοντος νερού μέσα στη γεώτρηση και διευκολύνει την απομάκρυνση των μεγαλύτερων θρυμμάτων. Τα παραπάνω συμβάλλουν στην αύξηση της ταχύτητας διάτρησης και στην επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του κοπτικού. Ο αφρός επιπρόσθετα μπορεί να χρησιμεύσει και στην καταστολή της σκόνης που παράγεται κατά τη χρήση αέρα ως ρευστού διάτρησης, βοηθώντας παράλληλα στη μείωση απωλειών αέρα μέσα στους σχηματισμούς, ειδικά σε ζώνες απώλειας κυκλοφορίας.

Η δημιουργία ενός σχετικά σταθερού αφρού επιτυγχάνεται με σχετικά μέτριες ποσότητες αέρα, της τάξης των $0.3\text{m}^3/\text{min}$ ανά 25mm διαμέτρου κοπτικού. Δεν απαιτείται όρυγμα λάσπης (mud pit), το ρευστό προετοιμάζεται σε δεξαμενή με την ανάμειξη του αέρα με τα κατάλληλα πρόσθετα, διοχετεύεται μέσα από τη διατηρητική στήλη στο κοπτικό, ψύχοντας και λιπαίνοντάς το και στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η διόγκωση και ο αφρισμός που επιτυγχάνει την απομάκρυνση των θρυμμάτων και την άνοδό τους στην επιφάνεια. Ανάλογα με τα πρόσθετα (μπεντονίτης ή/και οργανικό πολυμερές, νερό και αφριστικό μέσο), ο αφρός που δημιουργείται μπορεί να είναι από ένα νεφέλωμα σταγονιδίων (mist) έως ένας πολύ σκληρός αφρός (stiff foam). Ο λόγος αφριστικού προς αέρα είναι συνήθως 1:150, ενώ το αφριστικό παρασκευάζεται με 1% υλικό αφρισμού αναμειγμένο με νερό. Ο αφρός εξέρχεται από τη γεώτρηση στην επιφάνεια σαν αφρός ξυρίσματος και καθώς χρησιμοποιούνται βιοδιασπώμενα αφριστικά, αποσυντίθεται πλήρως μετά από 30-45min, οπότε η επίπτωση στο περιβάλλον είναι περιορισμένη (Εικόνα 6-10).



Εικόνα 6-10. Χρήση αφρού ως ρευστού διάτρησης (Πηγή: <https://www.asecexport.org/drilling-chemicals/>)

6.2.5.3 Νερό – Πολφός

Το νερό χρησιμοποιείται ως αποκλειστικό ρευστό διάτρησης όταν τα πετρώματα είναι σταθερά. Σε πολλές περιπτώσεις, εξάλλου, κατά τη διάτρηση αργιλικών σχηματισμών, το νερό, ως ρευστό διάτρησης, εμπλουτίζεται με ποσότητες αργίλων που αυξάνουν το ιξώδες του ή ακόμα και την πυκνότητά του σε μικρό βαθμό, βελτιώνοντας έτσι τον καθαρισμό της γεώτρησης και τη βελτίωση του ρυθμού προχώρησης.

Ωστόσο, συχνά απαιτείται κατάλληλη ρύθμιση των ιδιοτήτων του ρευστού διάτρησης (ιξώδες, διηθητική ικανότητα), η οποία επιτυγχάνεται με την προσθήκη αργιλικών ορυκτών, κυρίως μπεντονίτη, όπως αναλυτικά αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3. Ο έλεγχος και η ρύθμιση των ιδιοτήτων του πολφού στις υδρογεωτρήσεις αποτελεί σημαντικό κεφάλαιο στην περιστροφική όρυξη.

Η διηθητική ικανότητα του ρευστού διάτρησης ελέγχει τη δημιουργία πλακούντα διήθησης πάνω στα τοιχώματα της γεώτρησης, ο οποίος προστατεύει τα υδροφόρα στρώματα από την

μόλυνσή τους με ρευστά διάτρησης, όταν η γεώτρηση διέρχεται μέσα από αυτά. Από την άλλη, ο πλακούντας διήθησης θα πρέπει να μπορεί να απομακρυνθεί εύκολα κατά τη φάση ανάπτυξης της γεώτρησης, ώστε η γεώτρηση να παράγει απρόσκοπτα. Η διηθητική ικανότητα του ρευστού διάτρησης ελέγχεται με τη σειρά της με την προσθήκη κατάλληλων οργανικών πολυμερών.

6.3 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

6.3.1 Ολοκλήρωση υδρογεώτρησης

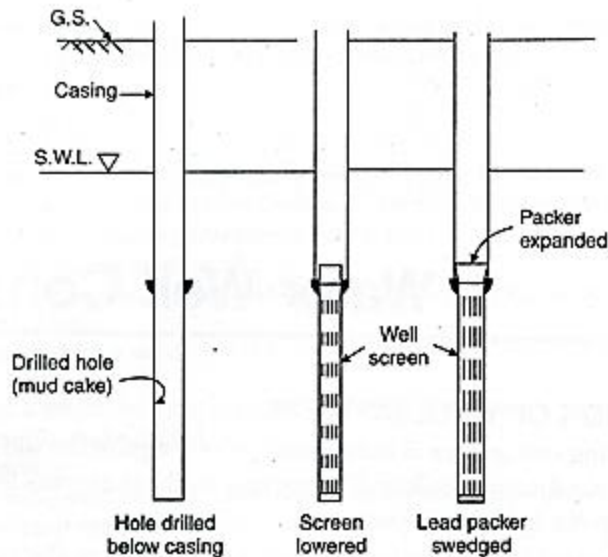
Ο όρος «ολοκλήρωση υδρογεωτρήσεων» αναφέρεται στο σύνολο των εργασιών που πρέπει να λάβουν χώρα μετά το πέρας της διάτρησης, προκειμένου να προετοιμάσουν πλήρως την ορυχθείσα γεώτρηση ως μια παραγωγική διάταξη για την παραγωγή νερού. Ο όρος «ανάπτυξη υδρογεώτρησης» ουσιαστικά αναφέρεται στις εργασίες που είναι απαραίτητες για την αποκατάσταση της πλήρους επικοινωνίας του υπόγειου υδροφορέα με τη γεώτρηση με την απομάκρυνση τυχόν εμποδίων που δύνανται να την περιορίσουν (π.χ. πλακούντας διήθησης, άμμος κ.λπ.). Και οι δύο αυτές φάσεις προηγούνται της δοκιμαστικής άντλησης που ακολουθεί και κρίνει την επιτυχία ή μη του έργου της υδρογεώτρησης.

Οι εργασίες ολοκλήρωσης μιας υδρογεώτρησης είναι γενικά οι ακόλουθες:

- Τοποθέτηση σωλήνωσης (αν και όπου απαιτείται), για τη συγκράτηση των τοιχωμάτων της γεώτρησης (τυφλοί σωλήνες).
- Τοποθέτηση φιλτροσωλήνων.
- Κατασκευή τεχνητού φίλτρου (χαλικόφιλτρο).

6.3.1.1 Σωλήνωση

Η επένδυση της γεώτρησης με σωλήνωση δεν είναι πάντα απαραίτητη. Στην περίπτωση που μια υδρογεώτρηση ορύσσεται μέσα σε σκληρούς, συμπαγείς σχηματισμούς και το νερό παράγεται από ρωγμές εντός αυτών των πετρωμάτων, τότε η γεώτρηση δεν απαιτείται να επενδυθεί με σωλήνωση ή/και πλέγμα (screen) για τη σταθεροποίηση των τοιχωμάτων της και το φιλτράρισμα του παραγόμενου νερού. Αυτού του τύπου η ολοκλήρωση ονομάζεται ολοκλήρωση ανοιχτού φρέατος (open hole completion). Σε αυτές τις περιπτώσεις, συνήθως επενδύεται με σωλήνωση το άνω μέρος της γεώτρησης, όπου αυτή διέρχεται από τους χαλαρούς εδαφικούς σχηματισμούς (Εικόνα 6-11).



Εικόνα 6-11. Ολοκλήρωση ανοιχτού τύπου με τοποθέτηση φίλτρου (Πηγή: <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=124691>)

Στις περισσότερες περιπτώσεις, όταν η υδρογεώτρηση διέρχεται από ή καταλήγει σε μη συνεκτικά πετρώματα καθίσταται απαραίτητη η επένδυσή της με σωλήνωση. Η επιλογή της διαμέτρου της τελικής σωλήνωσης είναι συνάρτηση της διαμέτρου της αντλίας που θα εγκατασταθεί και η αύξησή της δεν συνεπάγεται ανάλογη αύξηση της παροχής της γεώτρησης (Βαφειάδης, 1998). Η διάμετρος των παραγωγικών υδρογεωτρήσεων είναι συνήθως 8.5, 11½, 12¼, 15½, 17.5 in.

Η σωλήνωση δρα για τη σταθεροποίηση της γεώτρησης, αποτρέπει την είσοδο υλικών από τους σχηματισμούς εντός της στήλης νερού, παρέχει τον κατάλληλο χώρο για την είσοδο του αντλητικού ή πρόσθετου εξοπλισμού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απομόνωση συγκεκριμένων σχηματισμών.

Γενικά συνιστάται οι σωληνώσεις σε νέες γεωτρήσεις:

- Να είναι κατασκευασμένες από καινούρια υλικά.
- Να μην υποβαθμίζουν την ποιότητα του νερού.
- Να είναι στεγανές. Οποιοσδήποτε αρθρώσεις και ραφές χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι μόνιμες και στεγανές, όπου και αυτές με τη σειρά τους δεν θα πρέπει να υποβαθμίζουν την ποιότητα του νερού.
- Να είναι καθαρές και απαλλαγμένες από μολύνσεις, δηλαδή να έχουν αφαιρεθεί όλα τα ορατά υπολείμματα και υλικά πριν την τοποθέτησή τους.

Εκτός από τυφλούς σωλήνες σε μια υδρογεώτρηση εγκαθίστανται και φιλτροσωλήνες, οι οποίοι παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο είναι ότι οι τυφλοί σωλήνες είναι συμπαγείς και αδιαπέρατοι, ενώ οι φιλτροσωλήνες φέρουν ανοίγματα διαφόρων τύπων (Εικόνα 6-12).



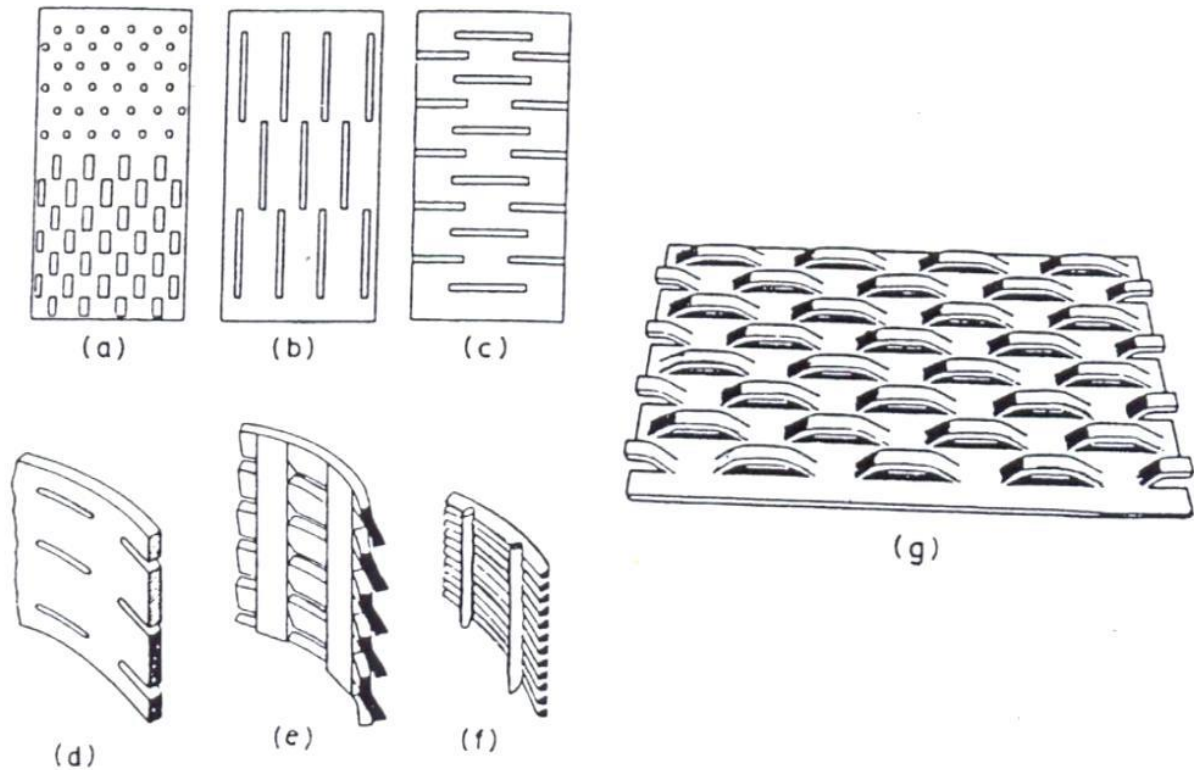
Εικόνα 6-12. Τυφλή σωλήνωση και φιλτροσωλήνες υδρογεωτρήσεων (Κανέλλος, 2014)

Οι σωλήνες που επενδύουν τις υδρογεωτρήσεις είναι κατασκευασμένοι από PVC ή από χάλυβα, κατά κύριο λόγο, και δύναται να είναι εφοδιασμένοι και με ατσάλινο πλέγμα. Οι μεταλλικοί σωλήνες πρέπει να είναι γαλβανισμένοι, ώστε να μην οξειδώνονται.

6.3.1.2 Φιλτροσωλήνες

Η επιτυχής κατασκευή μιας υδρογεώτρησης εξαρτάται κατά σημαντικό ποσοστό από την ορθή επιλογή και τοποθέτηση των φιλτροσωλήνων. Υπάρχουν διάφοροι τύποι φιλτροσωλήνων οι οποίοι μπορεί να είναι κατασκευασμένοι είτε από χάλυβα, είτε από PVC (δηλαδή θερμοπλαστικό υλικό).

Τα φίλτρα των φιλτροσωλήνων διακρίνονται ανάλογα με το σχήμα και τις διαστάσεις των ανοιγμάτων τους, την επιφάνεια που καταλαμβάνουν, καθώς και την αντοχή των φιλτροσωλήνων. Ενδεικτικά, στην Εικόνα 6-13 παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι ανοιγμάτων για φιλτροσωλήνες υδρογεωτρήσεων.



Εικόνα 6-13. Τύποι ανοιγμάτων για φιλτροσωλήνες υδρογεωτρήσεων: a) ανοίγματα κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής, b) κατακόρυφα ανοίγματα, c) & d) οριζόντια ανοίγματα, e) ανοίγματα τύπου περσίδας, f) ανοίγματα συνεχούς σχισμής, g) ανοίγματα τύπου γέφυρας (Κανέλλος, 2014)

Ανάλογα με το υλικό και τον τρόπο κατασκευής τους, οι πιο συνηθείς φιλτροσωλήνες είναι οι ακόλουθοι:

- Φιλτροσωλήνες με ραφή. Είναι χαλύβδινοι, ευθύγραμμοι σωλήνες που φέρουν ανοίγματα τύπου γέφυρας (bridge slot) με διαστάσεις 1, 1.5, 2 ή 2.5mm. Είναι γαλβανισμένοι εν θερμώ ή εν ψυχρώ.
- Φιλτροσωλήνες αφανούς ραφής. Έχουν τα ίδια σχεδιαστικά χαρακτηριστικά με τον προηγούμενο τύπο, είναι κατασκευασμένοι από διαφορετικό κράμα χάλυβα και η συγκόλληση είναι τύπου ERW/HF χωρίς εγκάρσια ραφή.

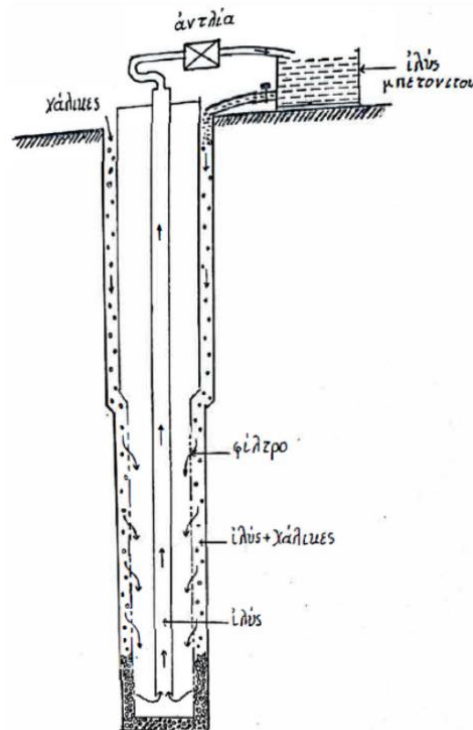
6.3.1.3 Χαλικόφιλτρο

Το χαλικόφιλτρο πληρώνει τον κενό δακτύλιο μεταξύ των εξωτερικών τοιχωμάτων της σωλήνωσης (φιλτροσωλήνας) και της γεώτρησης, έτσι ώστε να αποφεύγονται καταπτώσεις των τοιχωμάτων που θα μπορούσαν να φράξουν τα φίλτρα. Το χαλικόφιλτρο, επίσης, συγκρατεί κατά την άντληση το λεπτόκοκκο υλικό των υδροφόρων στρωμάτων (άμμος, άργιλος), επιτρέπει την κατακόρυφη κίνηση του νερού μέχρι αυτό να εισέλθει στα φίλτρα και, τέλος, αυξάνει την ενεργή διάμετρο της υδρογεώτρησης, με αποτέλεσμα την ειδική παροχή της (Βαφειαδης, 1979).

Τα πιο σημαντικά κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου χαλκόφιλτρου είναι η σύσταση, η κοκκομετρία και το σχήμα των κόκκων. Η πιο ενδεδειγμένη σύσταση είναι η πυριτική, η χαλαζιακή, η κερατολιθική και γενικά σύσταση ανθεκτική σε διάβρωση. Κόκκοι ασβεστολιθικής σύστασης είναι επιτρεπτοί μέχρι ποσοστού 5%. Από πλευράς σχήματος των κόκκων, οι λείοι και στρογγυλεμένοι είναι οι πλέον κατάλληλοι.

Η κοκκομετρία των χαλίκων πρέπει να είναι αντίστοιχη με την ταξινόμηση της άμμου του υδροφορέα. Μπορεί να υπάρξει σημαντικό πρόβλημα εάν χρησιμοποιηθεί χαλκόφιλτρο που είναι πολύ χονδρόκοκκο. Ομοιόμορφη χονδρόκοκκη άμμος διαμέτρου περίπου 1/8 in (3.17 mm) είναι η πλέον κατάλληλη για τους περισσότερους υδροφορείς που περιέχουν ψιλή άμμο. Αντίθετα, στην περίπτωση που ο υδροφορέας διαθέτει άμμο μέσης ως μεγάλης διαμέτρου, επιβάλλεται η χρήση λεπτόκοκκου χαλκιού μεγέθους 1/4 in (6.35 mm).

Η χαλίκωση ξεκινά από τον πυθμένα του φρέατος και φθάνει μέχρι 5 m κάτω από το στόμιο της υδρογεώτρησης. Τα υπολειπόμενα 5 m μέχρι την επιφάνεια τσιμεντώνονται (υγειονομική σφράγιση). Το πάχος του χαλκόφιλτρου πρέπει να κυμαίνεται από 2 έως 4 in περιμετρικά της σωλήνωσης. Η τοποθέτηση του χαλκόφιλτρου μπορεί να γίνει είτε με θετική (συμβατική) είτε με ανάστροφη κυκλοφορία πολφού μπετονίτη (Βαφειάδης, 1998). Εάν η γεώτρηση διατηρείται ανοιχτή με το ρευστό διάτρησης, η τοποθέτηση του χαλκόφιλτρου γίνεται με συμβατική κυκλοφορία του ρευστού διάτρησης (Εικόνα 6-14).



Εικόνα 6-14 Χαλίκωση γεώτρησης με ανάστροφη κυκλοφορία ρευστού διάτρησης (Βαφειάδης, 1979)

6.3.2 Ανάπτυξη υδρογεώτρησης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο σκοπός της ανάπτυξης είναι η αποκατάσταση της πλήρους επικοινωνίας του υπόγειου υδροφορέα με την υδρογεώτρηση, καθώς κατά την όρυξη προκαλούνται αλλοιώσεις στους σχηματισμούς εντός των οποίων διαμορφώνονται τα τοιχώματα της γεώτρησης και ιδιαίτερα στα στρώματα του υδροφόρου ορίζοντα (δημιουργία πολύ λεπτόκοκκων υλικών, συμπίεση των κόκκων του πετρώματος και φράξιμο των πόρων). Επίσης, ο πλακούντας διήθησης που καλύπτει τα τοιχώματα της ανοιχτής γεώτρησης εμποδίζει την ομαλή επικοινωνία της με το υδροφόρο στρώμα.

Η ανάπτυξη στοχεύει, λοιπόν, στην ανακατάταξη των χονδρόκοκκων υλικών του υδροφορέα γύρω από τον φιλτροσωλήνα και στην απομάκρυνση του πλακούντα διήθησης και της άμμου από τη ζώνη άντλησης της γεώτρησης, ώστε να διατηρείται υψηλή διαπερατότητα για την απρόσκοπτη και χωρίς μεγάλες απώλειες πίεσης ροή του νερού από τον υδροφορέα στη γεώτρηση και από κει στην επιφάνεια. Οι εργασίες ανάπτυξης αρχίζουν αμέσως μετά την τοποθέτηση του χαλικόφιλτρου.

6.3.2.1 Μέθοδοι ανάπτυξης υδρογεωτρήσεων

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι ανάπτυξης υδρογεωτρήσεων, ανάλογα με τα ειδικά προβλήματα σε κάθε περίπτωση:

1. Έκπλυση γεώτρησης με κυκλοφορία καθαρού νερού. Η μέθοδος περιλαμβάνει την κυκλοφορία καθαρού νερού με την αντλία του ρευστού διάτρησης όπου με την εισαγωγή σωλήνα εισπνέζεται καθαρό νερό για την εκτόπιση του ρευστού διάτρησης. Στην ουσία η διαδικασία αυτή αλλάζει τον πολφό διάτρησης σε νερό, δεν καθαρίζει τους πόρους του σχηματισμού και δεν αποδίδει όταν υπάρχουν έντονα προβλήματα στην επικοινωνία του σχηματισμού με τη γεώτρηση.
2. Εισπίεση πεπιεσμένου αέρα με χρήση αεροσυμπιεστή (air lift). Σε αυτήν διοχετεύεται στο εσωτερικό της γεώτρησης αέρας υπό πίεση μέσω σωλήνα, αναμιγνύεται με το ρευστό διάτρησης που υπάρχει μέσα στη γεώτρηση, μειώνοντας διαρκώς την πυκνότητα του διαφασικού μίγματος και αυξάνοντας την ανοδική του ταχύτητα. Είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική ιδιαίτερα σε γεωτρήσεις που έγιναν που ορύχθηκαν με περιστροφική διάτρηση και χρήση πολφού.
3. Εκτόξευση νερού υπό πίεση (jetting). Βασίζεται στην εκτόξευση νερού υπό υψηλή πίεση προς τα τοιχώματα της γεώτρησης, με σκοπό να διασπάσει και να απομακρύνει τον πλακούντα διήθησης που έχει πιθανά αναπτυχθεί στα τοιχώματα της γεώτρησης. Τυπικές ταχύτητες εκτόξευσης νερού: 45-60 m/sec.

4. Χρήση εμβόλου ή γραμμικού ξέστρου (line swab). Πρόκειται για μέθοδο μηχανικής απομάκρυνσης του πλακούντα διήθησης κατά την οποία μια διάταξη (ξέστρο) κινείται παλινδρομικά εντός της γεώτρησης αποξέοντα τα τοιχώματα από τις επικαθίσεις.
5. Μέθοδοι που βασίζονται σε διάφορους τύπους άντλησης από τον υπόγειο υδροφορέα, ενίοτε σε συνδυασμό με εισπίεση νερού. Δύναται να πραγματοποιείται άντληση υψηλής παροχής (υπεράντληση) προκειμένου να απομακρυνθεί το λεπτόκοκκο υλικό από το χαλικόφιλτρο και τους φίλτροσωλήνες, είτε άντληση με κλιμακωτή αύξηση της παροχής, είτε απότομη έναρξη για 10-30 min και στη συνέχεια παύση της άντλησης για 5-15 min, είτε πραγματοποιούνται εναλλαγές άντλησης με εισπίεση ρευστού, για την καλύτερη αναδιάταξη των κόκκων και τη διευκόλυνση της διέλευσης νερού από τον υδροφορέα στη γεώτρηση.

Εισπίεση νερού με εμβολισμό. Κατά τη μέθοδο αυτή πραγματοποιείται εισπίεση νερού κάτω από ένα μονό έμβολο που είναι τοποθετημένο στη διατρητική στήλη, έτσι ώστε το έμβολο να αναγκάζει το εισπνεζόμενο νερό να εισχωρήσει στον σχηματισμό, καθαρίζοντας τους πόρους του. Το έμβολο παλινδρομεί με ταχύτητα περίπου 2.5m/s. Υπάρχει και παραλλαγή της μεθόδου με διπλό έμβολο. Ο Βαφειάδης (1979) αναφέρει και άλλες μεθόδους ανάπτυξης των υδρογεωτρήσεων με χρήση χημικών ουσιών. Ενδεικτικά αναφέρονται:

- Πλύση με πολυφωσφορικά άλατα για την εξουδετέρωση του μπεντονίτη.
- Πλύση ανθρακικών πετρωμάτων με υδροχλωρικό οξύ για την αύξηση της διαπερατότητάς τους.
- Χρήση εκρηκτικών υλών σε ανθρακικά πετρώματα για τον κατακερματισμό τους και την αύξηση του πορώδους τους.

6.4 ΣΥΝΗΘΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΟΡΥΞΗ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Τα πλέον συνήθη προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την όρυξη των υδρογεωτρήσεων και μπορούν να εγείρουν κινδύνους για το έργο είναι:

- Κατάρρευση των τοιχωμάτων της γεώτρησης.
- Απώλεια ρευστού διάτρησης στους σχηματισμούς που περιβάλλουν τη γεώτρηση.
- Ανεπιθύμητη επικοινωνία μεταξύ των υδροφόρων στρωμάτων.
- Απόκλιση από την κατακορυφότητα.
- Άντληση νερού υψηλής περιεκτικότητας σε άμμο.

Αναφέρονται επίσης και μια σειρά άλλων προβλημάτων, που όμως είναι κοινά σε όλους τους τύπους των γεωτρήσεων, όπως:

- Αστοχία διατρητικών στελεχών.
- Έκκεντρη σύνδεση διατρητικών στελεχών.
- Έκρηξη (blow out) στη γεώτρηση λόγω ύπαρξης θύλακα αερίου σε μικρό βάθος (shallow gas).
- Βλάβη στο γεωτρύπανο, στην αντλία ή στον αεροσυμπιεστή.

Η απόκλιση από την κατακορυφότητα μπορεί να επιφέρει δυσκολία ανόδου και καθόδου του αντλητικού συγκροτήματος μέσα στη γεώτρηση που τελικά οδηγεί σε φθορά της σωλήνωσης και του αντλητικού συστήματος. Το αποτέλεσμα μιας τέτοιας κατάστασης είναι η προβληματική λειτουργία της υδρογεώτρησης ή/και η καταστροφή της λόγω εγκλωβισμού της αντλίας ή καταστροφής της σωλήνωσης. Εκτός από την απόκλιση από την κατακορυφότητα, άλλοι πιθανοί λόγοι για τέτοιου είδους προβλήματα μπορεί να είναι η κακή συναρμολόγηση της σωλήνωσης, το «τσαλάκωμα» της επένδυσης λόγω δυσκολιών κατά τη σωλήνωση, εδαφικές μετακινήσεις κ.ά.

Η άντληση νερού υψηλής περιεκτικότητας σε άμμο ή άργιλο οδηγεί σε υποβάθμιση της ποιότητάς του. Στην περίπτωση αυτή το νερό αντλείται «θολό» και μη κατάλληλο ειδικά για ύδρευση και ταυτόχρονα μειώνεται ο χρόνος ζωής τόσο του αντλητικού συγκροτήματος όσο και της γεώτρησης λόγω της απενεργοποίησης των φίλτροσωλήνων που πληρώνονται από άργιλο και καθίστανται ουσιαστικά ανενεργοί. Το πρόβλημα μπορεί να οφείλεται στη λανθασμένη τοποθέτηση του αντλητικού συγκροτήματος, στη μη κατάλληλη χαλίκωση εξωτερικά της σωλήνωσης, στην υπεράντληση, στην εκμετάλλευση προβληματικού υδροφόρου στρώματος ή στην αποτυχημένη απομόνωση εδαφικού στρώματος κ.ά.

Σήμερα ο τεχνικός έλεγχος των υδρογεωτρήσεων γίνεται αποσπασματικά και συνήθως εστιάζεται στην καθετομέτρηση της γεώτρησης, δηλαδή μέτρηση της γωνίας κλίσης. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται με όργανα παλιάς τεχνολογίας και δίνουν περιορισμένη πληροφορία για τη γεώτρηση. Επίσης το χαμηλό κόστος των υδρογεωτρήσεων δεν επιτρέπει τη χρήση αισθητήρων παρακολούθησης σημαντικών παραμέτρων που επιδρούν στην εκτέλεση της γεώτρησης, οι οποίοι θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην έγκαιρη ανίχνευση πιθανών προβλημάτων. Γενικά η λειτουργία του γεωτρύπανου στις μέρες μας είναι καθαρά εμπειρική και βασίζεται στην ικανότητα του χειριστή. Οι επιδόσεις μπορεί να είναι καλές, δηλαδή ικανοποιητικοί ρυθμοί διάτρησης με κατάλληλους χρόνους εκτέλεσης, αλλά κανείς δε μπορεί να γνωρίζει εάν είναι οι βέλτιστες. Πολλά από τα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν κατά την όρυξη(κόλλημα του κοπτικού ή της διατρητικής στήλης, απώλεια κώνου του κοπτικού, απώλεια πολφού, κατάπτωση των τοιχωμάτων, δημιουργία πλακούντα διήθησης μεγάλου πάχους με κίνδυνο το κόλλημα της στήλης), μπορούν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά με κατάλληλη εκπαίδευση του προσωπικού.

6.5 ΚΟΣΤΟΣ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Οι βασικές κατηγορίες κόστους κατά την κατασκευή αβαθών υδρογεωτρήσεων αφορούν:

- Τη μεταφορά στη θέση της γεώτρησης του κατάλληλου μηχανικού εξοπλισμού, όπως επίσης και την απομάκρυνσή του μετά το πέρας των εργασιών.
- Τη διεύρυνση της γεώτρησης σε γεωτρήσεις μεγαλύτερων διαμέτρων (12.25 in, 15.5 in, 17.5 in), ανάλογα με τις ανάγκες.
- Την προμήθεια των πρώτων υλών για τη σύνθεση του ρευστού διάτρησης (του νερού, μπεντονίτη κ.λπ.), των κοπτικών άκρων, των απαιτούμενων υλικών για τη σύνθεση και τοποθέτηση της τελικής σωλήνωσης διαμέτρου ανάλογης με την τελική διάμετρο της παραγωγικής γεώτρησης.
- Την κατασκευή και εγκατάσταση του χαλικόφιλτρου.
- Τον καθαρισμό, την έκπλυση και την ανάπτυξη της γεώτρησης.
- Την κατασκευή στομίου γεώτρησης με το σύστημα ασφαλείας αυτού.
- Την τελική δοκιμαστική άντληση και όλους τους υπόλοιπους ελέγχους και δοκιμές που απαιτούνται.

Πίνακας 6-3 Ενδεικτικές τιμές κόστους ανά μέτρο βάθους όρυξης υδρογεωτρήσεων αλλά και διεύρυνσης διαμέτρου αυτών ανάλογα με τη σκληρότητα των σχηματισμών σύμφωνα με τις τιμολογήσεις του Ελληνικού Δημοσίου. (Πηγή:

<http://deyaka.gr/wp-content/uploads/2020/05/4.->

[%CE%A4%CE%B9%CE%BC%CE%BF%CE%BB%CF%8C%CE%B3%CE%B9%CE%BF.pdf](#))

Διάνοιξη υδρογεώτρησης Φ 8½"	
Μαλακά πετρώματα	Σκληρά πετρώματα
17.53 €/m	30.11 €/m
Διεύρυνση υδρογεώτρησης από Φ 8½" σε Φ 16"	
Μαλακά πετρώματα	Σκληρά πετρώματα
34.3 €/m	51.4 €/m
Διεύρυνση υδρογεώτρησης από Φ 16" σε Φ 20"	
Μαλακά πετρώματα	Σκληρά πετρώματα
18.31 €/m	27.46 €/m

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΑΙ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι βασικές διαφορές μεταξύ των γεωθερμικών γεωτρήσεων χαμηλής και υψηλής ενθαλπίας σχετίζονται με τις θερμοκρασίες που επικρατούν στον ταμιευτήρα και στο βάθος που βρίσκεται αυτός. Η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών στα πεδία υψηλής ενθαλπίας ξεπερνά τους 150°C, ενώ στα πεδία χαμηλής ενθαλπίας η θερμοκρασία κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 30 και 100°C. Οι υψηλές θερμοκρασίες, σε συνδυασμό με τη διαβρωτική δράση των γεωθερμικών ρευστών απαιτεί ενδελεχή σχεδιασμό των γεωτρήσεων και χρήση ειδικού μηχανολογικού εξοπλισμούς. Η σημαντική αύξηση του βάθους των γεωτρήσεων στα πεδία υψηλής ενθαλπίας συγκριτικά με τις γεωτρήσεις στα πεδία χαμηλής ενθαλπίας, συμβάλλει επίσης στην απαίτηση ενδελεχούς σχεδιασμού της γεώτρησης και του υδραυλικού της προγράμματος για την ορθή και ασφαλή διαχείριση των πιέσεων των σχηματισμών. Σε κάθε περίπτωση, οι καταπονήσεις του γεωτρητικού εξοπλισμού είναι σημαντικά μεγαλύτερες στα πεδία υψηλής ενθαλπίας, οπότε στις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας απαιτείται πιο σύνθετος σχεδιασμός και χρήση ειδικού εξοπλισμού, στοιχεία που αυξάνουν το κόστος κατακόρυφα.

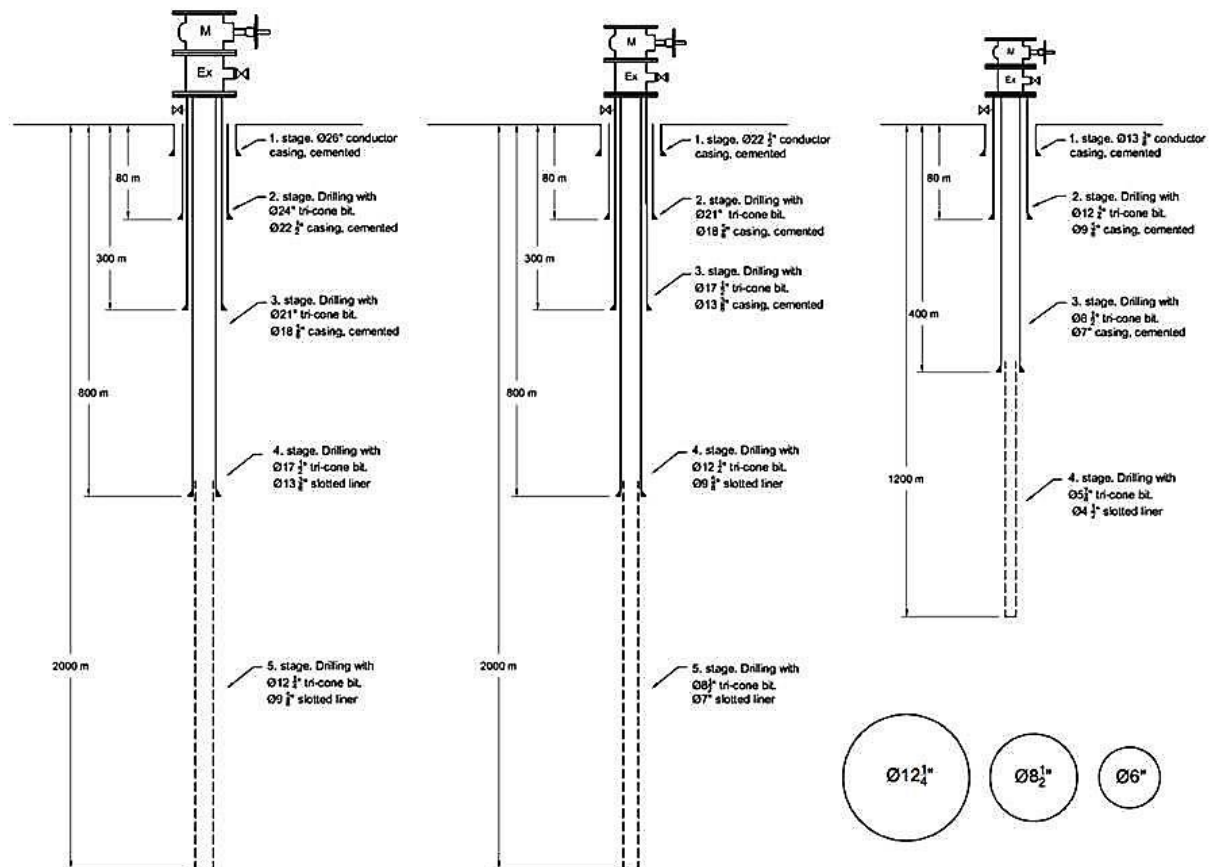
Στις ενότητες που ακολουθούν επιχειρείται ανάδειξη των διαφορών μεταξύ γεωτρήσεων χαμηλής και υψηλής ενθαλπίας στον σχεδιασμό αυτών των γεωτρήσεων, στις μεθόδους και τον μηχανολογικό εξοπλισμό που απαιτείται για την όρυξή τους.

7.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

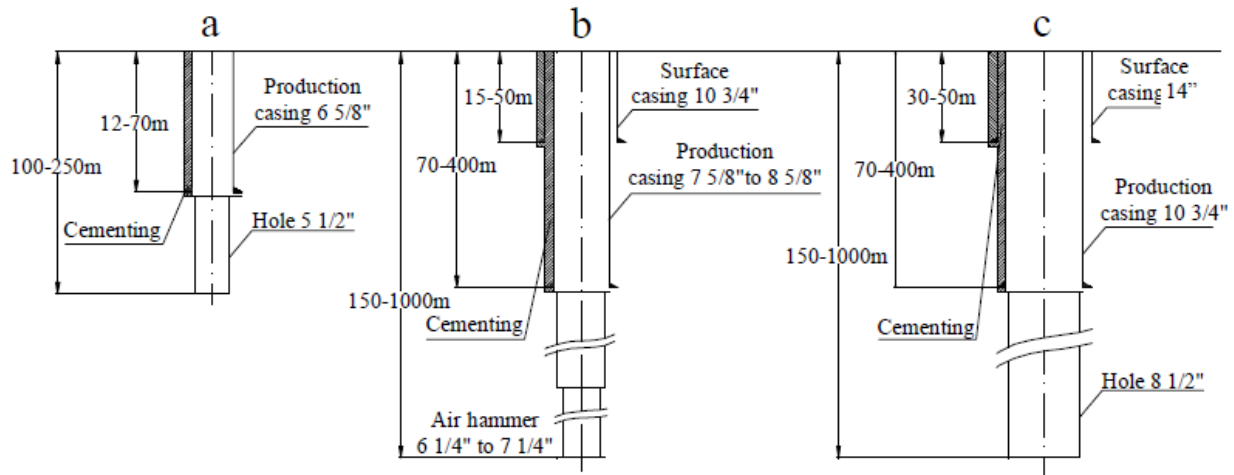
Όπως είναι γνωστό η επιλογή της σωστής τεχνικής διάτρησης σε μια γεωθερμική γεώτρηση εξαρτάται από τους γεωλογικούς σχηματισμούς, το βάθος και τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα. Έχει ως στόχο την άρτια εκτέλεση της όρυξης και τη μείωση του κόστους, καθώς με βάση αυτές τις παραμέτρους προκύπτουν οι διάμετροι των γεωτρήσεων, ο αριθμός των σωληνώσεων που πρέπει να εγκατασταθούν, οι τύποι των κοπτικών άκρων κοκ. Σε αβαθείς γεωθερμικές γεωτρήσεις αναλογίζοντας αυτές τις τρεις παραμέτρους μπορεί εύκολα να φανταστεί κάποιος ότι απαιτούν λιγότερο πολύπλοκους σχεδιασμούς σε σχέση με τις βαθιές γεωθερμικές γεωτρήσεις, αφού πραγματοποιούνται σε αρκετά μικρότερα βάθη, γεγονός που προφανώς υποδεικνύει ότι κατά την όρυξη της γεώτρησης θα συναντηθεί πιθανότατα μικρότερος αριθμός διαφορετικών σχηματισμών και σχετικά πιο ήπιες συνθήκες στους

ΟΡΥΞΗ ΑΒΑΘΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΠΕΔΙΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

ταμειυτήρες ενδιαφέροντος. Αυτός ο συλλογισμός γίνεται ακόμη πιο κατανοητός από τα σχήματα που ακολουθούν, όπου συγκρίνοντάς τα είναι ευδιάκριτη η μεγαλύτερη πολυπλοκότητα σχεδίασης των βαθιών γεωθερμικών γεωτρήσεων και τα οποία αφορούν τα προφίλ σωληνώσεων ορισμένων βαθιών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία υψηλής ενθαλπίας (Εικόνα 7-1) και τα αντίστοιχα προφίλ σε ορισμένες γεωτρήσεις αβαθών γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας (Εικόνα 7-2).



Εικόνα 7-1 Σχεδιαγράμματα προγραμμάτων σωλήνωσης τριών διαφορετικών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία υψηλής ενθαλπίας (Πηγή: <https://www.geoenergymarketing.com/tag/casing-design/>)



Εικόνα 7-2 Ενδεικτικά σχεδιαγράμματα προγραμμάτων σωλήνωσης τριών διαφορετικών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας. Τα συγκεκριμένα προγράμματα αφορούν γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην Ισλανδία (Gombó, 2010)

7.3 ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

7.3.1 Γεωτρύπανο

Τα γεωτρύπανα που χρησιμοποιούνται και στους δύο τύπους γεωτρήσεων που εξετάζονται χρησιμοποιούν σύστημα περιστροφής. Διακρίνονται σε δύο τύπους: αυτά που η περιστροφή μεταδίδεται στη διατρητική στήλη με περιστροφική τράπεζα και αυτά που διαθέτουν περιστρεφόμενη κεφαλή. Τα γεωτρύπανα με περιστροφική τράπεζα είχαν παλαιότερα περισσότερο εφαρμογή στις γεωθερμικές γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας. Το τελευταίο διάστημα όμως κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος τα γεωτρύπανα με περιστρεφόμενη κεφαλή, τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε αβαθείς γεωτρήσεις σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας. Αυτό συμβαίνει λόγω των μεγαλύτερων δυσκολιών που συναντώνται στα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας. Η περιστρεφόμενη κεφαλή βοηθάει στην εξοικονόμηση χρόνου, καθώς δε χρειάζεται να προστίθενται ένα-ένα τα διατρητικά στελέχη και, επιπλέον, το μεγάλο της πλεονέκτημα είναι ότι δε σταματάει ποτέ η περιστροφική κίνηση και η ταυτόχρονη ροή ρευστού διάτρησης, στοιχείο πολύ χρήσιμο καθώς στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες παρατείνεται κατ' αυτόν τον τρόπο η ζωή του κοπτικού άκρου και προστατεύεται γενικότερα ο υπεδαφικός εξοπλισμός.

Μια άλλη διαφορά των δύο τύπων γεωθερμικών γεωτρήσεων, είναι ο τύπος του γεωτρύπανου. Στις γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας τα γεωτρύπανα μπορούν να μεταφέρονται εύκολα στη θέση της γεώτρησης λόγω του συνήθως μικρού μεγέθους τους και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλοι οι τύποι αυτοκινούμενων και συρόμενων γεωτρύπανων (τροχοφόρα, ερπυστριοφόρα και συρόμενα επί ελκλήθρου). Από την άλλη στις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας τα γεωτρύπανα, λόγω του μεγάλου μεγέθους τους, συναρμολογούνται στο πεδίο και αποσυναρμολογούνται μετά

το πέρας της διαδικασίας της όρυξης. Απαιτείται η διαχείριση περισσότερων και μεγαλύτερου μήκους και διαμέτρου διατρητικών στελεχών και σωληνώσεων. Ο αντiekρηκτικός μηχανισμός (B.O.P.) είναι πιο σύνθετος παραπέμποντας σε βαθιές γεωτρήσεις υδρογονανθράκων και επομένως είναι απαιτητό ο πύργος να εκτείνεται σε αρκετά μέτρα ύψος. Τέλος, η προετοιμασία της περιοχής για τη διενέργεια των γεωτρήσεων σε πεδία υψηλής ενθαλπίας αποτελεί πιο σύνθετη διαδικασία σε σχέση με τις γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας.

7.3.2 Διατρητική στήλη

Ο σχεδιασμός της διατρητικής στήλης αποτελεί σύνθετο πρόβλημα σε όλες τις γεωθερμικές γεωτρήσεις και ακόμα περισσότερο στις υψηλής ενθαλπίας, εξαιτίας του μεγάλου βάθους, των υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών και του έντονου διαβρωτικού περιβάλλοντος που επικρατεί στους σχηματισμούς των ταμιευτήρων. Επιλέγονται, λοιπόν, στελέχη που ανήκουν σε ειδικές κατηγορίες χάλυβα και είναι κατασκευασμένα από κράματα σχεδιασμένα να αντέχουν σε διάβρωση. Η παρουσία υδρόθειου απαιτεί ο σχεδιασμός της διατρητικής στήλης να συμβαδίζει με τους κανονισμούς NACE 0175 και IRP 1. Αυτό συμβαίνει διότι σε γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας η διατρητική στήλη τείνει να φθείρεται πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με οποιονδήποτε άλλο τύπο γεώτρησης.

Όσον αφορά την κατώτερη συνδεσμολογία, δεδομένου ότι στο μεγαλύτερό της μέρος συμπίεζεται, είναι πιο επιρρεπής σε αστοχία σε σύγκριση με τη διατρητική στήλη. Το αυξημένο φορτίο που δέχεται κάνει τα μέρη από τα οποία αποτελείται, να είναι πιο ευαίσθητα στο H_2S , απαιτώντας με αυτόν τον τρόπο ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή κατάλληλα ανθεκτικών υλικών, πόσο μάλλον σε πεδία υψηλής ενθαλπίας που τα φαινόμενα είναι πιο έντονα.

Τέλος, πολλές φορές η πορεία των γεωτρήσεων πρέπει να παρεκκλίνει της κάθετης διεύθυνσης εξαιτίας είτε νομικών είτε τοπογραφικών ζητημάτων που μπορεί να προκύψουν κατά την επιλογή της θέσης της γεώτρησης, με αποτέλεσμα το γεωτρήπανο να μην είναι δυνατό να βρίσκεται ακριβώς από πάνω από τον σχηματισμό ενδιαφέροντος. Για να επιτευχθεί η κεκλιμένη πορεία απαιτείται η χρήση κινητήρων στον πυθμένα και εργαλεία για τον έλεγχο και την παρακολούθηση της πορείας. Αυτός ο εξοπλισμός χρησιμοποιείται αποκλειστικά γεωτρήσεις μεγάλου βάθους, διότι σε γεωτρήσεις μικρού βάθους δεν υπάρχει το περιθώριο απόκλισης πολλών μοιρών από την κατακόρυφο λόγω των λίγων μέτρων βάθους όρυξης. Επομένως, όταν χρήζει εφαρμογής σε γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας, που οι συνθήκες διάτρησης είναι πολύ αντίξοες, φθείρονται τα ελαστομερή μέρη του κινητήρα και τα όργανα παρακολούθησης μπορεί να υπολειπώνονται.

7.3.3 Κοπτικά άκρα

Σε όλους τους τύπους γεωθερμικών γεωτρήσεων κυριαρχούν τα κοπτικά με περιστρεφόμενους κώνους και πιο συγκεκριμένα τα τρίκωνα κοπτικά. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι οικονομικά, παρουσιάζουν πολύ καλά αποτελέσματα σε σχηματισμούς μέσης έως μεγάλης σκληρότητας και πολύ καλές αντοχές σε σκληρά και ρωγματωμένα πετρώματα, τα οποία απαντώνται πολύ συχνά σε γεωτρήσεις γεωθερμικών πεδίων. Όπως έχει προαναφερθεί τα τρίκωνα κοπτικά πρέπει να διαθέτουν ρουλεμάν και λιπαντικά υγρά όσο το δυνατόν περισσότερο ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες.

Ακόμη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στους δύο τύπους γεωτρήσεων κοπτικά με ελάσματα, τα οποία περιορίζονται σε χαλαρούς σχηματισμούς και είναι πιο οικονομικά. Στις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας, πιο συγκεκριμένα, έχουν αρχίσει να βρίσκουν εφαρμογή και τα πολυκρυσταλλικά συμπαγή αδαμαντοκοπτικά (PDC), καθώς έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα ότι δε διαθέτουν κινούμενα μέρη τα οποία καταπονούνται σε μεγάλο βαθμό από τις υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, σε πολύ σκληρούς σχηματισμούς δεν παρουσιάζουν πολύ ικανοποιητικούς ρυθμούς προχώρησης. Τέλος, οι αδαμαντοκορώνες αποφεύγονται και στους δύο τύπους γεωτρήσεων λόγω του υψηλού τους κόστους και τις γρήγορης φθοράς τους, αν και ενίοτε μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας, στις περιπτώσεις που δεν είναι αποδοτική η χρήση των άλλων τύπων κοπτικών.

7.3.4 Ρευστά διάτρησης

Στις γεωθερμικές γεωτρήσεις γενικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ρευστά διάτρησης υγρής ή αέριας φάσης. Η ανάγκη για μεγάλες διαμέτρους στις γεωθερμικές γεωτρήσεις και τα συχνά προβλήματα απώλειας κυκλοφορίας που συναντώνται έχουν σημαντικές επιπτώσεις στο κόστος των γεωτρήσεων. Για την παρασκευή του ρευστού διάτρησης η υγρή βάση αποτελείται αποκλειστικά από νερό και συνήθως γλυκό, τα ενεργά στερεά συμπεριλαμβάνουν άργιλο και πολυμερή που στοχεύουν στη δημιουργία ενός κολλοειδούς αιωρήματος και ρυθμίζουν το ιξώδες του πολφού, καθώς και αδρανή στερεά (βαρύτης) που χρησιμεύουν στην αύξηση της πυκνότητας του πολφού.

Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών στις γεωθερμικές γεωτρήσεις επηρεάζεται η δράση των πρόσθετων δημιουργώντας έτσι προβλήματα στη διαδικασία της διάτρησης. Το πρόβλημα αυτό είναι ακόμα πιο έντονο στα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας όπου οι θερμοκρασίες είναι αρκετά υψηλότερες. Πιο συγκεκριμένα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 150°C τα στερεά εντός της λάσπης απορροφούν νερό και οδηγούν στην αύξηση του ιξώδους και επομένως στη ζελατινοποίηση του ρευστού. Επίσης, το πολύ αυξημένο pH εξαιτίας της παρουσίας H₂S και CO₂, που είναι ακόμα πιο έντονη σε πεδία υψηλής ενθαλπίας, οδηγεί σε διάβρωση του

εξοπλισμού, η οποία μπορεί να περιοριστεί με την προσθήκη καυστικής σόδας (NaOH) ή καυστικής ποτάσας (KOH) για ιδανική σταθεροποίηση του pH σε τιμές κοντά στο 10.5.

Τέλος, γενικά στις γεωθερμικές γεωτρήσεις είναι αναγκαία η αλλαγή του πολφού σε πολφό με βάση τον αέρα όταν διατρύονται οι παραγωγικοί σχηματισμοί, δεδομένου ότι ελλοχεύει ο κίνδυνος φραξίματος των ρωγμών από τις οποίες το γεωθερμικό ρευστό θα εισρέει στη γεώτρηση. Επίσης, η ύπαρξη υποπίεσης σε ορισμένους ταμιευτήρες δύναται να απαιτήσει τη χρήση συμπιεσμένου αέρα ως ρευστού διάτρησης.

7.3.5 Σωλήνωση

Γενικότερα στις γεωθερμικές γεωτρήσεις παίζει σημαντικό ρόλο η μεταλλουργική κατεργασία που θα χρησιμοποιηθεί ώστε ο χάλυβας των στελεχών της σωλήνωσης να καταστεί ανθεκτικός στη διάβρωση που προκαλείται από τα γεωθερμικά ρευστά. Στις γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας, όπου και το βάθος είναι μικρότερο, αλλά και η διάβρωση δεν είναι τόσο έντονη, ο σχεδιασμός της σωλήνωσης είναι ευκολότερος από αυτόν που απαιτείται για τις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας. Η διαδικασία της σωλήνωσης είναι μια πολύ δαπανηρή διαδικασία και είναι πολύ σημαντική η χρήση όσο το δυνατόν λιγότερων στηλών σωλήνωσης, κυρίως στις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας. Έτσι, όταν το επιτρέπουν οι συνθήκες, δηλαδή δεν αυξάνεται σημαντικά το ρίσκο, αφαιρούνται από κατά τον σχεδιασμό επιπλέον στήλες σωλήνωσης για να καταστεί οικονομικά βιώσιμη η γεώτρηση.

Υπάρχουν αρκετοί προβληματισμοί που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διάτρηση γεωθερμικών γεωτρήσεων γενικά, οι οποίοι καθίσταται πιο έντονοι σε αυτές της υψηλής ενθαλπίας. Τα συνηθισμένα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένες οι σωληνώσεις χάνουν την αντοχή τους με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό το φαινόμενο δεν είναι τόσο έντονο σε γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας, αλλά σε πεδία υψηλής ενθαλπίας περιορίζει σημαντικά τις κατηγορίες χάλυβα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Στον περιορισμό αυτό συμβάλει και η διάβρωση που περιορίζει ακόμα περισσότερο τις επιλογές σε ειδικές κατηγορίες χάλυβα. Αυτό το πρόβλημα συνεπάγεται περιορισμένη διαθεσιμότητα σωληνώσεων που είτε απαιτεί έγκαιρο προγραμματισμό, αρκετό διάστημα πριν την υλοποίηση της γεώτρησης, είτε σε αλλαγές και προσαρμογές κατά τη διάρκεια της διάτρησης.

Τέλος, η απόφαση για το αν ο παραγωγικός σχηματισμός είναι αρκετά συνεκτικός και ικανός να αφηθεί χωρίς σωλήνωση (open hole completion) ή να σωληνωθεί με χρήση διάτρητου liner για να αποφευχθούν καταρρεύσεις των τοιχωμάτων ή εμφράξεις του κατώτατου μέρους της γεώτρησης στηρίζεται στις δειγματοληψίες κατά τη διάρκεια διάτρησης της γεώτρησης, ή σε ειδικές διαγραφίες αν είναι διαθέσιμες. Τις περισσότερες φορές, ωστόσο, η επιλογή βασίζεται σε δεδομένα από άλλες γεωτρήσεις σε όμοιους ταμιευτήρες. Αν, λοιπόν, στις γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας είναι επιθυμητή η παρουσία ενός έμπειρου μηχανικού για να αναλάβει τον σχεδιασμό

και την υλοποίηση της γεώτρησης, στις υψηλής ενθαλπίας είναι επιβεβλημένη, καθώς οι κίνδυνοι είναι πάρα πολλοί και το κόστος δεν πρέπει να ξεφύγει.

7.3.6 Τσιμέντωση

Η λογική της τσιμέντωσης είναι η ίδια και στις δύο γεωτρήσεις που εξετάζονται. Είναι απαραίτητη η τσιμέντωση σε όλο το μήκος των σωληνώσεων, όμως στις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας συγκεκριμένα είναι εξαιρετικά δύσκολη. Η δυσκολία αυτή προκύπτει από τα ειδικά προβλήματα που αντιμετωπίζονται, όπως οι ζώνες απώλειας κυκλοφορίας, η ακανόνιστη γεωμετρία της γεώτρησης που επιδεινώνεται περισσότερο σε ζώνες κατάπτωσης ή απώλειας κυκλοφορίας και τέλος, η αύξηση του ιξώδους του πολφού σε υψηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιούνται λοιπόν, οι κατάλληλες τεχνικές ώστε να επιτευχθεί τσιμέντωση χωρίς κενά και ατέλειες που θα παρέχει ισχυρή επαφή μεταξύ της σωλήνωσης και του τσιμέντου. Το τσιμέντο, κυρίως στις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας, πρέπει να είναι ελαφρύ σε βάρος, οπότε χρησιμοποιείται τσιμέντο που εμπεριέχει αέρα. Εάν, όμως, και με το αεριοποιημένο τσιμέντο δεν καθίσταται δυνατή η ιδανική τσιμέντωση, η όλη διαδικασία πραγματοποιείται σε στάδια με χρήση ειδικών κολάρων, έτσι ώστε να ασκείται η μικρότερη δυνατή πίεση στους σχηματισμούς. Το τσιμέντο τύπου Portland είναι ο βασικός τύπος τσιμέντου που χρησιμοποιείται σε όλες τις γεωθερμικές γεωτρήσεις και ανήκει στην κλάση G. Η πυριτική παιπάλη (silica flour) προστίθεται για να βελτιωθεί η αντοχή του τσιμέντου σε θλίψη κάνοντάς το πολύ πιο ανθεκτικό σε χρόνο και σε υψηλές θερμοκρασίες.

7.4 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Η ολοκλήρωση του αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας περιλαμβάνει την επιλογή της κατάλληλης φιλτροσωλήνωσης (υλικό κατασκευής ανθεκτικό στη διάβρωση, κατάλληλο άνοιγμα σχισμών), το σωστό σημείο τοποθέτησής της και την επιλογή της χρήσης ή μη χαλκίκοφιλτρου. Στις βαθιές γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας, είναι πολύ σημαντική η διαπίστωση για ανάγκη ολοκλήρωσης ανοιχτού μετώπου ή ολοκλήρωση με χρήση διάτρητου liner αν οι σχηματισμοί του ταμειυτήρα δεν είναι αρκετά συμπαγείς. Ύστερα, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη διέγερση (Υδραυλική ρωγμάτωση, Θερμική ρωγμάτωση, Χρήση οξέων) των γεωθερμικών ταμειυτήρων δε διαφέρουν και είναι κοινές για τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής και υψηλής ενθαλπίας. Τέλος, το τελευταίο στάδιο της ολοκλήρωσης, δηλαδή η εγκατάσταση του απαραίτητου εξοπλισμού στην κεφαλή της γεώτρησης, δε παρουσιάζει ουσιαστική διαφορά μεταξύ των δύο γεωτρήσεων, παρά μόνο ότι στις βαθιές γεωθερμικές γεωτρήσεις θα είναι πιο σύνθετος ο συγκεκριμένος εξοπλισμός εξαιτίας της πολυπλοκότητάς τους.

7.5 ΣΥΝΗΘΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

Τα προβλήματα που συναντώνται σε όλες τις γεωθερμικές γεωτρήσεις είναι κοινά κατά κύριο λόγο, με τη διαφορά ότι στις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας είναι εντονότερα λόγω του μεγαλύτερου βάθους και των πιο αντίξοων συνθηκών που επικρατούν. Η απώλεια κυκλοφορίας ρευστού είναι το πιο σύνηθες πρόβλημα που μπορεί να προκαλέσει σημαντικές οικονομικές επιβαρύνσεις, καθώς μεγάλες ποσότητες ρευστού διάτρησης διαφεύγουν μέσω των ρωγμών των πετρωμάτων. Επίσης, δεν είναι καθόλου απίθανο να συμβούν κολλήματα της διατρητικής στήλης, γεγονός που δεν επιτρέπει την περιστροφή της και δυσκολεύει και την ανέλκυσή της. Η αστάθεια των τοιχωμάτων του φρέατος είναι ένα ακόμα σοβαρό πρόβλημα που μπορεί να οφείλεται είτε στη έντονη ρωγμάτωση του πετρώματος που διατρύεται, είτε στην ύπαρξη διογκωμένων αργίλων, είτε ακόμα και σε μη συμπαγείς σχηματισμούς που μπορεί να καταρρεύσουν κατά τη διάτρηση μπλοκάροντας τη διατρητική στήλη.

Η ανάγκη για πλήρη τσιμεντώση της σωλήνωσης σε συνδυασμό με τα προηγούμενα προβλήματα αποτελεί ένα ακόμα σοβαρό θέμα, καθώς με κακές τσιμεντώσεις προκαλούνται διάφορες αστοχίες στις σωληνώσεις. Τέλος, πολλά από αυτά τα προβλήματα μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της διαμέτρου του φρέατος, γεγονός που με τη σειρά του επηρεάζει την τελική παραγωγική διάμετρο, η οποία πρέπει να είναι σχετικά μεγάλη, ώστε να επιτυγχάνονται μεγάλες παροχές παραγωγής και να είναι οικονομικά βιώσιμη η γεώτρηση.

7.6 ΚΟΣΤΟΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Οι γεωθερμικές γεωτρήσεις αποτελούν από μόνες τους πολύ ακριβά τεχνικά έργα δεδομένου ότι για τον σχεδιασμό τους και την υλοποίησή τους απαιτείται η αξιολόγηση πληθώρας παραμέτρων που μπορεί να συγκριθεί μόνο με τις γεωτρήσεις υδρογονανθράκων. Οι γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας πιο συγκεκριμένα διενεργούνται σε μεγαλύτερα βάθη και σε πιο δυσμενείς συνθήκες και, επομένως, είναι εύκολα αντιληπτό ότι απαιτούν περισσότερα και ταυτόχρονα πιο εξειδικευμένα κοπτικά άκρα, διατρητικά στελέχη και σωληνώσεις. Απαιτούν επίσης, γεωτρήσιμα μεγαλύτερης δυναμικότητας συνοδευόμενα με περισσότερο εξοπλισμό που είναι πιο δαπανηρά για την ενοικίασή τους και τη λειτουργία τους (με βάση την ενέργεια που καταναλώνουν). Απαιτούν, επίσης, μεγαλύτερες ποσότητες πολφών διάτρησης και τσιμεντοπολφών, που θα περιέχουν μάλιστα και περισσότερα πρόσθετα για τη ρύθμιση των ιδιοτήτων τους. Αξιολογώντας, λοιπόν, όλους αυτούς τους παράγοντες προκύπτει ότι οι γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας είναι κατά πολύ ακριβότερες στην υλοποίησή τους από αυτές σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας.

Αξιολογώντας, λοιπόν, τα δεδομένα που παρατέθηκαν στους πίνακες κοστολόγησης παραγωγικών γεωτρήσεων στην Ελλάδα σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας (Πίνακας 3-2, Κεφάλαιο 3) και σε πεδία υψηλής ενθαλπίας (Πίνακας 4-1, Κεφάλαιο 4), λαμβάνοντας προσεγγιστικά έναν μέσο όρο κόστους ανά μέτρο βάθους όρυξης για τον κάθε τύπο γεώτρησης και συγκρίνοντας αυτούς τους μέσους όρους μπορούμε να καταλάβουμε με μεγαλύτερη ευκολία το αντίκτυπο που έχουν στο κόστος οι διαφορές που παρατίθενται παραπάνω. Επομένως, για γεωθερμικές γεωτρήσεις σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας με μέσο όρο κόστους 210 €/m και για γεωθερμικές γεωτρήσεις σε πεδία υψηλής ενθαλπίας με μέσο όρο κόστους 650 €/m, γίνεται αντιληπτό ότι οι βαθιές γεωθερμικές γεωτρήσεις έχουν περίπου τριπλάσιο κόστος από τις αβαθείς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ

8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι βασικές διαφορές μεταξύ των αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων χαμηλής ενθαλπίας και των συμβατικών υδρογεωτρήσεων αφορούν στις αυξημένες θερμοκρασίες και πιέσεις που παρατηρούνται στις γεωθερμικές γεωτρήσεις, την παρουσία αερίων, τις απώλειες κυκλοφορίας του ρευστού διάτρησης με ταυτόχρονη παρουσία αερίων, τις διαβρωτικές συνθήκες και τις υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένων αλάτων.

Το νερό που παράγεται από τις γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας, πιο συγκεκριμένα, διαφοροποιείται από το νερό που παράγεται από τις συμβατικές υδρογεωτρήσεις ως προς τη θερμοκρασία, τη χημική σύσταση του και την περιεκτικότητά του σε μη συμπυκνώσιμα αέρια. Συνεπώς, ο σχεδιασμός αυτών των δύο τύπων γεωτρήσεων διαφέρει σημαντικά και απαιτεί ειδική τεχνική εκτέλεση. Στην περίπτωση των γεωθερμικών γεωτρήσεων είναι κομβικής σημασίας η κατάρτιση ενός γεωλογικού προγράμματος, καθώς και ενός τεχνικού προγράμματος, πριν την εκτέλεση της γεώτρησης.

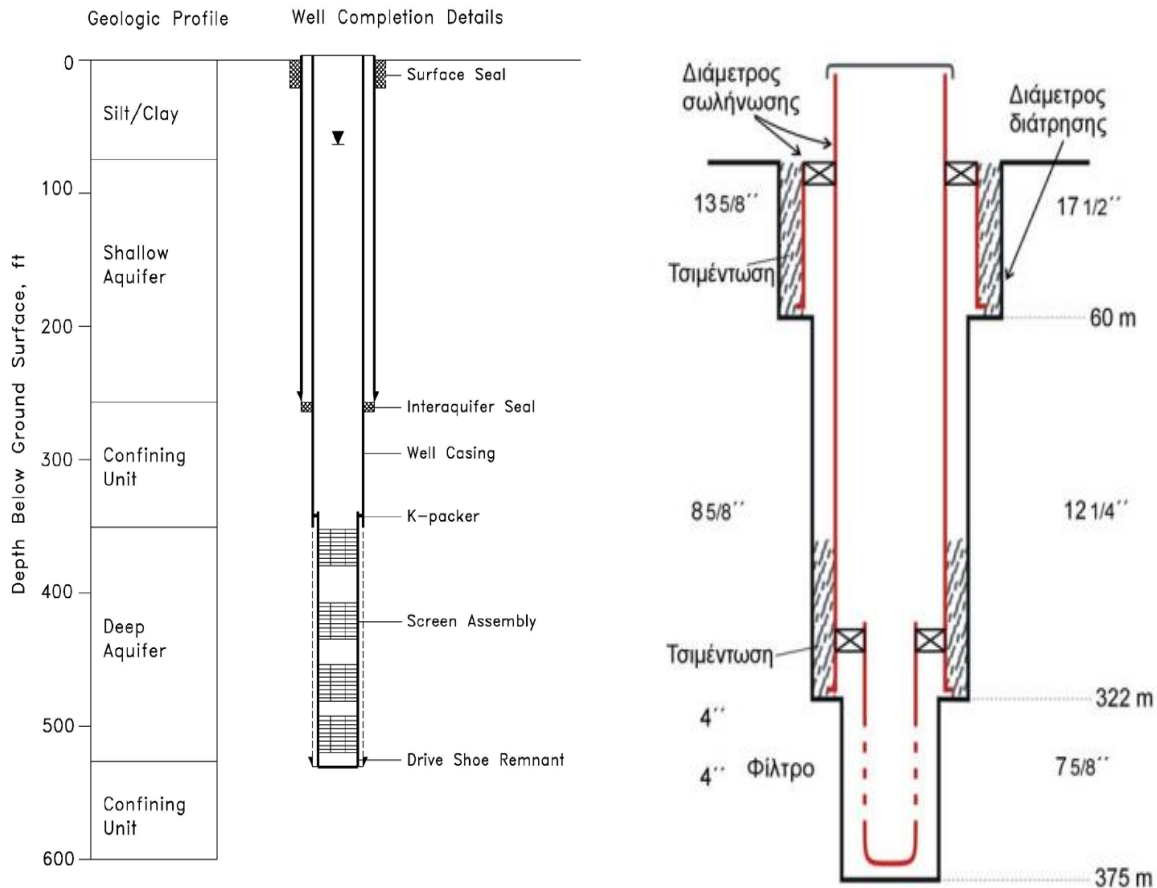
Στις ενότητες που ακολουθούν επιχειρείται ανάδειξη των διαφορών μεταξύ των δύο τύπων γεωτρήσεων ως προς τον σχεδιασμό τους, τις μεθόδους και τον μηχανολογικό εξοπλισμό που απαιτείται για την όρυξή τους.

8.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

Οι αβαθείς γεωτρήσεις σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας δεν παρουσιάζουν τόσο τρανταχτές διαφορές στη σχεδιάσή τους, όπως παρουσιάζουν με τις βαθιές σε πεδία υψηλής ενθαλπίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι και οι δύο πραγματοποιούνται σε παρόμοια βάθη τα οποία είναι αναλόγως μικρά, χαρακτηριστικό που περιορίζει τον αριθμό των σωληνώσεων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Οι κύριες διαφορές στη σχεδίαση αφορούν κυρίως την τσιμέντωση, η οποία είναι επιβεβλημένη στις γεωθερμικές γεωτρήσεις σε αντίθεση με τις συμβατικές υδρογεωτρήσεις και ακόμη περισσότερο τη φύση των ταμιευτήρων ενδιαφέροντος, όπου κατά τη διενέργεια των γεωθερμικών γεωτρήσεων οι τεχνικές προδιαγραφές των σωληνώσεων θα πρέπει να είναι κατάλληλες για αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και διάβρωση. Ορισμένα ενδεικτικά

ΟΡΥΞΗ ΑΒΑΘΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΠΕΔΙΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

προγράμματα σωλήνωσης αυτών των τύπων γεωτρήσεων παρατίθενται παρακάτω στην Εικόνα 8-1.



Εικόνα 8-1 Ενδεικτικά σχεδιαγράμματα προγράμματος σωλήνωσης σε συμβατικής υδρογεώτρηση (Αριστερά) (Πηγή: <https://www.pnws-awwa.org/uploads/PDFs/conferences/2012/May%203rd%20Engineering.pdf>) και σε αβαθή γεωθερμική γεώτρηση χαμηλής ενθαλπίας (Δεξιά) (Βρέλλης, Αρβανίτης, & Μπίμπου - Μπακούλα, 2009)

8.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΡΥΞΗΣ

Η όρυξη υδρογεωτρήσεων μπορεί να γίνει με πληθώρα τεχνικών, οι οποίες παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6 και οι οποίες εφαρμόζονται ανάλογα με το είδος των πετρωμάτων, την επιθυμητή διάμετρο, το βάθος της γεώτρησης και το κόστος. Εδώ συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά τους προς διευκόλυνση της σύγκρισης με τις γεωθερμικές γεωτρήσεις:

- Κρουστική μέθοδος όρυξης με χρήση συρματόσχοινου: Παλαιά μέθοδος, αξιόπιστη και με μικρό κόστος.
- Περιστροφική μέθοδος όρυξης: Η πιο διαδεδομένη τεχνική σε όλο τον κόσμο για υδρογεωτρήσεις, συνδυάζει υψηλές επιδώσεις και σχετικά χαμηλό κόστος.
- Περιστροφική όρυξη με θετική και ανάστροφη κυκλοφορία πολφού: Παρουσιάζει σταθερότητα στους μη συνεκτικούς σχηματισμούς και αποτροπή διαφυγής ρευστού διάτρησης.
- Περιστροφική όρυξη με θετική και ανάστροφη κυκλοφορία αέρα: Παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με την προηγούμενη μέθοδο, όμως περιορίζεται σε συμπαγείς σχηματισμούς και συνεκτικούς ορίζοντες.
- Περιστροφική όρυξη με αφρό: Αποφυγή δημιουργίας σκόνης, μικρότερη φθορά του εξοπλισμού, όμως αν δεν είναι βιοδιασπώμενος προκαλεί περιβαλλοντικά προβλήματα.
- Κρουστικοπεριστροφική όρυξη: Παρουσιάζει υψηλότερους ρυθμούς διάτρησης σε σύγκριση με τις προαναφερθείσες τεχνικές. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται η αερόσφουρα επιφάνειας (THD) και η ενδογεωτρητική αερόσφουρα (DTH).

Όσον αφορά τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα. Σε περιπτώσεις όπου οι ταμιευτήρες δεν βρίσκονται σε μεγάλα βάθη και περιλαμβάνουν μόνο νερό ως ρευστό, χωρίς έντονο αρτεσιανισμό και αέρια, εφαρμόζονται οι ίδιες μέθοδοι όρυξης με των συμβατικών υδρογεωτρήσεων. Όμως ο μεγαλύτερος αριθμός των γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας στην Ελλάδα βρίσκεται σε ιζηματογενείς λεκάνες, με χαλαρούς σχηματισμούς, παρουσιάζουν έντονο αρτεσιανισμό γεωθερμικού ρευστού και χαρακτηρίζονται από παρουσία διοξειδίου του άνθρακα σε μεγάλη περιεκτικότητα, αλλά και επικίνδυνων αερίων (H_2S -τοξικό, CH_4 -εύφλεκτο). Επομένως, είναι επιβεβλημένη η περιστροφική όρυξη με χρήση πολφού αυξημένης πυκνότητας και χρήση τρίκωνου κοπτικού, όπως στις βαθιές γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας.

8.4 ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

8.4.1 Γεωτρύπανο

Η επιλογή του κατάλληλου γεωτρύπανου είναι θεμελιώδης για το άριστο τεχνικο-οικονομικό αποτέλεσμα της όλης γεωτρητικής δραστηριότητας. Όσον αφορά τις υδρογεωτρήσεις χρησιμοποιούνται απλές διατάξεις γεωτρύπανων με σχετικά χαμηλή ισχύ, δηλαδή 50 -150 HP,

είναι συνήθως είτε περιστροφικού τύπου, είτε κρουστικού. Τα περιστροφικά αποδίδουν υψηλές ταχύτητες διάτρησης σε μεγάλο εύρος σκληρότητας πετρωμάτων, ενώ τα κρουστικά αποδίδουν καλύτερα σε βραχώδεις σχηματισμούς. Τα περιστροφικά γεωτρήματα είναι γεωτρήματα περιστροφικής τράπεζας (rotary table) καθώς αποτελούν πιο οικονομική επιλογή. Ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς τους μπορεί να είναι τροχοφόρα αυτοκινούμενα, ερπυστριοφόρα αυτοκινούμενα, τροχοφόρα συρόμενα και συρόμενα επί ελκίθρου.

Στις αβαθείς γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας, χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά γεωτρήματα περιστροφικού τύπου. Σε πιο εύκολες συνθήκες δύναται να χρησιμοποιηθούν γεωτρήματα περιστροφικής τράπεζας, όμως όταν πρόκειται για παραγωγικές γεωτρήσεις αποφεύγεται η χρήση τους εξαιτίας της ύπαρξης ρευστών υπό πίεση και επικίνδυνων αερίων, καθώς απαιτείται η τοποθέτηση πρόσθετου συστήματος στεγανοποίησης στο Β.Ο.Ρ. στην κεφαλή της γεώτρησης. Επομένως, προτιμούνται τα συστήματα περιστρεφόμενης κεφαλής (rotary head). Εφόσον, λοιπόν, οι γεωτρήσεις αφορούν μικρά βάθη η ισχύς των γεωτρημάτων είναι όμοια χαμηλή όπως σε αυτά που χρησιμοποιούνται στις υδρογεωτρήσεις, με ίδιο τρόπο μεταφοράς.

8.4.2 Διατρητική στήλη

Δεν υφίστανται ιδιαίτερες διαφορές στη σύνθεση της διατρητικής στήλης στους τύπους γεωτρήσεων που εξετάζονται. Η χρήση της παραμένει η ίδια και στις δύο περιπτώσεις, δηλαδή, μεταδίδει την περιστροφική κίνηση στο κοπτικό και διοχετεύει το ρευστό διάτρησης στον πυθμένα της γεώτρησης. Αποτελείται από διατρητικά στελέχη, τα οποία φτάνουν σε μήκος τα 9 m περίπου και σε διάμετρο τις 6'', από σταθεροποιητές, αντίβαρα και τη βαλβίδα αντεπιστροφής. Επιλέγονται ανάλογα με τη διάμετρο γεώτρησης και τις πιθανές τεχνικές δυσκολίες που αναμένονται κατά την όρυξη. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι στις γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας τα στελέχη επιλέγονται από ειδικά κράματα χάλυβα ώστε να είναι ανθεκτικά σε διάβρωση, η οποία προκύπτει είτε από την παρουσία H_2S (hydrogen embrittlement), είτε από διάβρωση λόγω O_2 όταν χρησιμοποιείται αέρας ως πολφός διάτρησης.

8.4.3 Κοπτικά άκρα

Στις υδρογεωτρήσεις έχουν εφαρμογή πολλά είδη κοπτικών άκρων, ανάλογα με τους τύπους πετρωμάτων που θα διατρηθούν. Δύο είναι οι κύριες κατηγορίες κοπτικών που χρησιμοποιούνται, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6:

- Τρίκωνα κοπτικά άκρα (tri-cone), με ενσωματωμένους χαλύβδινους οδόντες (milled steel tooth), τα οποία χρησιμοποιούνται σε διάφορους τύπους σχηματισμών από μικρής σκληρότητας (ψαμμίτες και άργιλοι) έως σκληρούς σχηματισμούς (ψαμμίτες μικρού

πορώδους και δολομίτες), και με ένθετους οδόντες από καρβίδια του βολφραμίου (TCI), τα οποία έχουν εφαρμογή σε μικρής σκληρότητας σχηματισμούς (σχιστόλιθοι, άργιλοι και αμμώδεις σχηματισμοί) και σε σχηματισμούς μέσης προς μεγάλης σκληρότητας (ασβεστόλιθοι, δολομίτες).

- Η δεύτερη κατηγορία αφορά τα κοπτικά άκρα τριβής, που κατασκευάζονται από χάλυβα, φυσικά διαμάντια και πολυκρυσταλλικά διαμάντια (PDC). Περιορίζονται στη διάτρηση ιζηματογενών πετρωμάτων και γενικότερα πιο μαλακών σχηματισμών (ψαμμίτες μεγάλου πορώδους και άργιλοι).

Και οι δύο παραπάνω τύποι κοπτικών φέρουν στην επιφάνειά τους ακροφύσια.

Ομοίως, και στις γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας, το βασικά κοπτικά άκρα που χρησιμοποιούνται είναι τα τρίκωνα. Η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στις γεωθερμικές γεωτρήσεις συναντώνται μεγαλύτερες θερμοκρασίες κατά τη διάτρηση που οδηγούν στη μείωση της ζωής των κοπτικών άκρων, λόγω της αυξημένης φθοράς που υφίστανται. Επομένως, ορισμένες φορές πρέπει να δίνεται προσοχή στα ρουλεμάν και τα λιπαντικά που διαθέτουν με βάση την κωδικοποίηση IADC, καθώς είναι τα μέρη του κοπτικού που επηρεάζονται περισσότερο από τις υψηλές θερμοκρασίες.

8.4.4 Λοιπός εξοπλισμός

Σε αντίθεση με τις υδρογεωτρήσεις, οι αβαθείς γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας απαιτούν και την εγκατάσταση πρόσθετου εξοπλισμού που αφορά την ασφάλεια του προσωπικού στο πεδίο της γεώτρησης. Είναι ο αντιεκρηκτικός μηχανισμό ασφαλείας (B.O.P.) ο οποίος σχεδιάζεται με πιο απλή διάταξη συγκριτικά με αυτόν που χρησιμοποιείται σε γεωτρήσεις υδρογονανθράκων και η εγκατάστασή του είναι επιβεβλημένη κυρίως όταν συναντώνται ταμειυτήρες υπό πίεση. Στον λοιπό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στις γεωθερμικές γεωτρήσεις και όχι στις υδρογεωτρήσεις περιλαμβάνεται επίσης ο ανιχνευτής αερίων (H_2S , CH_4) και όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας.

8.4.5 Ρευστά διάτρησης

Κατά την όρυξη υδρογεωτρήσεων, ανεξάρτητα από τη μέθοδο διάτρησης, απαιτείται η χρήση ρευστού διάτρησης για τον καθαρισμό του μετώπου και την ψύξη του κοπτικού. Αυτό μπορεί να είναι αέρας, πολφός (υδατικό αιώρημα μπεντονίτη ή/και χημικών πολυμερών) και αφρός και διοχετεύεται στη γεώτρηση μέσω αντλιών ή αεροσυμπιεστών. Καθένα από τα αυτά τα ρευστά διάτρησης παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ως εξής:

- Στους πολφούς, η υγρή φάση είναι το νερό και η στερεή φάση περιλαμβάνει αιωρούμενα σωματίδια διαμέτρου $< 0.5 \mu\text{m}$, όπως μπεντονίτη ή ατταπουλγίτη. Πολύ μεγάλη προσοχή απαιτείται στη ρύθμιση των ιδιοτήτων του πολφού ιδιαίτερα σε αβαθείς γεωτρήσεις. Τελευταία χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα οργανικά πολυμερή τα οποία ρυθμίζουν ευκολότερα τις επιθυμητές ιδιότητες του πολφού. Η παρασκευή του γίνεται στην επιφάνεια του εδάφους και δεν ανακυκλώνεται.
- Ο αέρας προτιμάται όταν υπάρχουν σπηλαιώσεις (καρστ) ή πυκνά δίκτυα ρωγμών στα πετρώματα για αποφυγή απωλειών ρευστού. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του φρέατος, τόσο μεγαλύτερη παροχή αέρα απαιτείται, επομένως χρειάζονται μεγαλύτερης δυναμικότητας αεροσυμπιεστές, οι οποίοι αυξάνουν το κόστος όρυξης.
- Ο αφρός δημιουργείται με την προσθήκη αφριστικών ουσιών μαζί με μικρή ποσότητα νερού στο ρεύμα αέρα. Συντελεί στην αποτελεσματικότερη απομάκρυνση μεγαλύτερου όγκου τριμμάτων. Δημιουργεί ευνοϊκότερες συνθήκες εργασίας καθώς καταστέλλει τη σκόνη.

Η επιλογή του κατάλληλου πολφού έχει ακόμα μεγαλύτερη σημασία στις γεωθερμικές γεωτρήσεις. Στα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας και πιο συγκεκριμένα σε γεωτρήσεις μικρού βάθους που διανοίγονται εντός συμπαγών σχηματισμών σε ταμιευτήρες όπου το γεωθερμικό ρευστό είναι μόνο ζεστό νερό, χωρίς αρτεσιανισμό και αέρια, δύναται να χρησιμοποιηθεί ως πολφός μόνο νερό ή/και αφρός. όμως, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, στην Ελλάδα δεν συναντώνται τέτοιες συνθήκες, αλλά οι σχηματισμοί είναι χαλαροί, ο αρτεσιανισμός είναι έντονος και υπάρχουν εύφλεκτα και τοξικά αέρια. Οπότε χρησιμοποιείται πολφός μίγματος νερού και μπεντονίτη με προσθήκη βαρύτη σε ειδικές περιπτώσεις ή ακόμα και πολυμερών, αν το νερό που χρησιμοποιείται είναι αλμυρό. Στα πεδία χαμηλής ενθαλπίας όπου είναι συχνή η εμφάνιση ρευστών διφασικής ροής και οι ταμιευτήρες είναι υπό υπερπίεση ο έλεγχος των πιέσεων πραγματοποιείται με ρύθμιση της πυκνότητας του πολφού. Επιπλέον, ο πολφός περιέχει και άλλα πρόσθετα που είναι υπεύθυνα για τη ρύθμιση του pH εξαιτίας των πολύ υψηλότερων θερμοκρασιών που επικρατούν συγκριτικά με τις υδρογεωτρήσεις.

8.4.6 Σωλήνωση

Οι σωληνώσεις που χρησιμοποιούνται στις υδρογεωτρήσεις κατά κύριο λόγο είναι μεταλλικές καθώς παρουσιάζουν καλύτερες αντοχές στον χρόνο, όμως μπορεί να είναι και από πλαστικό PVC. Οι μεταλλικοί σωλήνες πρέπει να είναι γαλβανισμένοι για αποφυγή οξείδωσής τους. Σε περιπτώσεις όπου τα πετρώματα είναι πολύ συνεκτικά και σταθερά πραγματοποιείται ολοκλήρωση ανοικτού φρέατος (open-hole completion) όπου δεν απαιτείται σωλήνωση του υδροφορέα. Από την άλλη σε μη συνεκτικά πετρώματα υπάρχει επένδυση από την επιφάνεια

μέχρι τον πυθμένα, η οποία είναι διάτρητη και φέρει κατάλληλες σχισμές ανάλογα με τα κοκκομετρικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα, αλλά και πλέγμα.

Η ίδια λογική και πρακτική ακολουθείται και στις γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας. Συγκεκριμένα σε αβαθείς γεωτρήσεις χρησιμοποιείται συνήθως μόνο μια στήλη ενδιάμεσης σωλήνωσης η οποία φτάνει πάντα μέχρι την επιφάνεια, ενώ όλες οι στήλες σωλήνωσης είναι τσιμεντωμένες και στην τελευταία τοποθετείται ο μηχανισμός ασφαλείας. Η παραγωγική σωλήνωση καλύπτει τον ταμιευτήρα με τα απαραίτητα φίλτρα, και είτε φτάνει μέχρι την επιφάνεια, είτε αναρτάται με ειδικό σύστημα (hanger) από την προηγούμενη στήλη σωλήνωσης (liner). Δύο είναι οι τεχνικές προδιαγραφές των σωληνώσεων που εξετάζονται εκτενέστερα στις γεωθερμικές γεωτρήσεις σε αντίθεση με τις υδρογεωτρήσεις και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τον σχεδιασμό. Αυτές είναι η αντοχή στη θερμοκρασία και η αντοχή στη διάβρωση. Συναντώνται, λοιπόν, είτε χαλύβδινες σωληνώσεις με καλές μηχανικές αντοχές, αλλά όχι τόσο ανθεκτικές σε διάβρωση, είτε πλαστικές με μικρές μηχανικές αντοχές αλλά καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά. Επίσης, στα πεδία χαμηλής ενθαλπίας συνήθως παρουσιάζονται ανθρακικές επικαθίσεις αλάτων εντός των σωληνώσεων λόγω εκτόνωσης του ταμιευτήρα, οι οποίες αντιμετωπίζονται με χημικούς αναστολείς, οι οποίοι με τη σειρά τους αυξάνουν το κόστος της διάτρησης.

8.4.7 Τσιμέντωση

Στις υδρογεωτρήσεις, η τσιμέντωση δεν αποτελεί διακριτή φάση όρυξης της υδρογεώτρησης, καθώς δεν εφαρμόζεται συμβατικά για τη σταθεροποίηση της σωλήνωσης, αλλά κατά περίπτωση, όταν απαντώνται ειδικού τύπου προβλήματα. Τέτοια προβλήματα αφορούν σε εκτεταμένες απώλειες ρευστού. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το φρέαρ τσιμεντώνεται και επαναδιατρύεται.

Η τσιμέντωση και στους δύο τύπους γεωτρήσεων πρέπει, σε κάθε περίπτωση, να είναι επιτυχής, δηλαδή να πληρώνει πλήρως τον χώρο του διάκενου με τσιμέντο, το τσιμέντο να έχει καλή πρόσφυση στα τοιχώματα της γεώτρησης και της σωλήνωσης. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να αντικατασταθεί όλη η λάσπη που βρίσκεται εντός του δακτυλίου που προαναφέρθηκε. Η αποτυχία της πλήρους απομάκρυνσης της λάσπης οδηγεί σε κακή πρόσφυση του τσιμέντου με τα τοιχώματα και μικρότερη αντοχή του, που μπορεί να οδηγήσει σε πιθανή καταστροφή των σωληνών. Ο τσιμεντοπολφός αποτελείται από τσιμέντο, νερό, αδρανή και διάφορα πρόσθετα για βελτίωση των ιδιοτήτων του. Μερικές φορές προστίθενται επιταχυντές πήξης στο μείγμα, όπως χλωριούχο ασβέστιο (CaCl_2) ή γύψος. Κατά κανόνα χρησιμοποιείται τσιμέντο τύπου Portland.

Στις γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας η ύπαρξη υψηλών θερμοκρασιών και διαβρωτικού περιβάλλοντος συντελούν στην επιλογή συγκεκριμένων τύπων τσιμέντου, οι οποίες παρουσιάζουν καλύτερη αντοχή στη θλίψη και τον εφελκυσμό μετά την πήξη σε αυτές τις συνθήκες. Οι συνθήκες προσθήκης στα τσιμέντα αυτών των γεωτρήσεων είναι ο μπεντονίτης, το

χλωριούχο ασβέστιο, ο βαρύτης και το νερό. Επίσης, τα θειικά του Na και Mg δρουν στο τσιμέντο και δημιουργούν ρωγμές. Η δράση τους είναι ακόμα πιο έντονη σε χαμηλές θερμοκρασίες κυρίως 30 – 50 °C.

8.5 .ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

8.5.1 Ολοκλήρωση

Η διαδικασία της ολοκλήρωσης είναι εξίσου σημαντικό στάδιο και στις αβαθείς γεωτρήσεις σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας και στις συμβατικές υδρογεωτρήσεις. Πέρα από τη σωλήνωση, η σωστή επιλογή της κατάλληλης φιλτροσωλήνωσης (κατάλληλο άνοιγμα σχισμών) και η τοποθέτησή της στο ιδανικό σημείο παίζει πολύ σπουδαίο ρόλο για την επιτυχή κατασκευή αυτών των δύο τύπων γεωτρήσεων. Και στις δύο γεωτρήσεις, υπάρχουν περιπτώσεις που μπορεί να μην είναι απαραίτητη η χρήση τους, δηλαδή αν οι σχηματισμοί που ορύσσονται είναι σκληροί και συμπαγείς, στα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας όμως, επειδή συνήθως οι ταμιευτήρες είναι υπό πίεση, οι φιλτροσωληνώσεις καλύπτουν σχεδόν όλο το πάχος ώστε να αυξηθεί η ειδική παροχή. Η πιο μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο γεωτρήσεων έγκειται στο γεγονός ότι ο χημισμός του παραγόμενου ρευστού στις αβαθείς γεωθερμικές γεωτρήσεις είναι αρκετά διαβρωτικός, πράγμα που οδηγεί στην αξιοποίηση είτε φιλτροσωληνώσεων με κατάλληλες προδιαγραφές για αντοχή σε διάβρωση είτε φιλτροσωληνώσεις με συγκεκριμένα ανοίγματα σχισμών.

Τέλος, όσον αφορά τη χρήση χαλκίφιλτρου και στις δύο γεωτρήσεις εξυπηρετεί τις ίδιες λειτουργίες, διαθέτει παρόμοια χαρακτηριστικά σύστασης και κοκκομετρίας και η τοποθέτησή του δεν αλλάζει, δηλαδή φτάνει μέχρι και λίγα μέτρα σε ύψος πάνω από τον ταμιευτήρα. Βέβαια στην πλειονότητα των αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων χαμηλής ενθαλπίας στην Ελλάδα, λόγω των σχηματισμών που περιβάλλουν τους ταμιευτήρες, μπορεί να παραλειφθεί η χρησιμοποίησή του και η γεώτρηση να λειτουργεί χωρίς προβλήματα.

8.5.2 Ανάπτυξη

Και στις αβαθείς γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας αλλά και στις συμβατικές υδρογεωτρήσεις οι μέθοδοι ανάπτυξης που εφαρμόζονται δεν διαφέρουν σχεδόν καθόλου και χρησιμοποιούνται για διαφορετικούς λόγους.

Πιο συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις υδρογεωτρήσεων που έχει χρησιμοποιηθεί πολφός μπεντονίτη ως ρευστό, υπάρχει ποσότητα που είτε έχει παραμείνει προσκολλημένη στα τοιχώματα της γεώτρησης είτε έχει διεισδύσει στους περιβάλλοντες σχηματισμούς. Για την

αφαίρεση της δύναται να χρησιμοποιηθούν τεχνικές ανάπτυξης που περιλαμβάνουν εκτόξευση αέρα, εκτόξευση νερού, υπεράντληση, κλιμακωτή άντληση, απότομη έναρξη και παύση άντλησης, με εμβολισμό και με χρήση χημικών.

Η συχνή ύπαρξη πλαστικής αργίλου σε αρκετές ιζηματογενείς λεκάνες στον Ελλαδικό χώρο που φιλοξενούν γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας, δημιουργεί πρόσθετα προβλήματα στην ανάπτυξη των γεωτρήσεων. Η παραμονή της εντός της γεώτρησης υπό μορφή πλαστικών κυλίνδρων πολλών μέτρων έχει ως συνέπεια να συμπαρασύρεται κατά την κάθοδο της φιλτροσωλήνωσης και να καλύπτει το διάκενο με τη γεώτρηση, δημιουργώντας αδυναμία καθόδου του χαλικόφιλτρου, ενώ το στάδιο της ανάπτυξης καθίσταται χρονοβόρο και απαιτεί την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων. Στις γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας μικρού βάθους χωρίς ιδιαίτερο αρτεσιανισμό μπορούν να εφαρμοστούν όλες οι πιο πάνω μέθοδοι, ανάλογα τα υδραυλικά και πετρολογικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα. Στις γεωτρήσεις μικρού βάθους με έντονο αρτεσιανισμό (υπό πίεση) διφασικής ροής ρευστών, μετά την πλύση με νερό και την απομάκρυνση του πολφού, συναντάται αυτόματη ενεργοποίηση. Όμως κρίνεται απαραίτητη τουλάχιστον η εκτέλεση εμβολισμών για τη σωστή ανάπτυξη όλου του πάχους του ταμιευτήρα. Η ύπαρξη του αντιεκρηκτικού μηχανισμού ασφάλειας (B.O.P.) στην κεφαλή της γεώτρησης είναι απαραίτητη κατά τη φάση της ανάπτυξης.

8.6 ΣΥΝΗΘΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Κατά την όρυξη υδρογεωτρήσεων είναι πιθανό να προκύψουν διάφορα προβλήματα όπως κατάρρευση των τοιχωμάτων της γεώτρησης, απώλεια γεωτρητικού ρευστού, έκρηξη λόγω ύπαρξης αερίου, βλάβες στον διατρητικό εξοπλισμό κ.α. όπως έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 6.

Ομοίως και στις γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας είναι αρκετά πιθανό να εμφανιστούν κάποια από τα ανωτέρω προβλήματα, όμως δεδομένων και των δυσκολότερων συνθηκών που ισχύουν σε αυτές, δύναται να εμφανιστούν επιπρόσθετα και πιο δαπανηρά στην αντιμετώπιση προβλήματα, όπως:

- Η ύπαρξη υψηλών θερμοκρασιών, πιέσεων και επικίνδυνων αερίων στους ταμιευτήρες, απαιτεί τη συνεχή παρακολούθηση των χαρακτηριστικών του πολφού διάτρησης και τη ρύθμιση της πυκνότητάς του. Ορισμένες φορές υπάρχει η πιθανότητα να μην καταστεί εφικτός αυτός ο έλεγχος με αποτέλεσμα τη συνεχή και ανεξέλεγκτη ροή γεωθερμικού ρευστού ή/και επικίνδυνων αερίων. Η εμφάνιση τέτοιων προβλημάτων ελέγχεται με τη χρήση του αντιεκρηκτικού εξοπλισμού (B.O.P.).
- Είναι πιθανή η ύπαρξη H_2S σε επικίνδυνες συγκεντρώσεις. Συγκεντρώσεις >30 ppm, απαιτούν την παραμονή στο πεδίο μόνο εξειδικευμένου προσωπικού εξοπλισμένου με

προστατευτικό εξοπλισμό και ενημέρωση των τοπικών υπηρεσιών για τη λήψη μέτρων ασφαλείας στην περιοχή.

- Πρέπει να χρησιμοποιείται ειδικός τύπος τσιμέντου γιατί η επίδραση της θερμοκρασίας επηρεάζει τις ιδιότητες των συμβατικών κατηγοριών δημιουργώντας έτσι ρωγμές και θραύσματα στις τσιμεντώσεις με καταστροφικές συνέπειες με την πιο ακραία την αστοχία ολόκληρου του φρέατος.
- Επίσης, επειδή παρατηρείται συνήθως έντονη απώλεια κυκλοφορίας ρευστού στις γεωθερμικές γεωτρήσεις, είναι πιθανό να χρειαστούν δευτερεύουσες εργασίες τσιμεντώσεως, ώστε ο τσιμεντοπολφός να φτάνει από τον πυθμένα μέχρι την επιφάνεια.
- Τέλος, είναι πολύ συχνό φαινόμενο οι επικαθίσεις αλάτων οι οποίες προκαλούν ζημιές στον εξοπλισμό και μειώνουν τις παροχές άντλησης και επομένως την παραγωγικότητα, καθιστώντας την αντιμετώπισή τους οικονομικά επιβαρυντική για το έργο.

8.7 ΚΟΣΤΟΣ

Γενικά το κόστος ανά μέτρο γεώτρησης αυξάνει σε συνάρτηση με το βάθος, ανεξάρτητα από τον τύπο και τον σκοπό της γεώτρησης. Στη διαμόρφωσή του όμως συμβάλουν πολλοί παράγοντες, όπως η διάμετρος και ο τύπος των σωληνώσεων, οι σχηματισμοί που διατρύονται και ο βαθμός δυσκολίας διάτρησής τους, η ύπαρξη τοξικών ή διαβρωτικών αερίων και ο χημισμός του παραγόμενου ρευστού. Το κόστος φυσικά επηρεάζεται και από το χρόνο που διατίθεται για τη διάτρηση, τις συμπληρωματικές διεργασίες, την μεταφορά και απομάκρυνση του γεωτρητικού και άλλου εξοπλισμού κ.λπ.

Στη συγκεκριμένη σύγκριση το βάθος και των δύο γεωτρήσεων που εξετάζονται είναι περίπου το ίδιο. Η μεγάλη και ειδοποιός διαφορά είναι οι ταμειυτήρες που διατρύονται στην εκάστοτε περίπτωση. Μπορεί και στις δύο γεωτρήσεις το παραγωγικό ρευστό να είναι το νερό, όμως στις γεωθερμικές γεωτρήσεις το νερό αυτό βρίσκεται σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες και περιέχουν άλατα και επικίνδυνα αέρια. Αυτή η συνθήκη απαιτεί τη χρησιμοποίηση διαφορετικού και πιο ακριβού εξοπλισμού κατά τον σχεδιασμό της γεώτρησης. Πιο συγκεκριμένα, απαιτούνται:

- Διατρητικά στελέχη και σωληνώσεις ανθεκτικά στη διάβρωση.
- Περισσότερα κοπτικά άκρα καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες μειώνουν τον χρόνο ζωής τους.

- Πολφοί διάτρησης και τσιμεντοπολφοί με περισσότερα πρόσθετα για να μην επηρεάζονται οι ιδιότητές τους από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, περισσότερος όγκος αυτών, καθώς συναντώνται συχνά απώλειες κυκλοφορίας.
- Επιπρόσθετες διεργασίες αντιμετώπισης των επικαθίσεων αλάτων εντός των σωληνώσεων.
- Ανάγκη ύπαρξης του αντεκρηκτικού μηχανισμού για περαιτέρω προστασία του φρέατος και του προσωπικού συν των πρόσθετων οργάνων ελέγχου θερμοκρασιών.
- Ανάγκη πρόσληψης πιο έμπειρου και καταρτισμένου προσωπικού σε σχέση με τη διάτρηση υδρογεωτρήσεων που πολλές φορές αποτελεί πιο εμπειρική εργασία.

Σε γενικές γραμμές οι υδρογεωτρήσεις αποτελούν πιο απλές διαδικασίες με μικρή επικινδυνότητα και ταυτόχρονα πιο οικονομικές. Οι γεωθερμικές γεωτρήσεις από την άλλη, είναι πιο σύνθετες στον σχεδιασμό, αρκετά πιο δαπανηρές στην υλοποίηση και απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό για την πραγματοποίησή τους.

Λαμβάνοντας υπόψη, επομένως, τα δεδομένα κοστολόγησης που προκύπτουν για τις αβαθείς γεωθερμικές γεωτρήσεις σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας (Πίνακας 3-2, Κεφάλαιο 3) και για την όρυξη και τη διεύρυνση των συμβατικών υδρογεωτρήσεων (Πίνακας 3, Κεφάλαιο 6) και ακολουθώντας την ίδια λογική που ακολουθήθηκε στο 7^ο Κεφάλαιο, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τη διαφοροποίηση του κόστους αυτών των δύο τύπων γεωτρήσεων. Ο μέσος όρος κόστους των αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων είναι ο ίδιος που χρησιμοποιήθηκε και στο Κεφάλαιο 7, δηλαδή 210 €/m. Όσον αφορά τις υδρογεωτρήσεις λαμβάνονται τρεις μέσοι όροι, σύμφωνα με τις τρεις περιπτώσεις που αναγράφονται στον αντίστοιχο πίνακα. Πιο συγκεκριμένα, για όρυξη γεώτρησης διαμέτρου 8½’’ έχουμε 23.8 €/m, για διεύρυνση της γεώτρησης από διάμετρο 8½’’ σε διάμετρο 16’’ έχουμε 42.8 €/m και για διεύρυνση γεώτρησης από διάμετρο 16’’ σε διάμετρο 20’’ έχουμε 22.9 €/m. Οπότε προκύπτει ότι οι αβαθείς γεωθερμικές γεωτρήσεις κοστίζουν περίπου 9 φορές περισσότερο σε σχέση με την 1^η περίπτωση υδρογεώτρησης, περίπου 3 φορές περισσότερο σε σχέση με την 1^η διεύρυνση ($23.8 + 42.8 = 66.7$ €/m) και περίπου 2.5 φορές περισσότερο σε σχέση με τη 2^η διεύρυνση ($23.8 + 42.8 + 22.9 = 89.5$ €/m).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μέσα από βιβλιογραφική επισκόπηση, εξετάζονται οι μέθοδοι και η τεχνολογία όρυξης αβαθών παραγωγικών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας / θερμοκρασίας. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των εν λόγω γεωτρήσεων αναδεικνύονται και εξετάζονται και υπό το πρίσμα της συγκριτικής αξιολόγησής τους με τα αντίστοιχα στοιχεία τόσο των βαθιών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία υψηλής ενθαλπίας, όσο και με των συμβατικών υδρογεωτρήσεων, οδηγώντας στα ακόλουθα συμπεράσματα.

Οι αβαθείς γεωθερμικές γεωτρήσεις σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας / θερμοκρασίας έχουν κατά μέσο όρο βάθος εφαρμογής τα 200-250m και σε σπάνιες περιπτώσεις ορύσσονται μέχρι τα 400m και τα 600m, όπου για την αποτελεσματική και ασφαλή τους όρυξη θα πρέπει να ακολουθούνται συγκεκριμένες πρακτικές κατά τον σχεδιασμό τους:

- Η **μέθοδος όρυξης** που ενδείκνυται είναι η περιστροφική όρυξη. Λόγω των χαρακτηριστικών των γεωθερμικών ταμιευτήρων χαμηλής ενθαλπίας, οι οποίοι απαρτίζονται από ασταθείς και χαλαρούς γεωλογικούς σχηματισμούς, παρουσιάζουν έντονο αρτεσιανισμό και περιέχουν μεγάλες συγκεντρώσεις επικίνδυνων αερίων, είναι η μόνη μέθοδος που δίνει τη δυνατότητα διαχείρισης αυτών των συνθηκών.
- Το **περιστροφικό γεωτρώπανο** θα πρέπει να είναι τύπου περιστρεφόμενης κεφαλής, καθώς είναι κατάλληλα για γεωθερμικές γεωτρήσεις μέχρι το βάθος των 1000m.
- Η **διατηρητική στήλη** θα πρέπει να έχει σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε τα διατηρητικά στελέχη και η κατώτερη συνδεσμολογία να πληρούν τις προδιαγραφές αντοχής στα διαβρωτικά περιβάλλοντα που χαρακτηρίζουν στους γεωθερμικούς ταμιευτήρες.
- Τα **κοπτικά άκρα** που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι αυτά με περιστρεφόμενους κώνους – τρίκωνα, τα οποία παρουσιάζουν καλύτερους ρυθμούς διάτρησης, με την προϋπόθεση βέβαια ότι είναι πιστοποιημένα για αντοχή σε διαβρωτικές συνθήκες.
- Τα **ρευστά διάτρησης** θα πρέπει να αποτελούνται κυρίως από πολφό μίγματος νερού με μπεντονίτη, ώστε το ιξώδες και η πυκνότητα του πολφού να ρυθμίζονται κατάλληλα για την αντιμετώπιση των ειδικών συνθηκών των ταμιευτήρων.
- Πολλές φορές κρίνεται αναγκαία η χρήση **πρόσθετου εξοπλισμού**, όπως ο αντικρηκτικός μηχανισμός (BOP), οι ανιχνευτές αερίων και όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας, για την ασφάλεια του έργου, καθώς και αντλίες, κόσκινα, δεξαμενές και κυκλώνες για τον καθαρισμό, τη ρύθμιση και την παρακολούθηση του πολφού.
- Το **πρόγραμμα σωλήνωσης**, ανάλογα με το βάθος, δύναται να περιλαμβάνει επιφανειακή, ενδιάμεση και παραγωγική σωλήνωση, εκ των οποίων η επιφανειακή τσιμεντώνεται καθ' όλο το ύψος της. Οι κατηγορίες των σωληνώσεων, ανάλογα με τις συνθήκες του ταμιευτήρα και τις οικονομικές απαιτήσεις του γεωθερμικού έργου, μπορεί να είναι είτε μεταλλικές (χάλυβας ή ανοξείδωτο χάλυβας), είτε μη μεταλλικές

(θερμοπλαστικά, PVC, θερμοσκληρυνόμενα), με τις πρώτες να παρουσιάζουν καλές μηχανικές αντοχές, αλλά να είναι ευάλωτες στη διάβρωση και τις τελευταίες να παρουσιάζουν μικρές μηχανικές αντοχές, λόγω υψηλής θερμοκρασίας, αλλά καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά.

- Κατά τη διαδικασία της **τσιμέντωσης**, στον πολφό τσιμέντου χρησιμοποιείται ευρέως το κοινό τσιμέντο Portland, τύπου Α, μιας και βρίσκει εφαρμογή μέχρι θερμοκρασίες $T < 110$ °C και βάθος < 1800 m.
- Κατά το στάδιο της **ολοκλήρωσης**, επειδή στα πεδία χαμηλής ενθαλπίας είναι σύνηθες φαινόμενο η ύπαρξη υπό πίεση ταμιευτήρων, οι φιλτροσωληνώσεις καλύπτουν σχεδόν όλο το πάχος του ταμιευτήρα με στόχο την αύξηση της ειδικής παροχής, ενώ όταν οι σχηματισμοί του ταμιευτήρα είναι συμπαγείς δεν κρίνεται απαραίτητη η τοποθέτησή της. Όσον αφορά, το χαλικόφιλτρο, το πάχος του θα πρέπει να υπερβαίνει τα 3cm, όμως η πλειονότητα των ταμιευτήρων χαμηλής ενθαλπίας βρίσκεται στα κροκαλοπαγή της οροφής του υπόβαθρου ή σε συνεκτικούς ψαμμιτικούς σχηματισμούς, όπου δε χρησιμοποιείται συνήθως χαλικόφιλτρο.
- Στο στάδιο της **ανάπτυξης** της γεώτρησης θα πρέπει να απομακρύνονται ο πολφός, η άργιλος και τα λεπτόκοκκα θρύμματα, να αναδιατάσσονται και να καθαρίζονται οι χάλικες εξωτερικά των φίλτρων και να αποκαθίσταται η κανονική ροή των ρευστών του ταμιευτήρα προς τη γεώτρηση, ενώ με πρόσθετες παρεμβάσεις να αυξάνεται και η διαπερατότητα του σχηματισμού γύρω από τη γεώτρηση.
- Οι ιδιαιτερότητες των ταμιευτήρων και τα συνακόλουθα **προβλήματα** που προκύπτουν, όπως απώλειες κυκλοφορίας ρευστού διάτρησης, επικαθίσεις αλάτων, καταπονήσεις στον διατρητικό εξοπλισμό και δυσκολίες κατά το, σχεδιασμό του προγράμματος σωλήνωσης, προκαλούν σημαντικές επιπτώσεις στο συνολικό **κόστος** της γεώτρησης, το οποίο φτάνει να κυμαίνεται από 36,000 € μέχρι 125,000 € ανά γεώτρηση για βάθη από 200m μέχρι 500m, κατά το έτος 2009.

Η κύρια διαφοροποίηση μεταξύ των γεωθερμικών γεωτρήσεων χαμηλής και υψηλής ενθαλπίας αφορά τη θερμοκρασία που συναντάται στον ταμιευτήρα και το βάθος στο οποίο βρίσκεται αυτός. Στα πεδία υψηλής ενθαλπίας οι θερμοκρασίες υπερβαίνουν τους 150°C, ενώ στα πεδία χαμηλής ενθαλπίας οι θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 30 και 100°C. Επομένως, προκύπτουν επιμέρους διαφοροποιήσεις κατά την όρυξή τους:

- Ο **σχεδιασμός** όρυξης μιας αβαθούς γεωθερμικής γεώτρησης σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας είναι μεν πολύπλοκος, αλλά όχι τόσο όσο αυτός των βαθιών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία υψηλής ενθαλπίας. Στον τελευταίο τύπο γεώτρησης συναντώνται πολύ πιο έντονες συνθήκες διάβρωσης και πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις. Οι απαιτήσεις σε κοπτικά άκρα, σε διατρητικά στελέχη, σε σωληνώσεις, σε όγκους ρευστού διάτρησης και τσιμεντοπολφού είναι μεγάλες. Επίσης, τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν είναι περισσότερα και σοβαρότερα και χρειάζεται, επομένως, πιο

ενδεδειγμένος σχεδιασμός, ώστε να περιοριστεί όσο το δυνατό το κόστος καθώς εύκολα μπορεί να ξεφύγει αν δε ληφθούν οι σωστές αποφάσεις.

- Και στους δύο αυτούς τύπους γεωτρήσεων χρησιμοποιούνται περιστροφικά **γεωτρύπανα** με περιστρεφόμενη κεφαλή καθώς παρέχουν το πλεονέκτημα ότι δε σταματάει ποτέ η περιστροφική κίνηση και η ταυτόχρονη ροή ρευστού διάτρησης, στοιχείο πολύ χρήσιμο στις υψηλές θερμοκρασίες. Διαφέρουν όμως στο γεγονός ότι το μέγεθος του γεωτρύπανου είναι συγκριτικά μεγαλύτερο στις βαθιές γεωθερμικές γεωτρήσεις, με πιο σύνθετο BOP και πιο απαιτητική προετοιμασία της περιοχής.
- Η **διατρητική στήλη** στις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας τείνει να φθείρεται πιο γρήγορα λόγω των πιο έντονων διαβρωτικών συνθηκών και υψηλότερων θερμοκρασιών, με την κατώτερη συνδεσμολογία να είναι πιο ευαίσθητη στο H_2S , λόγω του μεγαλύτερου φορτίου που δέχεται. Επιπλέον, στις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας όταν υπάρχει ανάγκη για παρέκκλιση της πορείας της γεώτρησης προκύπτουν πρόσθετες δυσκολίες με τη φθορά των κινητήρων πυθμένα.
- Στα **κοπτικά άκρα** δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές. Γίνεται κυρίως χρήση τρίκωνων κοπτικών και στους δύο τύπους γεωτρήσεων, με τη μόνη διαφορά ότι στις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται και πολυκρυσταλλικά συμπαγή αδαμαντοκοπτικά (PDC), καθώς δε διαθέτουν κινούμενα μέρη τα οποία φθείρονται εύκολα.
- Κατά την παρασκευή του **ρευστού διάτρησης** είναι κοινή η χρήση του νερού ως υγρή βάση. Τα ενεργά στερεά συμπεριλαμβάνουν άργιλο και πολυμερή ρυθμίζοντας το ιξώδες. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών στις γεωθερμικές γεωτρήσεις επηρεάζεται η δράση των πρόσθετων δημιουργώντας έτσι προβλήματα στη διαδικασία της διάτρησης. Πιο συγκεκριμένα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των $150^{\circ}C$, στα πεδία υψηλής ενθαλπίας, τα στερεά εντός της λάσπης απορροφούν νερό και οδηγούν στην αύξηση του ιξώδους.
- Τα συνηθισμένα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένες οι **σωληνώσεις** χάνουν την αντοχή τους με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό το φαινόμενο δεν είναι τόσο έντονο σε γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας, αλλά σε πεδία υψηλής ενθαλπίας περιορίζει σημαντικά τις κατηγορίες χάλυβα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Στον περιορισμό αυτό συμβάλει και η διάβρωση που περιορίζει ακόμα περισσότερο τις επιλογές σε ειδικές κατηγορίες χάλυβα.
- Οι μέθοδοι **τσιμέντωσης** που χρησιμοποιούνται και στις δύο γεωτρήσεις δεν διαφέρουν. Παρ' όλ' αυτά, στις βαθιές γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας η όλη διαδικασία εμπεριέχει μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας κυρίως λόγω των πιο συχνών ζωνών απώλειας κυκλοφορίας ρευστού που δύναται να συναντηθούν, αλλά και η αύξηση του ιξώδους του πολφού λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών. Οπότε ορισμένες φορές χρησιμοποιείται τσιμέντο με προσθήκη αέρα ώστε να είναι ελαφρύτερο. Σε γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας συνήθως βρίσκει εφαρμογή το τσιμέντο Portland τύπου G.

- Η **ολοκλήρωση** των αβαθών γεωθερμικών γεωτρήσεων σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας περιλαμβάνει την επιλογή της κατάλληλης φιλτροσωλήνωσης το σωστό σημείο τοποθέτησής της και την επιλογή της χρήσης ή μη χαλκίκοφίλτρου. Στις βαθιές γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας, είναι πολύ σημαντική η διαπίστωση για ανάγκη ολοκλήρωσης ανοιχτού μετώπου ή ολοκλήρωση με χρήση διάτρητου liner αν οι σχηματισμοί του ταμιευτήρα δεν είναι αρκετά συμπαγείς. Κατά την **ανάπτυξη**, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι κοινές και δε διαφοροποιούνται.
- Τα **προβλήματα** που συναντώνται σε όλες τις γεωθερμικές γεωτρήσεις είναι κοινά κατά κύριο λόγο, με τη διαφορά ότι στις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας είναι εντονότερα. Η απώλεια κυκλοφορίας ρευστού είναι πολύ συχνό πρόβλημα, και ακολουθούν τα κολλήματα της διατρητικής στήλης και η αστάθεια των τοιχωμάτων της γεώτρησης.
- Λόγω των μεγαλύτερων και περισσότερων απαιτήσεων των βαθιών γεωθερμικών γεωτρήσεων προκύπτει ότι κατά μέσο όρο **κοστίζουν** περίπου τρεις φορές περισσότερο από τις αβαθείς σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας. Πιο συγκεκριμένα, 210 €/m έναντι 650 €/m βάθους, κατά το έτος 2009.

Το νερό που παράγεται από τις γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας διαφοροποιείται από το νερό που παράγεται από τις συμβατικές υδρογεωτρήσεις ως προς τη θερμοκρασία και τη χημική του σύσταση. Επομένως, ο σχεδιασμός τους διαφέρει και απαιτεί ειδική τεχνική εκτέλεση:

- Κατά το **σχεδιασμό** τους οι αβαθείς γεωθερμικές γεωτρήσεις εξαιτίας της ύπαρξης αυξημένων θερμοκρασιών και πιέσεων, της παρουσίας τοξικών (H_2S) και εύφλεκτων (CH_4) αερίων, των συχνών απωλειών κυκλοφορίας ρευστού διάτρησης και των επικαθίσεων αλάτων και διαβρώσεων παρουσιάζουν πολλές περισσότερες απαιτήσεις συγκριτικά με τις συμβατικές υδρογεωτρήσεις, παρόλο που πολλές φορές ορύσσονται σε παρόμοια βάθη. Οι υδρογεωτρήσεις ορύσσονται είτε με περιστροφικές, είτε με κρουστικοπεριστροφικές μεθόδους, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν και σε γεωθερμικές γεωτρήσεις σε μικρά βάθη και χωρίς έντονο αρτεσιανισμό. Σε αντίθετη περίπτωση, στις γεωθερμικές γεωτρήσεις είναι επιβεβλημένη η περιστροφική όρυξη με χρήση πολφού αυξημένης πυκνότητας.
- Όσον αφορά την επιλογή του **γεωτρώπανου**, στις υδρογεωτρήσεις χρησιμοποιούνται απλές διατάξεις γεωτρώπανων με σχετικά χαμηλή ισχύ. Τα περιστροφικά γεωτρώπανα είναι συνήθως γεωτρώπανα περιστροφικής τράπεζας (rotary table), καθώς αποτελούν πιο οικονομική επιλογή. Στις αβαθείς γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας, χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά γεωτρώπανα περιστροφικού τύπου περιστρεφόμενης κεφαλής.
- Στη σύνθεση της **διατρητικής στήλης** δεν εμφανίζονται σοβαρές διαφορές, με εξαίρεση το υλικό κατασκευής των στελεχών, καθώς στις γεωτρήσεις χαμηλής επιλέγονται ειδικά κράματα χάλυβα ώστε να είναι ανθεκτικά σε διάβρωση.

- Στις αβαθείς γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας, όπως και στις υδρογεωτρήσεις ο κύριος τύπος **κοπτικού άκρου** είναι τα τρίκωνα κοπτικά, με τη μικρή διαφορά ότι στις γεωθερμικές γεωτρήσεις πρέπει να επιλέγονται κοπτικά με ανθεκτικά ρουλεμάν και λιπαντικά στις υψηλές θερμοκρασίες.
- Οι υδρογεωτρήσεις δεν απαιτούν την εγκατάσταση του πρόσθετου εξοπλισμού που συχνά είναι αναγκαίος στις γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας (BOP, ανιχνευτές επικίνδυνων αερίων και όργανα μέτρησης θερμοκρασίας).
- Το **ρευστό διάτρησης** που χρησιμοποιείται στις υδρογεωτρήσεις μπορεί να είναι είτε αέρας, είτε πολφός, είτε αφρός και σχετίζεται κυρίως με τους σχηματισμούς που θα συναντηθούν κατά την όρυξη της γεώτρησης. Στις γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας, εκτός από αυτόν τον παράγοντα δίνεται επιπλέον προσοχή και στις συνθήκες του ταμειυτήρα, δηλαδή αν χαρακτηρίζεται από ασταθή τοιχώματα, έντονο αρτεσιανισμό και παρουσία τοξικών αερίων. Τότε είναι επιβεβλημένη η χρήση πολφού μίγματος νερού με μπεντονίτη.
- Και στις δύο γεωτρήσεις οι **σωληνώσεις** μπορεί να είναι είτε μεταλλικές, είτε πλαστικές (PVC). Στις αβαθείς γεωθερμικές γεωτρήσεις όμως, πρέπει να εξεταστούν περαιτέρω οι αντοχές των σωληνώσεων στη θερμοκρασία και στη διάβρωση, επηρεάζοντας σημαντικά το, σχεδιασμό.
- Στις υδρογεωτρήσεις η διαδικασία της **τσιμέντωσης** πραγματοποιείται κατά περίπτωση, όταν το επιβάλουν ειδικού τύπου προβλήματα. Αντιθέτως στις αβαθείς γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας το στάδιο αυτό δεν μπορεί να παραληφθεί και απαιτεί την χρησιμοποίηση ειδικών τύπων τσιμέντου με καλύτερη συμπεριφορά στις υψηλές θερμοκρασίες.
- Το στάδιο της **ολοκλήρωσης** περιλαμβάνει και στις δύο γεωτρήσεις την τοποθέτηση φιλτροσωλήνωσης και χαλικόφιλτρου όταν αυτά απαιτούνται. Η κύρια διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι ο χημισμός του παραγόμενου ρευστού στις αβαθείς γεωθερμικές γεωτρήσεις είναι αρκετά διαβρωτικός, πράγμα που οδηγεί στην επιλογή είτε φιλτροσωληνώσεων με κατάλληλες προδιαγραφές για αντοχή σε διάβρωση, είτε φιλτροσωληνώσεις με συγκεκριμένα ανοίγματα σχισμών.
- Το στάδιο της **ανάπτυξης** περιλαμβάνει τις ίδιες τεχνικές και στις δύο γεωτρήσεις. Όμως, χρησιμοποιούνται για διαφορετικούς σκοπούς στην εκάστοτε γεώτρηση. Στις υδρογεωτρήσεις οι τεχνικές αφορούν τον καθαρισμό της γεώτρησης από τον προσκολλημένο στα τοιχώματα μπεντονίτη, ενώ στις γεωθερμικές γεωτρήσεις αφορούν την αφαίρεση της πλαστικής αργίλου.
- Οι αβαθείς γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας έχουν κοινά **προβλήματα** με τις υδρογεωτρήσεις, όπως κατάρρευση των τοιχωμάτων, απώλεια γεωτρητικού ρευστού, έκρηξη λόγω ύπαρξης αερίου και βλάβες στον διατρητικό εξοπλισμό, αλλά δεν περιορίζονται μόνο σε αυτά. Επιπρόσθετα, μπορεί να συσσωρευθούν επικίνδυνες ποσότητες H₂S, οι οποίες απαιτούν τη χρήση προστατευτικού εξοπλισμού από το

προσωπικό. Επίσης, μπορεί να απαιτηθούν δευτερεύουσες εργασίες τσιμέντωσης με στόχο την αντιμετώπιση των πολύ έντονων απωλειών κυκλοφορίας ρευστού και τέλος, οι πολύ συχνές επικαθίσεις αλάτων, οι οποίες επιβαρύνουν τον εξοπλισμό και μειώνουν τις παροχές άντλησης.

- Δεδομένου ότι το βάθος όρυξης και στις δύο γεωτρήσεις είναι περίπου το ίδιο, η μεγάλη διαφορά η οποία διαφοροποιεί σε μεγάλο βαθμό το κόστος είναι τα χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων τα οποία και επηρεάζουν τον συνολικό σχεδιασμό. Έτσι, οι αβαθείς γεωθερμικές γεωτρήσεις σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας **κοστίζουν** από δύομισι έως εννέα φορές περισσότερα χρήματα από τις συμβατικές υδρογεωτρήσεις, ανάλογα με τη διάμετρο της γεώτρησης.

Συνοψίζοντας, γίνεται αντιληπτό ότι η όρυξη γεωθερμικών γεωτρήσεων απαιτεί γνώση, εμπειρία, σοβαρότητα, υπευθυνότητα και ειδική κατάρτιση, είτε πρόκειται για πεδία υψηλής ενθαλπίας, είτε για πεδία χαμηλής ενθαλπίας. Ο αυτοσχεδιασμός και οι επιπολαιότητες που παρατηρούνται συχνά κατά την όρυξη των κοινών υδρογεωτρήσεων δεν έχουν χώρο σε τέτοια έργα, τα οποία είναι σύνθετα και έχουν ορισμένο βαθμό επικινδυνότητας. Συνεπώς, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των γεωθερμικών γεωτρήσεων είναι επιβεβλημένο να ανατίθεται σε ειδικευμένους επιστήμονες / μελετητές (γεωλόγους και μηχανικούς), που διαθέτουν εμπειρία στις νέες τεχνολογίες και εξελίξεις, τόσο για την έγκαιρη και επιτυχή αντιμετώπιση των προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν, όσο και για την ορθολογική επιλογή εξοπλισμού, υλικών και μεθόδων που διατίθενται στην αγορά και πρέπει να χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση, για τον περιορισμό όχι μόνο του ρίσκου, αλλά και του κόστους του γεωτρητικού έργου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahmed, M. (2020). *Drillstring instability phenomena studied by superior analysis techniques, resonance modelling*. Torino: Politecnico di Torino.
- Akulshin, A. A., Shcherbakov, V. I., & Uchaev, A. S. (2019). Selection of well screen parameters as aspect of water well design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1088/1757-899x/687/4/044018>
- Archer, R. (2020). Geothermal Energy. *Future Energy*, 431–445. doi:<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102886-5.00020-7>
- Balac, S. (2019). *Full design of a drilling mud pump and flow program*. Chania: Technical University of Crete. Retrieved from <https://dias.library.tuc.gr/view/manf/81838>
- Bett, K. E. (2010). Geothermal well cementing materials and placement techniques. *United Nations University*.
- Burkhad, S., & Olof, A. (2011). GEOTRAINET training manual for drillers shallow geothermal systems. *GEOTRAINET*. Retrieved from <https://geotrainet.eu/wp-content/uploads/2015/11/Drillers-Manual-Final-V2-10.11.pdf>
- Capuano, E. L. (2016). Geothermal well drilling. *Geothermal Power Generation*, 107-139. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100337-4.00005-x>
- Cruse, K. (1979). A review of water well drilling methods. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*.
- Finger, J., & Blankenship, D. (2010). *Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling*. Albuquerque: Sandia National Laboratories. doi:<https://doi.org/10.2172/1325261>
- Gombo, M. (2010). *Drilling programme for a low-temperature geothermal well using a small rig-case history: SIGLUFJÖRDUR, N-ICELAND*. Reykjavik: United Nations University.
- Grant, M. A., Clearwater, J., Quinao, J., Bixley, P. F., & Le Brum, M. (2013). *Thermal Stimulation of Geothermal Wells: A review of field data*. Stanford, California: Stanford University.
- Hagen, D., & Pawlus, W. (2017). Feasibility Study of Electromechanical Cylinder Drivetrain for Offshore Mechatronic Systems.
- Kipsang, C. (2013). Cost model for geothermal wells. *United Nations University*.
- Klempa, M. (n.d.). *Fundamentals of Onshore Drilling*. Retrieved from <http://geologie.vsb.cz/DRILLING/drilling/theory.html>

- Kruseman, G. P., & de Ridder, N. A. (2000). *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. Wageningen: International Institute for Reclamation and Improvement.
- Lohne, H. P., Mansouri, M., Ford, E. P., & Aldaz, S. (2017). *Barrier definitions and risk assessment tools for Geothermal Wells*. Retrieved from Researchgate: https://www.researchgate.net/publication/324573751_Barrier_definitions_and_risk_assessment_tools_for_geothermal_wells
- Lukawski, M., Anderson, B. J., Augustine, C., Capuano, L. E., Beckers, K. F., Livesay, B., & Tester, J. W. (2014). Cost analysis of oil, gas and geothermal well drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.03.012>
- Lyons, W. C., & Plisga, C. J. (2005). *Standard handbook of petroleum & natural gas engineering*. Oxford: Elsevier.
- Nicholson, J. E., & Snyder, R. E. (1982). *Geothermal-Well Completions: A Survey and Technical Evaluation of Existing Equipment and Needs*. New Mexico: Sandia National Laboratories Albuquerque.
- Petrica, V. C. (2016). Common geothermal well design and a case study of the low temperature geothermal reservoir in Otopen, Romania. *United Nations University*.
- Potter, P. A. (2018). Making the Connection for Well Control on Floaters: Evolving Design Rationales for BOP Control Systems.
- Sungkar, F. M., Simanjuntak, H., Isa, B., Ashadi, A., & Hartono, Y. (2020, February). A Thermal Casing Connection Test for Geothermal Wells in KS ORKA. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 417(1). doi:10.1088/1755-1315/417/1/012018
- Tomaszewska, B., Sowizdzał, A., & Chmielowska, A. (2018, September). Selected technical aspects of well construction for geothermal energy utilization in Poland. *Contemporary Trends in Geoscience: The Journal of Uniwersytet Slaski*, 7(2). doi:10.2478/ctg-2018-0013
- Weatherford. (2012). *Gravel Pack Systems*. Retrieved from Weatherford: <https://www.weatherford.com/documents/catalog/gravel-pack-systems/>
- Woessner, W., & Poeter, E. (2020). *Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow*. Ontario: Groundwater Project.
- Zhang, X. (2019). Design and numerical analysis of a large-diameter air reverse circulation drill bit for reverse circulation down-the-hole air hammer drilling. *Energy Science & Engineering*.
- Ανδρίτσος, Ν., & Φυτίκας, Μ. (2004). *Γεωθερμία*. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.
- Ανδρίτσος, Ν., & Φυτίκας, Μ. (2004). *Γεωθερμία*. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.

- Βαφειάδης, Π. Π. (1979). *Η τεχνική των υδρογεωτρήσεων*. Θεσσαλονίκη.
- Βουδούρης, Κ. Σ. (2006). *Θέματα υδρογεωλογίας περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Βραχόπουλος, Μ., Κούκου, Μ., & Καρύτσας, Κ. (2015). *Κανονική Γεωθερμία - Αρχές Σχεδιασμού Γεωθερμικών Συστημάτων και Εφαρμογές*. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα.
- Βρέλλης, Γ., Αρβανίτης, Α., & Μπίμπου - Μπακούλα, Α. (2009). *Γεωθερμικές Γεωτρήσεις: Σχεδιασμός, εκτέλεση και αντιμετώπιση προβλημάτων*. Θεσσαλονίκη: Διεθνές Forum "Η γεωθερμική ενέργεια στο Προσκήνιο".
- Καββαδάς, Μ. Ι. (2013). *Στοιχεία Περιβαλλοντικής Μηχανικής*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κανέλλος, Σ. (2014). *Τεχνικές Κατασκευής Υδρογεωτρήσεων*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Καρυδάκης, Γ. (2005). *Γεωθερμική Ενέργεια*. Αθήνα: Αθλότυπο.
- Καρυδάκης, Γ. Ι. (2003). *Γεωθερμικά Πεδία Χαμηλής Ενθαλπίας Β. Ελλάδας. Τεχνική Γεωτρήσεων, Μηχανική Ταμιευτήρων και Διφασική Ροή Γεωθερμικών Ρευστών*. Διδακτορική Διατριβή, Ξάνθη.
- Κελεσίδης, Β. Χ. (2011). *Αβαθείς και Ειδικές Γεωτρήσεις*. Χανιά: Εκδόσεις Τζιόλα.
- Σταματάκη, Σ. (2003). *Τεχνολογία Γεωτρήσεων*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Τζανής, Α. (2010). *Σημειώσεις για την Έρευνα Γεωθερμικών Πεδίων*. Αθήνα: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Χρηστάρας, Β. (2003). *Αδαμαντοφόρα κοπτικά άκρα*. Retrieved from Εδαφομηχανική Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.: http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg883e/diamond_bits.htm