



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

**Η Γεωθερμική Έρευνα στη Νήσο Μήλο – Αξιολόγηση
Γεωθερμικών Δεδομένων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΚΑΜΑΚΑΡΗ ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ

Επιβλέπουσα: Σταματάκη Σοφία
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

**Η Γεωθερμική Έρευνα Στη Νήσο Μήλο – Αξιολόγηση
Γεωθερμικών Δεδομένων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΚΑΜΑΚΑΡΗ ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ

Επιβλέπουσα: Σταματάκη Σοφία
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις

Σταματάκη Σοφία, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π,

Αποστολόπουλος Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π,

Κυρούσης Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π,

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

Πρόλογος - Ευχαριστίες

Στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η συμβολή κάποιων ατόμων ήταν καθοριστική, προκειμένου να καταφέρω να παρουσιάσω μία αξιόλογη εργασία. Γι' αυτό το λόγο θέλω να τους ευχαριστήσω, γιατί χωρίς την συμβολή τους δεν θα μπορούσα να τα καταφέρω.

Αρχικά, ένα μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω στην καθηγήτρια κα Σταματάκη Σοφία, η οποία σε πρώτο στάδιο με εμπιστεύτηκε και μου έδωσε μία τέτοια διπλωματική εργασία. Δεν με βοήθησε όμως, έτσι όπως θα ήθελα αρχικά. Πολλές φορές με προβλημάτισε και ήρθα σε δύσκολη θέση, με αποτέλεσμα να ψάξω, να διαβάσω, να προβληματιστώ, προκειμένου να βρω λύσεις στα ερωτήματά της. Αυτό ήταν και το μεγάλο μου κέρδος από αυτήν την εργασία και την ευχαριστώ πολύ.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και στον καθηγητή κ. Καρυδάκη Γρηγόριο, ο οποίος φρόντισε σε μεγάλο βαθμό να βρει όλα τα απαραίτητα δεδομένα προκειμένου να προχωρήσω στην μετέπειτα έρευνα και προσπάθησε να μου λύσει κάθε μου απορία πάνω στην τεχνολογία των γεωθερμικών γεωτρήσεων.

Τέλος, το πιο θερμό ευχαριστώ, θα ήθελα να το πω στη συνάδελφό μου, κα Δημητρέλλου Ειρήνη. Η βοήθειά της ήταν ανεκτίμητη και χωρίς εκείνη η εργασία δεν θα είχε έρθει σε πέρας. Φρόντιζε, να μου λύνει κάθε πιθανή και απίθανη απορία, όντας οπλισμένη πάντα με χαμόγελο και υπομονή. Την ευχαριστώ πολύ και της εύχομαι πραγματικά κάθε ευτυχία.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με στήριξαν και με βοήθησαν, και κατά την διάρκεια των σπουδών, και κατά την εκπλήρωση της στρατιωτικής μου θητείας, αλλά και μετά το πέρας αυτής.

Οκτώβριος 2010

Βασίλειος Καμακάρης

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η, κατά το δυνατόν, ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση της μέχρι σήμερα γεωθερμικής έρευνας που έχει εκτελεστεί στη νήσο Μήλο (γεωφυσική και γεωτρητική έρευνα), καθώς και η αξιολόγηση κάποιων εκ των γεωτρητικών δεδομένων. Σκοπός αυτού του μέρους της εργασίας είναι η συμβολή στη δημιουργία μίας πλατφόρμας δεδομένων, η οποία θα μπορεί να αξιοποιηθεί στο σχεδιασμό νέων γεωθερμικών γεωτρήσεων στην περιοχή της Μήλου, δεδομένου ότι η συστηματική και ορθολογική ανάπτυξη του γεωθερμικού δυναμικού της είναι επιβεβλημένη.

Στο πρώτο τμήμα της εργασίας, Κεφάλαια 1 έως και Κεφάλαιο 3, αναλύεται η έννοια της γεωθερμικής ενέργειας, γενικά, και παρουσιάζεται εκτενέστερα η περίπτωση της νήσου Μήλου. Στο δεύτερο τμήμα της εργασίας, Κεφάλαια 4 και 5, γίνεται εκτενή αναφορά στη γεωφυσική και γεωτρητική έρευνα που έχει εκτελεστεί μέχρι σήμερα στη Μήλο και παρουσιάζεται η τεχνική διάτρησης των γεωθερμικών γεωτρήσεων (ρευστά διάτρησης, σωλήνωση, τσιμέντωση, προβλήματα).

Στο τρίτο και τελευταίο τμήμα της εργασίας, Κεφάλαια 6 και 7, παρουσιάζεται ο τρόπος και η μέθοδος αξιολόγησης των γεωτρητικών δεδομένων, γενικά, και γίνεται υπολογισμός των εξής παραμέτρων για τη γεωθερμική γεώτρηση M1: γεωμηχανικές παράμετροι (εκθέτες d και d_{mod} , πίεση σχηματισμού, P_f), ειδική ενέργεια (SE) και διατρησιμότητα (K).

Τέλος, στο Κεφάλαιο 8, γίνεται η σύνοψη των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία.

Abstract

The subject of this dissertation is a comprehensive literature review of the geothermal research, which has been carried out on the island of Milos (geophysical survey and drilling) until today, and the evaluation of some the drilling data available. The purpose of this latter part of the dissertation is to help create a data platform, which can be exploited to design new geothermal wells in the island, since the systematic and rational development of the island's geothermal resources is imperative.

In the first part of this dissertation, Chapters 1 through Chapter 3, the concept of geothermal energy in general explained and the case of Milos island is presented in more detail. In the second part of the dissertation, Chapters 4 and 5, an extensive reference is made to the geophysical and drilling survey that has been performed so far in Milos. In Chapter 5 the technique of drilling geothermal wells (drilling fluids, casing, cementing, and problems) is presented.

The third and last part of the dissertation, Chapters 6 and 7, the method for the evaluation of drilling data is presented in general, and the following parameters for the geothermal well M1 are determined: geomechanical parameters (exponents d and d_{mod} , formation pressure, P_f), specific energy (SE) and drillability (K).

Finally, the basic conclusions of this dissertation are summarized in Chapter 8.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | Σελ. |
|---|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο. Γενικά περί Γεωθερμίας..... | 1 |
| 1.1. Εισαγωγή – Ορισμοί – Βασικές έννοιες..... | 1 |
| 1.2. Προέλευση της γήινης θερμότητας..... | 2 |
| 1.3. Γεωθερμικά συστήματα..... | 4 |
| 1.4. Ταξινόμηση των γεωθερμικών συστημάτων..... | 7 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο. Η Γεωθερμία στον Ελλαδικό Χώρο | 9 |
| 2.1. Γεωθερμικές συνθήκες στο Κεντρικό και Βόρειο Αιγαίο και στη Βόρεια Ελλάδα.. | 10 |
| 2.2. Γεωθερμικές συνθήκες στην Κεντρική Ελλάδα..... | 12 |
| 2.3. Γεωθερμικές συνθήκες στο ηφαιστειακό τόξο του Νοτίου Αιγαίου..... | 13 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο. Γεωθερμία και Νήσος Μήλος..... | 15 |
| 3.1. Η περίπτωση της Μήλου..... | 15 |
| 3.2. Αίτια και συνέπειες της θερμικής ανωμαλίας της Μήλου..... | 17 |
| 3.2.1. Μπεντονιτίωση – Καολινιτίωση..... | 21 |
| 3.2.2. Άλλες ορυκτογενέσεις..... | 21 |
| 3.2.3. Θερμοκρασία των υδροθερμικών ρευστών..... | 22 |
| 3.2.4. Φρεατικές εκρήξεις..... | 22 |
| 3.2.5. Επιφανειακές εκρήξεις..... | 23 |
| 3.3. Στρωματογραφία της Μήλου..... | 23 |
| 3.4. Τεκτονική..... | 28 |
| 3.5. Ηφαιστειακή δραστηριότητα και ηφαιστειακά προϊόντα..... | 31 |
| 3.6. Γεωμορφολογία..... | 33 |
| 3.7. Μελέτη του υδρογραφικού δικτύου..... | 34 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο. Ανάλυση Δεδομένων Γεωθερμικών Ερευνών στη Μήλο | 37 |
| 4.1. Γεωφυσική έρευνα..... | 37 |
| 4.1.1. Γεωηλεκτρικές έρευνες..... | 38 |
| 4.1.2. Βαρυτομετρική έρευνα..... | 45 |
| 4.1.3. Ηλεκτρομαγνητική (MT και CSAMT) μελέτη..... | 47 |
| 4.1.4. Σεισμολογική μελέτη..... | 47 |
| 4.2. Γεωτρητική έρευνα για τον εντοπισμό των γεωθερμικών πεδίων..... | 49 |
| 4.2.1. Η γεώτρηση MZ1..... | 55 |
| 4.2.2. Η γεώτρηση MA1..... | 62 |
| 4.2.3. Η γεώτρηση M1..... | 66 |
| 4.2.4. Η γεώτρηση M2..... | 73 |
| 4.2.5. Η γεώτρηση M3..... | 76 |
| 4.2.6. Η γεωθερμική μονάδα της Μήλου..... | 80 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο. Τεχνική Διάτρησης Γεωθερμικών Γεωτρήσεων..... | 84 |
| 5.1. Κοπτικά άκρα..... | 86 |
| 5.2. Πολφός γεωθερμικών γεωτρήσεων..... | 89 |
| 5.2.1. Παράμετροι που επηρεάζουν τον πολφό..... | 91 |
| 5.2.2. Συστατικά του πολφού διάτρησης..... | 92 |
| 5.3. Σωληνώσεις γεωθερμικών γεωτρήσεων..... | 93 |
| 5.3.1. Κατηγορίες σωληνώσεων..... | 95 |

| | |
|---|-----|
| 5.4. Τσιμέντωση γεωθερμικών γεωτρήσεων..... | 97 |
| 5.4.1. Τα υλικά για την τσιμέντωση και αναλογία νερού-τσιμέντου..... | 98 |
| 5.4.2. Μέθοδοι τσιμέντωσης..... | 99 |
| 5.4.3. Παράμετροι σχεδιασμού τσιμεντώσεων..... | 102 |
| 5.5. Προβλήματα επικαθίσεων στις γεωθερμικές μονάδες..... | 104 |
| 5.5.1. Θειούχες επικαθίσεις..... | 105 |
| 5.5.2. Αντιμετώπιση του σχηματισμού πυριτικών και θειούχων επικαθίσεων..... | 109 |
| 5.5.3. Αύξηση του κόστους λόγω των επικαθίσεων..... | 113 |
| 5.6. Τρόποι διάθεσης γεωθερμικών αποβλήτων..... | 114 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο. Αξιοποίηση Γεωτρητικών Δεδομένων στην Εκτίμηση Γεωμηχανικών Παραμέτρων..... 120

| | |
|---|-----|
| 6.1. Εισαγωγή..... | 120 |
| 6.2. Προέλευση γεωπιέσεων – Ορισμοί..... | 122 |
| 6.2.1. Επεξήγηση του όρου «ανώμαλη πίεση»..... | 122 |
| 6.2.2. Πίεση σχηματισμού..... | 122 |
| 6.2.3. Κανονική πίεση σχηματισμού..... | 123 |
| 6.2.4. Ζώνες Ανωμάτων Πιέσεων..... | 124 |
| 6.3. Μέθοδοι Πρόβλεψης & Εκτίμησης Γεωπιέσεων..... | 127 |
| 6.3.1. Ταχύτητα Διάτρησης και Εκθέτες d και d_{mod} | 129 |
| 6.3.2. Προσδιορισμός της Πίεσης του Σχηματισμού (Pf)..... | 132 |
| 6.4. Βαθμίδα ρωγμάτωσης..... | 133 |
| 6.5. Εκτίμηση γεωπιέσεων..... | 136 |
| 6.5.1. Υπολογισμός των εκθετών d & d_{mod} και της Πίεσης των Σχηματισμών (Pf)..... | 138 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο. Αξιολόγηση Διατρησιμότητας Σχηματισμών & Συμπεριφοράς των κοπτικών άκρων..... 146

| | |
|---|-----|
| 7.1. Εισαγωγή..... | 146 |
| 7.1.1. Ειδική ενέργεια..... | 147 |
| 7.1.2. Διατρησιμότητα..... | 149 |
| 7.2. Υπολογισμός της ειδικής ενέργειας και της διατρησιμότητας των σχηματισμών για τη γεώτρηση M1..... | 150 |
| 7.3. Υπολογισμός της μέσης διατρησιμότητας (\bar{K}) για τη γεώτρηση M1..... | 153 |
| 7.3.1. Μέση διατρησιμότητα (\bar{K}) για τη Γεώτρηση M1..... | 154 |
| 7.4. Συμπεράσματα από τα διαγράμματα μέση διατρησιμότητα (\bar{K}) – Βάθος σχετικά με τη διατρησιμότητα των σχηματισμών για τη γεώτρηση M1..... | 156 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο. Σύνοψη συμπερασμάτων..... 160

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

| | |
|---|---|
| Σχήμα 1.1: Τεκτονικές πλάκες, μεσοκεάνιες ράχες, ωκεάνιες τάφροι, ζώνες καταβύθισης και γεωθερμικά πεδία | 3 |
| Σχήμα 1.2: Διάδοση της θερμότητας στα γεωθερμικά πεδία | 6 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

| | |
|--|----|
| Σχήμα 2.1: Γεωθερμικές περιοχές Β. Ελλάδας | 11 |
| Σχήμα 2.2: Ηφαιστειακό τόξο του Ν. Αιγαίου (McKenzie, 1972) | 13 |
| Σχήμα 2.3: Τεκτονικές γραμμές και όρια λιθοσφαιρικών πλακών στο Αιγαίο (McKenzie, 1972) | 13 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

| | |
|--|----|
| Σχήμα 3.1: Τοπογραφική τομή του αναγλύφου της Μήλου | 34 |
|--|----|

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

| | |
|--|----|
| Σχήμα 4.1: Σχηματική παράσταση της γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης. Το ηλεκτρικό ρεύμα διοχετεύεται στο έδαφος μέσω των ηλεκτροδίων Α και Β. Η μέτρηση της διαφοράς δυναμικού γίνεται μεταξύ των ηλεκτροδίων Μ και Ν | 39 |
| Σχήμα 4.2: Τομές από ηλεκτρικές διοσκοπήσεις στο νησί της Μήλου | 44 |
| Σχήμα 4.3: Χάρτης θέσεων βαρυτομετρικών σημείων μέτρησης στη Μήλο | 46 |
| Σχήμα 4.4: Χάρτης της ανωμαλίας Bouguer της Μήλου | 50 |
| Σχήμα 4.5: Οι θέσεις των γεωτρήσεων στη Μήλο | 54 |
| Σχήμα 4.6: Βαθεία γεώτρηση ΜΖ1 (Μήλος-Ζεφυρία 1η) | 56 |
| Σχήμα 4.7: Θερμομετρήσεις της γεώτρησης ΜΖ1 και καμπύλη κορεσμού νερού-ατμού | 58 |
| Σχήμα 4.8: Βαθεία γεώτρηση ΜΑ1 (Μήλος-Αδάμαντας 1η) | 63 |
| Σχήμα 4.9: Θερμοκρασίες στη γεώτρηση ΜΑ1 | 65 |
| Σχήμα 4.10: Γεώτρηση Μ1 (Μήλος 1η) | 67 |
| Σχήμα 4.11: Γεώτρηση Μ2 (Μήλος 2η) | 74 |
| Σχήμα 4.12: Γεώτρηση Μ3 (Μήλος 3η) | 77 |
| Σχήμα 4.13: Θερμοκρασίες στη γεώτρηση Μ3 | 79 |
| Σχήμα 4.14: Σχηματικό διάγραμμα της γεωθερμικής μονάδας της Μήλου | 81 |
| Σχήμα 4.15: Φωτογραφία της γεωθερμικής μονάδας της Μήλου | 82 |
| Σχήμα 4.16: Φωτογραφία του αγωγού επανεισαγωγής της Μήλου | 83 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 5.1: Ονοματολογία τρίκωνων κοπτικών με ενσωματωμένους οδόντες (milled teeth bit) | 87 |
| Σχήμα 5.2: Ονοματολογία τρίκωνων κοπτικών με ένθετους οδόντες από καρβίδιο του βολφραμίου (tungsten carbide insert bit) | 88 |
| Σχήμα 5.3: Προτεινόμενη διάταξη λειτουργίας του κυκλώματος πολφού για την όρυξη γεωθερμικών γεωτρήσεων χαμηλής θερμοκρασίας | 90 |
| Σχήμα 5.4: Διάτρηση συστήματος τσιμέντωσης με εσωτερική σωλήνωση 2" και σύστημα στεγανότητας σε γεώτρηση στην περιοχή της Υπάτης | 100 |
| Σχήμα 5.5: Διάταξη συστήματος τσιμέντωσης με διαχωριστικά πώματα | 102 |

| | |
|--|-----|
| Σχήμα 5.6: Φωτογραφία επικαθίσεων στο αρχικό τμήμα του αγωγού επανεισαγωγής του γεωθερμικού υγρού στη Μήλο | 107 |
| Σχήμα 5.7: Αρχικός σχεδιασμός γεωθερμοηλεκτρικής μονάδας 2 MW Μήλου | 108 |
| Σχήμα 5.8: Τροποποιημένο σύστημα διαχωρισμού μονάδας 2MW Μήλου..... | 109 |
| Σχήμα 5.9: Απλοποιημένο διάγραμμα απομάκρυνσης των πυριτικών αλάτων πριν από την επανεισαγωγή του αλμολοίπου στον ταμιευτήρα..... | 111 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

| | |
|--|-----|
| Σχήμα 6.1. Γεωπιέσεις και σχεδιασμός γεωτρήσεων | 121 |
| Σχήμα 6.2. Σχηματική παρουσίαση δημιουργίας ανωμάτων πιέσεων από αρτεσιανό σύστημα..... | 125 |
| Σχήμα 6.3. Τεκτονικές δράσεις και δημιουργία ανωμάτων πιέσεων | 125 |
| Σχήμα 6.4. Δημιουργία ανωμάτων πιέσεων σε υποσυμπυκνωμένες ζώνες..... | 126 |
| Σχήμα 6.5. Μεταβολή της ταχύτητας διάτρησης λόγω αλλαγής λιθολογίας (A) ή αλλαγής της πίεσης των σχηματισμών (B)..... | 128 |
| Σχήμα 6.6. Διάγραμμα διορθωμένου εκθέτη d (dmod) με το βάθος | 132 |
| Σχήμα 6.7. Μεταβολή της βαθμίδας πίεσης υπερκειμένων με το βάθος | 135 |
| Σχήμα 6.8. Μεταβολή του λόγου Poisson με το βάθος | 135 |
| Σχήμα 6.9. Τοποθεσία της γεώτρησης M1 | 137 |
| Σχήμα 6.10. Διάγραμμα dmod σε συνάρτηση με το βάθος για την γεώτρηση M1 | 141 |
| Σχήμα 6.11: Διάγραμμα πίεση σχηματισμού σε συνάρτηση με το βάθος για τη γεώτρηση M1 | 144 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 7.1. Διάγραμμα διατρησιμότητας σε συνάρτηση με το βάθος για τη γεώτρηση M1..... | 152 |
| Σχήμα 7.2. Διάγραμμα μέσης διατρησιμότητας σε συνάρτηση με το βάθος για τη γεώτρηση M1 | 155 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

| | |
|--|---|
| Χάρτης 2.1: Γεωθερμικές περιοχές της Ελλάδας..... | 9 |
|--|---|

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

| | |
|--|----|
| Χάρτης 3.1: Προκαταρκτικός χάρτης θερμικής ροής Ελλάδας, σε mWm^{-2} (Fytikas and Kolios, 1979) | 18 |
| Χάρτης 3.2: Χάρτης καμπυλών ισοβαθμίδας Μήλου και οι θέσεις των βαθιών παραγωγικών γεωτρήσεων | 20 |
| Χάρτης 3.3: Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας | 25 |
| Χάρτης 3.4: Γεωλογική – Στρωματογραφική τομή της ν. Μήλου..... | 26 |
| Χάρτης 3.5: Θέσεις και διευθύνσεις ζωνών διάρρηξης στη Μήλο | 29 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

| | |
|--|----|
| Χάρτης 4.1: Χάρτης θέσεων όπου πραγματοποιήθηκαν οι ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις στη Μήλο | 38 |
| Χάρτης 4.2: Χάρτης των φαινομένων αντιστάσεων | 41 |
| Χάρτης 4.3: Χάρτης καμπυλών της γεωθερμικής βαθμίδας | 42 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

| | |
|---|----|
| Πίνακας 3.1: Χημικές αναλύσεις δειγμάτων λάβας της Μήλου | 32 |
|---|----|

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

| | |
|---|----|
| Πίνακας 4.1. Χημικές αναλύσεις ρευστών από τη γεώτρηση MZ1 | 61 |
| Πίνακας 4.2: Δεδομένα όρυξης γεώτρησης M1 | 70 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

| | |
|--|-----|
| Πίνακας 5.1: Υλικά αύξησης της πυκνότητας του πολφού διάτρησης σε γεωθερμικές γεωτρήσεις | 93 |
| Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά γεωτρήσεων και αναλύσεις δειγμάτων επικαθίσεων σε ελληνικά γεωθερμικά πεδία | 106 |
| Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά ροής της M1 | 116 |
| Πίνακας 5.4: Συνοπτικά στοιχεία συγκεντρώσεων αλμολοίπου στη γεωθερμική μονάδα της Μήλου | 119 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

| | |
|--|-----|
| Πίνακας 6.1. Υπολογισμός των εκθετών d και d_{mod} με αξιοποίηση των γεωτρητικών δεδομένων για τη γεώτρηση M1 | 139 |
| Πίνακας 6.2: Υπολογισμός της βαθμίδας πίεσης και της πίεσης των σχηματισμών στη γεώτρηση M1 | 143 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 7.1. Υπολογισμός της ειδικής ενέργειας (SE) και της διατρησιμότητας (K) για τη γεώτρηση M1 | 151 |
| Πίνακας 7.2. Υπολογισμός της μέσης διατρησιμότητας για τη γεώτρηση M1 | 154 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

1.1. Εισαγωγή – Ορισμοί – Βασικές έννοιες

Γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα που προέρχεται από το εσωτερικό της γης, ενώ ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της γης ανά μονάδα μήκους ονομάζεται *γεωθερμική βαθμίδα*. Η μέση της τιμή είναι $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ και χαρακτηρίζεται ως κανονική γεωθερμική βαθμίδα. Ως γεωθερμική ενέργεια, όμως, χαρακτηρίζεται κυρίως το μέρος της θερμότητας που μπορεί να εκμεταλλευτεί και να αξιοποιήσει ο άνθρωπος.

Η γεωθερμία είναι μια φυσική, ήπια και σε σημαντικό βαθμό ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Είναι σημαντικό ότι η γεωθερμία δεν παρουσιάζει τον διαλείποντα χαρακτήρα άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. ηλιακή, αιολική) και είναι σε θέση να προσφέρει ενέργεια ανάλογα με τη ζήτηση. Η εκμετάλλευσή της είναι εφικτή μόνο με την προϋπόθεση ότι οι γεωλογικές συνθήκες, σε συνδυασμό με το θερμικό φορτίο, εξασφαλίζουν ένα οικονομικό αποτέλεσμα.

Τέλος, ως *θετική γεωθερμική ανωμαλία* χαρακτηρίζεται η ύπαρξη τοπικά μιας αυξημένης θερμικής ροής (μεγαλύτερη της μέσης γήινης που ισούται $1,43\text{ μcal/cm}^2\cdot\text{s}$), με συνέπεια την εμφάνιση μεγαλύτερων τιμών γεωθερμικής βαθμίδας σε σχέση με την κανονική.

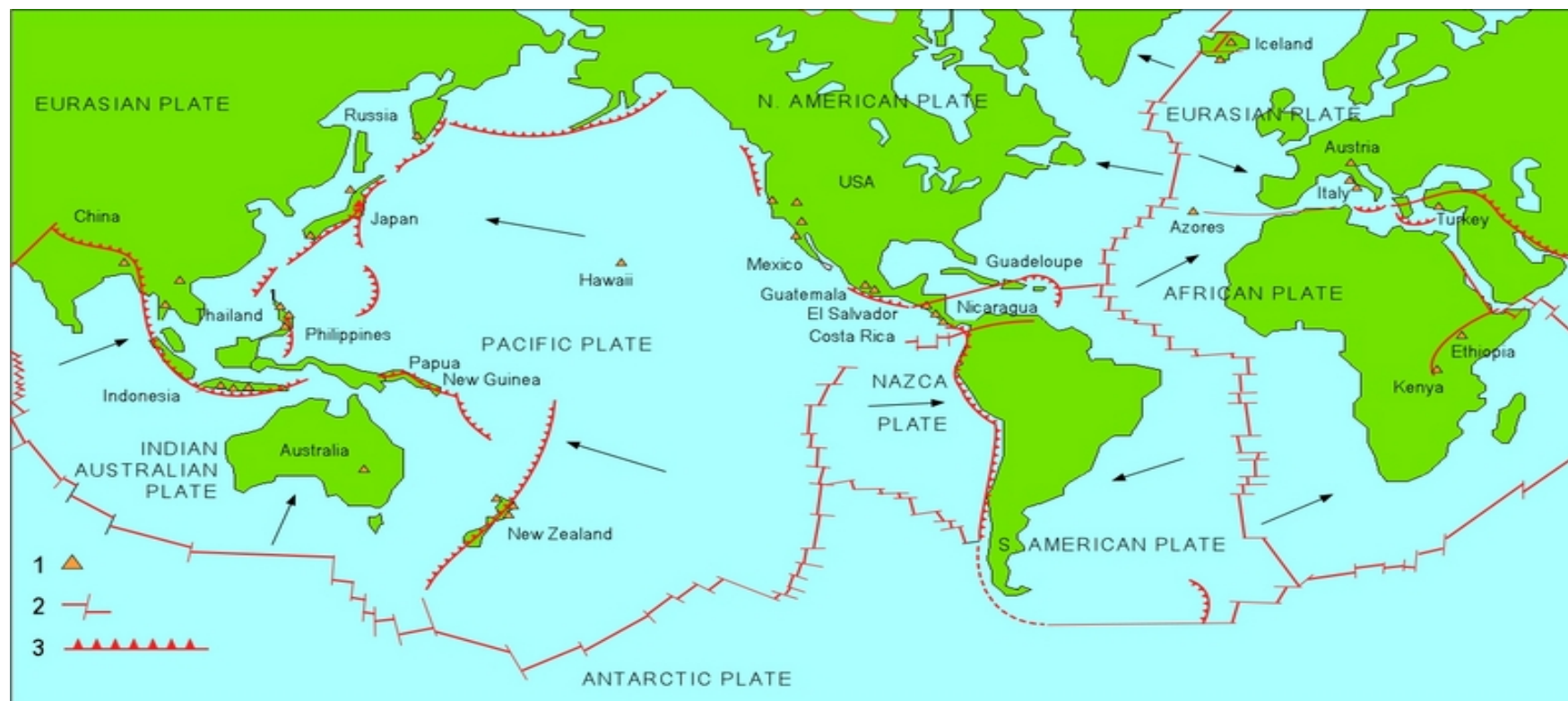
1.2. Προέλευση της γήινης θερμότητας

Η προέλευση της θερμότητας της γης δεν είναι γνωστή με ακρίβεια. Διάφορες θεωρίες έχουν αναπτυχθεί και αναφέρονται στους μηχανισμούς που συμμετέχουν στην παραγωγή της. Οι κυριότεροι μηχανισμοί είναι δύο:

- 1) Η διάσπαση ορισμένων ραδιενεργών ορυκτών της γης, τα οποία περιέχουν ραδιενεργά ισότοπα με μεγάλο χρόνο ημιζωής, όπως U^{238} και U^{235} , Th^{232} και K^{40} . Ο μηχανισμός της διάσπασης των ραδιενεργών ισωτόπων είναι πιθανόν ο σημαντικότερος μηχανισμός παραγωγής θερμικής ενέργειας (Muffler, 1993).
- 2) Η θερμότητα της γης προέρχεται από τις διεργασίες που οδήγησαν στη δημιουργία της, δηλαδή έχει αστρική προέλευση.

Από την άλλη πλευρά, η θεωρία των τεκτονικών πλακών, εκτός από τα ηφαίστεια και τη σεισμική δραστηριότητα, προσφέρει ένα καλό πλαίσιο ερμηνείας και στην περίπτωση της γεωθερμίας. Η θεωρία υποστηρίζει ότι η επιφάνεια της Γης αποτελείται από στερεές πλάκες οι οποίες κινούνται η μία σε σχέση με την άλλη (κίνηση της τάξης cm/yr), και η παραμόρφωση περιορίζεται μόνο στα όρια μεταξύ αυτών. Οι μεσοκεάνιες ράχες, τα ρήγματα μετασχηματισμού και οι ζώνες καταβύθισης σχηματίζουν ένα εκτεταμένο δίκτυο που χωρίζει την επιφάνεια της γης σε έξι λιθοσφαιρικές πλάκες, που αναλυτικά φαίνονται στο **Σχήμα 1.1** που ακολουθεί.

Εξαιτίας των τάσεων που προκαλούνται από τη γήινη θερμική μηχανή και την ασυμμετρία των ζωνών που δημιουργούν και καταστρέφουν το λιθοσφαιρικό υλικό, οι πλάκες αυτές κινούνται αργά η μία προς την άλλη, αλλάζοντας συνεχώς τη σχετική τους θέση. Η Ελλάδα βρίσκεται πάνω στην πλέον ενεργή -γεωλογικά- περιοχή της Αλπιδο-Ιμαλαϊανής ζώνης. Η αφρικανική πλάκα βυθίζεται κάτω από την περιοχή του Αιγαίου, αρχίζοντας την βύθισή της νότια της Κρήτης και στο ύψος των Κυκλάδων φθάνει σε βάθη 200 km. Εκεί προκαλεί τήξη των πετρωμάτων και δημιουργείται το μάγμα. Το λιωμένο αυτό πέτρωμα προσπαθεί να βρει διέξοδο προς τα πάνω, στις περιοχές όπου



Σχήμα 1.1: Τεκτονικές πλάκες, μεσοκεάνιες ράχες, ωκεάνιες τάφροι, ζώνες καταβύθισης και γεωθερμικά πεδία. Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών προς τις ζώνες καταβύθισης.

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

υπάρχουν μεγάλες ρωγμές του φλοιού της γης. Εκεί εξέρχεται στην επιφάνεια, ήπια ή εκρηκτικά, ψύχεται ή στερεοποιείται, παίρνει το χρώμα της λάβας ή της τέφρας, σχηματίζονται πετρώματα από τα οποία αποτελούνται τα ηφαίστεια ηφαιστειογενούς προέλευσης.

Τα όρια των πλακών αντιστοιχούν σε πολύ διαρρηγμένες ζώνες του φλοιού, που χαρακτηρίζονται από έντονη σεισμικότητα, μεγάλο αριθμό ηφαιστειών και, λόγω της ανόδου πολύ θερμών υλικών προς την επιφάνεια, από υψηλή γήινη θερμική ροή. Έτσι, **οι πιο σημαντικές γεωθερμικές περιοχές εντοπίζονται κοντά στα όρια των πλακών.**

Όταν μιλάμε για **γεωθερμικούς πόρους**, συνήθως αναφερόμαστε στους προσβάσιμους πόρους, δηλαδή στους χρήσιμους πόρους που μπορούν να ανακτηθούν σήμερα με οικονομικά ανταγωνιστικό τρόπο και στους πόρους που σήμερα δεν είναι οικονομικοί, αλλά θα μπορούσαν να γίνουν οικονομικοί στο μέλλον. Επομένως, μέρη όπου η εκμετάλλευση της γεωθερμίας είναι δυνατή, είναι εκεί όπου υπάρχουν ταμιευτήρες σχετικά κοντά στην επιφάνεια, ώστε να είναι δυνατή η πρόσβαση σε αυτούς μέσω γεωτρήσεων. Επίσης και όπου οι γεωλογικές διεργασίες έχουν επιτρέψει στο μάγμα να ανέλθει ψηλά μέσα στον φλοιό. Τέτοιες περιοχές είναι:

- 1) Εκείνες όπου οι μεγάλες ωκεάνιες και κρυσταλλικές πλάκες συγκρούονται μεταξύ τους, και η μία διολισθαίνει κάτω από την άλλη (π.χ. βόρεια της Κρήτης η αφρικανική πλάκα καταβυθίζεται κάτω από την ευρωπαϊκή πλάκα).
- 2) Τα επίκεντρα όπου οι πλάκες απομακρύνονται ή μια από την άλλη (Ισλανδία, Ατλαντικός Ωκεανός κ.λπ.).
- 3) Τα θερμά σημεία στον φλοιό όπου υπάρχει συνεχής έκλυση μάγματος στην επιφάνεια. Καθώς η πλάκα κινείται συνεχώς κατά μήκος των σημείων αυτών, δημιουργούνται αλυσίδες ηφαιστειών, όπως π.χ. στα νησιά της Χαβάης.

1.3. Γεωθερμικά συστήματα

Γενικότερα, το **γεωθερμικό σύστημα** μπορεί να περιγραφεί ως «ένα σύστημα» που βρίσκεται σε περιορισμένο χώρο στον ανώτερο φλοιό της γης και αποτελείται από

«κινούμενο νερό», το οποίο μεταφέρει θερμότητα από μια «πηγή» σε μια «δεξαμενή» θερμότητας, που συνήθως είναι μια ελεύθερη επιφάνεια. Έτσι λοιπόν, ένα γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από τρία στοιχεία:

1. την εστία θερμότητας,
2. τον ταμιευτήρα, και
3. το ρευστό, το οποίο λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας.

Η **εστία θερμότητας** μπορεί να είναι είτε μια μαγματική διείσδυση πολύ υψηλής θερμοκρασίας (>600°C) που έχει φτάσει σε σχετικά μικρά βάθη (5-10 km), είτε, στα συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας, η κανονική θερμοκρασία των πετρωμάτων του εσωτερικού της γης, η οποία, όπως αναφέρθηκε, αυξάνεται με το βάθος.

Ο **ταμιευτήρας** είναι ένας σχηματισμός από θερμά υδατοπερατά πετρώματα, που επιτρέπει την κυκλοφορία των ρευστών μέσα σε αυτόν και από τον οποίο τα ρευστά αντλούν θερμότητα. Πάνω από τον ταμιευτήρα βρίσκεται συνήθως ένα κάλυμμα αδιαπέρατων πετρωμάτων. Ο ταμιευτήρας πολλές φορές συνδέεται με μια επιφανειακή περιοχή τροφοδοσίας, δια μέσου της οποίας μετεωρικό ή επιφανειακό γενικά νερό κατεισδύει και αντικαθιστά μερικώς ή ολικώς τα ρευστά που απομακρύνονται από τον ταμιευτήρα και εξέρχονται στην επιφάνεια με τη μορφή θερμών πηγών ή αντλούνται από γεωτρήσεις.

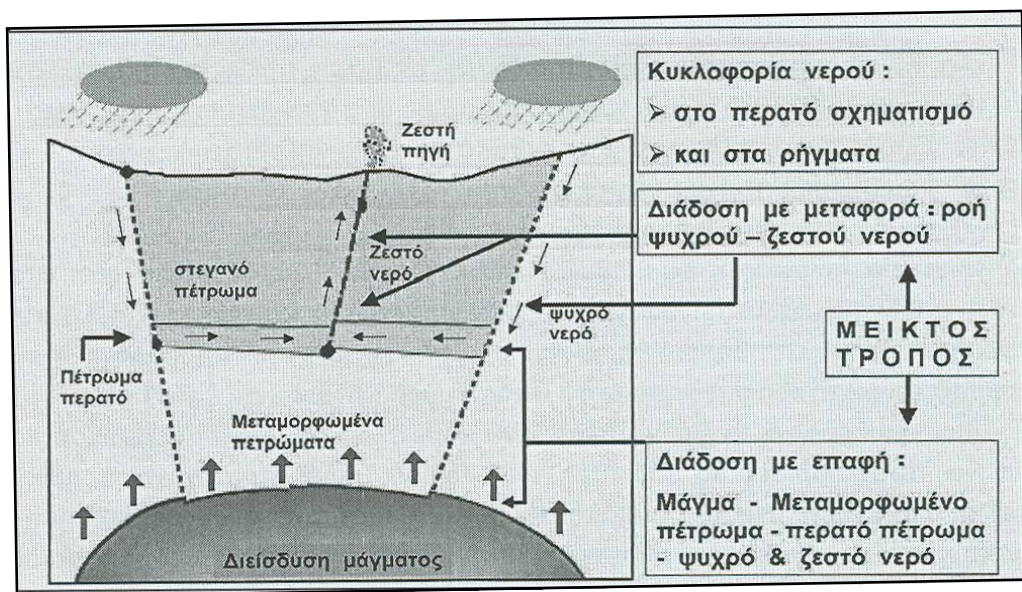
Το **γεωθερμικό ρευστό** συνήθως είναι νερό, στις περισσότερες περιπτώσεις μετεωρικής προέλευσης, το οποίο, ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στον ταμιευτήρα, βρίσκεται σε υγρή ή αέρια κατάσταση. Συχνά το ρευστό είναι εμπλουτισμένο σε χημικά στοιχεία και αέρια, όπως CO₂, H₂S, κ.λπ. Ο μηχανισμός που διέπει τη λειτουργία των γεωθερμικών συστημάτων εν γένει ελέγχεται από τη μεταφορά θερμότητας μέσω της συναγωγής/κυκλοφορίας των ρευστών (fluid convection).

Η **θερμική συναγωγή** λαμβάνει χώρα λόγω της θέρμανσης και, κατ' επέκταση, της θερμικής διαστολής των ρευστών σε ένα πεδίο βαρύτητας. Η ενέργεια που προκαλεί το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι ουσιαστικά η θερμότητα που προσφέρεται από την εστία στη βάση του συστήματος κυκλοφορίας. Η πυκνότητα των ρευστών που θερμαίνονται μειώνεται, οπότε αυτά παρουσιάζουν τάσεις ανόδου προς μικρότερα βάθη, ενώ

αντικαθίστανται στη συνέχεια από ρευστά μικρότερης θερμοκρασίας και μεγαλύτερης πυκνότητας, που προέρχονται από τα περιθώρια του γεωθερμικού συστήματος.

Τέλος, από τα τρία στοιχεία ενός γεωθερμικού συστήματος, η εστία θερμότητας είναι το μόνο που απαραίτητως πρέπει να έχει φυσική προέλευση. Εάν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές, τα άλλα δύο στοιχεία μπορεί να είναι και τεχνητά.

Στα γεωθερμικά πεδία συνήθως επικρατεί ο μεικτός τρόπος μετάδοσης της θερμότητας: με αγωγή (επαφή) και συναγωγή (μεταφορά), όπως παρουσιάζεται και στο **Σχήμα 1.2**.



Σχήμα 1.2: Διάδοση της θερμότητας στα γεωθερμικά πεδία (Πηγή: Καρυδάκης, 2006)

Αρχικά, η θερμότητα μεταδίδεται με αγωγή (επαφή) από τις μαγματικές διεισδύσεις, λόγω μεγάλου βάθους (υψηλές θερμοκρασίες, αυξημένη γεωθερμική βαθμίδα), στα υπερκείμενα μεταμορφωμένα και ρωγματομένα πετρώματα. Ακολούθως, η θερμότητα πάλι με αγωγή (επαφή) μεταδίδεται από τα θερμαθέντα ρωγματομένα πετρώματα στο μετεωρικό νερό που κυκλοφορεί στις ρωγμές τους. Στις περιοχές αυτές (επαφή νερού - πετρώματος) αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού, επομένως, μειώνεται η πυκνότητά του σε σχέση με το υπερκείμενο κρύο νερό. Τότε, λόγω διαφοράς πυκνότητας προκαλείται ροή του νερού (μετάδοση της θερμότητας με μεταφορά), έως ότου όλος ο όγκος του στον ταμιευτήρα αποκτήσει μια θερμοκρασιακή ισορροπία.

1.4. Ταξινόμηση των γεωθερμικών συστημάτων

Τα γεωθερμικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορα κριτήρια, όπως είναι:

- το είδος των γεωθερμικών πόρων,
- ο τύπος και η θερμοκρασία των ρευστών,
- ο τύπος του πετρώματος που φιλοξενεί τα ρευστά,
- το είδος της εστίας θερμότητας,
- αν κυκλοφορούν ή όχι ρευστά στον ταμιευτήρα, κ.ά.

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

1. Τα **υδροθερμικά συστήματα ή πόροι (hydrothermal systems or resources)**, τα οποία είναι υπόγεια φυσικά, θερμά ρευστά και βρίσκονται σε έναν ή περισσότερους ταμιευτήρες. Η μεταφορά της θερμότητας γίνεται με ανοδική κυκλοφορία του νερού (υγρό ή ατμός), το οποίο θερμαίνεται από μία εστία θερμότητας και συχνά εμφανίζεται στην επιφάνεια της γης με τη μορφή θερμών εκδηλώσεων. Τα συστήματα αυτά συχνά ταυτίζονται με το σύνολο σχεδόν των γεωθερμικών πεδίων, αφού σήμερα είναι ουσιαστικά τα μόνα συστήματα που αξιοποιούνται. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται και **συστήματα συναγωγής (convective systems)** ή **δυναμικά συστήματα**, επειδή η θερμότητα μεταφέρεται με το μηχανισμό της συναγωγής. Άλλα υδροθερμικά συστήματα μεταφοράς οφείλονται στην κυκλοφορία μετεωρικού νερού μέσω ρηγμάτων και περατών σχηματισμών, όπου, λόγω μεγάλου βάθους ή μαγματικών διεισδύσεων, θερμαίνεται και ακολουθεί ανοδική πορεία.
2. Τα **γεωπιεσμένα συστήματα (geopressed systems)**, τα οποία αποτελούνται από ρευστά που έχουν εγκλωβιστεί από μη περατά πετρώματα σε μεγάλο βάθος. Μέσα στους περατούς ιζηματογενείς σχηματισμούς υπάρχει ζεστό νερό που παγιδεύτηκε κατά την απόθεση των ιζημάτων, εγκλωβισμένο από στεγανά περιβάλλοντα πετρώματα, υπό πίεση αρκετά μεγαλύτερη της υδροστατικής που αντιστοιχεί στο

- βάθος. Περιέχουν επίσης και μεγάλες ποσότητες μεθανίου. Παρόλο που τεχνολογικά η εκμετάλλευσή τους φαίνεται εφικτή, το μεγάλο κόστος που προκύπτει από την εκμετάλλευση σε μεγάλα βάθη και από τη χρονική διάρκειά της, καθιστούν τους γεωθερμικούς ταμειυτήρες υπό πίεση μη αξιοποιήσιμους.
3. Τα **μαγματικά συστήματα (magma systems)**, στα οποία η απόληψη της θερμότητας με κατάλληλες γεωτρήσεις σε μαγματικές διεισδύσεις, που βρίσκονται σε σχετικά μικρό βάθος, γίνεται με συμβατική τεχνολογία και μικρό σχετικά κόστος.
 4. Τα συστήματα βαθιών **θερμών-ξηρών πετρωμάτων (hot dry rock systems)**, όπου η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή, όμως η έλλειψη ρωγματώσεων δεν επιτρέπει την κυκλοφορία και ύπαρξη νερού. Το σύστημα αυτό, συνήθως υψηλής θερμοκρασίας, επιτρέπει την εισαγωγή κρύου νερού από γεώτρηση, τη θέρμανση του στον τεχνικό ταμειυτήρα και την εξαγωγή ως ζεστού νερού από άλλη γεώτρηση. Αν και τεχνολογικά φαίνεται εφικτή η αξιοποίηση των βαθιών θερμών-ξηρών πετρωμάτων, η εκτίμηση της θερμικής απόδοσης του συστήματος και του ρυθμού απωλειών πρέπει να αξιολογηθούν ώστε να καταστεί οικονομικά βιώσιμη μια τέτοια εκμετάλλευση.
 5. **Συστήματα αγωγιμότητας**, τα οποία αναφέρονται σε γεωθερμικά πεδία χαμηλής θερμοκρασίας που θερμαίνονται με αγωγή και εμφανίζονται σε ιζηματογενείς λεκάνες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Η ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

Οι κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες, η έντονη ηφαιστειακή και σεισμική δραστηριότητα και η έντονη παρουσία ρηγμάτων καθιστά την Ελλάδα μια χώρα αρκετά ευνοημένη γεωθερμικά, όπως παρατηρούμε και στον **Χάρτη 2.1** που ακολουθεί.



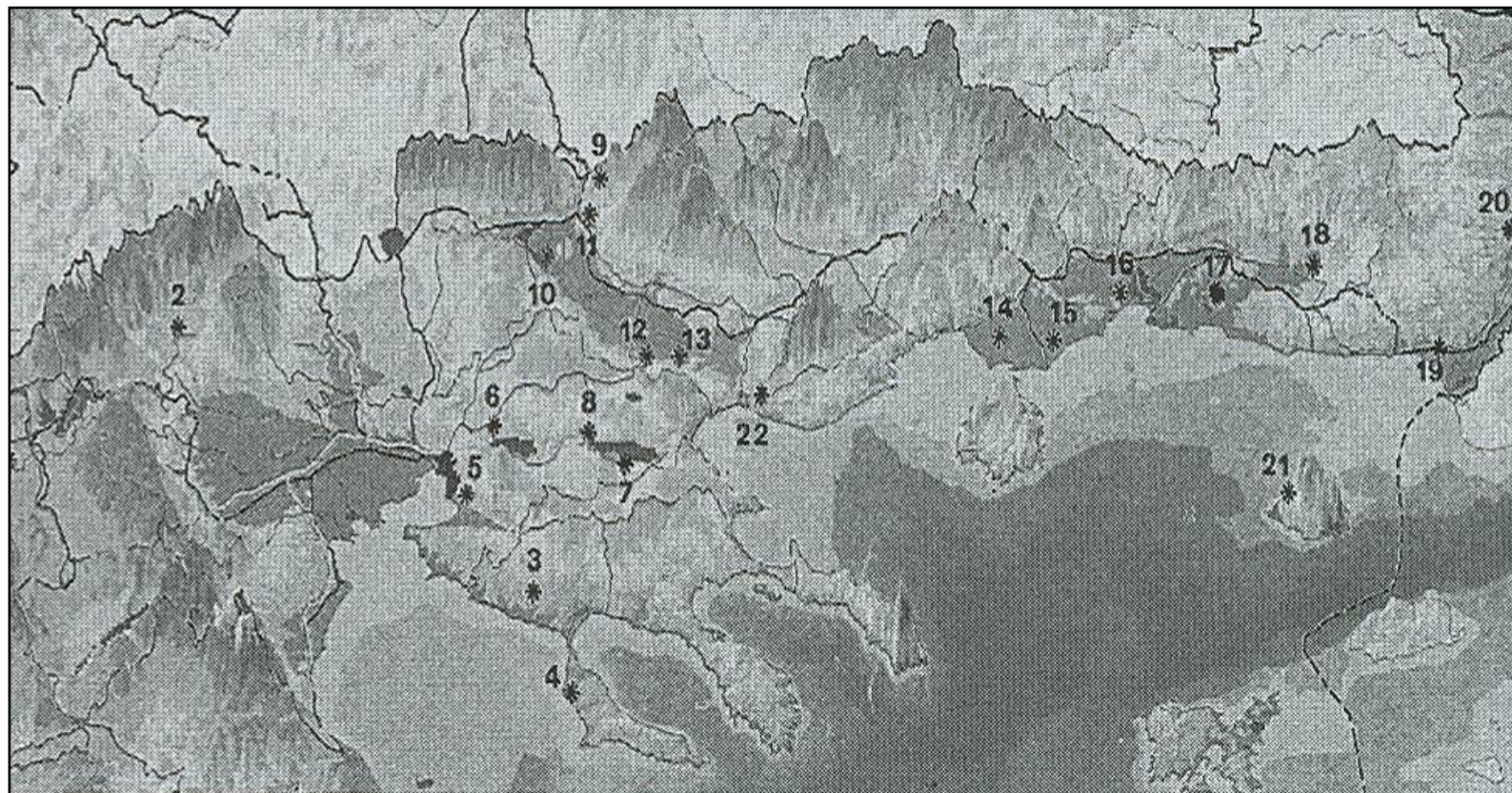
Χάρτης 2.1: Γεωθερμικές περιοχές της Ελλάδας (Πηγή: Φυτίκας-Ανδρίτσος, 2004)

Το Αιγαίο αποτελεί μια περιοχή με συγκλίνουσες λιθοσφαιρικές πλάκες, την Αφρικανική και την Ευρασιατική, με συνέπεια την εμφάνιση ενός ενεργού ηφαιστειακού τόξου, αλλά και μια περιοχή με εφελκυστική τεκτονική, με δημιουργία ιζηματογενών λεκανών. Στη χώρα μας, ως γνωστόν, έπειτα από τις βασικές έρευνες που άρχισαν στις αρχές της δεκαετίας του '70, έχουν εντοπιστεί στα νησιά Μήλο και Νίσυρο δύο γεωθερμικά πεδία υψηλής θερμοκρασίας, ικανά να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Σημειώνεται ότι σήμερα, ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί και από πεδία με θερμοκρασία μεγαλύτερη των 85°C.

2.1. Γεωθερμικές συνθήκες στο κεντρικό και βόρειο Αιγαίο και τη βόρεια Ελλάδα

Η περιοχή βόρεια του ηφαιστειακού τόξου Ν. Αιγαίου (Κεντρικό και Βόρειο Αιγαίο), σε απόσταση 200 km, δημιουργεί εφελκυστικού τύπου τεκτονική με μεγάλα βαθιά ρήγματα, διά μέσου των οποίων κυκλοφορούν γεωθερμικά ρευστά (χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας). Τα ρήγματα αυτά είναι προέκταση του τεράστιου ρήγματος της Ανατολίας, που ξεκινά από τη Β. Τουρκία και διά μέσου του Β. Αιγαίου καταλήγει στη λεκάνη του Σπερχειού.

Στις λεκάνες της Θεσ/νίκης, στο Βύθισμα Στρυμόνα, στο Δέλτα του Νέστου, στην Ξάνθη, Κομοτηνή και Αλεξ/πολη έχουν εντοπιστεί πάνω από 20 γεωθερμικά πεδία με θερμοκρασίες 40 - 92°C, σε βάθη 50 – 500 m. Τα γεωθερμικά ρευστά κυκλοφορούν (κυρίως) στους υδροπερατούς σχηματισμούς (κροκαλοπαγή, ψαμμίτες κ.λπ.) στην οροφή του μεταμορφωμένου υπόβαθρου. Χαρακτηριστική είναι η λεκάνη του Δέλτα του Νέστου (Χρυσούπολη Καβάλας), όπου η έντονη τεκτονική ρηγμάτων, σε συνδυασμό με τα ιζήματα που έχουν καλύψει τις συγκεκριμένες δομές, έχουν δημιουργήσει ένα πιθανό γεωθερμικό πεδίο μέσης θερμοκρασίας (σε βάθη > 1200 m έχουν μετρηθεί θερμοκρασίες 122°C). Αναλυτικότερα, στο **Σχήμα2.1** παρουσιάζονται όλες οι γεωθερμικές περιοχές της Β. Ελλάδας.



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

1. Αμύνταιο, Ν. Φλώρινας,
2. Αριδαία, Ν. Πέλλας,
3. Ελαιοχώρια, Ν. Θεσ/νίκης,
4. Σάνη, Ν. Θεσ/νίκης,
5. Ανθεμόντας Ν. Θεσ/νίκης,
6. Λαγκαδάς, Ν. Θεσ/νίκης,
7. Ν. Απολλωνία, Ν. Θεσ/νίκης,
8. Νυμφόπετρα, Ν. Θεσ/νίκης,
9. Άγκιστρο, Ν. Σερρών,
10. Ηράκλεια, Ν. Σερρών,
11. Σιδ/στρο, Ν. Σερρών,
12. Νιγρίτα, Ν. Σερρών,
13. Ίβηρα-Αχινός, Ν. Σερρών,
14. Ερατεινό, Ν. Καβάλας,
15. Ν. Εράσμιο, Ν. Ξάνθης,
16. Ν. Κεσσάνη, Ν.

Ξάνθης, 17. Λ. Μητρικού, Ν. Ροδόπης, 18. Σάπτες, Ν. Ροδόπης, 19. Τραϊανούπολη, Ν. Έβρου, 20. Τυχερό, Ν. Έβρου, 21. Ακροπόταμος, Ν. Καβάλας.

Σχήμα 2.1: Γεωθερμικές περιοχές Β. Ελλάδας (Πηγή: Καρυδάκης, 2006)

Τέλος, σε αρκετά νησιά του Κεντρικού και Β. Αιγαίου υπάρχουν θερμές πηγές (με αυξημένες θερμοκρασίες). Η Λέσβος χαρακτηρίζεται από έντονο γεωθερμικό ενδιαφέρον για τον εντοπισμό ρευστών χαμηλής, αλλά και μέσης θερμοκρασίας. Από τη μέχρι τώρα έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί στην περιοχή, έχουν εντοπιστεί θερμοκρασίες μέχρι και 90°C. Επίσης, στη Χίο (83°C) η ύπαρξη μεγάλων τεκτονικών διαρρήξεων, με διεύθυνση των κυρίων ρηγμάτων ΒΑ-ΝΔ, ευνοεί την κυκλοφορία των γεωθερμικών ρευστών στους καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους.

Στη Σαμοθράκη και τη Λήμνο, μετά από εκτέλεση αβαθών γεωτρήσεων σε χώρο θερμών πηγών, εντοπίστηκαν γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασίες περίπου 95°C και 42°C, αντίστοιχα.

Υπάρχουν όμως και άλλα νησιά, όπως η Σάμος και η Ικαρία, όπου η ύπαρξη θερμών πηγών με υψηλές θερμοκρασίες, σε συνδυασμό με το γεωλογικό υπόβαθρο, προκαλούν το άμεσο γεωθερμικό ερευνητικό ενδιαφέρον.

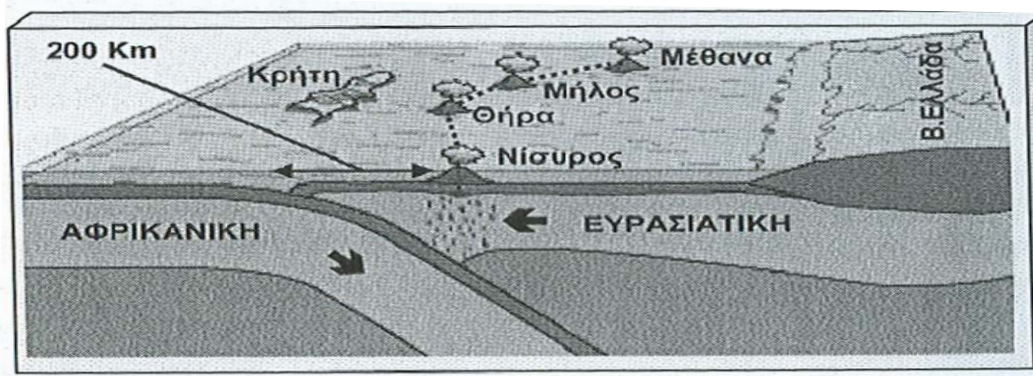
2.2. Γεωθερμικές συνθήκες στην κεντρική Ελλάδα

Η ιζηματογενής λεκάνη του Σπερχειού (περιοχή Λαμίας) όπου καταλήγει το μεγάλο ρήγμα της Ανατολίας, παρουσιάζει ιδιαίτερο γεωθερμικό ενδιαφέρον. Η έντονη τεκτονική ρηγμάτων δημιουργεί θετικές προϋποθέσεις κυκλοφορίας γεωθερμικών ρευστών. Αυτό επιβεβαιώνεται από την ύπαρξη αρκετών θερμών πηγών, όπως: Καμένα Βούρλα (41°C), Θερμοπύλες (41°C), Υπάτη κ.λπ. Τα παραπάνω ισχύουν και για την ευρύτερη περιοχή της Β. Εύβοιας. Η ύπαρξη θερμών πηγών με υψηλές θερμοκρασίες επιβεβαιώνει το γεωθερμικό ενδιαφέρον της περιοχής, όπως στην Αιδηψό (80°C), στα Γιάλτα και στα Ίλια.

Στην περιοχή Σουσάκι (& Μέθανα), αν και βρίσκεται στο ΒΔ άκρο του ηφαιστειακού τόξου του Ν. Αιγαίου, από τις μέχρι τώρα έρευνες σε βάθη μέχρι 1000 m εντοπίστηκαν θερμοκρασίες 60 - 80°C. Φαίνεται ότι οι μαγματικές διεισδύσεις στην περιοχή παραμένουν σε μεγάλα βάθη και δεν δημιουργούν ζώνες υψηλής θερμικής ροής.

2.3. Γεωθερμικές συνθήκες στο ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου

Η σύγκρουση των λιθосφαιρικών πλακών και συγκεκριμένα η βύθιση της Αφρικανικής κάτω από την Ευρασιατική πλάκα στο Αιγαίο (Σχήμα 2.2), δημιουργήσαν την Τάφρο του Αιγαίου, που είχε ως συνέπεια την έντονη σεισμική, ηφαιστειακή και γεωθερμική δράση στην περιοχή.



Σχήμα 2.2: Ηφαιστειακό τόξο του Ν. Αιγαίου (McKenzie, 1972) (Πηγή: Καρυδάκης, 2006)

Κατά τη βύθιση της Αφρικανικής πλάκας δημιουργείται ηφαιστειακή δράση και άνοδος του μάγματος, με συνέπεια την ύπαρξη θερμών εστιών σε μικρά βάθη στο στερεό φλοιό. Στον χώρο εμφανίζεται ένα ενεργό ηφαιστειακό τόξο και μια περιοχή εφελκυστικής τεκτονικής με δημιουργία ιζηματογενών λεκανών γεωθερμικού ενδιαφέροντος (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: Τεκτονικές γραμμές και όρια λιθосφαιρικών πλακών στο Αιγαίο (McKenzie, 1972) (Πηγή: Καρυδάκης, 2006)

Βόρεια, και σε απόσταση 200 km από τα όρια σύγκρουσης των λιθοσφαιρικών πλακών, υπάρχει το ηφαιστειακό τόξο του Ν. Αιγαίου. Έχει μήκος 500 km και πλάτος 30-40 km και οριοθετείται από τα ηφαιστειακά συγκροτήματα της Νισύρου, Σαντορίνης, Μήλου και Μεθάνων. Γεωλογικά βρίσκεται πάνω από την περιοχή ανόδου και τήξης του μάγματος σε μικρά βάθη (περίπου 5 km). Στο ηφαιστειακό τόξο του Ν. Αιγαίου εμφανίζονται ζώνες υψηλής θερμικής ροής και έντονης τεκτονικής (ρηγμάτων), που δημιουργούν προϋποθέσεις για γεωθερμικά πεδία (ειδικά υψηλής θερμοκρασίας), όπως τα ήδη εντοπισμένα στη Μήλο (320°C) και τη Νίσυρο (350°C).

Η Νίσυρος, όπως και η Μήλος, ανήκουν στα νησιά με υψηλή θερμική ροή στο ηφαιστειακό τόξο του Ν. Αιγαίου. Ήδη, μετά το 1980, με την εκτέλεση δύο ερευνητικών - παραγωγικών γεωτρήσεων για τη ΔΕΗ, σε βάθη 1550 m και 1820 m εντοπίστηκαν γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασία άνω των 350°C, ικανά να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια ισχύος τουλάχιστον 5 MWe. Οι δυνατότητες του πεδίου όμως, εκτιμώνται πολύ περισσότερες, της τάξης των 50 MWe.

Υπάρχουν όμως και μερικά άλλα νησιά που ανήκουν στο ηφαιστειακό τόξο του Ν. Αιγαίου, όπου οι αυξημένες θερμοκρασίες σε μικρά βάθη (γεωτρήσεις), σε συνδυασμό με την γεωτεκτονική τους δομή, προκαλούν το ερευνητικό ενδιαφέρον. Πρόκειται για τα νησιά Κω (45°C), Σαντορίνη (50°C /150 m), Κίμωλο (70 °C /150 m) και Κύθνο (52 °C).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ ΚΑΙ ΝΗΣΟΣ ΜΗΛΟΣ

3.1. Η περίπτωση της Μήλου

Η Μήλος είναι από τα πρώτα και πιο χαρακτηριστικά νησιά του ηφαιστειακού τόξου του Ν. Αιγαίου που προκάλεσε το γεωθερμικό ενδιαφέρον από το 1970. Η Μήλος βρίσκεται στο νοτιοδυτικό άκρο του νησιώτικου συμπλέγματος των Κυκλάδων, που γεωλογικά ανήκει στην Πελαγονική ζώνη. Η θέση της Μήλου, η τεκτονική του ελλαδικού χώρου και η παρουσία τριών λιθοσφαιρικών πλακών στην περιοχή του Αιγαιο-μεσογειακού χώρου δημιούργησαν ειδικές συνθήκες που εξηγούν την παρουσία του γεωθερμικού πεδίου του νησιού.

Το νησιώτικο σύμπλεγμα των Κυκλάδων, μαζί με την Αττική και τη νότια Εύβοια, αποτελούν την Κρυσταλλική Αττικοκυκλαδική μάζα (Φυτίκας, 1977). Ο χαρακτηρισμός αυτός αφορά μόνο τη μεταμόρφωση, ενώ είναι γνωστό ότι στην Πελαγονική ζώνη ανήκουν και περιοχές με σχηματισμούς που δεν έχουν υποστεί μεταμόρφωση. Η Πελαγονική ζώνη ανήκει στις εσωτερικές τεκτονικές ζώνες της Ελλάδας και θεωρείται ότι έχει, τουλάχιστον μερικά, μετακινηθεί από ανατολικότερες θέσεις σε χρονική περίοδο νεότερη του Μέσου Ηώκαινου. Δηλαδή, σε εποχή προγενέστερη από αυτήν που πραγματοποιήθηκαν οι μετακινήσεις των άλλων πιο κεντρικών ελληνικών ζωνών, ενώ οι δυτικές γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας θεωρούνται αυτόχθονες. Επίσης, αυτή αποτέλεσε τον κύριο κορμό των εσωτερικών γεωλογικών ζωνών της Ελλάδας και έπαιξε πρωτεύοντα ρόλο στη γενική γεωλογική εξέλιξη του Ελληνικού χώρου.

Η Πελαγονική ζώνη αποτέλεσε τον κύριο σκελετό των εσωτερικών ζωνών, αν και αργότερα μετακινήθηκε σχηματίζοντας κάλυμμα, και έπαιξε βασικό ρόλο στη γενική ορογένεση. Σε διαφορετικά διαστήματα υπέστη κατακόρυφες μετακινήσεις, που συνοδεύτηκαν από πτυχώσεις με μεγάλη ακτίνα κύρτωσης, από παλμικές κινήσεις, από

συχνές διαρρήξεις και από ολισθήσεις, που διευκολύνθηκαν από τα σχιστολιθικά και σερπεντινικά μέλη της ζώνης. Η Πελαγονική ζώνη περιέχει τέλος μεγάλες οφιολιθικές μάζες, μεσοζωικής ηλικίας (AUBOUIN et al., 1963).

Η Μήλος, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ανήκει στο ηφαιστειακό τόξο της μικρής πλάκας του Αιγαίου. Κάτω από την πλάκα αυτή, που κινείται τελευταία με πολύ μικρή ταχύτητα (περίπου 1,6 cm το χρόνο) προς νοτιοδυτικά, βυθίζεται η μεγάλη αφρικανική πλάκα κατά μήκος των σημείων που αντιστοιχούν στην ελληνική τάφρο. Το φαινόμενο αυτό, που έχει ουσιαστικά συμπληρωθεί και έτσι τελειώνει, δημιούργησε και το ενεργό ηφαιστειακό τόξο του νότιου Αιγαίου, τμήμα του οποίου είναι και το νησιώτικο σύμπλεγμα: Μήλος, Κίμωλος, Υπόλυβος, Αντίμηλος κ.λπ. (Φυτίκας, 1977).

Σε βάθη περίπου 5 km υπάρχουν στη Μήλο μαγματικοί θάλαμοι στη φάση της ψύξης, όπου δημιουργούν συνθήκες υψηλής θερμικής ροής. Η τεκτονική ρηγμάτων του μεταμορφωμένου υποβάθρου σε βάθη >500m δημιουργεί αυξημένης περατότητας γεωλογικούς σχηματισμούς (γεωθερμικός ταμιευτήρας). Υπάρχουν στο κεντρικό και στο ανατολικό τμήμα του νησιού ζεστά εδάφη, θερμές πηγές και ατμίδες με θερμοκρασία 75-102°C.

Η ΔΕΗ το 1974 - 1981 εκτέλεσε 5 γεωτρήσεις σε βάθη 1000 -1400 m (κυρίως στην περιοχή της Ζεφυριάς), όπου εντοπίστηκαν γεωθερμικοί ταμιευτήρες με θερμοκρασίες 290 - 320°C. Μερικές από τις γεωτρήσεις αυτές μπορούν να παράγουν υγρό ατμό με απόδοση 40-120 tn/h και θερμοκρασία 180 - 240°C (στην έξοδο της κεφαλής της γεώτρησης). Το συνολικό δυναμικό του πεδίου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται άνω των 120MW.

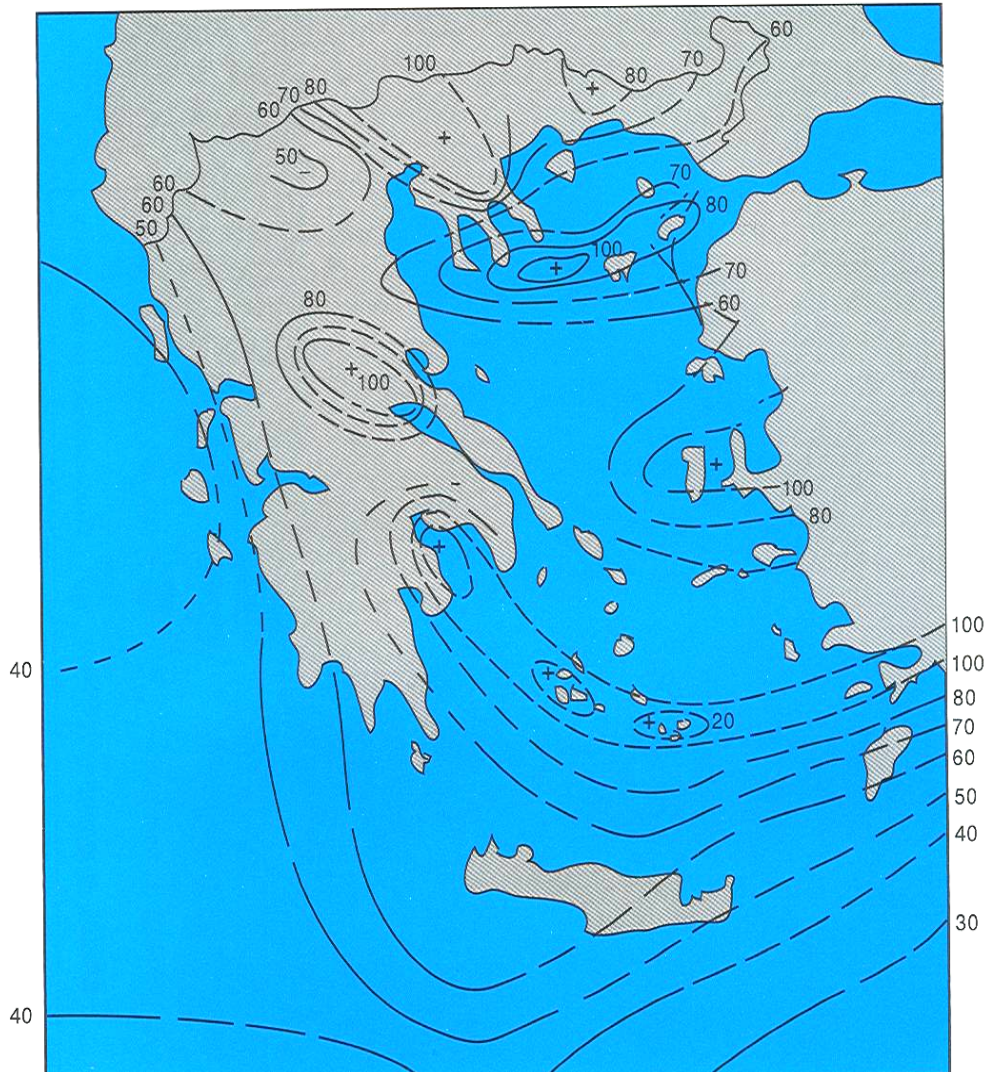
Η ΔΕΗ εγκατέστησε μια πρόδρομη μικρή μονάδα 2MW, που όμως δεν λειτούργησε λόγω τεχνικών προβλημάτων. Τα προβλήματα της μονάδας παραγωγής εστιάζονται στη δέσμευση του H₂S και στην αντιμετώπιση θειούχων και πυριτικών επικαθίσεων αλάτων, κυρίως στο δίκτυο απομάκρυνσης των γεωθερμικών ρευστών. Όλες οι γεωτρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα στη Μήλο, καθώς και τα προβλήματα που προέκυψαν, παρουσιάζονται εκτενέστερα στο **Κεφάλαιο 4**.

Η Μήλος ανήκει σήμερα, με βεβαιότητα, στην τρίτη ζώνη (γ), δηλ. στη ζώνη υψηλής θερμικής ροής. Βρίσκεται πάνω από τις περιοχές όπου γίνεται η τήξη και δημιουργούνται μάγματα που ανέρχονται και φτάνουν σύντομα κοντά ή και επάνω από την επιφάνεια. Στο παρελθόν, η σημερινή θέση του νησιού πιθανότατα αντιστοιχούσε διαδοχικά στις ζώνες (α) και (β). Σε ένα ορισμένο βάθος γίνεται τήξη, που έχει σαν αποτέλεσμα τη μετανάστευση θερμότητας προς την επιφάνεια, που τη διευκολύνει η άνοδος μαγμάτων και μαγματικών μεταφορικών κινήσεων. Έτσι είναι δυνατόν να διακριθούν οι τρεις θερμικές ζώνες. Η πρώτη ζώνη (α) έχει χαμηλή θερμική ροή, επειδή στη ζώνη αυτή υπάρχουν πολλά ψυχρά ακόμη ωκεάνια ιζήματα. Αντίθετα, η δεύτερη ζώνη (β) έχει ενδιάμεση τιμή θερμικής ροής και αποτελείται από ιζήματα τα οποία είχαν συγκεντρωθεί εκεί προηγουμένως ή από παλαιό φλοιό. Η αυξημένη θερμική ροή κατά μήκος του τόξου φαίνεται στο **Χάρτη 3.1** θερμικής ροής της χώρας μας που ακολουθεί.

3.2. Αίτια και συνέπειες της θερμικής ανωμαλίας της Μήλου

Ο κύριος λόγος της υψηλής θερμικής ροής που παρατηρείται στη Μήλο (στη Νίσυρο και τη Σαντορίνη), είναι η ύπαρξη σε μικρά σχετικά βάθη μεγάλων ποσοτήτων μάγματος σε κατάσταση κρυστάλλωσης. Τα μάγμα αυτά δημιουργήθηκε από τη μερική τήξη υλικών σε βάθος μέχρι 180 km, που είναι το μεγαλύτερο βάθος του τόπου των σεισμικών εστιών μεγάλου βάθους.

Δεν αποκλείεται φυσικά η υψηλή αυτή θερμική ροή να ενισχύεται και από τη ραδιενέργεια του ηπειρωτικού φλοιού. Η σχετικά υψηλή και σε μεγάλη έκταση θερμική ροή, που περιμένει κανείς να συναντήσει στο ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου, δεν είναι ίσως ικανή μόνη της να δικαιολογήσει την πολύ υψηλή θερμική ροή που υπάρχει στην κεντρική Μήλο (Φυτίκας, 1977).



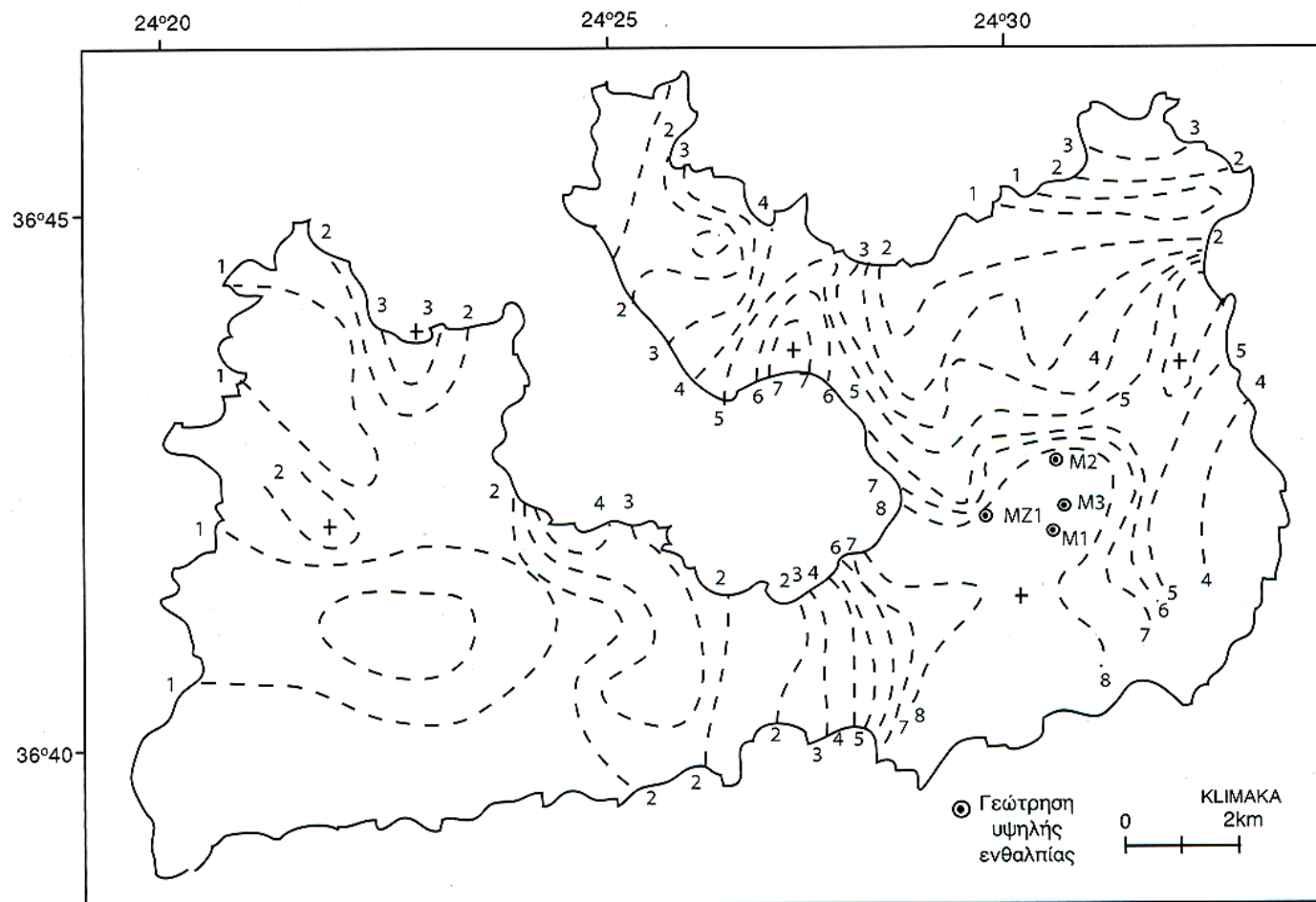
Χάρτης 3.1: Προκαταρκτικός χάρτης θερμικής ροής Ελλάδας, σε mWm^{-2}
(Fytikas and Kolios, 1979) (Πηγή: Φυτίκας-Ανδρίτσος, 2004)

Σημαντική επιβεβαίωση της μεγάλης θερμικής ροής στη Μήλο αποτελούν οι πολύ υψηλές τιμές της γεωθερμικής βαθμίδας. Ως **γεωθερμική βαθμίδα** ορίζεται ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της γης ανά μονάδα μήκους. Οι τιμές της είναι μέχρι και 20 φορές και πλέον υψηλότερες της μέσης γήινης, όταν, η κανονική γεωθερμική βαθμίδα αντιστοιχεί σε μεταβολή $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Στον **Χάρτη 3.2** που ακολουθεί οι τιμές της γεωθερμικής βαθμίδας δίνονται σε $^{\circ}\text{C}/10\text{m}$, ενώ η περιοχή με γεωθερμική βαθμίδα >8 έχει τιμές 24 φορές και πλέον μεγαλύτερες της μέσης γήινης.

Όσον αφορά τις συνέπειες της θερμικής ανωμαλίας, με την άνοδο του μάγματος από τον μανδύα στις επιφανειακές θέσεις του φλοιού, προξενήθηκαν, εκτός από την πρόσφατη ηφαιστειότητα της Μήλου, και διάφορα σύγχρονα φαινόμενα που οφείλονται στην

υδροθερμική δράση των θερμών ρευστών. Τα ρευστά αυτά θερμάνθηκαν κατά κύριο λόγο από την άμεση ή έμμεση επαφή του νερού που έχει μετεωρική ή θαλασσινή προέλευση και που κυκλοφορεί μέσα στα πετρώματα που βρίσκονται πάνω από τον μαγματικό θάλαμο.

Τα φαινόμενα που έλαβαν χώρα στη Μήλο, ως αποτέλεσμα της δραστηριότητας των υδροθερμικών ρευστών, είναι πολυάριθμες φρεατικές εκρήξεις, μεγάλης έκτασης μπεντονιτίωση και καολινιτίωση των ηφαιστιτών, σχηματισμός κοιτασμάτων βαρύτη, θείου, πυριτικών, αλουνίτη, μαγγανίου, γαληνίτη κ.λπ. Είναι φανερό ότι η μελέτη των υδροθερμικών φαινομένων, που είναι σύγχρονα ή μεταγενέστερα από την ηφαιστειακή δράση, παρουσιάζει ενδιαφέρον για τη γεωθερμική έρευνα. Εξάλλου, το μεγαλύτερο μέρος του ορυκτού πλούτου του νησιού οφείλεται ακριβώς στα υδροθερμικά αυτά φαινόμενα (Φυτίκας, 1977). Το μοναδικό ηφαιστειακό πέτρωμα που δεν έχει υδροθερμική προέλευση και που τυγχάνει βιομηχανικής εκμετάλλευσης στη Μήλο είναι ο περλίτης.



Χάρτης 3.2: Χάρτης καμπυλών ισοβαθμίδας Μήλου και οι θέσεις των βαθιών παραγωγικών γεωτρήσεων (Πηγή: Φυτίκας-Ανδρίτσος, 2004)

3.2.1. Μπεντονιτίωση – Καολινιτίωση

Το σημαντικότερο φαινόμενο υδροθερμικής εξαλλοίωσης είναι εκείνο που μετέτρεψε σε μεγάλη έκταση του νησιού τα διάφορα είδη ηφαιστειακών προϊόντων, και κατά προτίμηση των πυροκλαστικών, σε ορυκτά αργιλικού τύπου. Η μετατροπή αυτή δημιούργησε διαφοροποιημένα φυλλοπυριτικά ορυκτά, ανάλογα με το χημικό περιβάλλον που κυριαρχούσε. Το βαθύτερο γενικά περιβάλλον, αλκαλικής φύσης, προκάλεσε την μπεντονιτίωση της ηφαιστειακής σειράς. Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζεται η μετατροπή αρχικά της ηφαιστειακής υάλου και μετά των φαινοκρυστάλλων, που βρίσκονται μέσα στις λάβες και στους πυροκλαστίτες, σε ουσιαστικά καθαρό μοντμοριλλονίτη (μπετονίτη).

Όταν τα υδροθερμικά διαλύματα πλησιάζουν στην επιφάνεια του εδάφους, από την ανάμιξη αυτών με επιφανειακά νερά πλούσια σε οξυγόνο, γίνεται οξείδωση του υδρόθειου και μετατροπή αυτού σε θειικό οξύ. Επειδή, το H_2S είναι ένα πολύ ασθενές οξύ και το H_2SO_4 ένα εξαιρετικά ισχυρό οξύ, το pH των διαλυμάτων κατέρχεται αρκετά. Έτσι, στο νέο χημικό περιβάλλον που δημιουργείται δεν είναι πια σταθερός σαν αργιλικός τύπος ο μοντμοριλλονίτης, αλλά ο καολίνης.

Εκτός από τον καολίνη, η ενέργεια του H_2SO_4 προκαλεί και σχηματισμό θειικών αλάτων του Al και του K (αλουνίτη) και η μερική οξείδωση του H_2S δημιουργεί μικρές συγκεντρώσεις αυτοφυούς θείου. Ο σίδηρος που υπάρχει μέσα στους ηφαιστίτες διαλύεται υδροθερμικά σαν θειικός, αλλά δυστυχώς μερικές φορές αποτίθεται πάλι σαν υδροξείδιο, πράγμα που οφείλεται στο οξειδωτικό περιβάλλον. Γι' αυτό υπάρχουν ζώνες κατάλευκου και καθαρού καολινίτη και άλλες με φλέβες και εμποτισμούς κόκκινων υδροξειδίων του σιδήρου.

3.2.2. Άλλες ορυκτογενέσεις

Ο σχηματισμός, επίσης, των κοιτασμάτων του βαρύτη οφείλεται σε συγκέντρωση μικρών ποσοτήτων από βάριο, που περιέχονται στα ηφαιστειακά πετρώματα. Μαζί με τον βαρύτη βρέθηκαν και μικρές ποσότητες γαληνίτη, αγγλεσίτη και άλλων μεταλλικών ορυκτών. Ένα τέτοιο κοίτασμα βρίσκεται στο ΒΔ/κό άκρο του νησιού. Πρόκειται για υδροθερμικό

εμποτισμό από βαρύτη και ορυκτά μαγγανίου μιας ηφαιστειο-ιζηματογενούς σειράς νεαρής ηλικίας.

3.2.3. Θερμοκρασία των υδροθερμικών ρευστών

Είναι δύσκολο να καθορίσει κανείς ποια ήταν η θερμοκρασία των υδροθερμικών συστημάτων της Μήλου. Κατά το αρχικό στάδιο, επειδή τα συστήματα αυτά ήταν σε επαφή με τα επιφανειακά νερά και την ατμόσφαιρα, η θερμοκρασία τους δεν πρέπει να ήταν πολύ μεγαλύτερη των 100°C. Με την πάροδο του χρόνου, τα φαινόμενα της μπεντονιτίωσης και καολινιτίωσης έκαναν όλο και περισσότερο αδιαπέρατα τα αρχικά πολύ πορώδη ηφαιστειακά προϊόντα και έτσι δημιουργήθηκε ένας διαχωρισμός ανάμεσα στον υδροθερμικό κύκλο και στα επιφανειακά νερά. Η θερμοκρασία των υδροθερμικών ρευστών, που με τον τρόπο αυτόν ήταν προφυλαγμένα από τις επιφανειακές επιδράσεις, διατηρήθηκε πολύ υψηλή. Το φαινόμενο αυτό επαληθεύεται από την παρουσία των φρεατικών εκρήξεων.

3.2.4. Φρεατικές εκρήξεις

Με τον όρο φρεατικές εκρήξεις χαρακτηρίζονται τα εκρηκτικά εκείνα φαινόμενα που παρατηρούνται στις ηφαιστειογενείς περιοχές χωρίς να παίρνει μέρος σ' αυτά η ενέργεια των αερίων που βρίσκεται μέσα στο μάγμα και χωρίς να παρατηρείται έξοδος νέου μαγματικού υλικού. Οι φρεατικές εκρήξεις δημιουργούνται από την απότομη μετατροπή υπόγειου θερμού νερού σε ατμό. Το φαινόμενο αυτό εκδηλώνεται όταν η λιθοστατική πίεση σε ένα ορισμένο σημείο γίνεται κατώτερη από την πίεση βρασμού του νερού, για μια ορισμένη θερμοκρασία που έχει το νερό στο συγκεκριμένο αυτό βάθος. Στη Μήλο βρέθηκαν πολυάριθμοι κρατήρες φρεατικών εκρήξεων που τους διακρίνουμε σε τρεις ομάδες:

- Η πρώτη ομάδα βρίσκεται ανατολικά της πεδιάδας της Ζεφυρίας στις θέσεις Άγιοι-Θεόδωροι, Παλιόρεμα, Καστανάς και Μουρτόραχη και χαρακτηρίζεται από την παρουσία πάρα πολλών κρατήρων.

- Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει δύο μόνο φρεατικούς κρατήρες που σχηματίστηκαν στις πρόσφατες λάβες των Βουναλίων και έχουν διάμετρο 30 m περίπου.
- Η τρίτη ομάδα βρίσκεται δυτικά και βόρεια της πεδιάδας της Ζεφυρίας και οι κρατήρες έχουν διάμετρο αρκετών εκατοντάδων μέτρων.

3.2.5. Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας

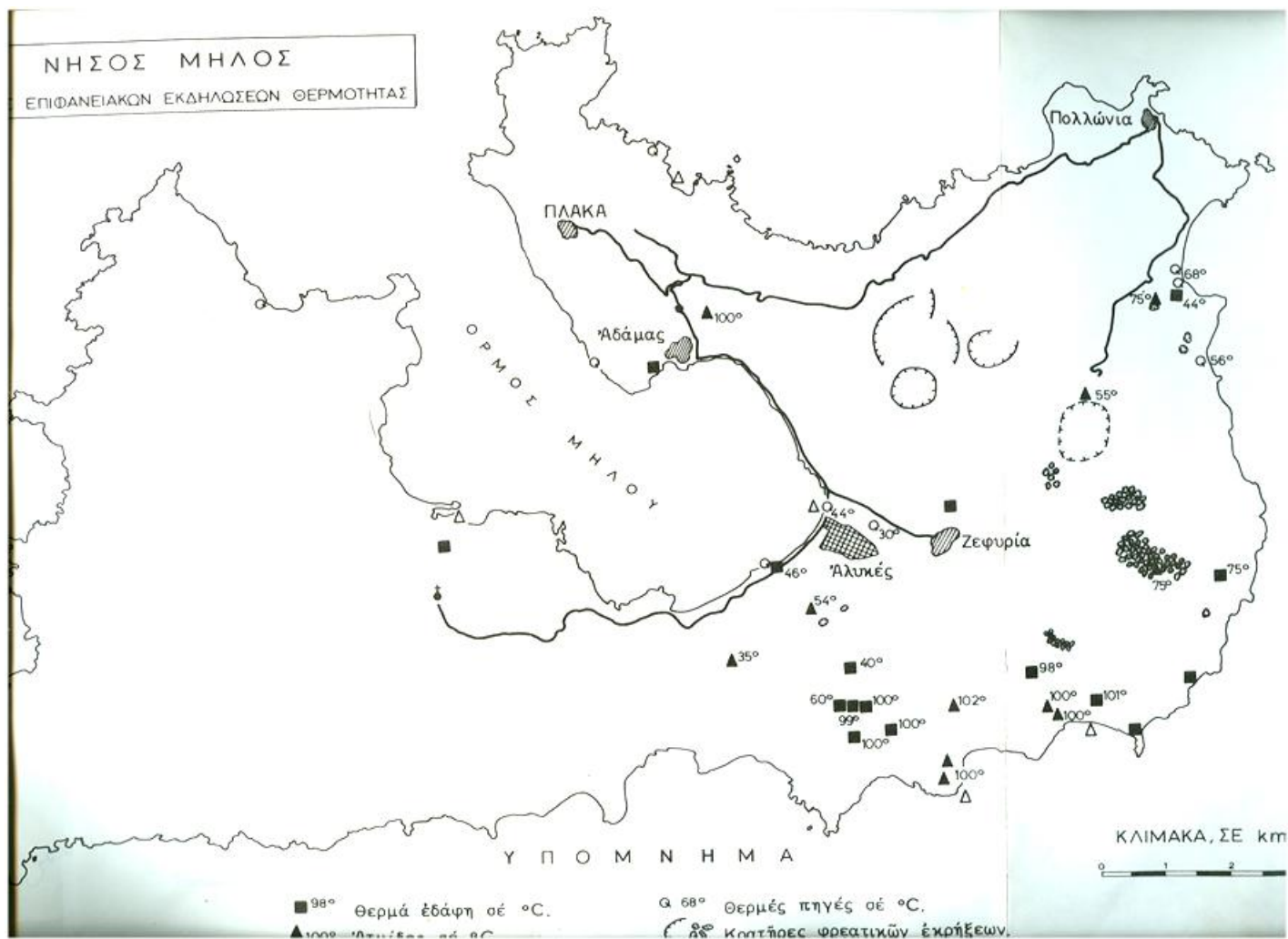
Είναι γνωστό ότι σε περιοχές με πολύ υψηλή θερμική ροή συχνά παρουσιάζεται το εξής φαινόμενο: Ρευστά που θερμάνθηκαν στο υπέδαφος φτάνουν πολλές φορές μέχρι την επιφάνεια κάτω από γεωτεκτονικές, ευνοϊκές γι' αυτό συνθήκες, δημιουργώντας έτσι θερμές πηγές, περιοδικές εκτινάξεις νερού και ατμών, αναθυμιάσεις ατμού αναμεμιγμένου με άλλα αέρια (ατμίδες) κ.λπ. Οι εκδηλώσεις αυτές είναι πολύ σημαντικές, κατά πρώτον στον εντοπισμό περιοχών με πολύ υψηλή θερμική ροή στην αρχική φάση της γεωθερμικής έρευνας και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των εκδηλώσεων, στη λήψη πληροφοριών για τη θερμότητα της περιοχής, για την υπόγεια κυκλοφορία του νερού κ.λπ.

Οι παραπάνω εκδηλώσεις ονομάζονται επιφανειακές θερμικές ανωμαλίες ή επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας. Στην επιφάνεια του εδάφους της Μήλου συναντά κανείς αρκετές εκδηλώσεις αυξημένης θερμοκρασίας. Οι εκδηλώσεις αυτές διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες: ατμίδες, υποθαλάσσιες διαφυγές αερίων, θερμές πηγές και θερμά εδάφη (Φυτίκας, 1977), και παρουσιάζονται στο **Χάρτη 3.3**.

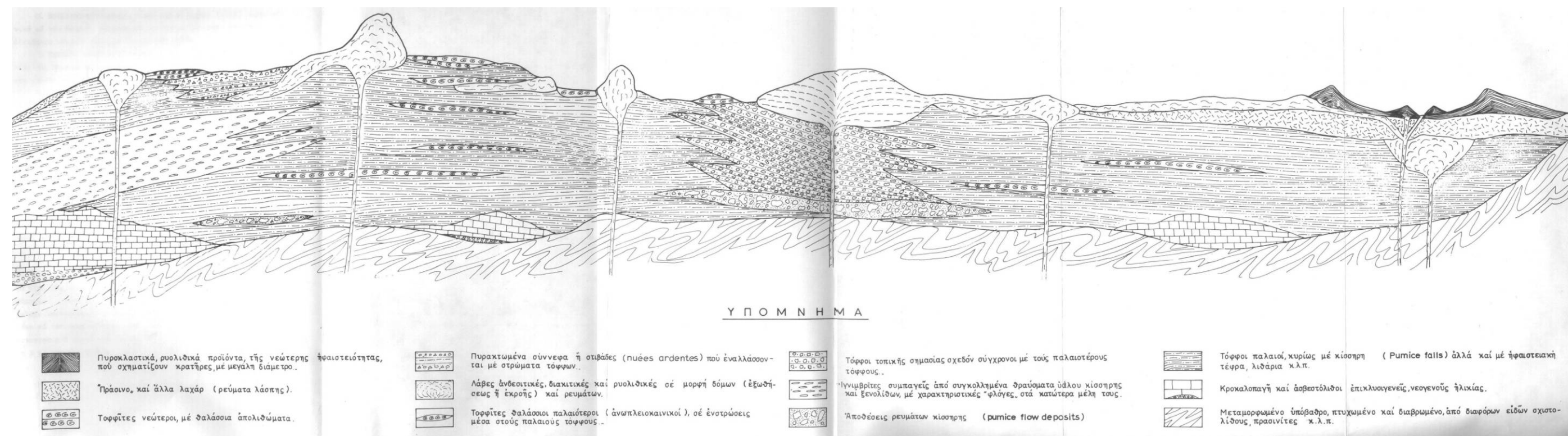
3.3. Στρωματογραφία της Μήλου

Από πλευράς ηλικίας οι παλαιότεροι σχηματισμοί της Μήλου είναι τα μεταμορφωμένα πετρώματα, που αποτελούν το κρυσταλλικό υπόβαθρο του νησιού. Πάνω από το υπόβαθρο αυτό, το οποίο είναι πτυχωμένο και έντονα διαβρωμένο, βρίσκονται επικλυσιογενώς τα

θαλάσσια ιζήματα του Μειόκαινου - Πλειόκαινου. Η σειρά αυτή, που δεν είναι συνεχής σε ολόκληρο το νησί, αρχίζει με ένα κοκκινωπό κροκαλοπαγές και τελειώνει με ασβεστόλιθους. Ακολουθούν τα προϊόντα της ηφαιστειακής δράσης που άρχισε από το Ανώτατο Πλειόκαινο και τελείωσε στο τέλος του Τεταρτογενούς. Τη σειρά κλείνουν, με ασυμφωνία, οι πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις (Φυτίκας, 1977). Γενικότερα, το ανατολικό τμήμα του νησιού παρουσιάζει μορφολογία πιο ήρεμη και σχεδόν πιο ομοιόμορφη σε σχέση με το δυτικό, που παρουσιάζει μεγάλες υψομετρικές διαφορές (Προφ. Ηλίας 752 m). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται γεωλογική - στρωματογραφική τομή της Μήλου (Φυτίκας, 1977) (**Χάρτης 3.4**).



Χάρτης 3.3: Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας (Πηγή: Φυτίκας, 1977)



Χάρτης 3.4: Γεωλογική – Στρωματογραφική τομή της ν. Μήλου (Πηγή: Φυτίκας, 1977)

Πιο αναλυτικά, εντοπίζονται:

α) Κρυσταλλικό υπόβαθρο

Το μεταμορφωμένο υπόβαθρο της Μήλου εμφανίζεται, σε περιορισμένη έκταση και πάχος, κυρίως στις νοτιοανατολικές ακτές του νησιού, όπως π.χ. ανατολικά του όρμου Καλάμου, στο ακρωτήρι Σπαθί και στη θέση Παλιόρεμα. Το συναντούμε στη θέση Κουτσουνοράχη, στην περιοχή που βρίσκεται στα βόρεια της Λαγκάδας, μέσα στη βαθιά κοιλάδα που σχηματίζεται στη θέση Καλάμιος ποταμός, καθώς και στο μικρό νησάκι Πρασονήσι, στο ΝΔ άκρο της Μήλου. Τέλος, μία νέα εμφάνιση του κρυσταλλικού αυτού υπόβαθρου εντοπίστηκε δυτικά της Μουρτοράχης. Λιθολογικά, το υπόβαθρο αποτελείται από όλους τους τύπους των παρα-μεταμορφωμένων πετρωμάτων ανάμεσα στο μάρμαρο και στο μαρμαρυγιάκο σχιστόλιθο. Εναλλάσσονται με αυτά ορθο-μεταμορφωμένοι τύποι και αντιπροσωπεύουν διαβαθμίσεις μεταμόρφωσης των βασικών και υπερβασικών μαγματικών πετρωμάτων. Υπάρχουν επίσης και γαλάζιοι σχιστόλιθοι.

β) Νεογενή ιζήματα

Οι νεογενείς αποθέσεις αποτελούνται από σχηματισμούς κροκαλοπαγών και ασβεστολίθων, οι οποίοι όμως δεν καλύπτουν όλη την έκταση του νησιού. Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούνται από εναλλαγές στρώσεων όσον αφορά το μέγεθος και την πετρογραφική σύσταση. Η προέλευση των κροκαλοπαγών προέρχεται από τη διάβρωση του υποβάθρου κατά το παρελθόν. Επίσης, μεταξύ των κροκαλοπαγών υπάρχουν ενστρώσεις ψαμμιτών, όπως κατά διαστήματα και αργιλικές αποθέσεις. Οι σχηματισμοί των ασβεστόλιθων παρουσιάζουν στρώση και χαρακτηρίζονται σαν λεπτοστρωματώδεις μέχρι μεσοστρωματώδεις. Είναι ελαφρά ως καθόλου μαργαϊκοί και σε σπάνιες περιπτώσεις στιφροί. Θεωρούνται απολιθωματοφόροι από τα ίχνη αποτυπωμάτων που προέρχονται κυρίως από κελύφη μαλακίων, των οποίων ο προσδιορισμός είναι αδύνατος. Είναι έντονα τεκτονισμένοι και η παρουσία ρηγμάτων και κατακλάσεων είναι εμφανής με κύριες διευθύνσεις Α-Δ και Β-Ν, ενώ σπανιότερα παρατηρείται η διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (Τσόκας, 1985).

γ) Αλλουβιακές αποθέσεις

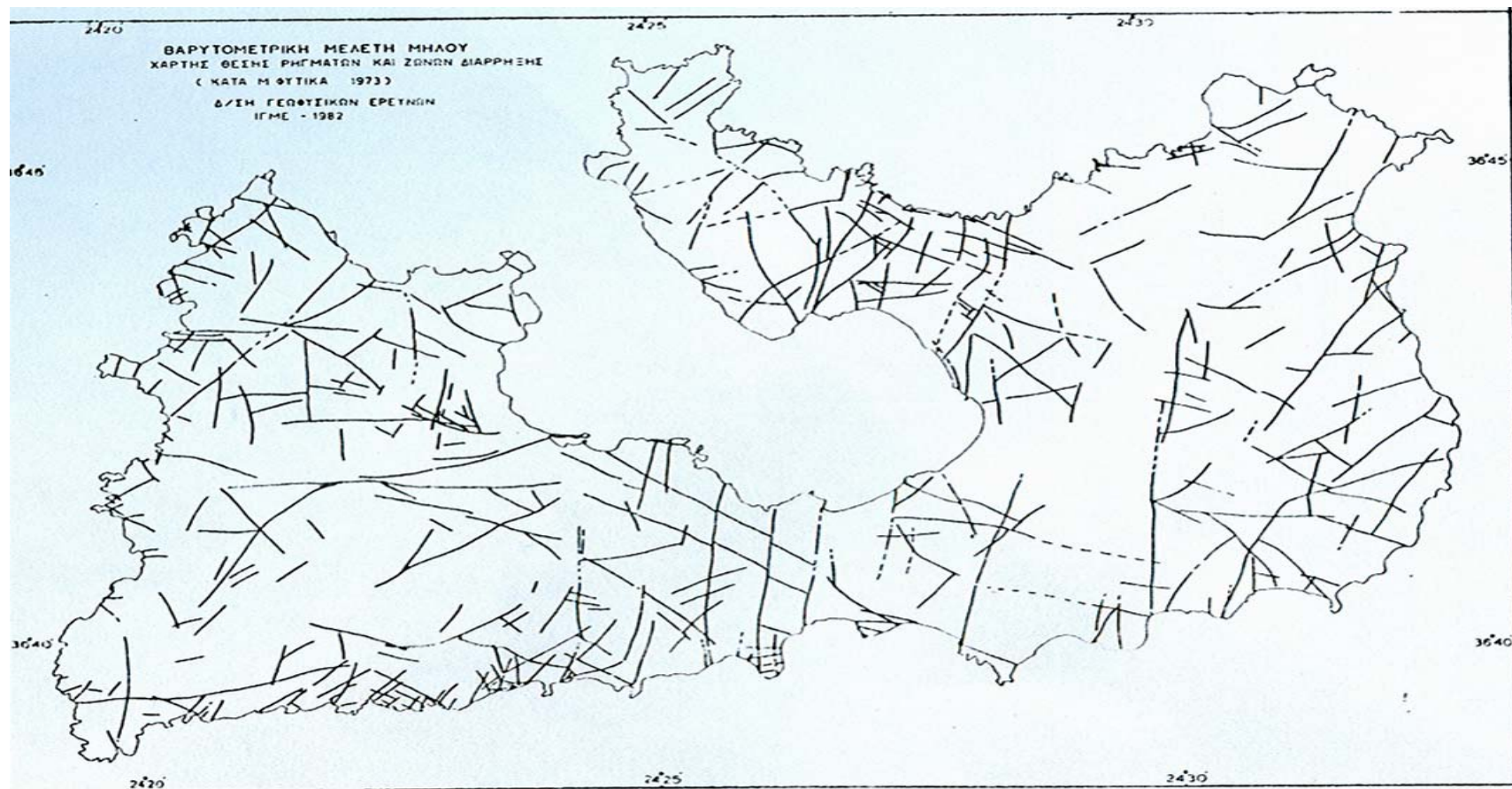
Οι αλλουβιακές αποθέσεις είναι περιορισμένης έκτασης και βρίσκονται κυρίως κοντά στη Ζεφυρία, στον Αδάμαντα και στον Προβατά. Έχουν παντού μικρό πάχος εκτός από τη Ζεφυρία που η βαθιά ερευνητική γεώτρηση ΜΖ1 (Μήλος-Ζεφυρία 1^η), για παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας, απέδειξε ότι εκτείνονται μέχρι βάθους 100 m περίπου. Εκτενής

αναφορά στη γεώτρηση γίνεται στο **Κεφάλαιο 4**. Τα υλικά των αλλουβιακών αποθέσεων προέρχονται γενικά από ηφαιστειακά υλικά και είναι συχνά εξαλλοιωμένα σε αργιλικά προϊόντα (Τσόκας, 1985).

3.4. Τεκτονική

Η άνοδος του μάγματος των ηφαιστειακών τόξων, που δημιουργεί τη θερμική ανωμαλία, οφείλεται σε τεκτονική εφελκυσμού. Από την παρατήρηση της διάταξης των ηφαιστείων αυτών κατά μήκος των νησιωτικών τόξων, διαπιστώνεται ότι αυτή είναι παράλληλη προς την τάφρο και ότι κάθε ένα από τα ηφαιστεια βρίσκεται σε ομάδες, ανάλογα με τα συστήματα διαρρήξεων του τόξου.

Στη Μήλο, όπως φαίνεται και στον **Χάρτη 3.5**, ένα από τα σπουδαιότερα συστήματα ρηγμάτων είναι εκείνο που έχει διεύθυνση Δ.ΒΔ.-Α.ΝΑ. περίπου, το οποίο είναι παράλληλο προς το ηφαιστειακό τόξο και είναι ευδιάκριτο στο νότιο τμήμα του νησιού.



Χάρτης 3.5: Θέσεις και διευθύνσεις ζωνών διάρρηξης στη Μήλο (Τσόκας, 1985)

Μια άλλη τεκτονική διεύθυνση είναι περίπου Α-Δ και φαίνεται στο τεκτονικό κέρασ της Κουτσουνοράχης. Είναι πολύ πιθανό τα συστήματα αυτά των ρηγμάτων να ήταν σχηματισμένα την περίοδο που άρχισε η ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Οι διευθύνσεις Β-Ν και Β20°Α-Ν20°Δ είναι πολύ ευδιάκριτες και πολύ διαδεδομένες πάνω στο νησί. Το σύστημα Β-Ν μάλλον προκάλεσε την άνοδο των μαγμάτων (Φυτίκας 1977) και στη συνέχεια το μεγαλύτερο μέρος της ηφαιστειακής δραστηριότητας, ενώ το σύστημα Β20°Α-Ν20°Δ φαίνεται ότι είναι πολύ νεαρής ηλικίας.

Τα συστήματα αυτά των ρηγμάτων προκάλεσαν τα τεκτονικά βυθίσματα και κέρατα που παρατηρούνται σ' όλη σχεδόν την έκταση του νησιού. Ένα "τέμαχος" του μεταμορφωμένου υποβάθρου ανατολικά-βορειοανατολικά της Ζεφυρίας, που βρίσκεται ψηλότερα από τα άλλα της περιοχής, θεωρείται ότι προήλθε από ένα σύστημα Β60°Α - Ν60°Δ.

Το σύστημα ρηγμάτων με διεύθυνση περίπου Β-Ν σχημάτισε τα δύο τεκτονικά βυθίσματα του νησιού: το μεγαλύτερο, της πεδιάδας της Ζεφυρίας είναι πολύ νεαρής ηλικίας, και τούτο διότι προσέβαλε μόνο το ηφαιστειακό κάλυμμα και όχι το υπόβαθρο που αποτελεί τεκτονική ανύψωση, αλλά και γιατί το πάχος των αλλουβιακών αποθέσεων είναι σχετικά πολύ μικρό. Το μικρότερο βύθισμα σχημάτισε τον ισθμό Προβατά-Αχιβαδολίμνης. Αντίθετα, τα τεκτονικά κέρατα είναι περισσότερο πολυάριθμα και δημιουργήθηκαν από ρήγματα με διάφορες διευθύνσεις, που η πιο φανερή είναι η διεύθυνση Α-Δ (κέρασ Κουτσουνοράχης).

Η εφελκυστική φάση του Τεταρτογενούς και τα ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης ρήγματα έπαιξαν τον πιο ουσιαστικό ρόλο στη νεοτεκτονική εξέλιξη της περιοχής (Σημιαϊάκη, 1985). Η τεκτονική αυτή φάση συνεχίζεται μέχρι και σήμερα, όπως διαπιστώνεται από πολύ πρόσφατες επαναδραστηριοποιήσεις ρηγμάτων. Η γενική διεύθυνση της φάσης αυτής και το είδος των ρηγμάτων της περιοχής μελέτης, βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με το εκτεταμένο σύγχρονο εφελκυστικό πεδίο που επικρατεί στον ευρύτερο χώρο του Αιγαίου.

Από τη στατιστική ανάλυση των γραμμικών τεκτονικών στοιχείων προκύπτει ότι όλες οι σύγχρονες τεκτονικές γραμμές ακολουθούν προϋπάρχουσες παλιότερες γεωλογικές δομές.

Επισημαίνεται, επίσης, ο ρόλος των ΒΑ-ΝΔ ως Α.ΒΑ.-Δ.ΝΔ. ρηγμάτων της περιοχής στη σύγχρονη τεκτονική και στη διευκόλυνση της κυκλοφορίας των θερμών ρευστών.

Το τελευταία αυτά ρήγματα εκδηλώνονται σε συχνότητα και σε μέγεθος πολύ περισσότερο στο ανατολικό τμήμα της Μήλου, στην Κίμωλο και στην Πολύαιγο και ειδικότερα σε περιοχές που τις χαρακτηρίζει έντονη θερμική εξαλλοίωση.

3.5. Ηφαιστειακή δραστηριότητα και ηφαιστειακά προϊόντα

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα στη Μήλο (Φυτίκας, 1977) άρχισε το ανώτερο Πλειόκαινο ή το παλαιότερο Τεταρτογενές. Το μεγαλύτερο μέρος του νησιού αποτελείται από ηφαιστειακά προϊόντα. Τα ηφαιστειακά προϊόντα αποτελούνται από εναλλαγές πυροκλαστικών προϊόντων και τοφφίτων που αποτέθηκαν τα μεν πρώτα σε χερσαίο, τα δε δεύτερα σε θαλάσσιο περιβάλλον. Κατά τον Φυτίκα (1977), το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι ολόκληρο το νησί υπέστη αλληπάλληλες ανυψώσεις και καταβυθίσεις κατά τη διάρκεια του ανώτερου Πλειόκαινου και του Πλειστόκαινου. Σύμφωνα με τον ίδιο ερευνητή, ολόκληρο το νησί έγινε χέρσο μετά την ολοκλήρωση της ηφαιστειακής δραστηριότητας, πριν από 480.000 χρόνια περίπου. Η θεώρηση αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι πολλές τέφρες ηφαιστειακής προέλευσης αποτέθηκαν τότε σε θαλάσσιο περιβάλλον.

Η λεπτομερής χαρτογράφηση του νησιού και η ηφαιστειολογική μελέτη του επέτρεψε την αναπαράσταση της εξέλιξης της ηφαιστειότητας (Φυτίκας 1977):

- Το παλιότερο τμήμα της σειράς αποτελείται από πυροκλαστικά πετρώματα. Αυτά αντιπροσωπεύονται από αποθέσεις ρευμάτων κίσηρης στο βόρειο κυρίως τμήμα του νησιού, από τόφφους χερσαίας απόθεσης και από εναλλαγές απολιθωματοφόρων τοφφικών οριζόντων θαλάσσιας απόθεσης.
- Μετά από μικρό σχετικά διάλειμμα, από δραστηριότητα κατά κύριο λόγο εκχύσεων, δημιουργήθηκαν πολυάριθμοι δόμοι και ρεύματα από λάβες. Πολυάριθμοι δόμοι απαντώνται στο βόρειο και νότιο, κυρίως όμως στο δυτικό τμήμα της Μήλου.

Η σύσταση που έχουν οι λάβες δεν είναι σταθερή και μεταβάλλεται ανάμεσα στην ανδεσιτική και ρυολιτική (**Πίνακας 3.1**), ενώ η δραστηριότητα των δόμων δημιούργησε πολλά λατυποπαγή, λίγα πυροκλαστικά υλικά και προϊόντα από πυρακτωμένα σύννεφα. Επίσης, δημιούργησε περιορισμένα ρεύματα λάσπης που ονομάστηκαν "πράσινο λάχαρ", κατά Φυτίκα (1977), και έχει πάρει μεγάλες διαστάσεις.

Τελικά, ανορθώθηκαν στη Μήλο όξινα κεντρικά ηφαίστεια, τα σπουδαιότερα από τα οποία είναι του Τράχηλα και της Φυριπλάκας. Η δραστηριότητα των ηφαιστειών ήταν κυρίως εκρηκτική και δημιούργησε στρώσεις από τεμάχη λάβας, κίσηρης και τέφρας. Υπάρχουν επίσης τοφφίτες πρόσφατων εποχών.

Πίνακας 3.1: Χημικές αναλύσεις δειγμάτων λάβας της Μήλου (Πηγή: Φυτίκας, 1977)

| Στοιχεία | Δύο (2) δείγμ. ανδεσιτών φτωχών σε SiO_2 | Οκτώ (8) δείγματα ανδεσιτών | Τέσσερα (4) δείγματα δακτιών | Δέκα (10) δείγματα ρυόλιθων |
|-----------|--|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| SiO_2 | 54,90 | 60,54 | 64,85 | 73,48 |
| Al_2O_3 | 17,90 | 16,60 | 15,77 | 13,27 |
| Fe_2O_3 | 3,75 | 3,19 | 2,65 | 0,80 |
| Feo | 3,35 | 2,11 | 1,75 | 0,69 |
| MnO | 0,10 | 0,14 | 0,10 | 0,07 |
| MgO | 4,05 | 3,23 | 2,22 | 0,64 |
| CaO | 9,30 | 6,85 | 5,42 | 1,53 |
| Na_2O_3 | 3,15 | 3,46 | 3,65 | 3,74 |
| K_2O | 1,70 | 2,37 | 1,90 | 3,78 |
| TiO_2 | 0,70 | 0,56 | 0,50 | 0,15 |
| P_2O_5 | 0,07 | 0,14 | 0,07 | 0,02 |
| H_2O^+ | 1,45 | 1,04 | 1,02 | 1,89 |
| H_2O^- | - | - | - | 0,03 |
| Σύνολο | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |

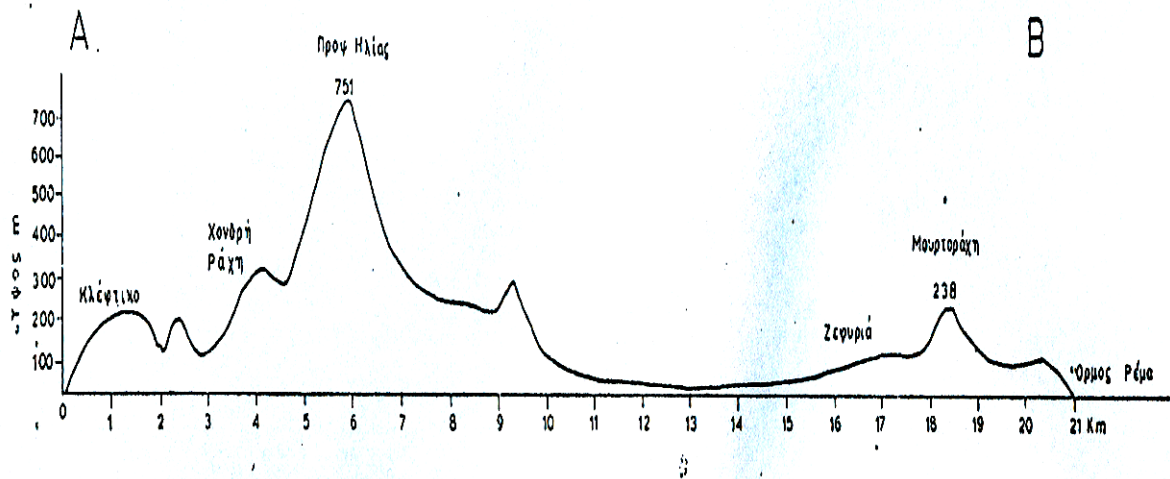
Σύμφωνα με έκθεση του γεωλόγου Γ. Βουγιουκαλάκη (Απρίλιος, 1992), μετά την ηφαιστειακή δραστηριότητα της Φυριπλάκας δεν εκδηλώνεται άλλη ηφαιστειακή έκρηξη στην περιοχή. Αντίθετα, εξαιτίας της ύπαρξης του γεωθερμικού πεδίου υψηλής θερμοκρασίας, εκδηλώνονται μια σειρά από φρεατικές εκρήξεις στην περιοχή της Ανατολικής Μήλου. Η γεωχημική, γεωφυσική και ηφαιστειολογική του έρευνα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχουν μεγάλοι μαγματικοί θάλαμοι στην περιοχή της Μήλου. Πιθανόν να υπάρχουν σε βάθη μεγαλύτερα των 6 km. Έτσι, τα δεδομένα αυτά οδηγούν

στο συμπέρασμα ότι ο ηφαιστειακός κίνδυνος στην περιοχή είναι πολύ χαμηλός όσον αφορά την ηφαιστειακή έκρηξη.

Τέλος, σχετικά με τα σεισμικά δεδομένα της περιοχής, η Μήλος κατατάσσεται, μαζί με το μεγαλύτερο μέρος των Κυκλάδων, στη ζώνη της χαμηλότερης σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας, γιατί παρατηρείται έντονη μικροσεισμική δραστηριότητα με υπόκεντρα σε μια ζώνη βάθους 5-8 km.

3.6. Γεωμορφολογία

Το 86% της έκτασης της Μήλου, που στο σύνολο ανέρχεται σε 151,93 km², είναι υψομετρικά μικρότερο από 200 m. Όμως η μορφολογία του νησιού δεν είναι παντού η ίδια και εξαρτάται από την γεωλογία του. Στο ΝΔ/κό και δυτικό μέρος του νησιού οι μεγάλοι και πολυάριθμοι ηφαιστειακοί δόμοι επέδρασαν στην μορφολογία του. Έτσι, το μέρος αυτό είναι πιο λοφώδες απ' ό,τι το ανατολικό, με υψηλότερο σημείο την κορυφή Προφήτης Ηλίας, με υψόμετρο 751 m που είναι το υψηλότερο του νησιού. Στο ανατολικό τμήμα, η μεγάλη εξάπλωση των χαλαρών και εξαλλοιωμένων πετρωμάτων έδωσε χαμηλό ανάγλυφο. Στο τμήμα αυτό το μεγαλύτερο υψόμετρο είναι 251 m στη Μουρτοράχη, όπως φαίνεται και στην τοπογραφική τομή του **Σχήματος 3.1**.



Σχήμα 3.1: Τοπογραφική τομή του αναγλύφου της Μήλου (Πηγή: Shafiqheh Andseta, 1983)

3.7. Υδρογραφικό δίκτυο

Η υπάρχουσα μορφολογία, καθώς και η τεκτονική δομή, είχαν σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη του παρακάτω περιγραφόμενου υδρογραφικού δικτύου. Η ύπαρξη των δόμων και των ηφαιστειακών κώνων συντελεί στην ανάπτυξη υδρογραφικού δικτύου με ακτινοειδή μορφή. Το δίκτυο αποκλίνει από την κεντρική υπερυψωμένη περιοχή, όπως παρατηρείται στο δυτικό τμήμα του νησιού, στις περιοχές Χονδρό Βουνό και Προφήτης Ηλίας, όπου τα ρέματα (Αγιαννιού, Δασίφνου, Κακοπόταμος, Τούλι, Λεμονιάς και άλλα ενδιάμεσα ρέματα) αποκλίνουν και δημιουργούν κενές περιοχές, δηλαδή περιοχές χωρίς υδρογραφικό δίκτυο. Η ακτινοειδής μορφή του υδρογραφικού δικτύου παρατηρείται στις θέσεις εκείνες του νησιού όπου υπάρχουν δόμοι και λόφοι. Στο ανατολικό τμήμα, επίσης, στη θέση Άγιοι Θεόδωροι, στη Μουρτοράχη, υπάρχει κενή περιοχή, χωρίς ρέματα, λόγω απόκλισης, εξαιτίας του υψηλού αναγλύφου (Shafiqheh Andseta, 1983).

Επίσης, παρατηρείται η παράλληλη μορφή του υδρογραφικού δικτύου που συναντάται στο βόρειο τμήμα του νησιού, στην περιοχή Καμίνια, λόγω της τεκτονικής της περιοχής. Εδώ τα υπάρχοντα ρήγματα είναι παράλληλα και το υδρογραφικό δίκτυο ακολουθεί τη διεύθυνσή τους. Παράλληλη, επίσης ανάπτυξη υδρογραφικού δικτύου παρατηρείται στα δυτικά και νοτιοδυτικά του νησιού, όπου υπάρχουν απότομες κλιθείες των δόμων και των

λόφων. Γενικά, οι κύριοι κλάδοι των διαφόρων δικτύων είναι παράλληλοι μεταξύ τους, καθώς επίσης σε πολλές θέσεις και οι δευτερεύοντες κλάδοι διατάσσονται παράλληλα. Οι δευτερεύοντες κλάδοι σε πολλά σημεία συνδέονται ορθογωνίως με τους κύριους κλάδους.

Στις θέσεις Ζεφυρία, Λειβάδια, Βουνάλια και Λουτρά το υδρογραφικό δίκτυο απουσιάζει εξαιτίας της μεγάλης περατότητας των πετρωμάτων. Τα συναντούμενα στρώματα εδώ είναι αλλούβιες αποθέσεις, πρόσφατοι ηφαιστειακοί σχηματισμοί και ρεύματα λάβας που παρουσιάζουν μεγάλη περατότητα επίσης. Η περιοχή αποστραγγίζεται από πολλά ρέματα διαιρετικού μήκους, τα οποία δημιουργούν πολλές αυτοτελείς λεκάνες απορροής διαφόρων μεγεθών.

Στο δυτικό τμήμα, η κύρια γραμμή του υδροκρίτη (γραμμή διαχωρισμού των υδάτων), λόγω της ύπαρξης πολλών λόφων δεν διακρίνεται σαφώς. Στο νοτιο-δυτικό μέρος η υδροκριτική γραμμή παύει πλέον να είναι μια γραμμή και γίνεται ένα σημείο το οποίο βρίσκεται σε υψόμετρο 751 m, στην κορυφή του Προφήτη Ηλία. Οι μεγαλύτερες λεκάνες του δυτικού τμήματος είναι οι λεκάνες των ρεμάτων Αγιαννιού και Δασίφνου, που πηγάζουν από τον Προφήτη Ηλία.

Στο ανατολικό τμήμα γενικά παρατηρείται μεγαλύτερος αριθμός λεκανών απορροής απ' ό,τι στο δυτικό, με μικρότερο όμως εμβαδόν. Στο ανατολικό και νοτιοανατολικό παράκτιο τμήμα του νησιού υπάρχουν πολλές μικρές αυτοτελείς λεκάνες. Η μεγαλύτερη λεκάνη του ανατολικού τμήματος είναι η λεκάνη της Ζεφυρίας που είναι σύμπλεγμα από λεκάνες πολλών τυφλών υδατορευμάτων. Τα υδατορεύματα αυτά δεν εκβάλλουν στη θάλασσα, διότι αναπτύσσονται σε αλλούβια στρώματα με αυξημένη περατότητα. Στην περιοχή αυτή είναι δύσκολος ο διαχωρισμός μιας σαφούς υδροκριτικής γραμμής. Ο υδροκρίτης της λεκάνης της Ζεφυρίας είναι μια κύρια υδροκριτική γραμμή για όλες τις γειτονικές λεκάνες της κεντρικής περιοχής. Η κύρια υδροκριτική γραμμή στο ανατολικό τμήμα είναι περισσότερο γωνιώδης απ' ό,τι στο δυτικό που είναι ομαλή. Οι οξύληκτες μορφές εξαρτώνται από την τεκτονική της περιοχής, καθώς και από την γεωλογία.

Στο νοτιοανατολικό τμήμα η παρουσία του υποβάθρου στην επιφάνεια και ο έντονος τεκτονισμός διευκολύνει τη δίοδο των υδροθερμικών διαλυμάτων, τα οποία επιφέρουν εξαλλοίωση στα υπάρχοντα πετρώματα, κατά διάφορες διευθύνσεις. Η διαφορετική αυτή

εξαλλοίωση υποδηλώνει διαφορετική ταχύτητα διάβρωσης, με αποτέλεσμα η υδροκριτική γραμμή διαχωρισμού των λεκανών απορροής να είναι πολύπλοκη.

Πάντως, στη Μήλο η επίδραση της τεκτονικής φαίνεται σαφώς στη σημερινή ανάπτυξη της λεκάνης της Ζεφυρίας. Η λεκάνη της Ζεφυρίας ήταν μια κλειστή λεκάνη μεγάλης τάξης, με πολλούς και μεγάλους παραποτάμους που ήταν ενωμένοι με τον κύριο κλάδο που περνούσε βόρεια του οικισμού της Ζεφυρίας και έφτανε στη θάλασσα. Μετά από τα τεκτονικά γεγονότα που συνέβησαν στην περιοχή, το σύστημα ρηγμάτων με διεύθυνση B-N βυθίζει το τμήμα αυτό και αλλάζει τη μορφολογική κλίση ολόκληρης της περιοχής. Έτσι δημιουργείται απόθεση των αλλούβιων και μείωση της μεταφορικής ικανότητας των ρευμάτων. Τα ρεύματα διαχωρίζονται από τον κύριο κλάδο και έτσι δημιουργούνται τυφλά ρεύματα. Επίσης, στις περιοχές με έντονο ανάγλυφο τα ρεύματα έχουν μεγαλύτερη διαβρωτική ικανότητα απ' ό,τι στις περιοχές με μικρή κλίση, όπως είναι η πεδιάδα της Ζεφυρίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ ΣΤΗ ΜΗΛΟ

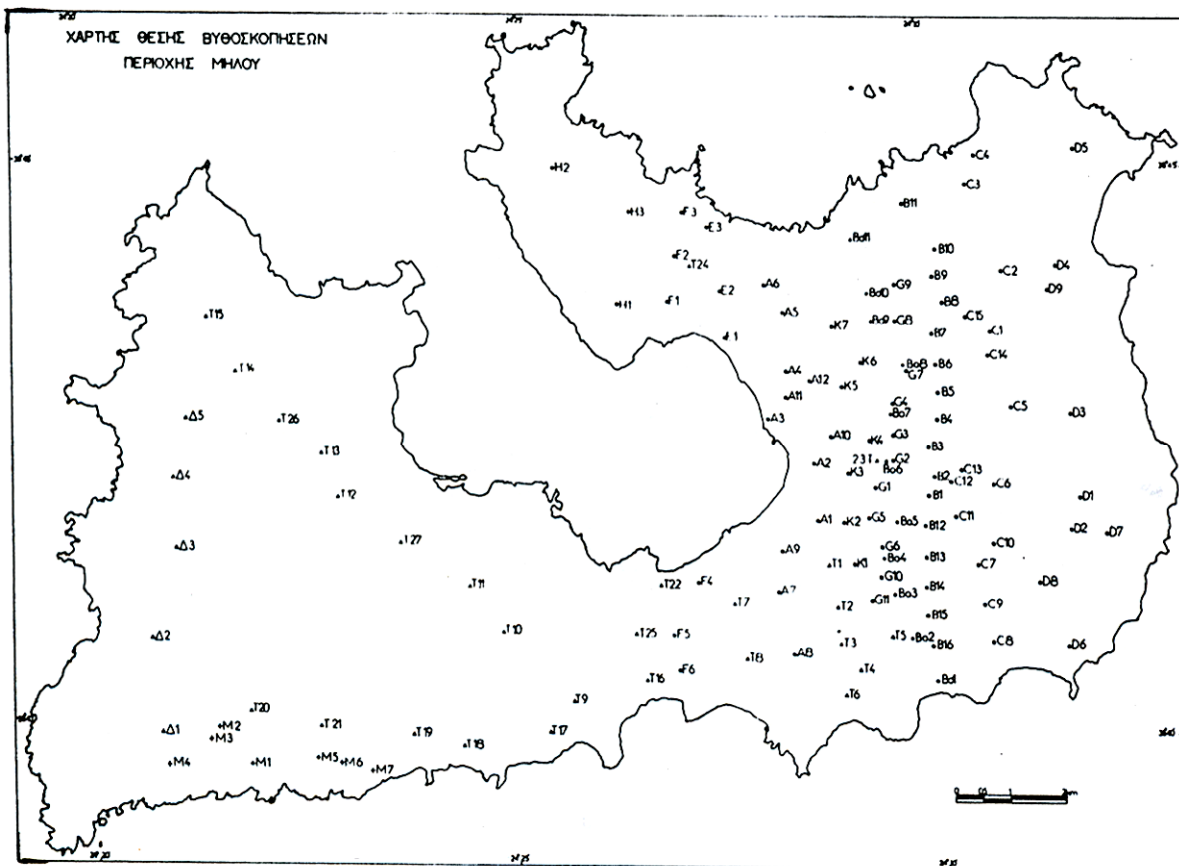
4.1. Γεωφυσική έρευνα

Ο στόχος γενικά των γεωφυσικών μεθόδων έρευνας επιφανείας (επίγειες ή υπέργειες) στη γεωθερμία, είναι ο προσδιορισμός της γεωλογικής δομής της περιοχής και ο εντοπισμός των γεωλογικών σχηματισμών εντός των οποίων κυκλοφορούν γεωθερμικά ρευστά. Πρόκειται για μεθόδους υποστηρικτικές της γεωλογίας. Δεν σχετίζονται άμεσα με τις ιδιότητες των ρευστών, αλλά μας πληροφορούν για τη φύση των πετρωμάτων που περιέχουν αυτά. Οι πιο συνήθεις μέθοδοι γεωφυσικής έρευνας επιφανείας που εφαρμόζονται στη γεωθερμία είναι: η μέθοδος των γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων, η βαρυτομετρική μέθοδος, η σεισμική μέθοδος, η μαγνητική μέθοδος και η μαγνητοτελλουρική μέθοδος.

Ένα στοιχείο μεγάλης σημασίας για τα γεωθερμικά πεδία είναι η διαπίστωση του πάχους του στεγανού καλύμματος. Για την περίπτωση της Μήλου, εκτός από τα στοιχεία που συλλέχθηκαν για τη γεωλογία και τη στρωματογραφία του νησιού, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που αποκτήθηκαν από τους κρατήρες των φρεατικών εκρήξεων (Φυτίκας 1977). Γι' αυτό το λόγο θεωρήθηκε αναγκαία η γεωφυσική έρευνα για τον προσδιορισμό του πάχους του καλύμματος. Η χρησιμοποίηση της μεθόδου της ηλεκτρικής αντίστασης πέραν της παροχής πολύτιμων πληροφοριών για το πάχος του καλύμματος, δίνει συνήθως και σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την προέκταση της επιφανειακής τεκτονικής συναρτήσεως του βάθους.

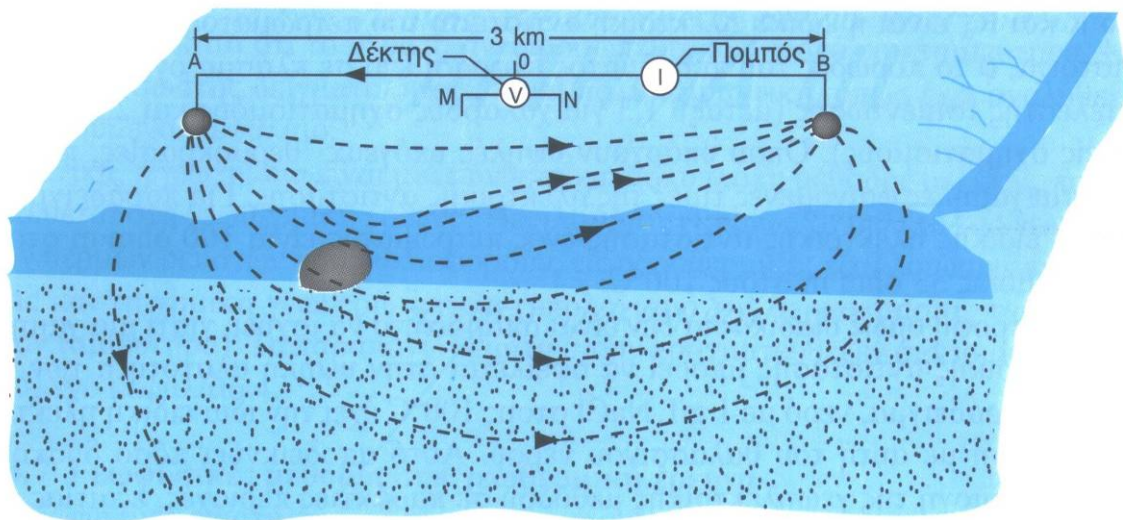
4.1.1. Γεωηλεκτρικές έρευνες

Οι γεωηλεκτρικές έρευνες στη Μήλο πραγματοποιήθηκαν σε τρεις φάσεις: Στην προκαταρκτική φάση (Βουτετάκης, 1973) διερευνήθηκαν οι ηλεκτρικές αντιστάσεις κατά μήκος τομής με διεύθυνση Β-Ν περίπου, σε 11 σημεία, για να διαπιστωθεί εάν είναι ουσιαστικά εφαρμόσιμη η μέθοδος αυτή στη Μήλο. Η δεύτερη φάση, που ήταν και το σπουδαιότερο μέρος των γεωφυσικών ερευνών, έγινε από κλιμάκιο της Γαλλικής Εταιρίας C.G.G. (Compagnie Generale de Geophysique), που το αποτελούσαν οι LE HANAFF και LEVY με την καθοδήγηση του γεωφυσικού A.Duprat (C.G.G., 1973). Έγιναν με σύγχρονο τεχνικό εξοπλισμό 83 ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις, από τις οποίες 14 σε απόσταση 2000 m μεταξύ τους και οι 69 σε απόσταση 3000 m. Τέλος, κατά την τρίτη φάση έγιναν 27 ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις από το ΙΓΜΕ το 1982 και 1984 (Θανάσουλας 1983, Θανάσουλας και Τσόκας 1985). Οι εργασίες κάλυψαν πυκνότερα το ανατολικό τμήμα της νήσου, όπως παρουσιάζονται και στο **Χάρτη 4.1.**, που είναι και η πλέον ενδιαφέρουσα γεωθερμική περιοχή.



Χάρτης 4.1: Χάρτης θέσεων όπου πραγματοποιήθηκαν οι ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις στη Μήλο
(Πηγή: Τσόκας, 1985)

Η γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση πραγματοποιείται με την διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος στη γη με τη βοήθεια δύο ηλεκτροδίων (ηλεκτρόδια ρεύματος) και τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού σε δύο άλλα ηλεκτρόδια (ηλεκτρόδια δυναμικού), όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 4.1**. Ο στόχος των ερευνών ήταν ο προσδιορισμός του βάθους του μη ηφαιστειακού υπόβαθρου, ο εντοπισμός και η κλίση των κύριων ρηγμάτων του και η μέτρηση των αντιστάσεων των υπερκειμένων εξαλλοιωμένων, νεότερων ηφαιστειακών σχηματισμών. Θα πρέπει, λογικά, να υπάρχει έντονη διαφορά ανάμεσα στις τιμές των ηλεκτρικών αντιστάσεων του ηφαιστειο-ιζηματογενούς καλύμματος που είναι αγωγίμο και στα στρώματα του μεταμορφωμένου υπόβαθρου ή των νεογενών ασβεστολίθων που έχουν μικρή αγωγιμότητα (Φυτίκας, 1977).



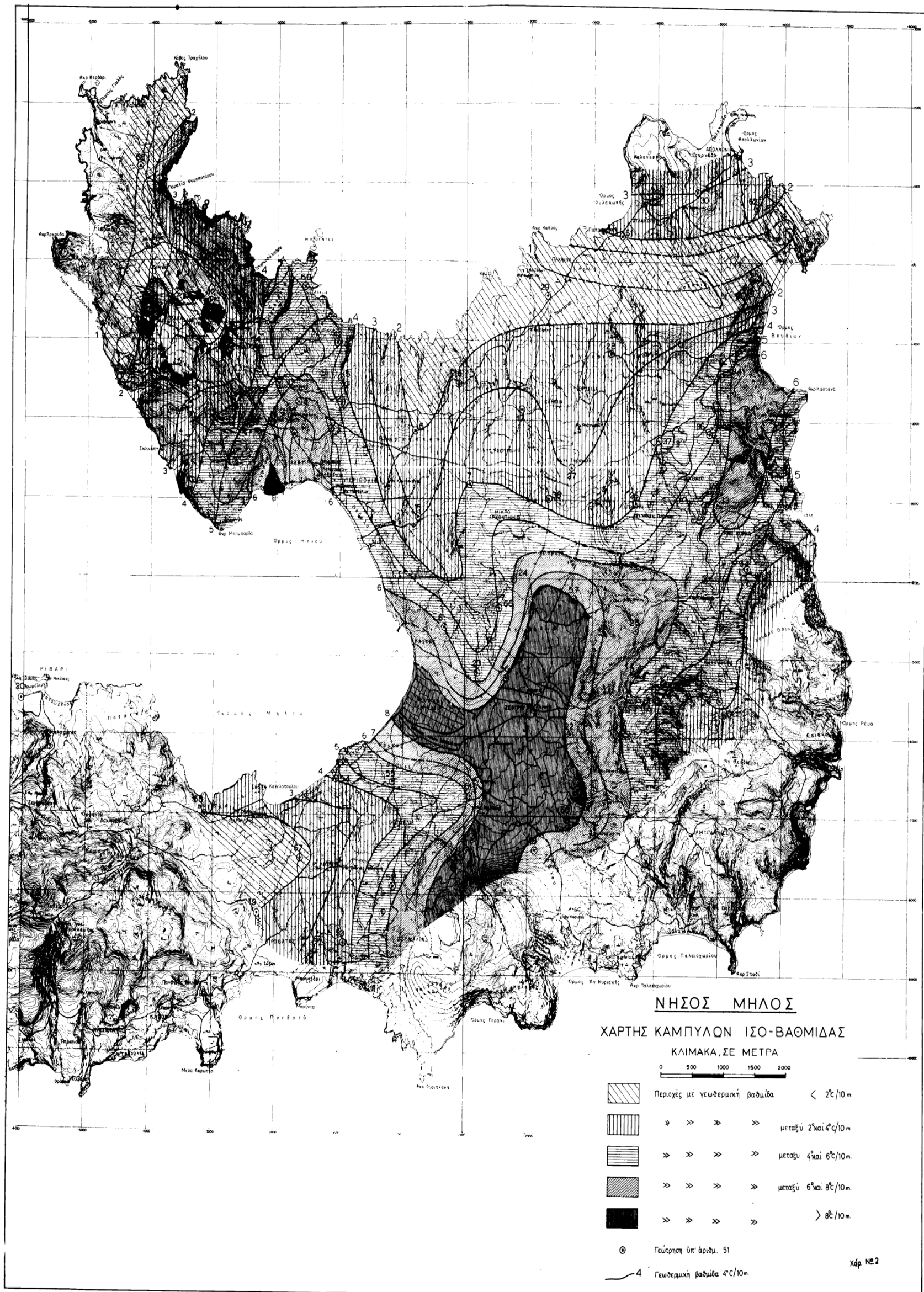
Σχήμα 4.1: Σχηματική παράσταση της γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης. Το ηλεκτρικό ρεύμα διοχετεύεται στο έδαφος μέσω των ηλεκτροδίων A και B. Η μέτρηση της διαφοράς δυναμικού γίνεται μεταξύ των ηλεκτροδίων M και N (Barbier, 1997) (Πηγή: Φυτίκας – Ανδρίτσος, 2004)

Οι μετρήσεις δίνουν γενικά για το κάλυμμα μικρές και μερικές φορές ελάχιστες τιμές αντιστάσεων (μέχρι $0,6 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$). Αυτό συμβαίνει επειδή το κάλυμμα περιέχει αυξημένη ποσότητα νερού και ακόμη γιατί το νερό αυτό είναι θερμό. Οι αντιστάσεις για το υπόβαθρο φτάνουν τα $40 - 50 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$. Το υπόβαθρο μπορεί να είναι κρυσταλλικό, ασβεστολιθικό - κροκαλοπαγές ή ακόμη (θεωρητικά) ηφαιστειακό, όχι εξαλλοιωμένο. Οι πολύ χαμηλές αντιστάσεις, που μετρήθηκαν στη Μήλο, οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στην υψηλή θερμοκρασία, αλλά και στη σημαντική αργιλική σύσταση των ιζημάτων αυτών και σε μικρότερο βαθμό στην αλμυρότητα των υδροφόρων συστημάτων που αναπτύχθηκαν

μέσα στα παραπάνω ιζήματα. Η άποψη αυτή ενισχύεται και από το γεγονός ότι το νερό που εξήλθε μαζί με τον ατμό από γεώτρηση που έγινε σε μικρό βάθος, ήταν πραγματικά αλμυρό. Όμως η περιεκτικότητα του σε άλατα ήταν κατώτερη από εκείνη του θαλασσινού νερού.

Από τον Χάρτη των φαινομένων αντιστάσεων της περιοχής που ερευνήθηκε (**Χάρτης 4.2**) προκύπτει ότι υπάρχουν δυο ζώνες με πάρα πολύ χαμηλές αντιστάσεις καλύμματος: στην πεδιάδα Ζεφυρίας και στην περιοχή κοντά στη γεώτρηση Γ1. Οι ζώνες αυτές συμπίπτουν με τις ζώνες της μεγαλύτερης γεωθερμικής βαθμίδας (**Χάρτης 4.3**) γεγονός που καλύπτεται πολύ ικανοποιητικά από τις παραπάνω θεωρίες, ότι δηλαδή οι χαμηλές αντιστάσεις συνδέονται περισσότερο με τις υψηλές θερμοκρασίες των ρευστών που καλύπτουν τα διάκενα των σχηματισμών, παρά με την αυξημένη αλμυρότητα των ρευστών αυτών.

Διακρίθηκαν σαφώς δυο περιοχές με υψηλές αντιστάσεις του υποβάθρου: μία στο κεντρικό τμήμα και μία κοντά στον Αδάμαντα. Η πρώτη βρίσκεται βορειοανατολικά της Ζεφυρίας και περιλαμβάνει την επιφανειακή εμφάνιση των σχιστόλιθων και των νεογενών ασβεστόλιθων της περιοχής. Η οροφή του υπόβαθρου βρίσκεται σε βάθος 150 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Η δεύτερη βρίσκεται στην περιοχή της Ζεφυρίας, αλλά σε βάθος 250 m. Τέλος, το σημείο της υψηλής αντίστασης στην περιοχή του Αδάμαντα βρίσκεται σε βάθος 500 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Και οι τρεις παραπάνω περιοχές έχουν διευθύνσεις περίπου Β-Ν και δημιουργήθηκαν από το ίδιο σύστημα ρηγμάτων που επέτρεψε και την έξοδο του μάγματος.



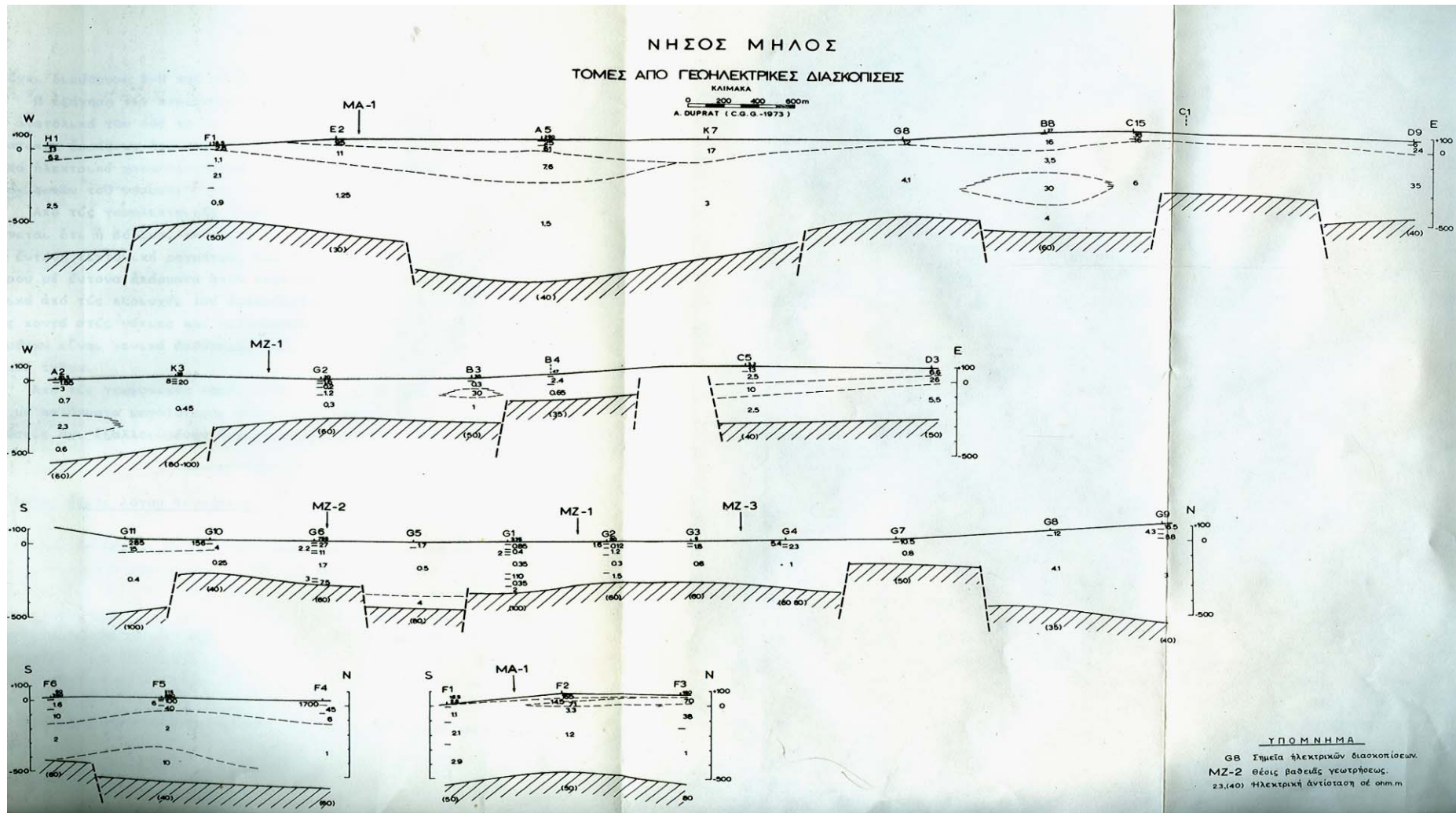
Χάρτης 4.3: Χάρτης καμπυλών της γεωθερμικής βαθμίδας (Πηγή: Φυτίκας, 1977)

Από τη μελέτη των ηλεκτρικών ασυνεχειών διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν δυο κύρια συστήματα ρηγμάτων: το πρώτο έχει διεύθυνση B-N και το δεύτερο περίπου A.BA.-Δ.ΝΔ.

Η ερμηνεία των στοιχείων από τις περιοχές που βρίσκονται νότια και ανατολικά των δύο προαναφερόμενων περιοχών υψηλών αντιστάσεων είναι δύσκολη, ίσως γιατί οι φρεατικές εκρήξεις αναστάτωσαν τη στρωματογραφική σειρά και γι' αυτό τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά εδώ είναι διαφορετικά από αυτά των άλλων ζωνών του νησιού.

Από τις γεωηλεκτρικές τομές, που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.2**, με διεύθυνση B-N και A-Δ (Φυτίκας, 1977) φαίνεται ότι η βόρεια, κεντρική και ανατολική Μήλος χαρακτηρίζονται από έντονη τεκτονική, που δημιούργησε κλιμακωτή δομή υπόβαθρου στην περιοχή βόρεια της Ζεφυρίας, εκτός φυσικά από τις περιοχές που εμφανίζεται το υπόβαθρο στην επιφάνεια, όπως κοντά στις νότιες και νοτιανατολικές ακτές. Οι βαθμίδες των κλιμάκων είναι γενικά βαθύτερες προς τη θάλασσα και ιδιαίτερα στο βόρειο τμήμα. Από τις γεωφυσικές τομές είναι δυνατό να διακρίνει κανείς ζώνες με καλύμματα μεγαλύτερης αντίστασης, που αντιστοιχούν ίσως σε στρώσεις μη εξαλλοιωμένων ηφαιστειακών πυροκλαστικών τόφφων.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις επαληθεύονται και από τη διδακτορική διατριβή του Ν. Τσόκα το 1985. Τότε ελέγχθηκε με μεθόδους H/Y η γεωηλεκτρική στρωματογραφία που προέκυψε από τις εργασίες των παραπάνω ερευνητών. Γενικά, παρατηρήθηκε καλή συμφωνία. Η συμφωνία αυτή αφορά τη γεωηλεκτρική στρωματογραφία, δηλαδή το βάθος ταφής και τις ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις των σχηματισμών. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις διαφωνιών που αφορούν κυρίως τη γεωλογική ερμηνεία των γεωηλεκτρικών καμπυλών, όταν τα γεωηλεκτρικά αποτελέσματα έχουν επηρεαστεί από τη διείσδυση του θαλασσινού νερού. Η διαφωνία σχετίζεται κυρίως με μερικές από τις βυθοσκοπήσεις που πραγματοποίησε το 1972 συνεργείο της εταιρείας C.G.G. (Duprat, 1973).



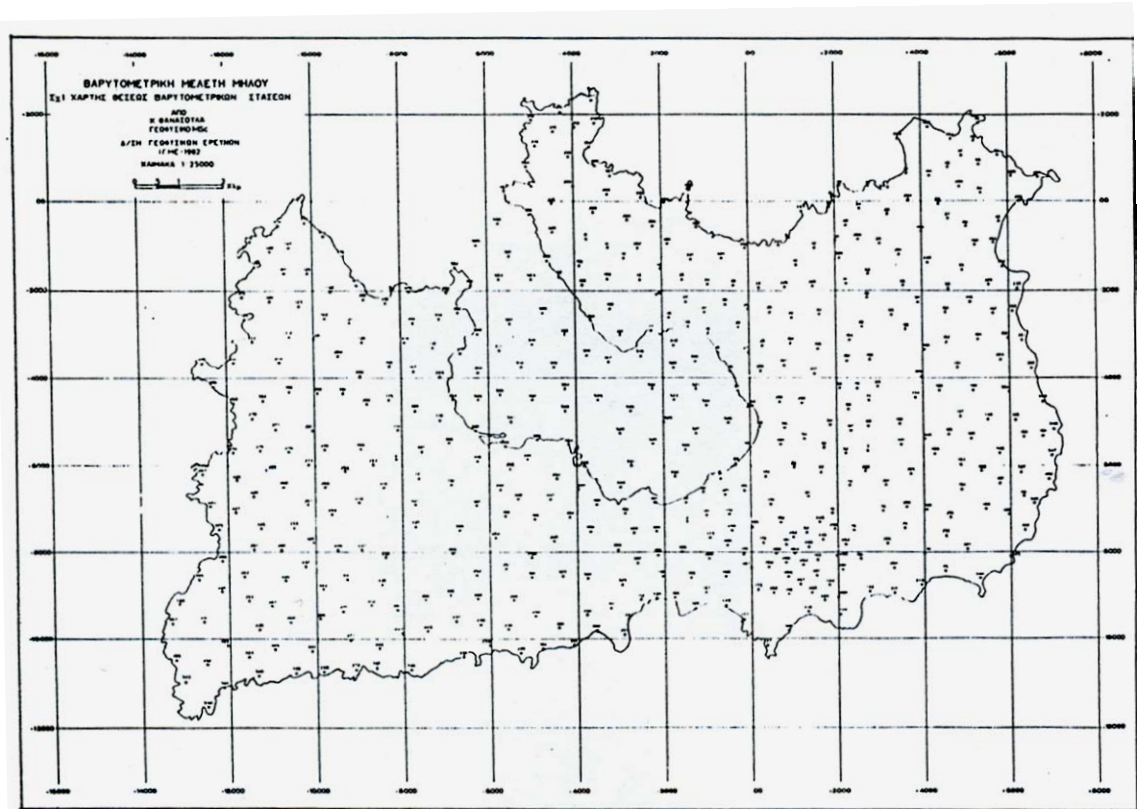
Σχήμα 4.2: Τομές από ηλεκτρικές διασκοπήσεις στο νησί της Μήλου (Πηγή: Φυτίκας, 1977)

4.1.2. Βαρυτομετρική έρευνα

Όσον αφορά τη γεωφυσικά έρευνα του νησιού με τη χρήση της **βαρυτομετρικής μεθόδου**, η πλήρης μελέτη σε κλίμακα που να ανταποκρίνεται στην τεκτονική του, έγινε με σκοπό την έρευνα του γεωθερμικού πεδίου. Το έργο αυτό ανατέθηκε από την Δ.Ε.Η στο Ι.Γ.Μ.Ε. και κατά τη διάρκεια της έρευνας (1982) πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε συνολικά 466 σημεία, ισοκατανεμημένα στην επιφάνεια του νησιού, με μέση απόσταση μεταξύ τους 700 m (**Σχήμα 4.3**).

Η *βαρυτομετρία (gravity method)* μελετά τις μεταβολές του πεδίου βαρύτητας της γης, με μετρήσεις της έντασης του πεδίου (επιτάχυνση της βαρύτητας) σε ένα συγκεκριμένο χώρο. Με τη βαρυτομετρική μέθοδο είναι δυνατή η λήψη δεδομένων για τον εντοπισμό των διαφόρων τεκτονικών δομών που παρουσιάζονται στην περιοχή που ερευνάται, καθώς και για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών τους. Το πρωταρχικό στάδιο της διαδικασίας λήψης και επεξεργασίας των μετρήσεων είναι η τοποθέτηση ενός δικτύου βαρυτομετρικών σταθμών, όπου είναι γνωστή η απόλυτη τιμή της έντασης του πεδίου βαρύτητας, καθώς και η τοποθέτηση ενός δικτύου άλλων σταθμών, όπου γίνεται η μέτρηση της τιμής της έντασης του πεδίου.

Σαν ανωμαλία Bouguer, σε κάθε σημείο μέτρησης του βαρυτικού πεδίου, ορίζεται η τιμή εκείνη του πεδίου που προκύπτει από την αναγωγή του σημείου σε κοινό με τα άλλα σημεία μέτρησης επίπεδο παρατήρησης, αφού εισαχθεί διορθωτικός παράγοντας για το τοπογραφικό ανάγλυφο κοντά στο σημείο παρατήρησης. Οι τοπογραφικές διορθώσεις εισάγονται για να εξαλειφθεί το ανώμαλο βαρυτικό αποτέλεσμα του αναγλύφου κοντά σε κάθε σημείο μέτρησης της έντασης του πεδίου.



Σχήμα 4.3: Χάρτης θέσεων βαρυτομετρικών σημείων μέτρησης στη Μήλο
(Θανάσουλας, 1983)

Οι σπουδαιότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις που λαμβάνονται με την βαρυτομετρική μέθοδο είναι το γεωγραφικό πλάτος, το υψόμετρο, η μάζα των πετρωμάτων μεταξύ δύο σημείων (αποτέλεσμα Bouguer), η τοπογραφία της περιοχής και οι γήινες παλίρροιες.

Αφού εισαχθούν και επεξεργαστούν κατάλληλα όλα τα στοιχεία των μετρήσεων, ακολουθεί η ερμηνεία της βαρυτομετρικής ανωμαλίας. Συντάσσεται χάρτης βαρυτομετρικών ανωμαλιών μικρής κλίμακας και γίνεται γεωφυσική ερμηνεία στο χάρτη, δηλαδή καθορίζονται οι διαστάσεις, η πυκνότητα και το βάθος του σώματος στο οποίο οφείλεται η κατανομή των βαρυτομετρικών ανωμαλιών.

Στο **Σχήμα 4.4** που ακολουθεί παρουσιάζεται χάρτης της ανωμαλίας Bouguer της Μήλου, όπου φαίνεται το βύθισμα στο κεντρικό τμήμα του νησιού και του κόλπου, τα δύο εξάρματα του υποβάθρου και η κύρια τεκτονική γραμμή διεύθυνση Β-Ν που διέρχεται από το γεωθερμικό πεδίο (Φυτίκας-Ανδρίτσος, 2004).

4.1.3. Ηλεκτρομαγνητική (MT¹ και CSAMT²) μελέτη

Το γεωθερμικό πεδίο της Μήλου υπήρξε αντικείμενο μείζονος πολυεθνικού ερευνητικού προγράμματος της ΕΟΚ (1986), το μεγαλύτερο μέρος του οποίου κατελάμβαναν οι ΗΜ διασκοπήσεις φυσικού πεδίου. Οι ΜΤ μελέτες διενεργήθηκαν από τα Πανεπιστήμια του Εδιμβούργου (Σκωτία), Βερολίνου και Ορλεάνης. Επίσης, από το πανεπιστήμιο του Braunschweig διενήργησε μία διασκόπηση CSAMT. Η ποσοτική ανάλυση των μετρήσεων διακρίνει μία γεωηλεκτρική ασυνέχεια σε βάθος αντίστοιχο με το πιστοποιημένο βάθος της επιφάνειας του γεωθερμικού ταμιευτήρα, η οποία παρατηρείται σε όλες τις βυθοσκοπήσεις και αποκαλείται από τους Hutton et al (1989) "ασυνέχεια-R". Είναι προφανές ότι η ασυνέχεια-R συμπίπτει με την περιοχή των μεγίστων θερμοκρασιακών ανωμαλιών. Η μέγιστη αγωγιμότητα παρουσιάζεται εντός του ταφροειδούς βυθίσματος της Ζεφυρίας, το οποίο αντιπροσωπεύει την κυριότερη περιοχή γεωθερμικού ενδιαφέροντος, ενώ το μέγιστο βάθος στο οποίο ανιχνεύεται η ασυνέχεια-R μάλλον συσχετίζεται με τα ενεργά ρήγματα, εντός των οποίων κυκλοφορούν τα γεωθερμικά ρευστά.

4.1.4. Σεισμολογική μελέτη

Η σεισμολογική μελέτη της Μήλου διεξήχθη, σαν μέρος του πολυεθνικού προγράμματος της ΕΟΚ, κατά το 1986 και 1987, από το BRGM (το αντίστοιχο ΙΓΜΕ της Γαλλίας), το Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) και το RWTH Aachen.

Το πείραμα του IPGP διήρκεσε πέντε συνολικώς μήνες. Το 1986 εγκαταστάθηκαν 16 σειсмоγράφοι για διάστημα δύο μηνών. Λόγω της χαμηλής και ασθενούς σεισμικής δραστηριότητας, το πείραμα επαναλήφθηκε το 1987 με 30 σειсмоγράφους. Ανεγράφησαν σχετικώς λίγα σεισμικά συμβάντα, με μορφή ακολουθιών σημοσειμών. Οι Hirn et al (1989) εκτιμούν ότι οι αυτοί σημοσειμοί έχουν μη τεκτονική προέλευση και πιθανώς προέρχονται από την λανθάνουσα μαγματική δραστηριότητα της Μήλου (Drakopoulos

¹ MT: Magneto Telluric method – μαγνητοτελλουρική μέθοδος.

² CSAMT: Controlled Source Audio-Magneto Tellourics – Ακουστο-ΜαγνητοΤελλουρικά Ελεγχόμενης Πηγής. ΜαγνητοΤελλουρική μέθοδος που λειτουργεί σε ακουστικές συχνότητες (μερικές δεκάδες Hz ως μερικά kHz), και στην οποία το πρωτεύον πεδίο δεν είναι φυσικό αλλά τεχνητό, παραγόμενο από μακράν κείμενη κατακόρυφη διπολική κεραία.

and Delibasis, 1973). Τα αναγραφόμενα σεισμικά κύματα S παρουσιάζουν στοιχεία ανισοτροπίας ταχυτήτων, η οποία εν μέρει μόνο αποδίδεται σε ανισοτροπία των πετρωμάτων του γεωθερμικού πεδίου. Η εντυπωσιακότερη συμβολή της σεισμολογικής έρευνας, έγκειται στην μελέτη της ετερογένειας ταχυτήτων του υπεδάφους της Μήλου (μεταβολής των ταχυτήτων συναρτήσει του μέσου διάδοσης), μέσω της οποίας κατορθώνουν να αποτυπώσουν με επαρκή λεπτομέρεια την οριζόντιο και κατακόρυφο έκταση του γεωθερμικού πεδίου.

Η μεγάλη διαφορά είναι ότι ενώ τα MT αποτελέσματα ήταν παραδοτέα σύντομα μετά την λήξη των εργασιών υπαίθρου, ενώ τα αντίστοιχα σεισμολογικά αποτελέσματα απαιτήσαν διετή κύκλο εργασιών υπαίθρου με επιπλέον εργαστηριακές αναλύσεις και φυσικά με το αντίστοιχο κόστος. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των σεισμολογικών μεθόδων είναι η εξάρτησή τους από την μικροσεισμική δραστηριότητα, την οποία αν δεν βρεθεί αμέσως, θα πρέπει να αναμένεται, με την έγκαιρη εμφάνισή της να εξαρτάται από καθαρή τύχη.

Το RWTH Aachen λειτούργησε το δίκτυό του ταυτοχρόνως με το IPGP κατά το 1986 και κατέγραψε ελαχίστους, μικρού μεγέθους σεισμούς. Κατά το 1987 όμως λειτούργησε το σειсмоγραφικό του δίκτυο για διάστημα δύο μηνών, σε χρόνο διαφορετικό από του IPGP και στάθηκε τυχερότερο.

Το μεγαλύτερο μέρος της σεισμικής δραστηριότητας εντοπίζεται στον κόλπο της Μήλου. Η προέλευση σεισμών παραμένει υπό μελέτη, διότι οι Ochmann et al (1989) εκτιμούν ότι αυτοί είναι τεκτονικοί, σε αντίθεση με τις διαπιστώσεις των Hirn et al (1989). Η διάσταση μεταξύ των εκτιμήσεων των δύο ερευνητικών ομάδων δεν έχει εξηγηθεί, αλλά δεν αποκλείεται να είναι αμφότερες σωστές, διδομένων των διαφορετικών χρόνων λειτουργίας των σεισμολογικών δικτύων κατά το 1987 και των επιπέδων σεισμικής δραστηριότητας. Είναι πολύ πιθανόν να συνέπεσε το RWTH με κάποια περίοδο έξαρσης της τεκτονικής μικροσεισμικής δραστηριότητας, δεδομένου επίσης ότι οι σεισμοί που προέρχονται από την περιοχή του κόλπου είναι κατά πολύ βαθύτεροι, από αυτούς που προέρχονται από την περιοχή της Ζεφυρίας.

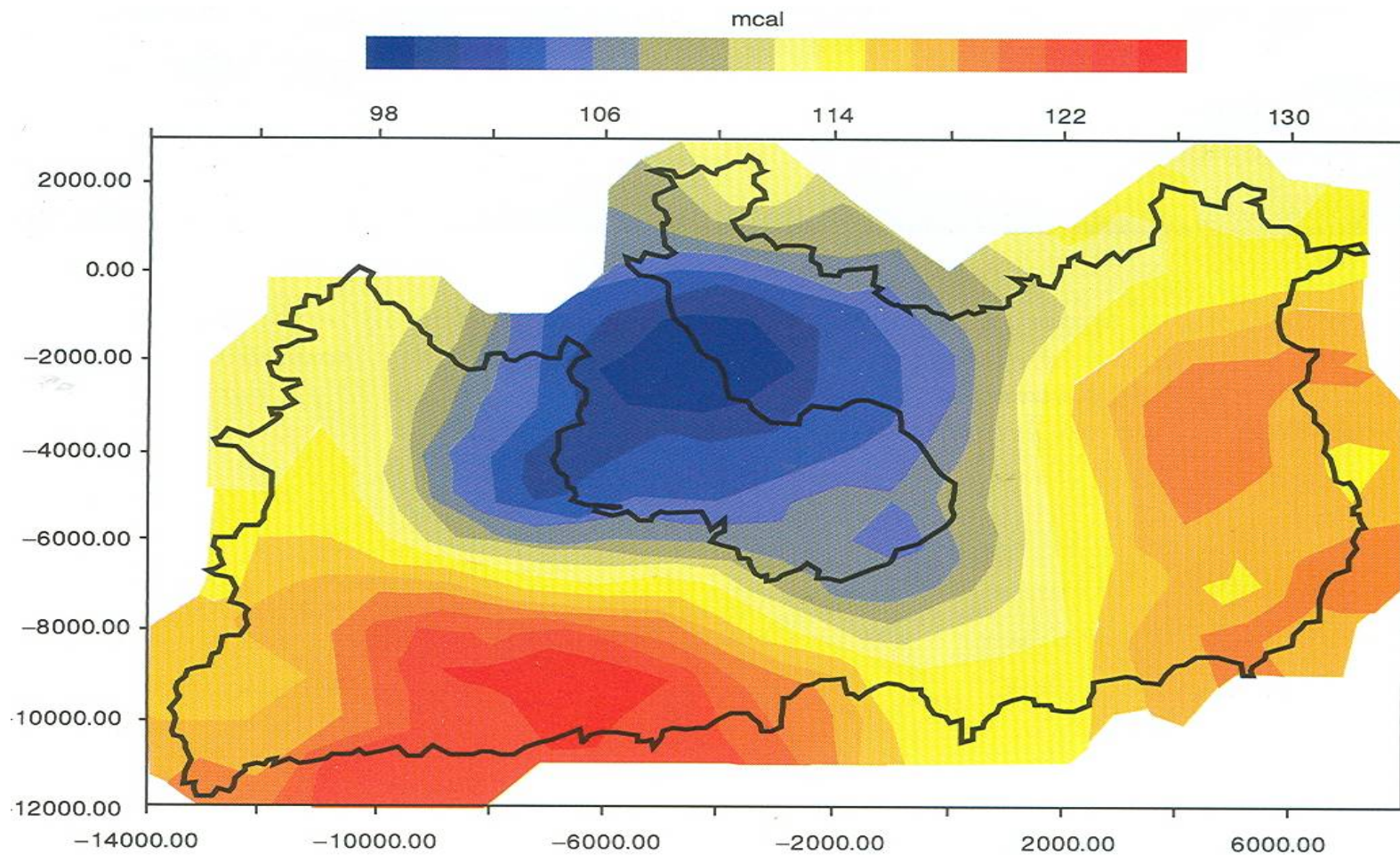
Είναι προφανές ότι τα επίπεδα διαρρήξεως έχουν μία μέση διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, γεγονός που επιβεβαιώνει μία τέτοια διευθέτηση των πραγματικών ενεργών ρηγμάτων, σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των MT αναλύσεων. Τέλος, ένα επιπλέον στοιχείο που

προκύπτει από τις σεισμολογικές μελέτες τόσο του IPGP όσο και του RWTH είναι η απουσία κάθε σεισμικής δραστηριότητας σε βάθη μεγαλύτερα των 7km κάτω από τον ταμιευτήρα. Στην περιοχή αυτή παρατηρούνται εστιακά βάθη της τάξης των 4-7 km. Τα εστιακά βάθη γίνονται μεγαλύτερα προς ΒΔ και φτάνουν μέχρι και τα 10 km. Παρατηρείται δηλαδή μία βύθιση της σεισμικής ζώνης προς ΒΔ.

4.2. Γεωηλεκτρική έρευνα για τον εντοπισμό των γεωθερμικών πεδίων

Οι γεωθερμικές έρευνες στη χώρα μας άρχισαν από τη Μήλο το 1971. Στην πρώτη φάση, διάρκειας δύο ετών, προσδιορίστηκαν οι ευνοϊκότερες περιοχές για βαθιές γεωτρήσεις ύστερα από συστηματική και λεπτομερειακή έρευνα επιφανείας. Διαπιστώθηκε μία μεγάλη θερμική ανωμαλία στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα του νησιού, η ενεργός τεκτονική των ρηγμάτων, η ύπαρξη λιθολογικών σχηματισμών κατάλληλων για την ύπαρξη ταμιευτήρων, καθώς και η ύπαρξη οριζόντων ηφαιστιτών που στεγανοποιήθηκαν υδροθερμικά εκ των υστέρων, σχηματίζοντας ένα ιδανικό κάλυμμα των γεωθερμικών ρευστών.

Μετά τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα, η Δ.Ε.Η. αποφάσισε την όρυξη δύο βαθιών γεωτρήσεων έρευνας – παραγωγής στη Ζεφυρία (MZ1) και στον Αδάμαντα (MA1), σε 1101 m και 1163 m, αντίστοιχα, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν την περίοδο 1975-76 (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.4: Χάρτης της ανωμαλίας Bouguer της Μήλου (Τσόκας, 1996)

Τα αποτελέσματα των δοκιμών των γεωτρήσεων πιστοποίησαν την ύπαρξη ενός σημαντικού γεωθερμικού πεδίου υψηλής θερμοκρασίας (ενθαλπίας), που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με βάση τα συμπεράσματα αυτά καταρτίστηκε ένα πρόγραμμα για την ανάπτυξη του πεδίου σε τρεις φάσεις, από τις οποίες, η πρώτη αφορούσε στην κατασκευή άλλων 3-4 γεωτρήσεων παραγωγής και την εγκατάσταση μιας πειραματικής γεωθερμοηλεκτρικής μονάδας, η δεύτερη την κατασκευή του απαιτούμενου αριθμού συμπληρωματικών γεωτρήσεων παραγωγής, για την εγκατάσταση μιας μονάδας 30 MWe, και, τέλος, η τρίτη φάση που περιελάμβανε την όρυξη πρόσθετων γεωτρήσεων παραγωγής για την εγκατάσταση δύο ακόμα μονάδων των 30 MWe ισχύς παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας η κάθε μία. Το Νοέμβριο του 1981 ολοκληρώθηκε η όρυξη τριών παραγωγικών γεωθερμικών γεωτρήσεων, M1, M2 και M3 στην περιοχή της Ζεφυρίας, σε βάθος 1180 m, 1381 m και 1017 m, αντίστοιχα (**Σχήμα 4.5**). Οι προκαταρκτικές δοκιμές έδωσαν ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα (στα 1000 m μετρήθηκαν θερμοκρασίες ρευστών 325 °C) και εκτιμήθηκε ότι η συνολική παραγωγή ατμού από τις τρεις αυτές γεωτρήσεις μπορούσε να εξασφαλίσει τη λειτουργία μονάδας 18 MWe. Οι εκτιμήσεις αυτές αυξήθηκαν στα 24 MWe ύστερα από τη δεύτερη σειρά δοκιμών (Φυτίκας – Ανδρίτσος, 2004).

Σχετικά με τις θερμομετρικές μεθόδους έρευνας, υπάρχουν δύο τρόποι μέτρησης της θερμοκρασίας της γεώτρησης:

1. Κατά τη φάση εκτέλεσης της γεώτρησης.
2. Μετά την ολοκλήρωση της γεώτρησης και αφού η γεώτρηση έρθει σε θερμική ισορροπία με τους περιβάλλοντες σχηματισμούς.

Κατά τον πρώτο τρόπο, κατεβαίνει εντός της γεώτρησης διάταξη μέτρησης της θερμοκρασίας. Οι μετρήσεις όμως που γίνονται κατά την εκτέλεση της γεώτρησης δεν δίνουν πραγματική θερμοκρασία σχηματισμών και αυτό γιατί ο πολφός, παρά το γεγονός ότι θερμαίνεται κατά την κυκλοφορία του εντός της γεώτρησης, έχει θερμοκρασία σαφώς χαμηλότερη από αυτή των περιβαλλόντων σχηματισμών. Προκειμένου να σχηματιστεί μία σαφή εικόνα για την πραγματική θερμοκρασία εντός της γεώτρησης χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι και προγράμματα υπολογιστών για την εκτίμηση της θερμοκρασίας σε κάθε βάθος (**Extrapolation**).

Σε μία ιδανική περίπτωση γεώτρησης, η θερμοκρασία θα λαμβανόταν από μία άμεση μέτρηση στη γεώτρηση. Ωστόσο, οι θερμοκρασίες που καταγράφονται κατά την διάρκεια της όρυξης της γεώτρησης εξαρτώνται αποκλειστικά από το ιστορικό της γεώτρησης. Η ιδανική λήψη της θερμοκρασίας απαιτεί το κλείσιμο της γεώτρησης για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, που μπορεί να φτάσει μέχρι και μερικούς μήνες, μέχρι η γεώτρηση να έρθει σε θερμική ισορροπία με τους περιβάλλοντες σχηματισμούς. Πρακτικά όμως αυτό δεν είναι εφαρμόσιμο, καθώς το κλείσιμο της γεώτρησης για μεγάλο χρονικό διάστημα καθιστά την γεώτρηση μη συμφέρουσα οικονομικά. Για το λόγο αυτό, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, χρησιμοποιούνται διάφορα μοντέλα αλγορίθμων και προγράμματα έχοντας σαν σκοπό την πρόβλεψη της θεωρητικής θερμοκρασίας για κάθε βάθος (Luheshi, 1983).

Τα υπάρχοντα δημοσιευμένα μοντέλα υπολογισμού της θερμοκρασίας της γεώτρησης, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία, περιλαμβάνονται τα μοντέλα που προσπαθούν να περιγράψουν την εξέλιξη της θερμοκρασίας ολόκληρης της λάσπης διάτρησης. Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται τα μοντέλα, τα οποία επικεντρώνονται στην περιοχή της γεώτρησης όπου μετρώνται οι πραγματικές θερμοκρασίες στον πυθμένα της γεώτρησης (bottom hole temperatures – BHTs).

Η ευαισθησία των μοντέλων της πρώτης κατηγορίας σε πιθανές διακυμάνσεις παραμέτρων όπως: σύνθεση της λάσπης, θερμοκρασία εισόδου της λάσπης κ.λπ. δεν είναι γνωστή. Συνήθως παράμετροι όπως: ρυθμός κυκλοφορίας, θερμοκρασία εισόδου και φυσικές ιδιότητες της λάσπης θεωρούνται ότι έχουν σταθερή τιμή. Μια τέτοια παραδοχή για ένα εκτεταμένο βάθος προχώρησης της γεώτρησης και αντίστοιχο χρόνο μπορεί να επιφέρει σωρεία λαθών στους υπολογισμούς.

Τα μοντέλα της δεύτερης κατηγορίας θεωρούν ότι η διαδικασία της διάτρησης επιφέρει άγνωστου βαθμού διαταραχή στη θερμοκρασία των σχηματισμών κατά τη στιγμή που το κοπτικό προχωράει στο βάθος όπου μετρήθηκε προηγουμένως η θερμοκρασία στον πυθμένα της γεώτρησης. Το εύρος αυτής της διαταραχής αποτελεί παράμετρο που προσαρμόζεται κάθε φορά στο εκάστοτε μοντέλο.

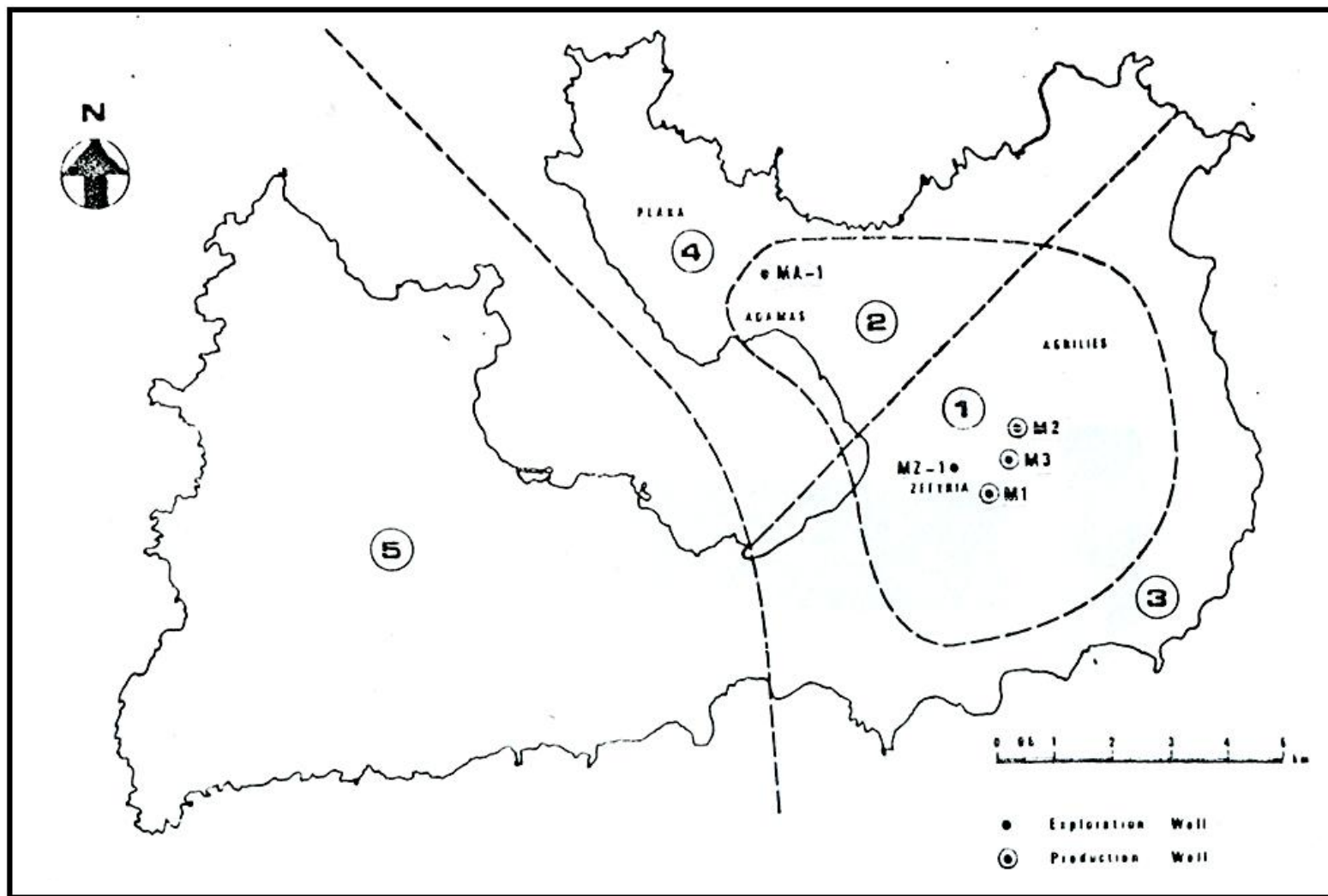
Η μέτρηση της θερμοκρασίας, της θερμοβαθμίδας και της θερμικής ροής των γεωλογικών σχηματισμών σε συνάρτηση με το βάθος είναι καθοριστικές παράμετροι στη γεωθερμική

έρευνα. Για την μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς της γης πρέπει να μετρηθεί η μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτησης με το βάθος και στη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου, απαραίτητο στοιχείο της γεωθερμικής έρευνας για τον εντοπισμό γεωθερμικών ρευστών.

Κατά την μέτρηση της γεωθερμικής βαθμίδας σε γεωτρήσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ορισμένα στοιχεία ώστε να αποφεύγονται τυχόν λανθασμένες εκτιμήσεις (Καρυδάκης, 2005):

- Οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται κατά την κάθοδο του θερμόμετρου ώστε να αποφεύγονται διαταραχές λόγω ανάμειξης νερού.
- Οι θερμομετρήσεις πρέπει να γίνονται σε κλίμακα 3-10 m με κατάλληλη χρονικά παραμονή του αισθητηρίου του θερμόμετρου ώστε να αποκατασταθεί θερμοκρασιακή ισορροπία με το περιβάλλον.
- Οι μετρήσεις σε γεωτρήσεις σε γεωτρήσεις που βρίσκονται σε φάση εκτέλεσης γίνονται μετά από διακοπή (σχετικής χρονικής διάρκειας) γιατί ο πολφός (λάσπη), θερμαινόμενος στον πυθμένα, ανέρχεται θερμαίνοντας τα ανώτερα στρώματα της γεώτρησης, αλλοιώνοντας έτσι τη γεωθερμική βαθμίδα, ενώ ο κατερχόμενος ψυχρός πολφός κρυώνει τον πυθμένα της γεώτρησης.
- Οι πλέον αξιόπιστες μετρήσεις γεωθερμικής βαθμίδας γίνονται σε στεγανούς σχηματισμούς, που δεν επιτρέπουν την κυκλοφορία νερού. Αντιθέτως, όπου υπάρχει κυκλοφορία νερού υπάρχει σχετική απόκλιση.
- Οι μετρήσεις σε γεωτρήσεις πλήρεις πολφού βοηθούν στον εντοπισμό ζωνών εισροής – εκροής νερού και όχι της απόλυτης θερμοκρασίας.
- Η επανάληψη των μετρήσεων γίνεται συχνά μετά την ολοκλήρωση της γεώτρησης, οπότε έχει αποκατασταθεί η θερμική ισορροπία.
- Η μη κανονική αύξησης της γεωθερμικής βαθμίδας συναρτήσει του βάθους, συνήθως οφείλεται στην ύπαρξη καθοδικής ροής κρύου νερού, που εξουδετερώνει τη θερμότητα με το βάθος.
- Επίσης η ύπαρξη ανοδικής ροής ζεστού νερού στις γεωτρήσεις διαφοροποιεί την τιμή της βαθμίδας με τη δημιουργία ισόθερμων ζωνών.
- Η μεγαλύτερη βαθμίδα δεν συμπίπτει πάντα με την περιοχή των υψηλότερων θερμοκρασιών.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαθέσιμα στη βιβλιογραφία στοιχεία για τις ως άνω γεωτρήσεις.



Σχήμα 4.5: Οι θέσεις των γεωτρήσεων στη Μήλο (Πηγή: ΙΓΜΕ)

4.2.1. Η γεώτρηση MZ1 (Μήλος-Ζεφυρία 1^η)

Η γεώτρηση MZ1 τοποθετήθηκε στη χαμηλή μορφολογικά περιοχή της κεντρικής Μήλου, 500 m ΒΔ του οικισμού της Ζεφυρίας. Οι γεωφυσικές έρευνες της ηλεκτρικής αντίστασης του υποβάθρου έδιναν πάχος καλύμματος της τάξης των 300-400 m. Στη θέση αυτή, παλαιότερη γεώτρηση έδωσε πολύ υψηλή γεωθερμική βαθμίδα της τάξης των 8°C/10 m. Η γεώτρηση MZ1 άρχισε στις αρχές του Ιουλίου 1975 και τελείωσε στο τέλος του Σεπτεμβρίου του ίδιου έτους, φτάνοντας σε βάθος 1101 m. Για τεχνικούς όμως λόγους, η γεώτρηση παρέκκλινε μέχρι και 16° και έτσι το πραγματικό βάθος που έφτασε ήταν τα 1080 m περίπου, που αντιστοιχούν σε 1070 m περίπου κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Στη γεώτρηση MZ1 οι παραγωγικοί ορίζοντες βρίσκονται σε βάθος μεγαλύτερο των 800 m, όπου η θερμοκρασία που μετρήθηκε είναι 310°C και η παροχή στις λίγες ώρες δοκιμών κυμάνθηκε μεταξύ 40 και 60 τόνων την ώρα, από τους οποίους ποσοστό μεγαλύτερο από το 50% ήταν κορεσμένος ατμός και το υπόλοιπο νερό. Η ενθαλπία του ρευστού που μετρήθηκε ήταν περίπου 450 Kcal/Kg.

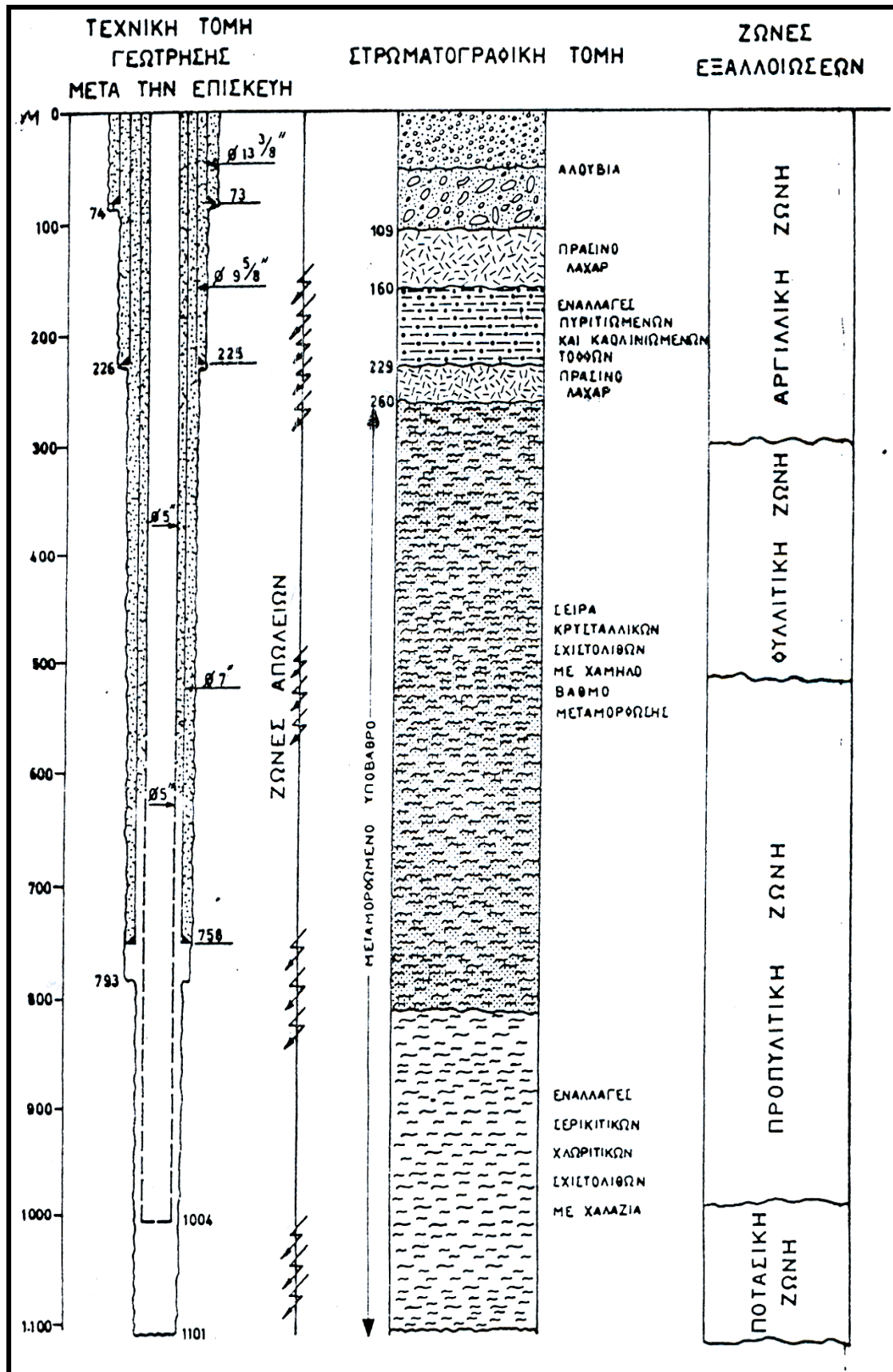
Στο **Σχήμα 4.6** φαίνεται παραστατικά η στρωματογραφική σειρά της γεώτρησης:

0 - 6 m: ελουβιακός μανδύας, προσχώσεις, χώματα κ.λπ.

6 - 19 m: λεπτομερή αλλουβιακά προϊόντα που προέρχονται από αποπλύσεις πυροκλαστικών προϊόντων.

19 - 62 m: στρώματα λιμνοθαλάσσιας προέλευσης, που αποτελούνται, από πλαστική γκριζωπή - πράσινη άργιλο με αμμώδη χαλαζιακή κύρια μάζα και εναλλάσσονται με γυψούχους ορίζοντες.

62 - 100 m: αδρομερή αλλουβιακά προϊόντα, που αποτελούνται από θραύσματα ηφαιστειακών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων (τα τελευταία προέρχονται από την αποκομιδή του πράσινου λάχαρ), εγκλωβισμένα μέσα σε αργιλική κύρια μάζα.



Σχήμα 4.6: Βαθεία γεώτρηση MZ1 (Μήλος-Ζεφυρία 1^η)(Πηγή: ΙΓΜΕ)

100 - 109 m: πράσινη πλαστική άργιλος, που περιέχει θραύσματα ηφαιστειτών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων.

109 - 160 m: πράσινο λαχάρ ή λατυποκροκαλοπαγές από μεταμορφωμένα συστατικά που προέρχονται από το πράσινο λάχαρ.

160 – 179 m: πυριτιωμένοι, συνήθως, τόφφοι, που έχουν ανοικτό - γκριζωπό και λευκό χρώμα.

179 - 229 m: καολιτιωμένοι τόφφοι, που έχουν ανοικτό - γκριζωπό ή λευκό χρώμα και περιέχουν ολιγάριθμα θραύσματα από λάβες και σχιστόλιθους.

229 – 260 m: πράσινο λαχάρ που περιέχει και κομμάτια από νεογενείς ασβεστολίθους.

260 - 809 m: σειρά κρυσταλλικών σχιστόλιθων με χαμηλό βαθμό μεταμόρφωσης. Αποτελούνται από εναλλαγές σερικιτικών – χλωριτικών φυλλιτών, όπου τα φυλλοπυριτικά ορυκτά κυριαρχούν σε σχέση με τον χαλαζία και τον σχιστόλιθο.

809 - 826 m: πράσινοι ασβεστούχοι χαλαζίτες.

826 - 843 m: σερικιτικοί - χλωριτικοί σχιστόλιθοι.

843 - 847 m: χλωριτικοί - μοσχοβιτικοί ασβεστοσχίστες³.

847 - 872 m: εναλλαγές σερικιτικών - χλωριτικών σχιστόλιθων με ανοιχτόχρωμους ασβεστόσχιστους και χαλαζίτες.

872 - 78 m: ασβεστοσχίστες πολύ πλούσιοι σε ασβεστίτη.

878 -1031 m: σερικιτικοί σχιστόλιθοι, συχνά χαλαζιακοί και ασβεστούχοι, με ενστρώσεις από χλωριτικούς σχιστόλιθους και σπάνια ασβεστόσχιστους. Η ποσότητα του ασβεστίτη λιγοστεύει όσο μεγαλώνει το βάθος.

1031 – 1058 m: κρυσταλλικοί σχιστόλιθοι ανάλογοι με τους προηγούμενους, αλλά με ενστρώσεις από λεπτομερείς χλωριτικούς σχιστόλιθους και σπάνια ασβεστοσχίστες.

1058 - 1075 m: χλωριτικοί - μοσχοβιτικοί σχιστόλιθοι, συχνά πλούσιοι σε αστρίους και επίδοτα.

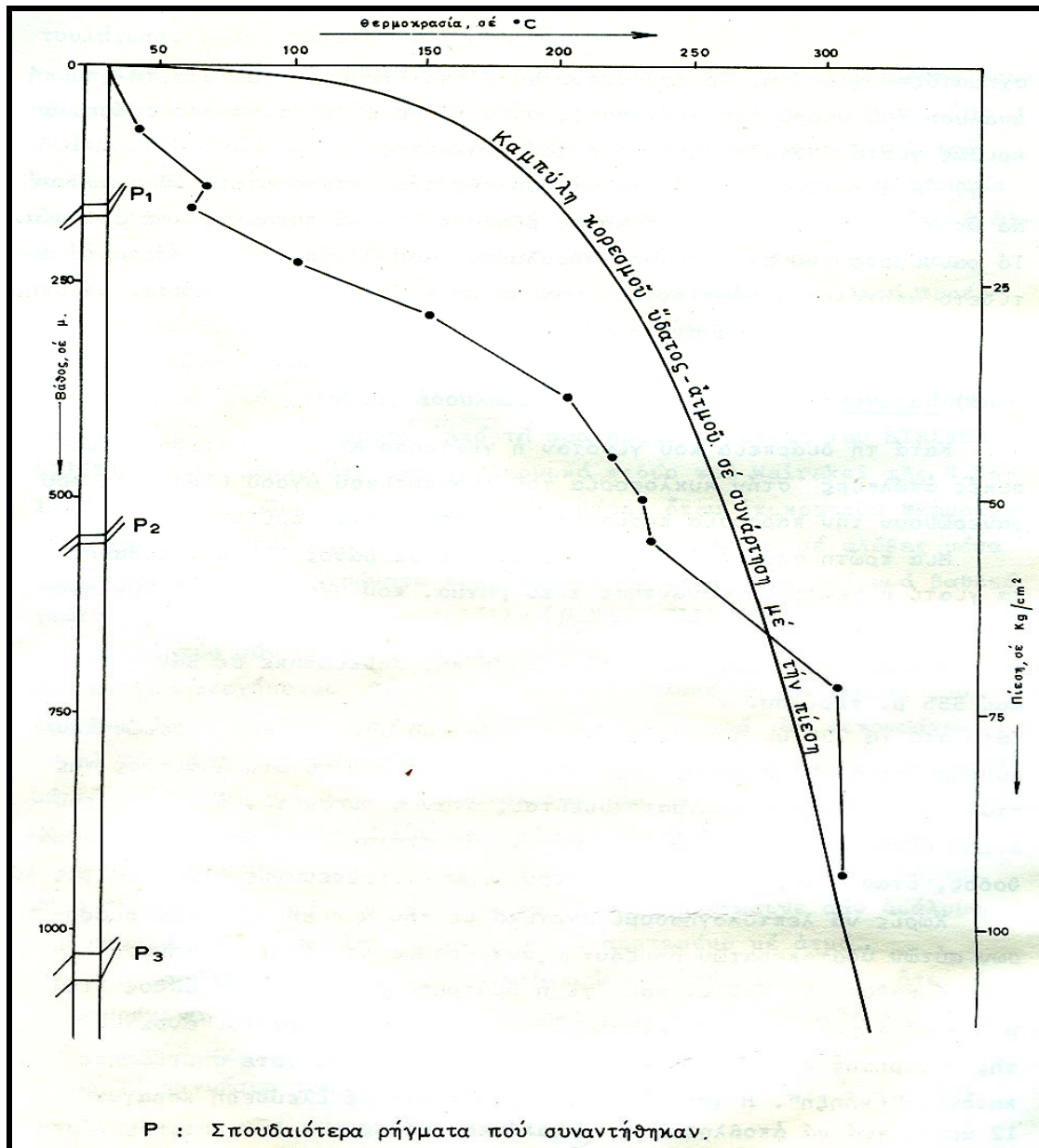
1075 – 1087 m: χαλαζίτες και επιδοτιτικοί χαλαζίτες. Η ποσότητα των φυλλοπυριτικών είναι πολύ μικρή.

1087 - 1101 m: εναλλαγές σχιστόλιθων, που είναι πλούσιοι σε φυλλοπυριτικά υλικά, με ασβεστούχους και επιδοτούχους χαλαζίτες.

Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της γεώτρησης MZ1, διαπιστώθηκαν μερικές απώλειες στην κυκλοφορία του ρευστού διάτρησης (λάσπης), γεγονός που φανερώνει την παρουσία περισσότερο υδατοπερατών οριζόντων (Φυτίκας 1977, Βλαχαντώνης-Κουτίνας, 1977).

³ Έτσι αναφέρονται από τον Φυτίκα (1977) και τους Βλαχαντώνη, Κουτίνα (1977)

Μια πρώτη σοβαρή απώλεια σημειώθηκε σε βάθος 155 m, πιθανότατα γιατί η γεώτρηση συνάντησε εκεί ρήγμα, που μέσα σ' αυτό κυκλοφορούσε σχετικά κρύο νερό (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7: Θερμομετρήσεις της γεώτρησης MZ1 και καμπύλη κορεσμού νερού-ατμού
(Πηγή: Φυτίκας, 1977)

Δεύτερη απώλεια, όχι πολύ σημαντική, σημειώθηκε σε βάθος 545 και 555 m περίπου. Κάτω από τα 790 m συναντήθηκαν πολυάριθμα σημεία, που σημειώθηκαν αυξομειώσεις της στάθμης της λάσπης. Είναι γνωστό ότι η άνοδος της στάθμης της λάσπης πραγματοποιείται όταν η πίεση των αερίων ή του ατμού είναι μεγαλύτερη από το βάρος της στήλης της λάσπης, και η κάθοδος της στάθμης όταν η περατότητα των πετρωμάτων

επιτρέπει απώλειες της λάσπης. Εάν η υδροστατική πίεση που ασκεί η στήλη του ρευστού διάτρησης μέσα στη γεώτρηση (PH) παραμένει μεγαλύτερη από την πίεση των ρευστών που μπορεί να περιέχουν οι διατρυόμενοι σχηματισμοί (νερό, αέριο ή πετρέλαιο), η εισροή των ρευστών αυτών στη γεώτρηση εμποδίζεται. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο κίνδυνος να προκληθούν ανεξέλεγκτες μεταβολές στις πιέσεις που επικρατούν μέσα στη γεώτρηση και να προκληθούν εκτινάξεις (kicks) ή εκρήξεις (blowouts). Η λάσπη διάτρησης θεωρείται ως ο πρώτος φυσικός αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφάλειας (blowout preventer) για τον έλεγχο των πιέσεων στον πυθμένα της γεώτρησης (Σταματάκη, 2003).

Κατά την όρυξη έγιναν θερμομετρήσεις, στα βάθη τα οποία παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.7** ως τελείες. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η θερμοκρασία 310°C, σε βάθος περίπου 800 m, όπου υπάρχουν οριζόντες παραγωγής ατμού, αντιστοιχεί στην περιοχή του ξηρού ατμού. Οι τιμές πίεσης και θερμοκρασίας στον πυθμένα της γεώτρησης, όταν αυτή παρέμεινε κλειστή, ήταν πίεση 93,5 Atm (1350 psi) και θερμοκρασία μεγαλύτερη από 298°C περίπου.

Η σωλήνωση έγινε μέχρι το βάθος των 760 m και η όρυξη σταμάτησε σε βάθος 1101 m, αφού πέρασε ένα τελευταίο υδατοπερατό ορίζοντα. Το "άνοιγμα" της γεώτρησης πραγματοποιήθηκε στις 15-10-75 και τότε σημειώθηκε κανονική έκρηξη. Η γεώτρηση έμεινε ανοιχτή σε ελεύθερη παραγωγή 12 ώρες, για να αποβληθεί το μεγαλύτερο μέρος της λάσπης διάτρησης και των θρυμμάτων των πετρωμάτων από τα τοιχώματα του τμήματος που δεν σωληνώθηκε. Σφραγίστηκε με βάνες ασφαλείας και ανοίχτηκε 3-4 φορές ακόμη προκειμένου να γίνουν μετρήσεις και δειγματοληψίες ρευστών για χημική ανάλυση. Η χημική ανάλυση του συμπυκνώματος ατμού φαίνεται στον **Πίνακα 4.1** (Φυτίκας, 1977).

Όσον αφορά τη σωλήνωση της γεώτρησης MZ1, η διάνοιξη της γεώτρησης MZ1 έγινε αρχικά με κοπτικό άκρο 17 1/2" τύπου TS5 μέχρι το βάθος των 74 m. Το τμήμα αυτό σωληνώθηκε με σωλήνες διαμέτρου 13 3/8" μέχρι το βάθος των 73,13 m (**Σχήμα 4.6**). Ακολούθως η γεώτρηση συνεχίστηκε με κοπτικό διαμέτρου 12 1/4" τύπου TM2, μέχρι το βάθος των 176 m και τύπου TH3 μέχρι το βάθος των 226 m. Η σωλήνωση της δεύτερης φάσης έγινε με σωλήνες διαμέτρου 9 5/8" μέχρι το βάθος των 224,85 m.

Στη συνέχεια ακολούθησε η τρίτη φάση της όρυξης με κοπτικό διαμέτρου 8 1/2" και τύπου TM και TH. Το τμήμα αυτό της γεώτρησης σωληνώθηκε με σωλήνες διαμέτρου 7" και μέχρι το βάθος των 758,52 m. Η τελευταία φάση της διάτρησης, από το βάθος των 793 m μέχρι τα 1101 m, έγινε με κοπτικό διαμέτρου 5 5/8" κι έμεινε ασωλήνωτο.

Είναι γνωστό ότι ο τύπος κοπτικού άκρου S (SOFT) χρησιμοποιείται για πετρώματα μικρής σκληρότητας (ως επιφανειακά εδάφη προσχώσεις κ.λπ.), ο τύπος M (MEDIUM) χρησιμοποιείται για μέτριας σκληρότητας πετρώματα και ο τύπος H (HARD) για πετρώματα μεγάλης σκληρότητας.

Πίνακας 4.1. Χημικές αναλύσεις ρευστών από τη γεώτρηση MZ1 (Πηγή: Φυτίκας, 1977)

| Δείγμα | Ημερομηνία δειγματοληψίας | Σύνολο διαλυμένων στερεών | pH | Χίλιοστοισοδύναμα ανά λίτρο (meq/l) | | | | | | | | | Μέρη ανά εκατομμύριο (ppm) | | | |
|----------|---------------------------|---------------------------|------|-------------------------------------|-------|------|------|----------|----------|------------------|------|-----------------|----------------------------|------------------|------|-----------------|
| | | | | Κατιόντα | | | | | Ανιόντα | | | | NH ₄ | SiO ₂ | B | CO ₂ |
| | | | | Ca | Mg | Na | K | Άθροισμα | Άθροισμα | HCO ₃ | Cl | SO ₄ | | | | |
| Z - 1/1 | 15/10/75 | 428,20 | 5,70 | 0,48 | 0,04 | 3,54 | 0,54 | 4,60 | 7,24 | 2,07 | 5,00 | 0,17 | 1,20 | 2,60 | 1,01 | 482,0 |
| Z - 1/3α | 30/10/75 | | 5,75 | 0,54 | 0,04 | 2,85 | 0,52 | 3,95 | | | 5,00 | 0,09 | 3,00 | 2,00 | 1,12 | 537,0 |
| Z - 1/3β | | 466,07 | 7,20 | 0,83 | 0,03 | 4,85 | 0,80 | 6,51 | 8,13 | 0,47 | 7,50 | 0,16 | 1,80 | 2,00 | 1,42 | |
| Z - 1/4α | | | 6,40 | 0,32 | 0,01 | 1,95 | 0,33 | 2,61 | | | 3,00 | 0,11 | 2,50 | 2,00 | 0,92 | 102,0 |
| Z - 1/4β | | 398,87 | 7,40 | 0,67 | 0,024 | 3,71 | 0,67 | 5,07 | 6,94 | 0,82 | 6,00 | 0,12 | 1,20 | 3,00 | 1,78 | |
| Z - 1/5α | | 293,31 | 7,00 | 0,34 | 0,015 | 1,94 | 0,34 | 2,635 | 4,98 | 1,85 | 3,00 | 0,13 | 2,20 | 2,00 | 0,92 | |
| Z - 1/5β | | 407,22 | 7,55 | 0,70 | 0,017 | 4,17 | 0,70 | 5,587 | 6,90 | 0,76 | 6,00 | 0,14 | 1,00 | 2,00 | 1,54 | |
| Z - 1/6α | | | 6,85 | 0,32 | 0,01 | 2,05 | 0,34 | 2,72 | | | 3,00 | 0,11 | 2,50 | 2,00 | 0,96 | 32,0 |
| Z - 1/6β | | 327,28 | 7,40 | 0,47 | 0,016 | 2,71 | 0,54 | 3,736 | 5,59 | 1,18 | 4,25 | 0,16 | 1,20 | 2,00 | 1,78 | |
| Z - 1/7α | | 347,66 | 6,40 | 0,38 | 0,013 | 2,63 | 0,45 | 3,47 | 5,83 | 2,00 | 3,75 | 0,08 | 2,50 | 2,00 | 0,91 | |
| Z - 1/7β | | 166,16 | 6,80 | 0,26 | 0,01 | 1,48 | 0,23 | 1,98 | 2,75 | 0,60 | 2,00 | 0,15 | 1,80 | 2,00 | 0,64 | |
| Z - 1/8α | | 291,84 | 7,55 | 0,47 | 0,04 | 2,19 | 0,38 | 3,08 | 5,00 | 1,34 | 3,50 | 0,16 | 1,50 | 2,00 | 0,87 | |
| Z - 1/8β | | 299,23 | 7,90 | 0,46 | 0,01 | 2,90 | 0,44 | 3,81 | 4,93 | 0,98 | 3,75 | 0,20 | 1,20 | 2,00 | 1,09 | |

4.2.2. Η γεώτρηση MA1 (Μήλος-Αδάμαντας 1^η)

Η δεύτερη γεώτρηση MA1 πραγματοποιήθηκε 1000 m Β.ΒΔ. της περιοχής του Αδάμαντα. Η εκτέλεσή της άρχισε 11 Φεβρουαρίου 1976 και περατώθηκε τέλη Απριλίου του ίδιου έτους, σε βάθος 1163 m. Το γεωτρύπανο (IDECO H30) ήταν προσαρμοσμένο στις απαιτήσεις των γεωθερμικών γεωτρήσεων και διέθετε: πλατφόρμα, πύργο ψύξης στο δίκτυο κυκλοφορίας της θερμής λάσπης, συστήματα ασφαλείας (B.O.P., HYDRIL) κ.λπ. Στην γεώτρηση MA1 η παραγωγή προερχόταν από βάθος μεγαλύτερο των 745 m, όπου η θερμοκρασία που μετρήθηκε έφτανε τους 308°C και οι συνθήκες παραγωγής για διάστημα δύομισι μηνών ήταν: πίεση 4,80 kg/cm², θερμοκρασία 155-159°C, παροχή 58-63 tn/h, εκ των οποίων 55% κορεσμένος ατμός και 45% νερό.

Στο **Σχήμα 4.8** φαίνεται παραστατικά η στρωματογραφική σειρά της γεώτρησης:

0 - 107 m: τοφίτες.

107 – 115 m: πράσινο λάχαρ.

115 – 460 m: εξαλλοιωμένοι τόφοι με ασβεστίτη.

460 – 470 m: εξαλλοιωμένοι τόφοι με ασβεστίτη και ανυδρίτη.

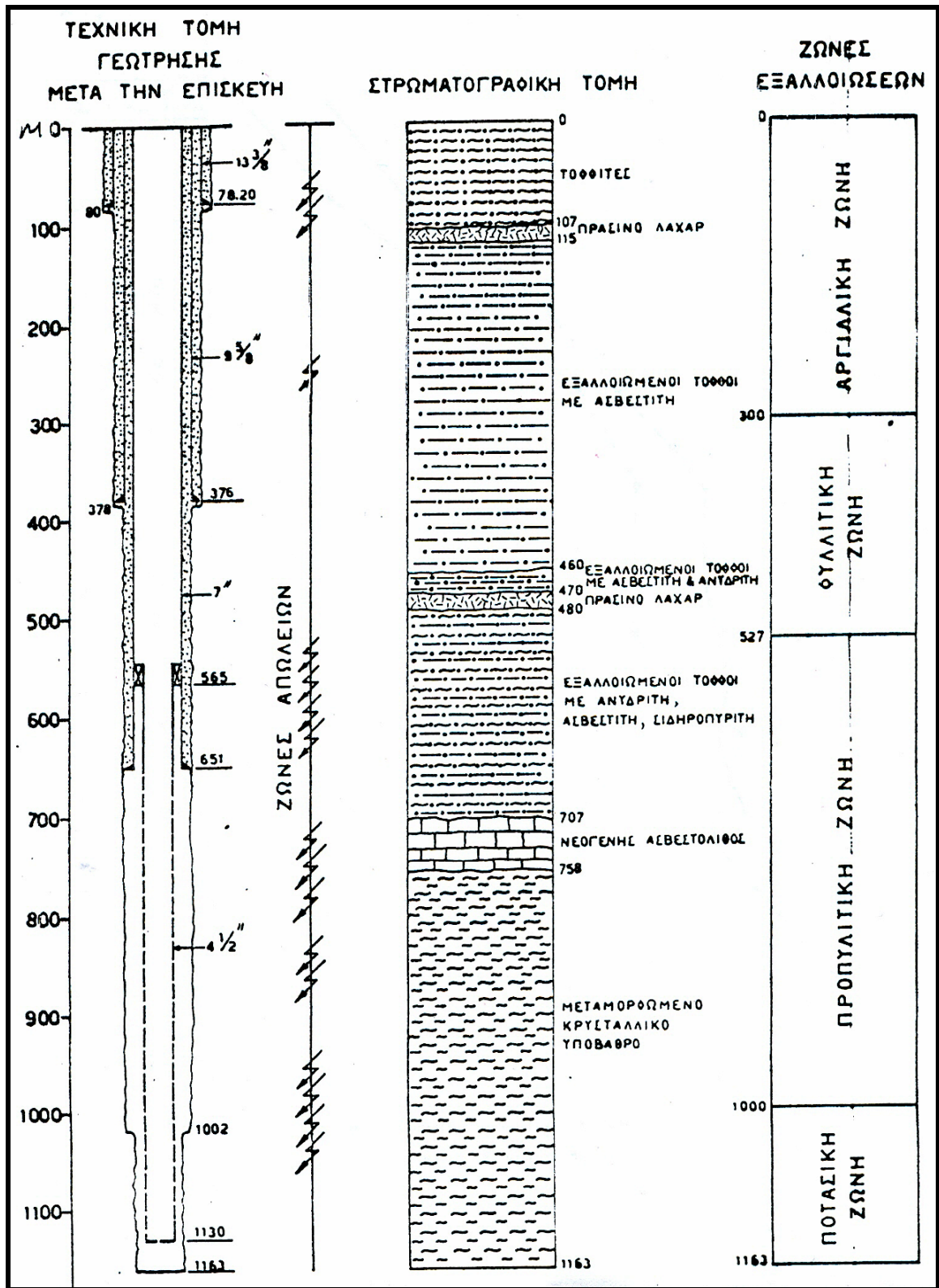
470 – 480 m: πράσινο λάχαρ.

480 – 707 m: εξαλλοιωμένοι τόφοι με ανυδρίτη, ασβεστίτη και σιδηροπυρίτη.

707 – 758 m: νεογενής ασβεστόλιθος.

758 – 1163 m: μεταμορφωμένο κρυσταλλικό υπόβαθρο.

Ένα από τα σπουδαιότερα προβλήματα που ανέκυψαν κατά την όρυξη της γεώτρησης MA1 ήταν η απώλεια λάσπης σε διάφορα βάθη. Συγκεκριμένα, σε βάθος 83 m παρατηρήθηκε απώλεια 45 m³/h και γι' αυτό το λόγο η όρυξη συνεχίστηκε με θαλάσσιο νερό (Βλαχαντώνης-Κουτίνας, 1977).



Σχήμα 4.8. Βαθεία γεώτρηση MA1 (Μήλος-Αδάμαντας 1^η) (Πηγή: ΠΓΜΕ)

Στη συνέχεια, σε βάθος 109 m, οι απώλειες ήταν μεγαλύτερες των 45 m³/h. Έτσι τοποθετήθηκε ειδικό πώμα για τον περιορισμό των απωλειών. Οι απώλειες αυτές, οι οποίες οφείλονταν στην διείσδυση της λάσπης, είτε μέσω των υδροπερατών σχηματισμών,

είτε μέσω των ρηγμάτων, ήταν απαραίτητο να μειωθούν στο ελάχιστο δυνατό, αφενός λόγω του υψηλού κόστους της λάσπης, αφετέρου για την ασφαλή τσιμέντωση της σωλήνωσης.

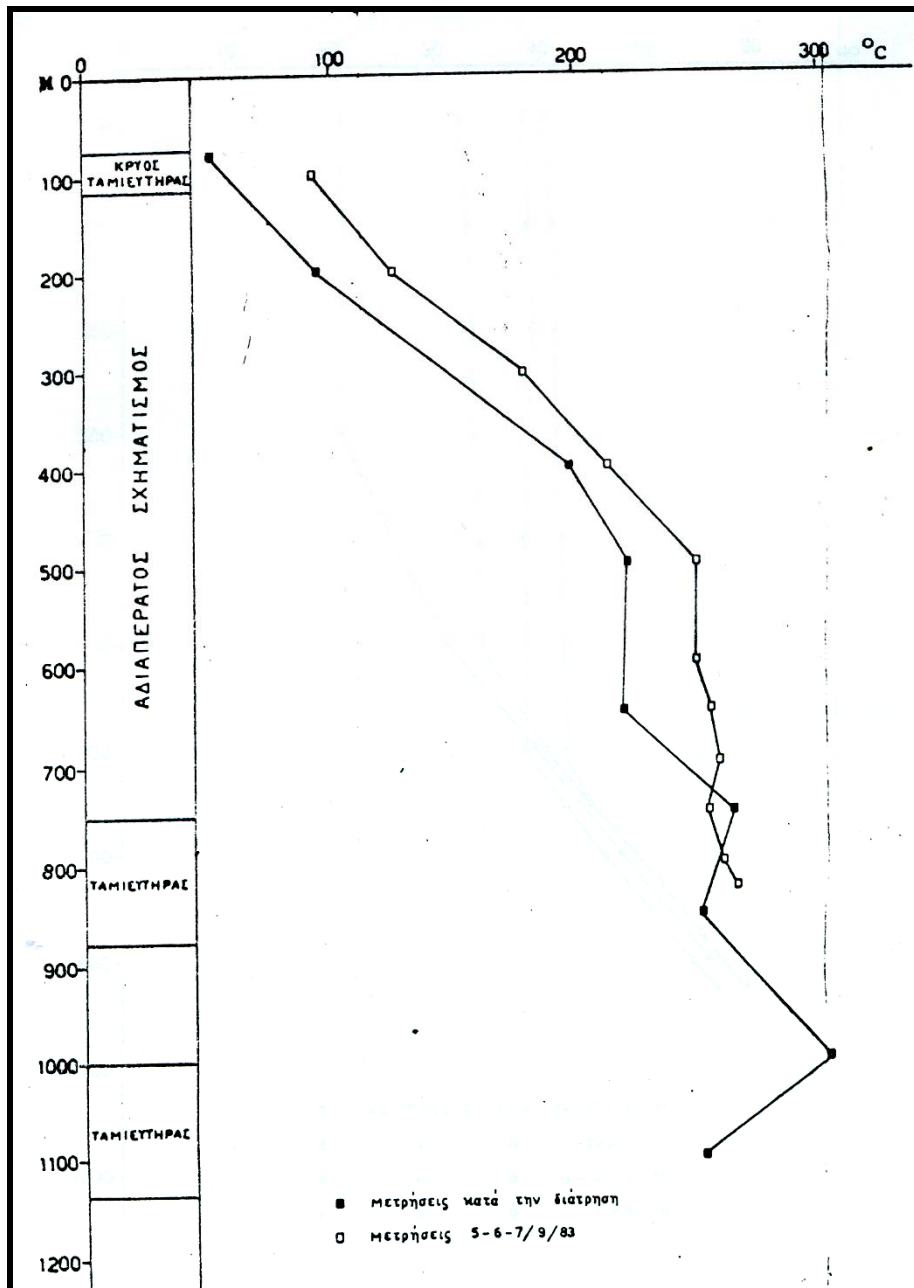
Σχετικά με τις θερμοκρασίες που μετρήθηκαν στην γεώτρηση MA1, ο επιφανειακός υδροφόρος σχηματισμός που συναντήθηκε μεταξύ 83 m και 87 m, επηρέασε τη θερμοκρασία, με αποτέλεσμα η τιμή των 100°C να παρατηρηθεί σε βάθος 200 m. Η γεωθερμική βαθμίδα στο διάστημα μεταξύ 196 m και 545 m ήταν 0,38 °C/m. Ακολούθως η θερμοκρασία παρουσίασε σταθεροποίηση μεταξύ 545 m και 654 m, δεδομένου ότι στο στρώμα αυτό δεν εμφανίστηκαν απώλειες σε λάσπη διάτρησης (**Σχήμα 4.9**).

Στο βάθος μεταξύ 654 – 746 m, η γεωθερμική βαθμίδα είναι 0,51 °C/m. Στη συνέχεια, μεταξύ 747 – 860 m υφίσταται έντονη ρωγμάτωση, ενώ η ανηγμένη θερμοκρασία σε βάθος 844 m αποδεικνύει την προσθήκη κρύου νερού⁴.

Η θερμοκρασία των 302°C σε βάθος 1002 m ελαττώνεται σημαντικά μέχρι το βάθος των 1095 m, εξαιτίας των μεγάλων απωλειών κυκλοφορίας στην περιοχή αυτή, λόγω της μεγάλης ρωγμάτωσης (υδροπερατά πετρώματα)(Βλαχαντώνης-Κουτίνας, 1977).

Η διάνοιξη της γεώτρησης MA1 άρχισε με κοπτικό διαμέτρου 17 1/2" από το βάθος των 6 m μέχρι το βάθος των 80 m κατάλληλο για μαλακά πετρώματα (TS5). Το τμήμα αυτό της γεώτρησης σωληνώθηκε μέχρι το βάθος των 78,21 m με σωλήνες διαμέτρου 13 3/8", (**Σχήμα 4.8**). Η συνέχεια της διάτρησης έγινε με κοπτικό διαμέτρου 12 1/4", τύπου TM2, από το βάθος των 80 m μέχρι το βάθος των 378 m. Η σωλήνωση αυτής της φάσης έγινε με σωλήνες διαμέτρου 9 5/8" μέχρι το βάθος των 376,12 m.

⁴ Έτσι αναφέρεται από τους Βλαχαντώνη, Κουτίνα (1977)



Σχήμα 4.9: Θερμοκρασίες στη γεώτρηση MA1 (Πηγή:ΙΓΜΕ)

Στη συνέχεια, η τρίτη φάση της διάτρησης έγινε με κοπτικό διαμέτρου 8 1/2", τύπων TS, Μ και ΕΗ, μέχρι το βάθος των 1002 m. Η σωλήνωση της τρίτης φάσης έγινε με σωλήνες διαμέτρου 7" μέχρι τα 651,10 m. Η τέταρτη φάση της διάτρησης κατά την οποία δεν τοποθετήθηκε σωλήνωση, περιελάμβανε την επαναδιάτρηση μέχρι το βάθος των 1002 m και τη συνέχεια της γεώτρησης μέχρι τα 1163 m. Η φάση αυτή έγινε με κοπτικά άκρα διαμέτρου 5 5/8", τύπου ΤΜ, μέχρι το βάθος των 1002 m και τύπου VΗ μέχρι το τέλος αυτής.

4.2.3. Η γεώτρηση M-1 (Μήλος 1^η)

Η γεωθερμική γεώτρηση M1 έγινε στην περιοχή της Ζεφυρίας που βρίσκεται στο κεντρικο-ανατολικό τμήμα του νησιού. Η όρυξη άρχισε στις 6 Οκτωβρίου 1980 και τελείωσε στις 6 Μαρτίου 1981, σε τελικό βάθος 1180 m.

Οι πετρογραφικές ενότητες που συναντήθηκαν κατά την όρυξη της γεώτρησης M1 είναι **(Σχήμα 4.10)**:

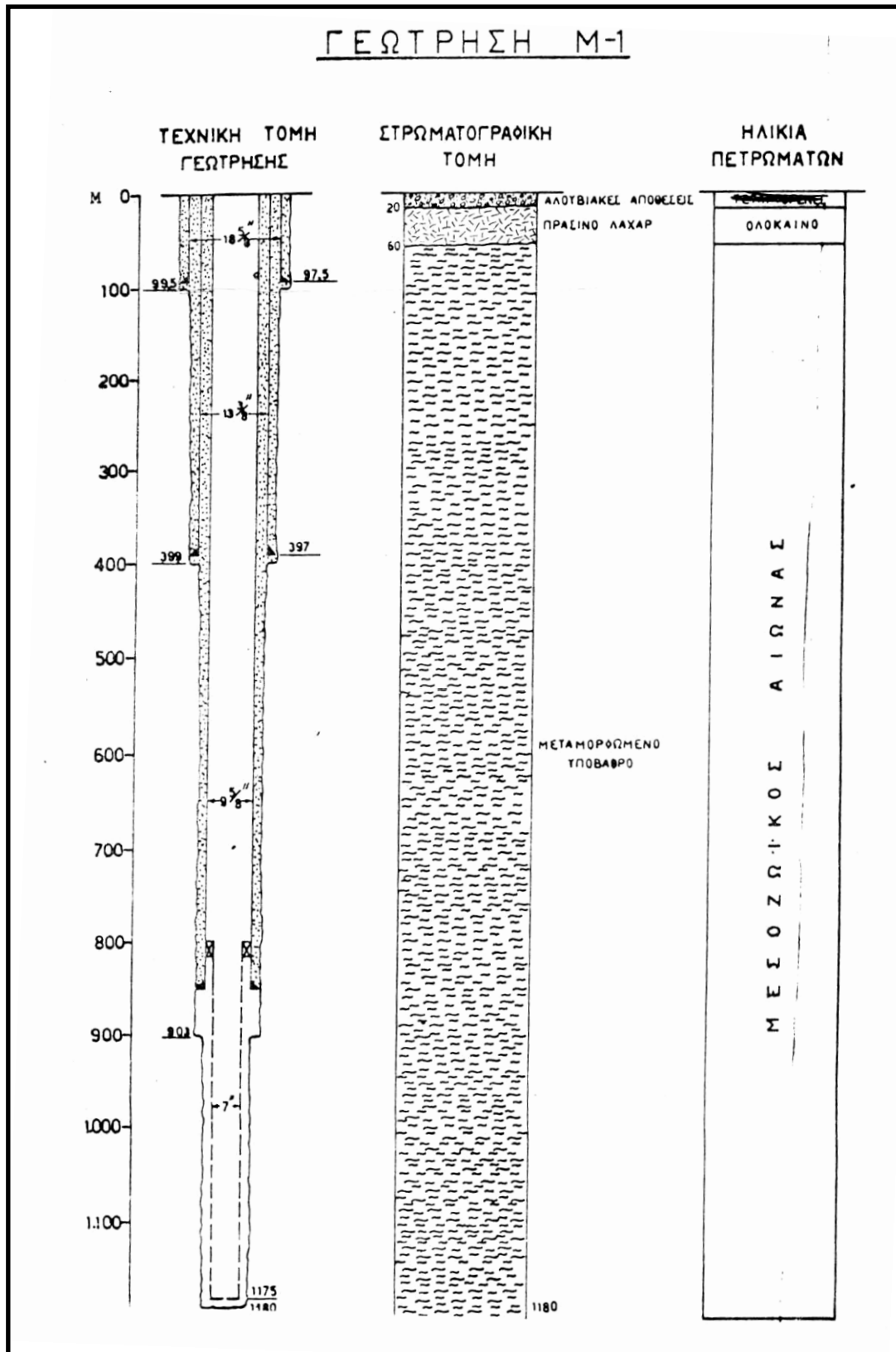
0 – 20 m: αλλουβιακές αποθέσεις.

20 – 60 m: πράσινο λάχαρ.

60 – 1180 m: μεταμορφωμένο υπόβαθρο.

Οι αλλουβιακές αποθέσεις από 0 m έως τα 20 m, αποτελούνται από κροκαλολατύπες, άμμους, λάσπη και αργίλους, στο ανώτερο κυρίως τμήμα. Βαθύτερα τα συστατικά είναι κυρίως κομμάτια προερχόμενα από το μεταμορφωμένο υπόβαθρο, κομμάτια λάβας, δακτιτικής μέχρι ρυολιθικής σύστασης και κίσηρης, καθώς επίσης και άλλα ηφαιστειακά υλικά που έχουν υποστεί μεγάλου βαθμού εξαλλοίωση.

Όσο αφορά τον σχηματισμό του πράσινου λάχαρ, από τα 20 m έως 60 m, αποτελείται από αποθέσεις ασύνδετων ετερογενών υλικών και κυρίως κροκαλολατύπες μεταμορφωμένων πράσινων σχιστόλιθων, αλλά και ασβεστολιθικών και ηφαιστειακών πετρωμάτων, μαζί με λεπτομερή υλικά (ηφαιστειακές τέφρες και τρίμματα μεταμορφωμένων πετρωμάτων). Ο σχηματισμός είναι χαώδης με αταξινόμητες ως προς το μέγεθος κροκαλολατύπες.



Σχήμα 4.10: Γεώτρηση M1 (Μήλος 1^η) (Πηγή: ΙΓΜΕ)

Τέλος, το μεταμορφωμένο υπόβαθρο από τα 60 m μέχρι το τελικό βάθος της γεώτρησης (1180 m) χωρίζεται στις ακόλουθες ενότητες, ανάλογα με τις πετρογραφικές και τις ορυκτολογικές ειδικές αναλύσεις που έγιναν.

- Από τα 60 m μέχρι τα 115 m συναντώνται μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι και χαλαζίτες, μέσου ή χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης, με μικρό ποσοστό γραφίτη. Σε βάθος 70 m έως τα 85 m υπάρχει ένας ορίζοντας μεγάλου βαθμού εξαλλοίωσης, με πετρώματα που έχουν υποστεί καολινιτίωση και πυριτίωση. Η εξαλλοίωση αυτή οφείλεται σε κυκλοφορούντα ρευστά δια μέσου των ρωγμών του πετρώματος, τα οποία έχουν υδροθερμική προέλευση.
- Από τα 115 m μέχρι τα 320 m υπάρχουν χλωριτικοί σχιστόλιθοι με χαλαζία και φλέβες από ασβεστολιθικό σχιστόλιθο, χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης. Τα πετρώματα αυτά εμφανίζουν σαφή σχιστότητα. Συναντάται, επίσης, χαλαζίας, ασβεστίτης και αλβίτης, με εμφανίσεις χλωρίτη και τιτανίτη. Επίσης, εμφανίζονται φλέβες από όξινα πλαγιόκλαστα, πυρόξενο, μονοκλινή, επίδοτο και χλωρίτη.
- Από τα 320 m μέχρι τα 325 m συναντώνται πράσινοι σχιστόλιθοι με χλωρίτη και τάλκη.
- Από τα 325 m μέχρι τα 540 m υπάρχουν χλωριτικοί και μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι, με κυριότερα ορυκτά: χλωρίτη, χαλαζία, μοσχοβίτη, αλβίτη, άφθονο γραφίτη με εμφανίσεις επίδοτου, τιτανίτη και πυρίτη. Ο βαθμός μεταμόρφωσης μπορεί να προσδιοριστεί σαν χαμηλός έως μέσος. Ακόμα, εμφανίζονται γλαυκοφανιτικός ασβετιτικός σχιστόλιθος με χλωρίτη, μοσχοβίτη, επίδοτο, απατίτη και τιτανίτη.
- Από τα 540 m μέχρι τα 555 m χλωριτικός, ταλκικός και ασβετιτικός σχιστόλιθος με αλβίτη.
- Από τα 555 m μέχρι τα 600 m χλωριτικός ασβεστόλιθος και σχιστόλιθος με αλβίτη, χαλαζία και φλέβες χαλαζίτη.
- Τέλος, από τα 600 m μέχρι τα 1180 m, όπου είναι και το τελικό βάθος της γεώτρησης, συναντώνται μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι – χλωριτοσχιστόλιθοι. Τα κυριότερα ορυκτά αυτής της ζώνης είναι: χλωρίτης, επίδοτο, ασβεστίτης, χαλαζίας, αλβίτης, τιτανίτης, γλαυκοφάνης και εμφανίσεις γραφίτη.

Όπως παρουσιάζεται και στο **Σχήμα 4.10**, η διάτρηση της γεωθερμικής γεώτρησης M1 άρχισε με κοπτικό 24" από την επιφάνεια μέχρι το βάθος των 99,50 m και σωληνώθηκε με

σωλήνες διαμέτρου 18 ⁵/₈". Από τα 99,50 m μέχρι το βάθος των 399 m, το κοπτικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν 17 ¹/₂" και εκτελέστηκε η σωλήνωση με σωλήνες διαμέτρου 13 ³/₈". Από τα 399 m μέχρι τα 903 m χρησιμοποιήθηκε κοπτικό 12 ¹/₄" και σωληνώθηκε με σωλήνες διαμέτρου 9 ⁵/₈". Τέλος, από τα 903 m μέχρι τα 1180 m, που είναι και το τελικό βάθος της γεώτρησης M1, χρησιμοποιήθηκε κοπτικό 8 ¹/₂" και σωληνώθηκε με σωλήνες διαμέτρου 7", διάτρητες από τα 800 m έως το τελικό βάθος.

Τα πλήρη γεωτρητικά δεδομένα για τη γεώτρηση M1 παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2** που ακολουθεί.

Πίνακας 4.2: Δεδομένα όρυξης γεώτρησης M1 (Πηγή: ΙΓΜΕ)

| Α/Α | ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ | ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ | ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΤΙΚΟΥ | ΣΕΙΡΙΑΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ | ΑΚΡΟΦΥΣΙΑ | | | ΒΑΘΟΣ | | FOOT AGE | ΧΡΟΝΟΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ | ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ | ΒΑΡΟΣ ΕΠΙ ΤΟΥ ΚΟΠΤΙΚΟΥ | ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ | ΠΙΕΣΗ ΛΑΣΠΗΣ | UNERS | STROKE | ΠΑΡΟΧΗ | ΒΑΡΟΣ ΛΑΣΠΗΣ | ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΟΠΤΙΚΟΥ | | | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ | |
|-----|---------------|-----------|----------------|-------------------|-----------|------|----|-------|-------|----------|------------------|--------------------|------------------------|--------------------|--------------|-------|--------|--------|--------------|--------------------|------------|------|--------------|--------------------|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | IN | OUT | | | | | | | | | | | T | B | G | | |
| | | (mm) | | | (mm) | (mm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | HUGH | 24 | OBC 3AJ | | 17 | 17 | 17 | 6,5 | 99,5 | 93 | 38,5 | 2,78 | 1-3 | 60-65 | 40 | 6 1/4 | 70 | 1860 | 1,08-1,12 | T1 | B2 | 1 mm | | |
| 2 | SMF | 17 1/2 | TH-2 | 2376 | - | - | - | 99,5 | 130 | 30,5 | 15,5 | 1,97 | 2-6 | 65 | 25 | 6 1/4 | 65 | 1660 | 1,06-1,14 | T-3 | B-5 | I | | |
| 3 | SMF | 17 1/2 | TH-3 | 2372 | - | - | - | 131,5 | 165 | | 18,5 | 1,81 | 2-6 | 65 | 35 | 6 1/4 | 70 | 1860 | 1,16 | T-3 | B-5 | 1 mm | | |
| 4 | SMF | 17 1/2 | TH-3 | 2373 | - | - | - | 165 | 206 | 41 | 28,5 | 1,44 | 2-8 | 55-70 | 35 | 6 1/4 | 70 | 1860 | 1,15-1,16 | T-4 | B-8 | I | | |
| 5 | SMF | 17 1/2 | TH-2 | 2575 | - | - | - | 206 | 235 | 29 | 20,5 | 1,41 | 2-8 | 50-65 | 30 | 6 1/4 | 70 | 1860 | 1,16 | T-4 | B-6 | I | | |
| 6 | SMF | 17 1/2 | TH-2 | 2573 | - | - | - | 235 | 267,5 | 32,5 | 25 | 1,3 | 2-6 | 45-50 | 35 | 6 1/4 | 70 | 1860 | 1,16 | T-4 | B-5 | I | | |
| 7 | SMF | 17 1/2 | TH-3 | 2371 | - | - | - | 268,5 | 310,5 | 48 | 30,5 | 1,4 | 6-9 | 40-45 | 30 | 6 3/4 | 70 | 2100 | 1,16 | T-4 | B-3 | 2 mm | | |
| 8 | SMF | 17 1/2 | TH-2 | 2577 | - | - | - | 310,5 | 341,5 | 31 | 22 | 1,41 | 6-8 | 45-50 | 30 | 6 3/4 | 70 | 2100 | 1,16 | T-1 | B-4 | I | | |
| 9 | HUGH | 12 1/4 | JD-8 | HA 085 | 14 | 14 | 14 | 345,5 | 389 | 53,5 | 36,5 | 1,46 | 6-8 | 45 | 65 | 6 3/4 | 62 | 1550 | 1,16 | T-1 | B-1 | I | | |
| 10 | DIAMOND BOART | 8 15/32 | CB 201 | 7080081 | | | | 3 | 341,5 | 345,5 | 4 | 2 | 2 | 2-6 | 65 | 30 | 6 3/4 | 30 | 900 | 1,16 | | | | CORE RECOVERY 3,0m |
| | | | | | | | | 1 | 130 | 131,5 | 1,5 | 2 | 0,75 | 2-6 | 70 | 30 | 6 1/4 | 40 | 950 | 1,16 | | | | 1,5m |
| | | | | | | | | 2 | 267,5 | 268,5 | 1 | 2 | 0,6 | 2-6 | 100 | 40 | 6 1/4 | 44 | 1150 | 1,16 | | | | - |
| | | | | | | | | 4 | 399 | 402 | 3 | 2 | 1,5 | 2-8 | 110 | 45 | 6 3/4 | 48 | 1440 | 1,15 | implicable | | | 1,3m |
| | | | | | | | | | | 9,5 | 8 | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | 17 1/2 | | | 22 | 22 | 22 | 374 | 341,5 | 32,5 | 21 | 1,35 | 2-4 | 50 | 28 | 6 3/4 | 65 | 1800 | 1,15 | T-2 | B-3 | I | HOLE EPENER | |
| 12 | | 17 1/2 | | | 22 | 22 | 22 | 399 | 374 | 25 | 18 | 1,4 | 3-4 | 75 | 28 | 6 3/4 | 65 | 1800 | 1,15 | T-3 | B-5 | 2mm | HOLE EPENER | |
| 13 | HUGH | 12 1/4 | JD-8 | M 035 | 14 | 14 | 14 | 342 | 399 | 57 | 84,35 | 1,5 | 6-10 | 50-70 | | 6 3/4 | 60 | 1800 | 1,18 | T-5 | B-1 | 2mm | | |
| 14 | HUGH | 12 1/4 | J-44 | XK 348 | 18 | 18 | 18 | 500 | 609 | 109 | 24,8 | 4,3 | 6-8 | 40 | 65 | 6 3/4 | 66 | | 1,16 | T-1 | B-1 | I | | |
| 15 | REED | 12 1/4 | S216 | NPG 362 | 18 | 18 | 18 | 609 | 700 | 91 | 23,6 | 4,2 | 3-6 | 60 | 60 | 6 3/4 | 70 | 2200 | 1 | T-6 | | I | | |
| 16 | REED | 12 1/4 | S216 | NPG 362 | 18 | 18 | 18 | 700 | 814 | 114 | 35,8 | 3,2 | 5 | 55 | 60 | 6 3/4 | 68 | 2050 | 1 | T-6 | B-8 | 10mm | | |
| 17 | REED | 12 1/4 | S216 | NPG 364 | 18 | 18 | 18 | 814 | 903 | 89 | 28,1 | 3,1 | 5 | 55 | 60 | 6 3/4 | 68 | 2050 | 1 | T-8 | B-8 | 45mm | | |

| Α/Α | ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ | ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ | ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΤΙΚΟΥ | ΣΕΙΡΙΑΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ | ΑΚΡΟΦΥΣΙΑ | | | ΒΑΘΟΣ | | FOOT AGE | ΧΡΟΝΟΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ | ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ (ft/hr) | ΒΑΡΟΣ ΕΠΙ ΤΟΥ ΚΟΠΤΙΚΟΥ (t) | ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ (rpm) | ΠΙΕΣΗ ΛΑΣΠΗΣ | UNERS | STROKE | ΠΑΡΟΧΗ (L/min) | ΒΑΡΟΣ ΛΑΣΠΗΣ (Kg/lt) | ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΟΠΤΙΚΟΥ | | | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ |
|-----|---------------|-----------|----------------|-------------------|-----------|------|----|------------------------------|----------------------------|----------|------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------|-------|--------|----------------|----------------------|--------------------|-----|------|----------------------------------|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | IN | OUT | | | | | | | | | | | T | B | G | |
| | | (mm) | | | (mm) | (mm) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | REED | 12 1/4 | S216 | NPG 361 | 18 | 18 | 18 | 418 694 | 437 814 | 423 | 60 | 8,45 | 1 | 50 | 50 | 7 1/4 | 60 | 2500 | 1,16 | T-8 | B-8 | 40mm | REDRILLING |
| 19 | REED | 12 1/4 | S216 | NPG 360 | 18 | 18 | 18 | 413 694 | 453 713 | 298 | 32 | 9,31 | 1 | 50 | 50 | 7 1/4 | 60 | 2800 | 1,14 | T-2 | B-2 | 2mm | REDRILLING |
| | | | | | | | | 811 675 | 870 855 | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | REED | 12 1/4 | S216 | | 18 | 18 | 18 | | | 19 | 1 | 19 | 1 | 50 | 50 | 7 1/4 | 60 | 2800 | 1,14 | T-1 | B-1 | | REDRILLING |
| 21 | DKG | 8 1/2 | R-2 | 42150 | - | - | - | 764 851 | 826 903 | | | | 1 | 60 | 50 | 7 1/4 | 65 | 2500 | | T-3 | B-3 | | REDRILLING |
| 22 | DKG | 8 1/2 | R-2 | 42165 | - | - | - | CONTROLLING CASING TILL 74m | | | | | | | | | | | T-1 | B-1 | | | |
| 23 | DKG | 8 1/2 | R-2 | 42154 | - | - | - | CONTROLLING CASING TILL 300m | | | | | | | | | | | T-1 | B-1 | | | |
| 24 | SMF | 8 1/2 | EM-2 | 20048 | 16 | 16 | 16 | 888 | 899 | | | | 1-2 | 60 | 50 | 7 1/4 | 70 | 2800 | WATER | T-3 | B-3 | | REDRILLING |
| 25 | DKG | 8 1/2 | M-1 | 148235 | - | - | - | 46-78 81-88 | 609- 696 288- 903 | | | | 3-4 | 55 | 50 | 7 1/4 | 60 | 2400 | WATER | T-4 | B-3 | | DRILLINGCEMENT PLUSREDRILLING |
| 26 | SMF | 8 1/2 | TM-8 | 12274 | - | - | - | 903 | 930 | 27 | 9,4 | 2,8 | 4-6 | 60 | 60 | 7 1/4 | 65 | 2600 | WATER | T-8 | B-3 | | |
| 27 | SMF | 8 1/2 | TM-8 | 12280 | - | - | - | 930 | 958 | 28 | 8,5 | 3,3 | 5-6 | 60 | 55 | 7 1/4 | 65 | 2600 | WATER | T-5 | B-3 | | |
| 28 | SMF | 8 1/2 | TM-8 | 12273 | - | - | - | 958 | 992 | 34 | 10,5 | 3,2 | 5-6 | 55 | 55 | 7 1/4 | 60 | 2400 | WATER | T-8 | B-4 | | |
| 29 | SMF | 8 1/2 | TM-8 | 11595 | - | - | - | 992 | 1040 | 48 | 11 | 4,3 | 5-6 | 55 | 58 | 7 1/4 | 55 | 2200 | WATER | T-8 | B-4 | | |
| 30 | SMF | 8 1/2 | TM-8 | 11594 | - | - | - | 1040 | 1077 | 37 | 9 | 4,1 | 6 | 55 | 55 | 7 1/4 | 60 | 2400 | WATER | T-7 | B-4 | | |
| 31 | SMF | 8 1/2 | TM-8 | 11901 | - | - | - | 1077 | 1099,5 | 22,5 | 9 | 2,5 | 6 | 50 | 60 | 7 1/4 | 60 | 2400 | WATER | T-7 | B-4 | | |
| 32 | SMF | 8 1/2 | TM-8 | 12271 | - | - | - | 1075 | 1099,5 | | | | 1-2 | 50 | 60 | 7 1/4 | 60 | 2400 | WATER | T-1 | B-1 | | REDRILLING |
| 33 | SMF | 8 1/2 | TM-8 | 12272 | - | - | - | 1099,5 | 1121 | 21,5 | 9 | 2,3 | 6 | 60 | 60 | 6 1/4 | 60 | 1600 | WATER | T-7 | B-3 | | |
| 34 | REED | 8 1/2 | YC20 | OWM 188 | - | - | - | 1121 | 1151 | 30 | 8,5 | 3,5 | 6 | 40 | 50 | 6 1/4 | 60 | 1600 | WATER | T-1 | B-4 | | |
| 35 | SMF | 8 1/2 | TM-8 | 11896 | - | - | - | 1151 | 1172 | 21 | 8,5 | 2,4 | 6 | 55 | 50 | 6 1/4 | 60 | 1600 | WATER | T-5 | B-4 | | |

| Α/Α | ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ | ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ | ΤΥΠΟΣ ΚΟΠΤΙΚΟΥ | ΣΕΙΡΙΑΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ | ΑΚΡΟΦΥΣΙΑ | | | ΒΑΘΟΣ | | FOOT AGE | ΧΡΟΝΟΣ ΔΙΑΤΡΙΣΗΣ | ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΤΡΙΣΗΣ | ΒΑΡΟΣ ΕΠΙ ΤΟΥ ΚΟΠΤΙΚΟΥ | ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΤΡΙΣΗΣ | ΠΙΕΣΗ ΛΑΣΠΗΣ | UNERS | STROKE | ΠΑΡΟΧΗ | ΒΑΡΟΣ ΛΑΣΠΗΣ | ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΟΠΤΙΚΟΥ | | | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ |
|-----|---------------|-----------|----------------|-------------------|-----------|------|------|-------|------|----------|------------------|--------------------|------------------------|--------------------|--------------|-------|--------|--------|--------------|--------------------|---------|---|--------------|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | IN | OUT | | | | | | | | | | | T | B | G | |
| | | (in) | | | (mm) | (mm) | (mm) | | | | | (ft/hr) | (t) | (rpm) | | | | | | (L/min) | (Kg/lt) | | |
| 36 | SMF | 8 1/2 | TM-5 | 16711 | - | - | - | 1172 | 1180 | 8 | 1,5 | 5,3 | 6 | 60 | 60 | 6 1/4 | 64 | 1750 | WATER | T-4 | B-2 | | |
| 37 | SMF | 8 1/2 | TM-5 | 16716 | - | - | - | 1172 | 1180 | | | | 1-2 | 60 | 50 | 6 1/4 | 64 | 1750 | WATER | T-1 | B-1 | | |

4.2.4. Η γεώτρηση M-2 (Μήλος 2^η)

Η γεωθερμική γεώτρηση M2 έγινε και αυτή στην πεδιάδα της Ζεφυρίας. Η όρυξη άρχισε στις 16 Μαρτίου και τελείωσε την 1 Ιουλίου 1981, με τελικό βάθος 1381 m.

Η ακολουθία των πετρωμάτων που συναντήθηκαν κατά τη διάρκεια της όρυξης (**Σχήμα 4.11**) μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

0 – 15 m: αλλουβιακές αποθέσεις.

15 – 25 m: ηφαιστειακά ιζήματα.

25 – 145 m: πράσινο λάχαρ.

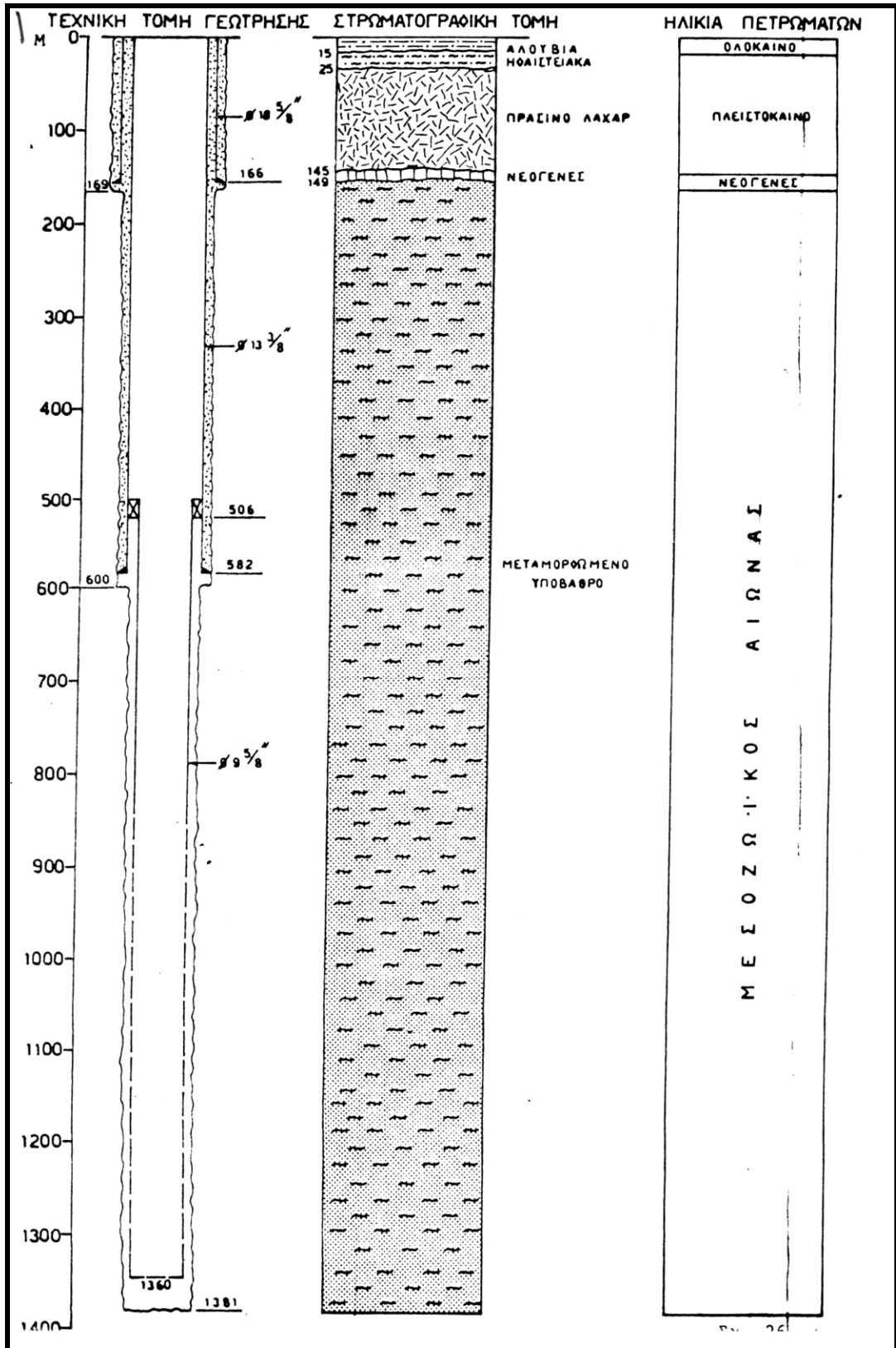
145 – 149 m: εμφάνιση του νεογενούς θαλασσίου κύκλου.

149 – 1381 m: μεταμορφωμένο υπόβαθρο.

Τα κύρια συστατικά του τμήματος των αλλουβιακών αποθέσεων είναι τεμάχια από το μεταμορφωμένο υπόβαθρο (που έχουν υποστεί μια καινούρια επεξεργασία, όπως αποστρογγύλωση), τεμάχια λάβας δακιτικής και ρυολιθικής σύστασης, κίσηρη, καθώς και άλλο ηφαιστειακό υλικό.

Σχετικά με τα ηφαιστειακά ιζήματα, διακρίνονται δύο λεπτά στρώματα. Το πρώτο στα 15 - 20 m, το οποίο αποτελείται από κίσηροτοφο περλίτη, και το δεύτερο στα 20 - 25 m, που είναι αργιλικής σύστασης, εξαλλοιωμένο, με μπεντονίτη.

Το τμήμα του πράσινου λάχαρ, από 25 μέχρι 145 m, μπορεί να χαρακτηριστεί σαν χαώδης σχηματισμός διάφορης λιθολογικής σύστασης. Μπορούν να διακριθούν μεταμορφωμένα πετρώματα, όπως σχιστόλιθοι, ακολουθούν τα ηφαιστειακά πετρώματα και ασβεστολιθικά, επίσης ορυκτά υδροθερμικής γένεσης, όπως γύψος, καολίνη, μπεντονίτη και σιδηροπυρίτης.



Σχήμα 4.11: Γεώτρηση M2 (Μήλος 2^η) (Πηγή: ΙΓΜΕ)

Ψαμμίτες και κροκαλοπαγή αποτελούν τις εμφανίσεις του νεογενή θαλάσσιου κύκλου. Διακρίνονται χαλαζιακοί ψαμμίτες που αποτελούνται κυρίως από χαλαζία και παρουσιάζουν διάφορες τάσεις διαγένεσης μέχρι ελαφριά μεταμόρφωση. Επίσης εμφανίζονται αργιλοψαμμίτες με κύρια συστατικά αστρίους, χαλαζία, σερικήτη, χλωρίτη και σπανιότερα με γύψο και οξείδια-υπεροξειδία του σιδήρου. Τα κροκαλοπαγή αποτελούνται από μικροκροκάλες ασβεστίτη, ψαμμίτη και διαφόρους σχιστόλιθους. Οι εμφανίσεις αυτές παρουσιάζουν ομοιότητα με τις ανάλογες εμφανίσεις του νεογενή κύκλου που βρίσκεται στο νότιο τμήμα του νησιού.

Τέλος, το μεταμορφωμένο υπόβαθρο παρουσιάζεται αρκετά ομογενές και σχηματίζεται από πετρώματα τα οποία έχουν υποστεί χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση. Αποτελείται, κυρίως, από διαφόρους τύπους σχιστολίθων με πολλές φλέβες ασβεστίτη και χαλαζία, με μεγάλη περιεκτικότητα σε σερικήτη, μοσχοβίτη και χλωρίτη.

Όσον αφορά την όρυξη της γεωθερμικής γεώτρησης M2, αυτή άρχισε με κοπτικό 24" και σωληνώθηκε με σωλήνες 18 ⁵/₈", μέχρι το βάθος των 166,80 m. Από τα 169 m μέχρι τα 600 m, το κοπτικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν 17 ¹/₂" και σωληνώθηκε με σωλήνες 13 ³/₈", μέχρι το βάθος των 582,30 m. Τέλος, από τα 600 m μέχρι το τέλος της γεώτρησης στα 1381 m, χρησιμοποιήθηκε κοπτικό 12 ¹/₂" και σωληνώθηκε με σωλήνες 9 ⁵/₈". Η κεφαλή του liner τοποθετήθηκε στα 506 m και τα 860 m, η σωλήνωση ήταν κανονική έως τα 860 m, και διάτρητη από τα 860 μέχρι τα 1360 m.

4.2.5. Η γεώτρηση M-3 (Μήλος 3^η)

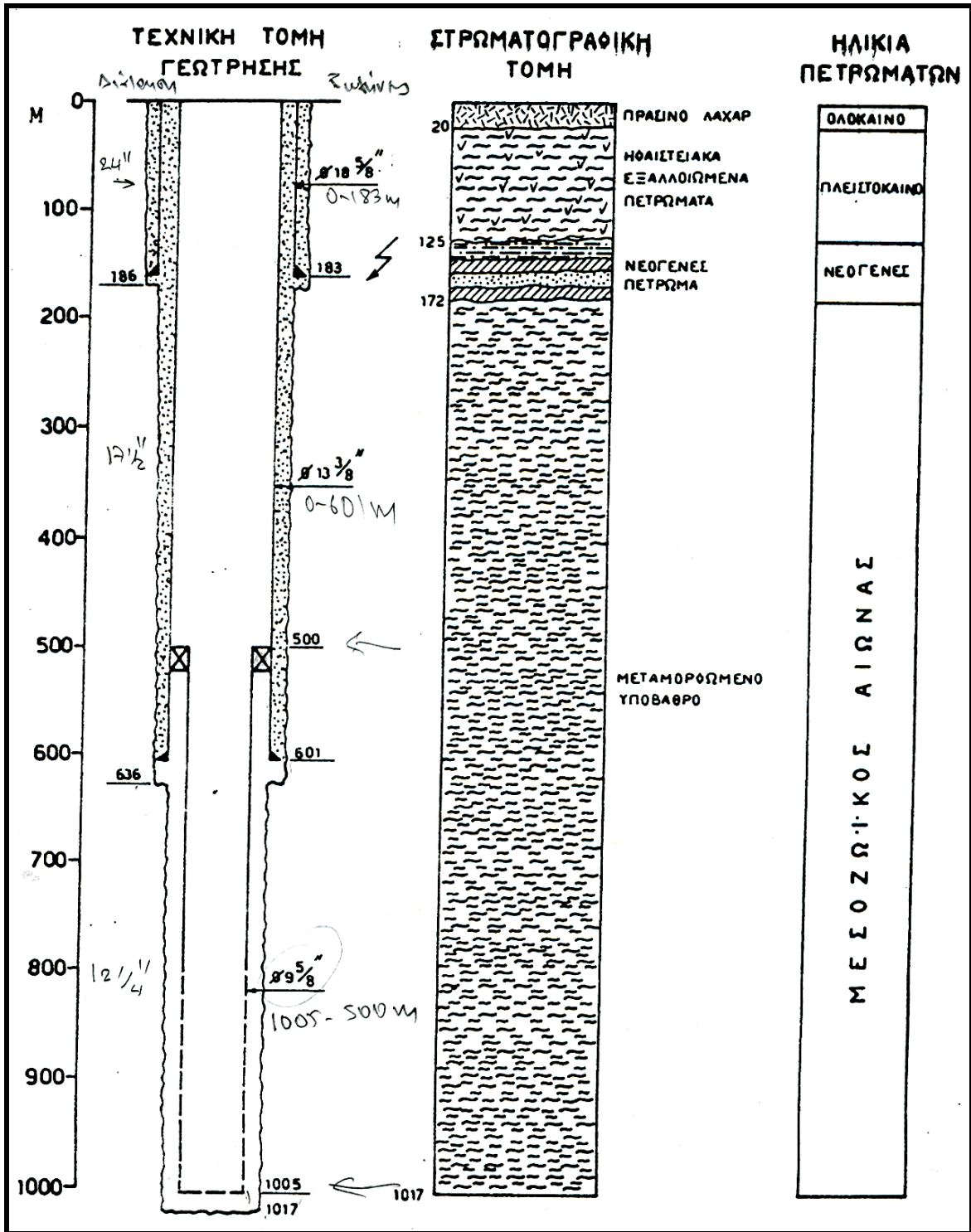
Η γεωθερμική γεώτρηση M3, όπως και οι προηγούμενες, βρίσκεται στην περιοχή της Ζεφυρίας. Η διάτρηση άρχισε στις 16 Ιουνίου και τελείωσε στις 15 Νοεμβρίου 1981. Το τελικό βάθος της γεώτρησης είναι 1017 m και το υψόμετρο είναι 102 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Ο ταμιευτήρας της M3 αρχίζει από τα 812 m με την πρώτη εμφάνιση του επιδότου $[Ca_2 (Fe,Al) Al_2 (O/OH/SiO_4/Si_2O_7)]$. Το επίδοτο σχηματίζεται κατά τη μεταμόρφωση και βρίσκεται σε μεταμορφωμένα πετρώματα, είναι δε γεωθερμόμετρο υψηλής θερμοκρασίας. Τα παραγωγικά τμήματα της γεώτρησης συμπίπτουν με την παρουσία του επιδότου, την υπερχειλίση και τη μεγαλύτερη ταχύτητα διάτρησης. Τα παραπάνω εμφανίζονται λόγω ρωγμάτωσης του ταμιευτήρα, κυκλοφορίας νερού και υψηλής θερμοκρασίας.

Κατά την όρυξη της M3 συναντήθηκαν οι παρακάτω στρωματογραφικές ενότητες (**Σχήμα 4.12**):

- 0 – 20 m: πράσινο λάχαρ.
- 20 – 125 m: ηφαιστειακά εξαλλοιωμένα πετρώματα.
- 125 – 172 m: νεογενές πέτρωμα.
- 172 – 1017 m: μεταμορφωμένο υπόβαθρο.

Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.12**, από τα 0 m μέχρι τα 186 m, η όρυξη έγινε με κοπτικό 24" και σωληνώθηκε με 18⁵/₈" , μέχρι βάθους τα 183,40 m. Από τα 186 m μέχρι τα 636,50 m ορύχθηκε με κοπτικό 17¹/₂" και σωληνώθηκε με 13³/₈". Τέλος, από τα 636,50 m μέχρι τα 1017 m ορύχθηκε με κοπτικό 12¹/₄" και σωληνώθηκε.

Η σωλήνωση liner που τοποθετήθηκε στα 500 m ήταν διαμέτρου 9⁵/₈". Έως τα 800 m η σωλήνωση liner ήταν κανονική, ενώ από τα 800 έως τα 1005 m ήταν διάτρητη.



Σχήμα 4.12: Γεώτρηση M3 (Μήλος 3^η) (πηγή: ΙΓΜΕ)

Κατά τη διάρκεια της διάτρησης έγιναν οι ακόλουθες θερμομετρήσεις:

Στα 912 m, θερμοκρασία 66,25°C (EXTRAPOLATION 125°)

Στα 619 m, θερμοκρασία 250°C (EXTRAPOLATION 250°)

Στα 937 m, θερμοκρασία 266°C.

Τα θερμοκρασιακά προφίλ κατά τη διάρκεια της όρυξης και μετά το πέρας αυτής παρουσιάζονται παρακάτω:

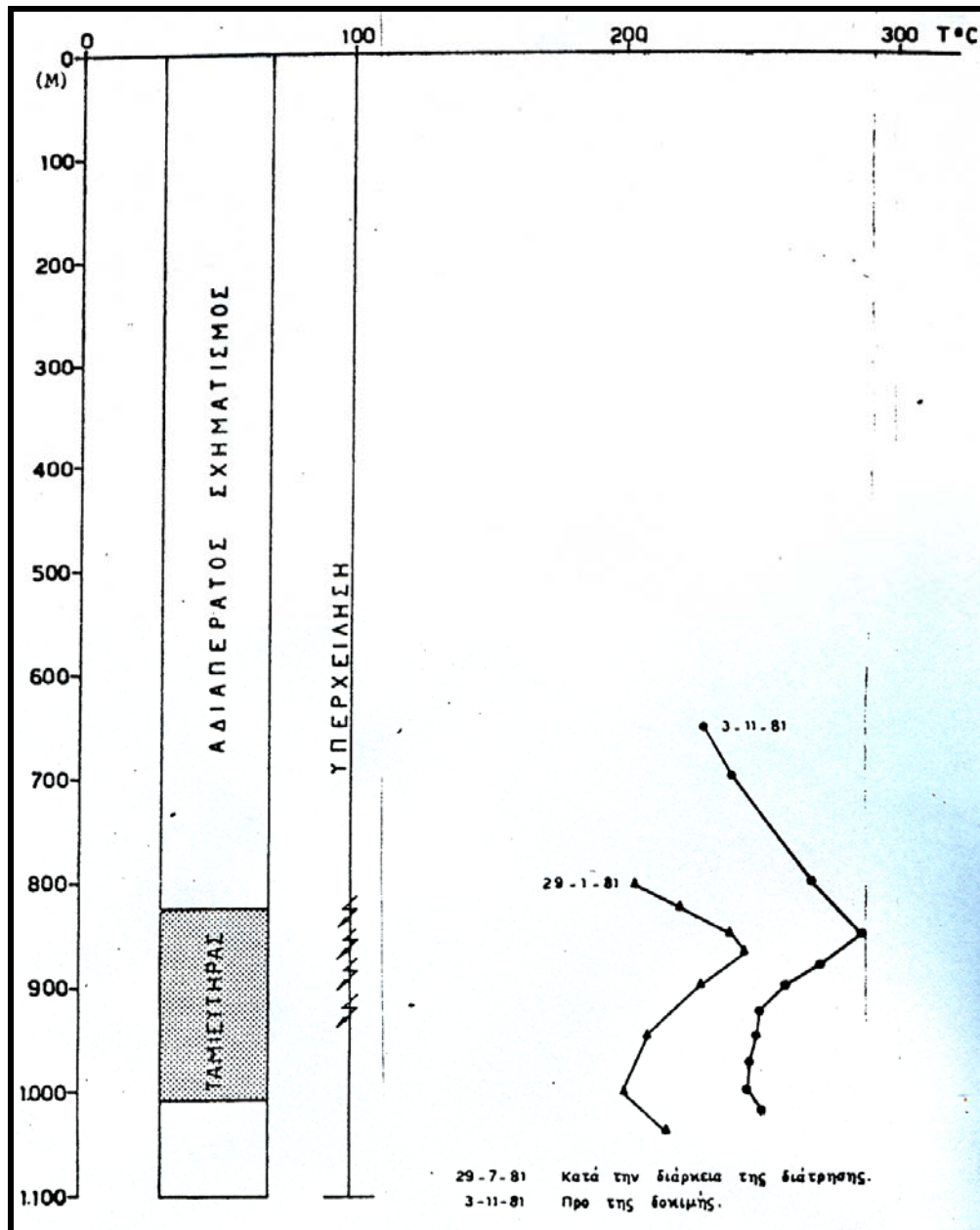
- Θερμομέτρηση της 27^{ης} Οκτωβρίου 1981

| Βάθος (m) | Θερμοκρασία (° C) |
|------------------|--------------------------|
| 800 | 204,86 |
| 850 | 239,16 |
| 900 | 232,81 |
| 950 | 210,40 |
| 1000 | 202,70 |
| 1006 | 214 |

- Θερμομέτρηση της 3^{ης} Νοεμβρίου 1981-Μετά το τέλος της όρυξης:

| Βάθος (m) | Θερμοκρασία (° C) |
|------------------|--------------------------|
| 600 | 228,22 |
| 700 | 239,86 |
| 800 | 261,09 |
| 850 | 287,28 |
| 900 | 259,30 |
| 925 | 280,03 |
| 950 | 249,52 |
| 1000 | 246,10 |
| 1006 | 253,22 |

Συγκεντρωτικά, οι παραπάνω πίνακες αποτυπώνονται πιο παραστατικά στο **Σχήμα 4.13**, ενώ μετρήσεις πίεσης δεν έγιναν κατά τη διάρκεια της όρυξης.



Σχήμα 4.13: Θερμοκρασίες στη γεώτρηση M3 (πηγή: ΙΓΜΕ)

Μελετώντας τους παραπάνω πίνακες που παρουσιάζουν τις θερμοκρασίες σε διάφορα βάθη, κατά τη διάρκεια της όρυξης και μετά το πέρας αυτής, διαπιστώνετε ότι υπάρχει μία απόκλιση στις τιμές της θερμοκρασίας για τα αντίστοιχα βάθη. Για παράδειγμα, για το βάθος των 800 m, η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της όρυξης ήταν 204,86 °C, ενώ μετά το πέρας αυτής, η θερμοκρασία για το ίδιο βάθος ήταν 261,09 °C. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στην κυκλοφορία του πολφού. Ο πολφός κατά την κάθοδό του στον πυθμένα θερμαίνεται. Όσο μεγαλύτερη η απόσταση που διανύει (μεγαλύτερο το βάθος της γεώτρησης) τόσο περισσότερο θερμαίνεται, καθώς κυκλοφορεί μέσα από θερμότερες ζώνες. Έτσι, η τιμή της θερμοκρασίας που μετράται κατά την όρυξη σε ένα ορισμένο

βάθος είναι σαφώς μικρότερη από την τιμή που μετράται στο ίδιο βάθος σε επόμενη χρονική στιγμή όταν η γεώτρηση έχει προχωρήσει πολύ βαθύτερα.

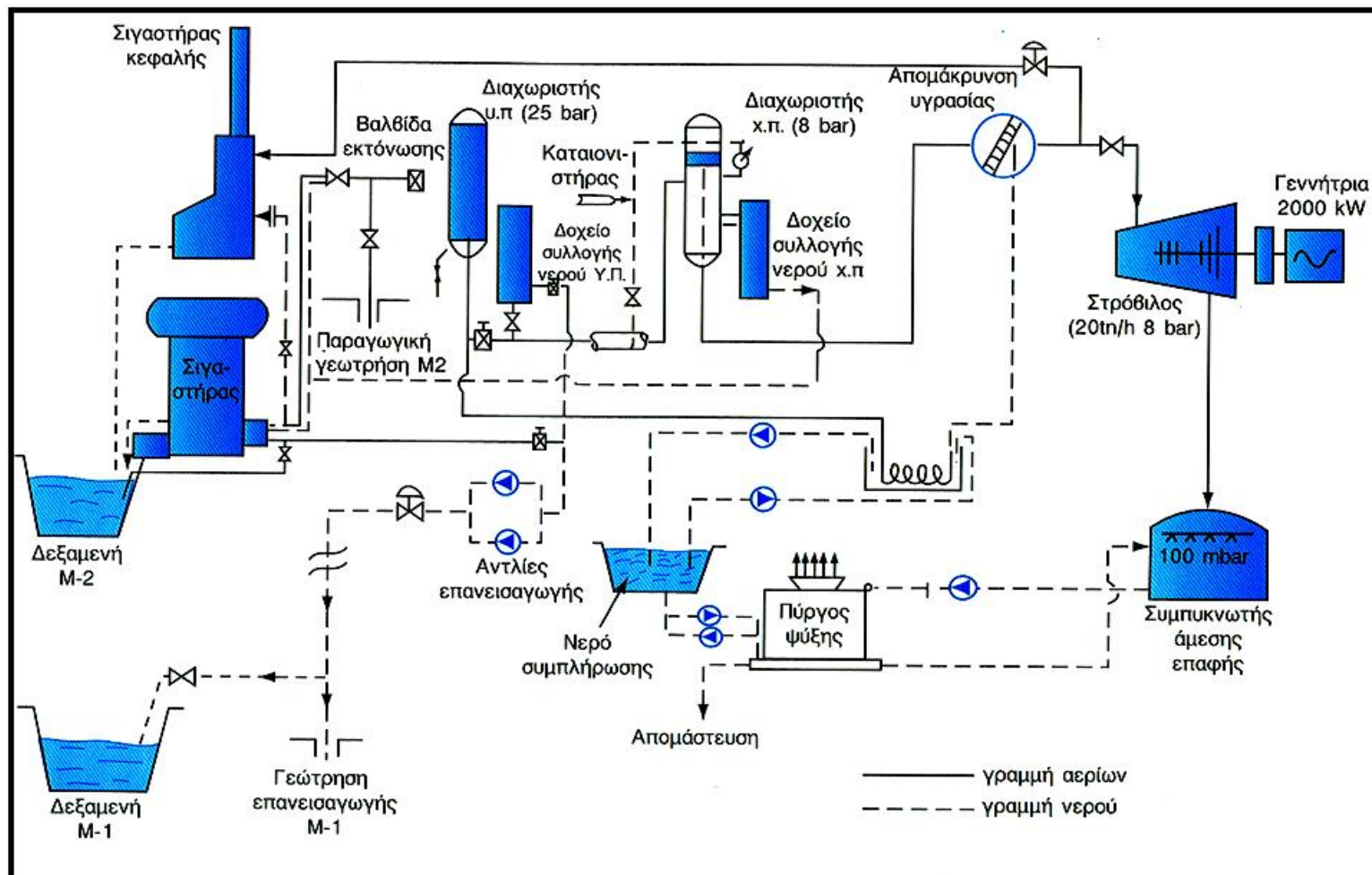
Η θερμομέτρηση γίνεται, γενικά, με τον εξής τρόπο:

Σε πρώτη φάση η διάτρηση σταματάει για τουλάχιστον δώδεκα (12) ώρες, προκειμένου η γεώτρηση να έρθει κατά το δυνατόν σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον της. Στη συνέχεια κατεβαίνει το θερμόμετρο και μετρείται η θερμοκρασία. Με την πάροδο όμως του χρόνου και όσο η γεώτρηση πλησιάζει σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον της, η θερμοκρασία αυξάνεται. Καθώς περνάει ο χρόνος και σταματάει η κυκλοφορία του πολφού, ο πολφός θερμαίνεται και τείνει να πάρει τη θερμοκρασία του ταμειυτήρα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η θερμοκρασία που δείχνει το θερμόμετρο.

4.2.6. Η γεωθερμική μονάδα της Μήλου

Το 1984, ύστερα από σχετικό διαγωνισμό, υπογράφηκε μεταξύ της ΔΕΗ και της εταιρίας Mitsubishi Heavy Industries σύμβαση για την κατασκευή πρόδρομης μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 2 MWe, τύπου εκτόνωσης διαφασικού ρευστού με συμπυκνωτή και πύργο ψύξης. Ο σχεδιασμός της μονάδας έγινε με βάση τις προκαταρκτικές αναλύσεις των γεωθερμικών ρευστών. Η κατασκευή της μονάδας περατώθηκε στις αρχές του 1986. Ο σχεδιασμός προέβλεπε τον διαχωρισμό του γεωθερμικού ρευστού σε κυκλωνικό διαχωριστή σε πίεση 8 bar. Ο κορεσμένος ατμός θα οδηγείτο στον αμοστρόβιλο, ενώ η υγρή φάση θα επανεισάγετο στον ταμειυτήρα.

Η μονάδα αντιμετώπισε από την αρχή προβλήματα λόγω δημιουργίας επικαθίσεων στη βαλβίδα εκτόνωσης και στις κατάντη επιφανειακές εγκαταστάσεις. Οι επικαθίσεις αποτελούνταν από θειούχα άλατα βαρέων μετάλλων και πυριτικές επικαθίσεις. Οι τελευταίες επικαθίσεις περιορίστηκαν σημαντικά με την αλλαγή των συνθηκών της εκτόνωσης του γεωθερμικού ρευστού, από τα 8 bar στα 25 bar. Σχηματικό διάγραμμα της μονάδας μετά τις τροποποιήσεις παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.14**, ενώ φωτογραφία της μονάδας παρατίθεται στο **Σχήμα 4.15**. Για την επανεισαγωγή της υγρής φάσης (σε συνθήκες 220°C, 25 bar) χρησιμοποιήθηκε η γεώτρηση M1, η οποία βρίσκεται σε απόσταση 1350 m από την παραγωγική γεώτρηση M2. Φωτογραφία τμήματος του αγωγού επανεισαγωγής με διάμετρο 5" ($\Phi 127$ mm) παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.16**.



Σχήμα 4.14: Σχηματικό διάγραμμα της γεωθερμικής μονάδας της Μήλου

(Πηγή: Φυτίκας-Ανδρίτσος, 2004)



Σχήμα 4.15: Φωτογραφία της γεωθερμικής μονάδας της Μήλου (Πηγή: Φυτίκας, 2007)

Η μονάδα λειτούργησε για μικρά χρονικά διαστήματα μέχρι τις αρχές του 1989 (σύνολο λειτουργίας 9 μήνες), οπότε και σταμάτησε οριστικά ύστερα από τις έντονες διαμαρτυρίες των κατοίκων, εξαιτίας της οσμής των εκπομπών υδρόθειου στην περιοχή της Ζεφυρίας. Σημειώνεται ότι στην αρχική σύμβαση δεν υπήρχε η προδιαγραφή της απομάκρυνσης των εκπομπών υδρόθειου, αν και αναφέρεται ότι συνηθιζόταν την εποχή εκείνη όταν επρόκειτο για πρόδρομες μονάδες (Φυτίκας-Ανδρίτσος, 2004).

Τον Σεπτέμβριο του 1993, για άγνωστους μέχρι τώρα λόγους, υπήρξε αρχικά διαρροή θερμού νερού για περίπου μία εβδομάδα και κατόπιν διάρρηξη του τοιχώματος της παραγωγικής γεώτρησης M2 κάτω από το τσιμεντένιο δάπεδο. Η διάρρηξη του τοιχώματος είχε ως αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη εκτόξευση μεγάλων ποσοτήτων γεωθερμικών ρευστών στην ατμόσφαιρα για διάστημα ορισμένων εβδομάδων. Η επέμβαση έμπειρου τεχνικού προσωπικού περιόρισε αρχικά τη διαρροή και στη συνέχεια τσιμεντόωσε τη γεώτρηση σε βάθος 500 m (Bottai et al, 1995).



Σχήμα 4.16 Φωτογραφία του αγωγού επανεισαγωγής της Μήλου
(Πηγή: Φοτίκας-Ανδρίτσος, 2004)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Η γεώτρηση είναι μία κυλινδρική “τρύπα” μικρής διαμέτρου και μεγάλου μήκους. Το άνω τμήμα της γεώτρησης καλείται κεφαλή (head) και το κάτω πυθμένας (bottom hole). Οι γεωτρήσεις μπορούν να διακριθούν σε κεκλιμένες και κατακόρυφες. Μετά τη διάνοιξη της γεώτρησης, και επειδή απαιτείται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της να έχει σταθερά τοιχώματα, καταβιβάζεται εντός αυτής στήλη σωλήνων από χάλυβα (σωλήνωση - casing) και σταθεροποιείται στη θέση της με τσιμέντο με κατάλληλη τεχνική (cementing).

Οι γεωθερμικές γεωτρήσεις αποτελούν μια ιδιαίτερη κατηγορία γεωτρήσεων και απαιτούν ειδική τεχνική, η οποία διαφέρει σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε άλλες γεωτρήσεις. Οι μέθοδοι όρυξης των γεωθερμικών γεωτρήσεων είναι πρακτικά όμοιες με τις εφαρμοζόμενες μεθόδους στον τομέα των γεωτρήσεων υδρογονανθράκων. Απαιτείται όμως προσαρμογή της τεχνικής και του εξοπλισμού στην αντιμετώπιση των ειδικών συνθηκών που εμφανίζονται στα γεωθερμικά φρέατα.

Τα γεωτρύπανα είναι μεν μέσου βάθους, αλλά πρέπει να αντέχουν σε υψηλότερα φορτία από αυτά που αντιστοιχούν στον τύπο αυτών των γεωτρύπανων, όταν χρησιμοποιούνται στον τομέα του πετρελαίου. Λαμβάνοντας υπόψη τη σταθερότητα του εδάφους γύρω από το φρέαρ, απαιτούνται έργα συμπίκνωσης για τη μείωση του ενδεχομένου κινδύνου από την εκτόνωση ατμού ή αερίου από μικρό βάθος. Η επιλογή της σωστής τεχνικής διάτρησης σε μια γεωθερμική γεώτρηση εξαρτάται από τους γεωλογικούς σχηματισμούς, το βάθος και τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα. Αρχικά αξιολογούνται τα γεωλογικά, γεωφυσικά κ.λπ. δεδομένα της περιοχής. Βάσει αυτών πρέπει να προσεγγίζονται τα βάθη και τα χαρακτηριστικά (ρωγματώσεις, υδροπερατότητα, αντοχή στη θλίψη κ.λπ.) των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών που θα διατηρηθούν, καθώς και οι συνθήκες του γεωθερμικού ταμιευτήρα (πίεση, θερμοκρασία, είδος ρευστών κ.λπ.).

Για τον εντοπισμό και την οριοθέτηση των γεωθερμικών ταμιευτήρων, καθώς και για την εκμετάλλευση του γεωθερμικού πεδίου απαιτείται, η εκτέλεση γεωτρήσεων. Με βάση τη σκοπιμότητα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους οι γεωτρήσεις διακρίνονται σε γεωτρήσεις *έρευνας, παραγωγής και επανεισαγωγής*.

Οι *ερευνητικές γεωτρήσεις* στοχεύουν στη γεωλογική καταγραφή των σχηματισμών, στην πλήρη γνώση των θερμικών παραμέτρων, στον εντοπισμό του βάθους, πάχους και έκτασης του γεωθερμικού ταμιευτήρα, στον προσδιορισμό του χημισμού των ρευστών και στην εκτίμηση των υδραυλικών παραμέτρων του ταμιευτήρα και των ποιοτικών και ποσοτικών στοιχείων των ρευστών.

Οι *παραγωγικές γεωτρήσεις* εκτελούνται για την άντληση των γεωθερμικών ρευστών με σκοπό την αξιοποίησή τους. Επιβεβαιώνεται η ύπαρξη των ταμιευτήρων και προσδιορίζονται τα φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά των ρευστών και οι υδροδυναμικές και οι θερμοδυναμικές παράμετροι του πεδίου, υπολογίζεται το δυναμικό του κοιτάσματος, προσδιορίζεται η επιβαλλόμενη πυκνότητα των γεωτρήσεων και σχεδιάζεται και υλοποιείται η εκμετάλλευση. Τέλος, μετά τη θερμική αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών, και εφόσον το επιτρέπει ο χημισμός και η θερμοκρασία τους δεν δημιουργεί προβλήματα στο περιβάλλον, μπορεί να διοχετευτούν στο επιφανειακό σύστημα απορροής.

Στην περίπτωση όμως που ο χημισμός και η θερμοκρασία δημιουργούν προβλήματα στο περιβάλλον, τότε δεν είναι δυνατή η διοχέτευση των γεωθερμικών ρευστών στο επιφανειακό σύστημα απορροής. Η διάθεσή τους τότε γίνεται στην ευρύτερη περιοχή του γεωθερμικού ταμιευτήρα. Αυτό πραγματοποιείται με τις *γεωτρήσεις επανεισαγωγής*. Οι γεωτρήσεις αυτού του τύπου θα πρέπει να τοποθετούνται σε περιοχές με χαμηλή βαθμίδα πίεσης και μακριά από τα ρήγματα τροφοδοσίας.

Με τα πιο πάνω δεδομένα και το είδος της γεώτρησης (έρευνας, παραγωγής ή επανεισαγωγής) σχεδιάζεται το τεχνικό πρόγραμμά της που περιλαμβάνει:

- Τύπο γεωτρύπανου και παρελκόμενων
- Κοπτικά άκρα
- Πολφό

- Δειγματοληψία πυρήνων
- Διάμετροι γεώτρησης
- Σωλήνωση
- Τσιμέντωση
- Ανάπτυξη πεδίου
- Μετρήσεις και δοκιμές άντλησης.

Σε γεωτρήσεις μέσου βάθους, σε πεδία χαμηλής θερμοκρασίας, όπου τα ρευστά είναι μόνο νερό, χωρίς έντονο αρτεσιανισμό⁵ και αέρια (CO₂, H₂S, CH₄, κλπ), εφαρμόζεται γενικά η τεχνική διάτρησης των κλασικών υδρογεωτρήσεων. Αντίθετα, σε γεωτρήσεις χαμηλής, μέσης και υψηλής θερμοκρασίας (βάθος>1000m) εφαρμόζεται γενικά η τεχνική διάτρησης των γεωτρήσεων πετρελαίου. Η ιδιαιτερότητα τους ως προς τις γεωτρήσεις πετρελαίου έγκειται στις υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις, που αντιμετωπίζονται μέσω του κυκλώματος του πολφού διάτρησης και του συστήματος ασφάλειας (B.O.P) στην κεφαλή της γεώτρησης. Ο αντιεκρηκτικός μηχανισμός ασφαλείας B.O.P (Blow Out Preventer) λειτουργεί με υδραυλικό και χειροκίνητο σύστημα, στεγανοποιώντας τα διάκενα στελεχών διάτρησης και σωληνώσεων, ενώ οι κεντρικές και πλευρικές βαλβίδες (βάνες) διακόπτουν τη ροή των ρευστών. Τοποθετείται στην κεφαλή της γεώτρησης, πάνω στην τσιμεντωμένη σωλήνωση με φλάντζα στεγανοποίησης και μετά την εγκατάστασή του γίνονται δοκιμές ελέγχου σωστής λειτουργίας.

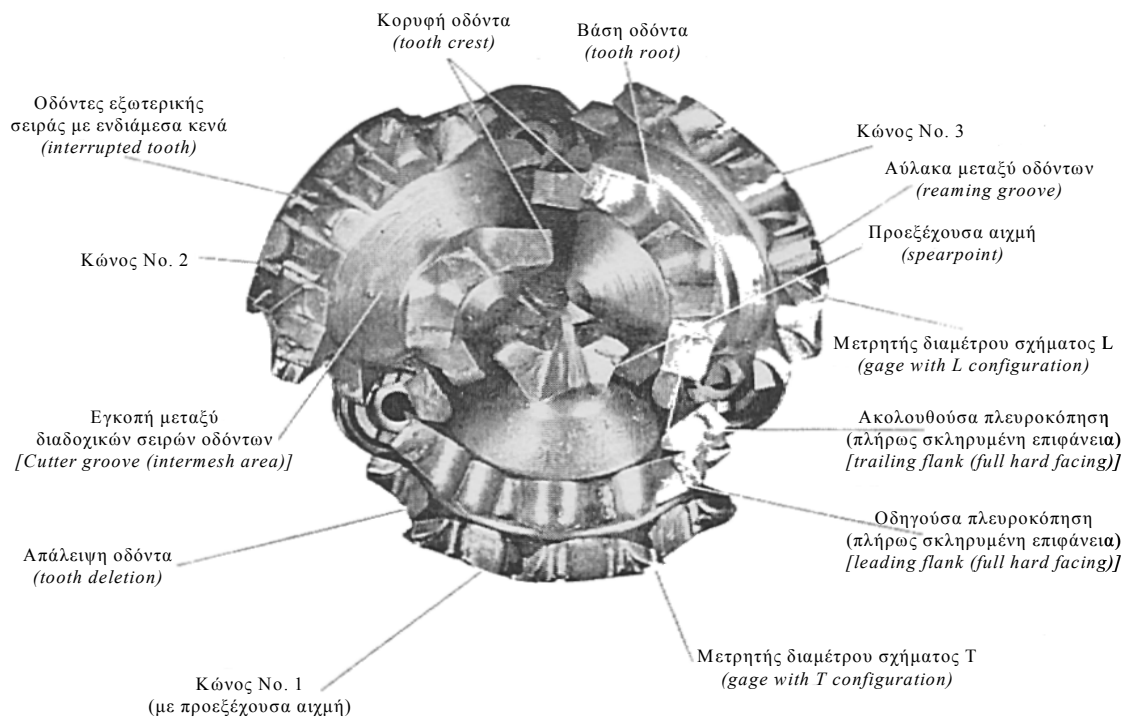
5.1. Επιλογή κοπτικού άκρου

Το **κοπτικό άκρο** αποτελεί την καρδιά της διατρητικής διαδικασίας. Το κοπτικό θραύει το πέτρωμα υπό τη συνδυασμένη δράση του βάρους που ασκείται επί αυτού και της περιστροφικής κίνησης. Το κοπτικό και η συνεργασία του με τη διατρητική στήλη (βάρος επί του κοπτικού, ευστάθεια και ακαμψία της κατώτερης συνδεσμολογίας), καθώς και η λάσπη διάτρησης (απομάκρυνση των θρυμμάτων, λίπανση και ψύξη του κοπτικού)

⁵ Αυτόματη ροή ρευστών με τη μορφή πίδακα.

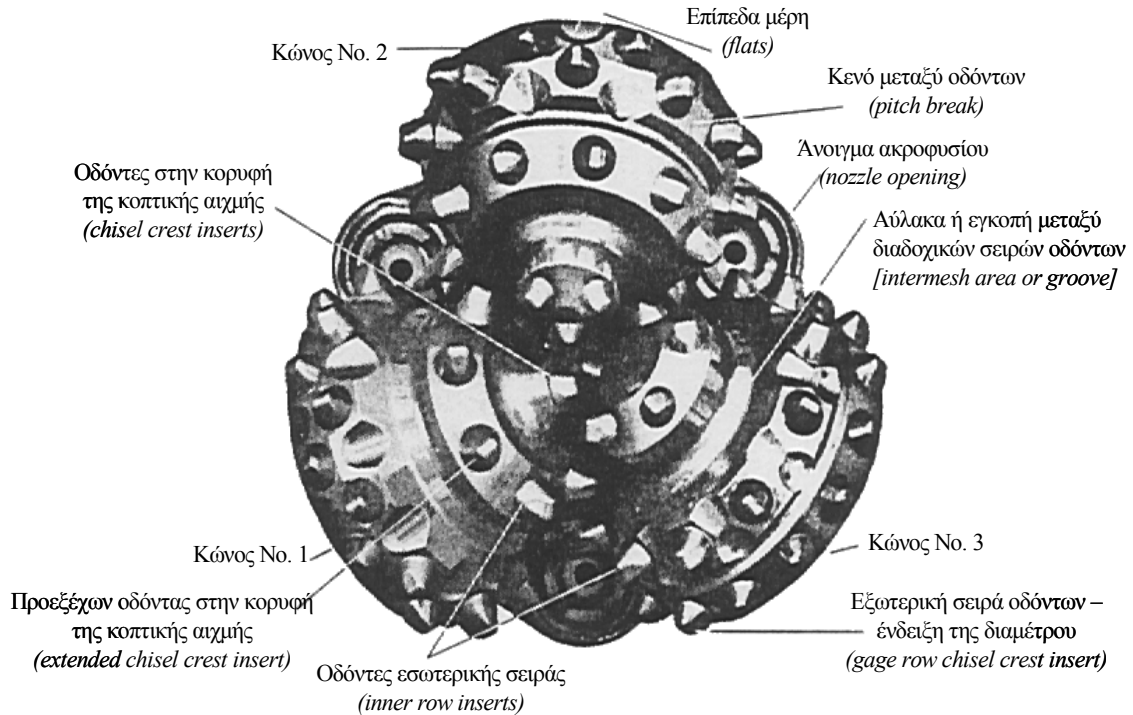
αποτελούν παράγοντες πρωτεύουσας σημασίας για την περιστροφική όρυξη γεωτρήσεων, γενικά.

Ο πιο ευρέως διαδεδομένος τύπος κοπτικού είναι το **τρίκωνο κοπτικό** (three cone bit) (Σχήματα 5.1 & 5.2). Το τρίκωνο κοπτικό περιλαμβάνει τρεις κώνους, καθένας από τους οποίους είναι προσαρμοσμένος πάνω σε ένα σκέλος, μέσω κατάλληλης διάταξης τριβέων (ρουλεμάν). Ο κάθε κώνος περιστρέφεται γύρω από έναν πείρο (pin) που αποτελεί προέκταση του σκέλους του κοπτικού. Τα τρία σκέλη είναι συγκολλημένα μεταξύ τους και σχηματίζουν την κυλινδρική άτρακτο του κοπτικού, που φέρει εξωτερικό σπείρωμα ώστε να βιδώνεται στο άκρο της διατρητικής στήλης. Κάθε σκέλος είναι εφοδιασμένο με ένα άνοιγμα (για την κυκλοφορία των ρευστών), το μέγεθος του οποίου μπορεί να μειωθεί με την προσαρμογή ακροφυσίων διαφορετικών μεγεθών. Τα ακροφύσια επιτρέπουν την έξοδο της λάσπης με μεγάλη ταχύτητα, ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματική απομάκρυνση των θρυμμάτων. Η λάσπη κυκλοφορεί μέσω της διατρητικής στήλης, περνάει μέσα από το άνοιγμα του κυλινδρικού στελέχους και μέσα από τα τρία ακροφύσια. Αν όλα τα ακροφύσια έχουν το ίδιο μέγεθος, καθένα παραλαμβάνει το ένα τρίτο της ποσότητας του ρευστού.



Σχήμα 5.1: Ονοματολογία τρίκωνων κοπτικών με ενσωματωμένους οδόντες (milled teeth bit)

(Πηγή: Σταματάκη, 2003)



Σχήμα 5.2: Ονοματολογία τρίκωνων κοπτικών με ένθετους οδόντες από καρβίδιο του βολφραμίου (tungsten carbide insert bit) (Πηγή: Σταματάκη, 2003)

Μεγάλη σημασία, επίσης, έχει η διάταξη των οδόντων σε κάθε κώνο και η σχέση των οδόντων των κώνων μεταξύ των. Οι εσωτερικές γραμμές των οδόντων τοποθετούνται σε κάθε κώνο με τρόπο που να επιτρέπεται να αλληλεμπλέκονται. Αυτό βοηθά στο να εξασφαλίζεται περισσότερη διαθέσιμη επιφάνεια για τον καλύτερο σχεδιασμό του κοπτικού, καλύτερος καθαρισμός και μεγαλύτερη κάλυψη στην επιφάνεια προσβολής από δεδομένο αριθμό οδόντων (από τα περισσότερα κοπτικά καλύπτεται το 70% της επιφάνειας προσβολής). Η εξωτερική σειρά οδόντων σε κάθε κώνο δεν αλληλεμπλέκεται. Αυτή η σειρά καλείται να επιτελέσει την πιο σκληρή εργασία. Λόγω της κυκλικής γεωμετρίας, περισσότερο πέτρωμα πρέπει να απομακρύνεται από τον εξωτερικό δακτύλιο του πυθμένα γεγονός δύσκολο, διότι το πετρώματα έχει την τάση να μένει προσαρτημένο στα τοιχώματα του πυθμένα. Κάποια από τα δόντια της εξωτερικής σειράς σχεδιάζονται με ενδιάμεσα κενά (interruption) που επιτρέπουν στο δόντι να δημιουργεί κατά την κοπή μικρότερα θρύμματα από το μέγεθος που θα αντιστοιχούσε στο κανονικό μέγεθος του δοντιού έτσι ώστε τα αυτά να μην ενσφηνώνονται μεταξύ των δοντιών.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό ενός τρίκωνου κοπτικού αφορούν στον τύπο και την σκληρότητα του σχηματισμού που ορύσσεται και τη διάμετρο της γεώτρησης. Η σκληρότητα του σχηματισμού υπαγορεύει τον τύπο και τις ιδιότητες του υλικού κατασκευής των οδόντων του κοπτικού.

Κατά την εκτέλεση γεωθερμικών γεωτρήσεων σε ιζηματογενείς σχηματισμούς συχνά απαιτήθηκε η αντιμετώπιση της πλαστικής αργίλου, που, εκτός των τεχνικών προβλημάτων διάτρησης, δημιουργεί και έντονα προβλήματα στη σωλήνωση και τσιμέντωση. Αναφέρεται γιατί έχει συναντηθεί σε αρκετά γεωθερμικά πεδία χαμηλής θερμοκρασίας στον Ελλαδικό χώρο και χαρακτηρίζεται ως ένα ειδικό πρόβλημα που χρειάζεται ιδιαίτερη αντιμετώπιση, ώστε πριν τη σωλήνωση και τσιμέντωση, η απομάκρυνση της πλαστικής αργίλου πρέπει να θεωρείται δεδομένη.

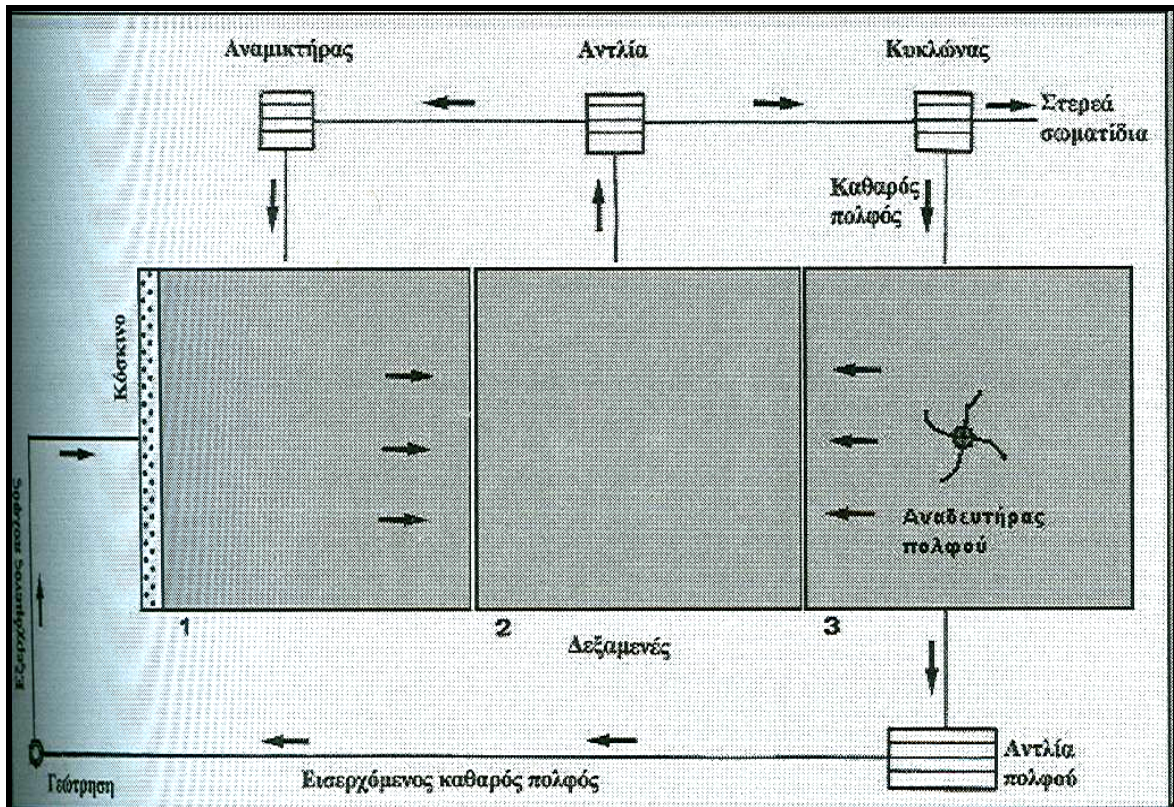
5.2. Πολφός διάτρησης γεωθερμικών γεωτρήσεων

Βασικός παράγοντας για την εκτέλεση μιας γεωθερμικής γεώτρησης είναι η κατάλληλη επιλογή και χρήση του πολφού (λάσπη - ρευστό διάτρησης). Ο πολφός χρησιμοποιείται για να εκτελέσει τις παρακάτω λειτουργίες:

- Καθαρισμό της γεώτρησης από τα θρύμματα διάτρησης και τη μεταφορά τους στην επιφάνεια.
- Δυνατότητα απομάκρυνσης των θρυμμάτων από τον πολφό πριν την επανεισαγωγή του στη γεώτρηση.
- Διατήρηση σε αιώρηση των θρυμμάτων μέσα στη γεώτρηση κατά την προσωρινή διακοπή της κυκλοφορίας του.
- Προστασία των τοιχωμάτων της γεώτρησης με τη δημιουργία επιχρίσματος, αποφεύγοντας τις καταπτώσεις ώστε να παραμείνει σταθερή η διάμετρός της.
- Καθαρισμό, ψύξη και λίπανση της διατρητικής στήλης και του κοπτικού άκρου και αποφυγή διάβρωσής τους.
- Έλεγχο των πιέσεων των ρευστών που υπάρχουν στους γεωλογικούς σχηματισμούς και των διαφόρων αερίων (CO₂, H₂S, CH₄ κ.λπ.).
- Δειγματοληψία των διατρυόμενων γεωλογικών σχηματισμών.

Βασική διεργασία αποτελεί επίσης, και ο καθαρισμός του πολφού από ανεπιθύμητα στερεά (θρύσματα) που αλλοιώνουν την σύστασή του. Συγχρόνως με τον καθαρισμό, επιτυγχάνεται και η προστασία από την φθορά του τμήματος του γεωτρητικού εξοπλισμού δια μέσου του οποίου διέρχεται, καθώς επίσης ελαττώνεται και το κόστος των εργασιών αφού δεν απαιτείται συχνή αντικατάστασή του.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του κυκλώματος του πολφού αποτελείται από αντλίες duplex ή triplex και φυγόκεντρες, κόσκινα, κυκλώνες, διαχωριστές αερίων, δεξαμενές, αναμικτήρες, πύργοι ψύξης κ.λπ. Στο **Σχήμα 5.3** που ακολουθεί φαίνεται η προτεινόμενη διάταξη λειτουργίας του κυκλώματος πολφού για γεωθερμικές γεωτρήσεις χαμηλής θερμοκρασίας. Τα αέρια διοξείδιο του άνθρακα και υδροθείο, όταν υπάρχουν στους γεωθερμικούς ταμιευτήρες, εισχωρούν στον πολφό και δημιουργούν προβλήματα διάβρωσης του γεωτρητικού εξοπλισμού. Με τη ρύθμιση του pH κατά περίπτωση και την αύξηση της υδροστατικής πίεσης του πολφού αποφεύγεται η απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων, χωρίς όμως πάντοτε να είναι αποτελεσματική η αντιμετώπισή τους.



Σχήμα 5.3: Προτεινόμενη διάταξη λειτουργίας του κυκλώματος πολφού για την όρυξη γεωθερμικών γεωτρήσεων χαμηλής θερμοκρασίας (Καρυδάκης, 2005)

5.2.1. Παράμετροι που επηρεάζουν τον πολφό διάτρησης

Ο πολφός διάτρησης χαρακτηρίζεται από τη *χημική σύσταση*, το *ιζώδες*, την *πυκνότητα* και την *ταχύτητα κυκλοφορίας* του κατά την άνοδό του στη γεώτρηση.

Το *ιζώδες* ενός ρευστού χαρακτηρίζει την αντίστασή του στην ροή. Το ιζώδες του πολφού επηρεάζει άμεσα τον καθαρισμό της γεώτρησης από τα θρύμματα, αλλά και τη δυνατότητα απομάκρυνσης των θρυμμάτων από τον πολφό με διαχωρισμό πριν την επανεισαγωγή του στη γεώτρηση.

Η *πυκνότητα* του πολφού βρίσκεται σε αντιστοιχία με το ιζώδες, όταν πρόκειται για μίγμα νερού και μπεντονίτη. Η αύξησή της επηρεάζει θετικά τον καθαρισμό της γεώτρησης και την προστασία της από την εισροή ρευστών από τους διατρυόμενους σχηματισμούς, αλλά αρνητικά την ταχύτητα διάτρησης λόγω της αύξησης της διαφορική πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης μεταξύ της υδροστατικής πίεσης του πολφού και της πίεσης του σχηματισμού. Επίσης δημιουργεί κίνδυνο έμφραξης των υδροπερατών σχηματισμών.

Όσον αφορά τη *χημική σύσταση*, ο πολφός που χρησιμοποιείται είναι μίγμα νερού και μπεντονίτη, με υλικά αύξησης της πυκνότητας του πολφού και ειδικά πρόσθετα. Το νερό είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε ιόντα Na, Ca και Mg (γλυκό νερό), ενώ σε περίπτωση αλμυρού νερού απαιτείται η προσθήκη πολυμερών. Ο μπεντονίτης βοηθά στην αύξηση του ιζώδους του πολφού και δευτερευόντως στη σχετική αύξηση της πυκνότητας. Τέλος, σε περιπτώσεις όπως: μεγάλα βάθη, τοξικά αέρια και υψηλές θερμοκρασίες (>90°C), χρησιμοποιούνται ειδικά πρόσθετα όπως: τα βελτιωτικά μπεντονίτη (κροκιδωτικά), τα κολλοειδή πολυμερή (CMC, άμυλα) κλπ.

Τέλος, η *ανοδική ταχύτητα κυκλοφορίας* του πολφού διάτρησης εντός της γεώτρησης επηρεάζει θετικά την απομάκρυνση των θρυμμάτων της διάτρησης, εξαρτάται άμεσα από τη διάμετρο της γεώτρησης, το είδος του πετρώματος, το μέγεθος των θρυμμάτων, έμμεσα από το βάθος της, το ιζώδες και την πυκνότητα του πολφού.

Σε 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 (ρευστό διάτρησης) μόνο νερό ή/ και αέρας (με αφριστικά).

5.2.2. Συστατικά του πολφού διάτρησης

Όπως προαναφέρθηκε, ο πολφός που χρησιμοποιείται στις γεωθερμικές γεωτρήσεις είναι μίγμα νερού και μπεντονίτη με υλικά αύξησης της πυκνότητας και ειδικά πρόσθετα. Ο μπεντονίτης, μίγμα διαφόρων ένυδρων αργιλοπυριτικών ορυκτών, είναι το βασικό πρόσθετο στο νερό για την δημιουργία πολφού κατάλληλου ιξώδους και πλακούντα στα τοιχώματα της γεώτρησης, ενώ βοηθά και στην αύξηση της πυκνότητας του πολφού. Μικρή αύξηση της πυκνότητας του πολφού με μπεντονίτη αυξάνει την τιμή του ιξώδους, δημιουργώντας έντονα προβλήματα στην ταχύτητα κυκλοφορίας του και στην όρυξη.

Ο τύπος υπολογισμού της απαιτούμενης ποσότητας μπεντονίτη ανά m^3 πολφού, για τον καθορισμό συγκεκριμένης πυκνότητας και επομένως ιξώδους, δίνεται από τη σχέση:

$$X_B = \frac{\rho_M - \rho_W}{\rho_B - \rho_M} \cdot \rho_B \cdot 1000$$

όπου: X_B : kg μπεντονίτη/ m^3 πολφού, που απαιτούνται,
 ρ_M : πυκνότητα πολφού (kg/l),
 ρ_W : πυκνότητα νερού (kg/l), και
 ρ_B : πυκνότητα μπεντονίτη (περίπου 2,5 kg/l).

Η αύξηση της πυκνότητας του πολφού επιτυγχάνεται με προσθήκη μπεντονίτη για τιμές 1,01-1,05 kg/l, αλλιώς απαιτείται προσθήκη υλικού αύξησης της πυκνότητας του πολφού. Η πυκνότητα του μπεντονίτη είναι περίπου 2,4-2,5 kg/l. Το πιο συνηθισμένο υλικό για την αύξηση της πυκνότητας του πολφού που χρησιμοποιείται στην ελληνική αγορά είναι η βαρυτίνη, με πυκνότητα 3,8 kg/l. Αλλά τέτοια υλικά αναφέρονται στον **Πίνακα 5.1** που ακολουθεί.

Πίνακας 5.1: Υλικά αύξησης της πυκνότητας του πολφού διάτρησης σε γεωθερμικές γεωτρήσεις

| Υλικά | Πυκνότητα (kg/l) |
|--------------|------------------|
| Βαρύτης | 4.2 |
| Αιματίτης | 5.2 |
| Ασβεστόλιθος | 2.7 |
| Άργιλος | 2.5 |
| Γύψος | 2.3 |

Ο τύπος υπολογισμού της απαιτούμενης ποσότητας του υλικού αύξησης πυκνότητας ανά 1 m³ πολφού για τον καθορισμό συγκεκριμένης πυκνότητας δίνεται από τη σχέση:

$$X_s = \frac{\rho_{M2} - \rho_{M1}}{\rho_s - \rho_{M2}} \cdot \rho_s \cdot 1000$$

- όπου: X_s: kg υλικού αύξησης της πυκνότητας ανά 1 m³ πολφού,
 ρ_{M1}: αρχική πυκνότητα πολφού (kg/l),
 ρ_{M2}: τελική πυκνότητα πολφού (kg/l), και
 ρ_s: πυκνότητα υλικού αύξησης της πυκνότητας του πολφού (kg/l).

5.3. Σωληνώσεις γεωθερμικών γεωτρήσεων

Η σωλήνωση είναι ουσιαστικά μια επένδυση της γεώτρησης από την επιφάνεια μέχρι τον πυθμένα, με πιθανή εξαίρεση τον ταμιευτήρα, όταν ο σχηματισμός είναι αρκετά σταθερός. Αποτελεί, όμως, καθοριστική παράμετρο για τη σωστή εκτέλεση και λειτουργία της γεώτρησης. Συνήθως η σωλήνωση γίνεται τμηματικά και εξαρτάται από τους σχηματισμούς που συναντώνται (χαλαροί, υδροφόροι κ.τλ.), τις τεχνικές ανάγκες, το βάθος της γεώτρησης και τις συνθήκες του γεωθερμικού ταμιευτήρα.

Η σκοπιμότητα των σωληνώσεων έγκειται:

- Στη συγκράτηση των χαλαρών τοιχωμάτων της γεώτρησης.
- Στην καλή κυκλοφορία του πολφού και στην αποφυγή των απωλειών του.

- Στη διακοπή επικοινωνίας του γεωθερμικού ταμιευτήρα με ανεπιθύμητους άλλους υδροφόρους και στην ασφάλεια της γεώτρησης από ανεξέλεγκτες διαρροές ρευστών, σε συνδυασμό με την απαραίτητη τσιμέντωσή της (στεγανοποίηση).
- Στη σωστή και ασφαλή άντληση των γεωθερμικών ρευστών, κυρίως σε συνθήκες έντονου αρτεσιανισμού αυτόματης ροής (με υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες) με την τοποθέτηση αντiekρηκτικού μηχανισμού ασφαλείας (B.O.P).
- Στην τοποθέτηση φιλτροσωληνώσεων για τη ροή των ρευστών από τον ταμιευτήρα στη γεώτρηση, χωρίς υδραυλική αντίσταση και επομένως, σωστή εκμετάλλευση.
- Και στην ασφαλή τοποθέτηση του αντiekρηκτικού εξοπλισμού (B.O.P) στην κεφαλή της γεώτρησης.

Η τοποθέτηση των σωληνώσεων γίνεται με τη βαρύτητα, αποφεύγοντας την περιστροφή και την πίεση, εκτός αν η ποιότητά τους το επιτρέπει. Αρκετά μέτρα κάθε σωλήνωσης κοχλιώνονται και συγκολλούνται συγχρόνως, λόγω της αυξημένης καταπόνησης που υφίστανται. Τα συνολικά μέτρα της σωλήνωσης μιας γεώτρησης είναι συχνά αρκετά περισσότερα από το βάθος της, επομένως απαιτείται προσεκτική επιλογή του αριθμού και της διαμέτρου των τμηματικών σωληνώσεων για τη αποφυγή αυξημένου κόστους. Η επιλογή της διαμέτρου των σωληνώσεων εξαρτάται από τον εκμεταλλεύσιμο ρυθμό άντλησης, τη διάμετρο του αντλητικού συγκροτήματος, τα χαρακτηριστικά του αντλούμενου γεωθερμικού ρευστού και την πιθανή ανάγκη τοποθέτησης χαλικόφιλτρου. Καθορίζεται και από τους νόμους της ρευστοδυναμικής και ειδικά της διφασικής ροής ρευστών σε κατακόρυφους αγωγούς.

Η αύξηση της διαμέτρου της γεώτρησης και συνεπώς της σωλήνωσης δεν είναι ευθέως ανάλογη του ρυθμού άντλησης. Η διαφορά διαμέτρων γεώτρησης-σωλήνωσης εξαρτάται από το βάθος (αυξάνει), τη σταθερότητα των σχηματισμών (χαλαροί και μη), την κατακορυφότητα και την ευθυγραμμία της γεώτρησης, την ανάγκη τσιμέντωσης και την τοποθέτηση χαλικόφιλτρου.

5.3.1. Κατηγορίες σωληνώσεων

Οι κατηγορίες των σωληνώσεων που χρησιμοποιούνται στις γεωθερμικές γεωτρήσεις είναι:

Μεταλλικές σωληνώσεις: Οι μεταλλικές σωληνώσεις από χάλυβα έχουν καλές μηχανικές αντοχές στην πίεση και τη θερμοκρασία, αλλά παρουσιάζουν προβλήματα όταν τα γεωθερμικά ρευστά είναι διαβρωτικά. Η αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων εστιάζεται συχνά στη χρήση χημικών αναστολέων και στην επικάλυψη της σωληνώσεως με προστατευτικά στρώματα (σε πεδία χαμηλής θερμοκρασίας). Όμως, το χαμηλό κόστος και οι καλές μηχανικές αντοχές καθιστούν τον χάλυβα ένα από τα βασικά υλικά κατασκευής γεωθερμικών σωληνώσεων.

Οι σωληνώσεις από ανοξείδωτο χάλυβα αποτελούν μια ειδική κατηγορία σωληνώσεων από χάλυβα. Το υψηλό κόστος συνήθως τις καθιστά απαγορευτικές για χρήση στις γεωθερμικές γεωτρήσεις. Όμως, σε γεωτρήσεις χαμηλής θερμοκρασίας με έντονα διαβρωτικά ρευστά και για μικρά βάθη και διαμέτρους, αποτελούν μια αναγκαία οικονομική επιβάρυνση για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Ως ανοξείδωτοι χάλυβες χαρακτηρίζονται μια σειρά κραμάτων χαλύβων. Χαρακτηριστικό τους είναι η περιεκτικότητα σε χρώμιο ($Cr > 11\%$), προσδίδει αντιδιαβρωτικές ιδιότητες. Οι προσθήκες σε νικέλιο (Ni) και μολυβδαίνιο (Mo) τροποποιούν τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες, όπως και το βαθμό διάβρωσης.

Μη μεταλλικές σωληνώσεις: Οι μη μεταλλικές σωληνώσεις έχουν πολύ καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά, όμως έχουν πολύ μικρές μηχανικές αντοχές στην πίεση, που μειώνονται ακόμα περισσότερο με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ παρουσιάζουν και το φαινόμενο της γήρανσης με το χρόνο. Η χρήση τους σε μικρά βάθη είναι περιορισμένη ακόμη και στα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας.

Είδη μη μεταλλικών σωληνώσεων:

- **Θερμοπλαστικά:** Δεν αντέχουν σε θερμοκρασίες πάνω από 60 - 80°C, όπου και η αντοχή τους στην πίεση δεν υπερβαίνει μερικές ατμόσφαιρες.
- **Θερμοσκληρυνόμενα:** Είναι σωληνώσεις από θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη ενισχυμένη με ίνες (FRP Fiberglass Reinforced Plastic). Έχουν μεγάλη χρήση

διεθνώς στις γεωθερμικές εφαρμογές, λόγω της αυξημένης αντιδιαβρωτικής συμπεριφοράς και των καλύτερων μηχανικών αντοχών από όλες τις μη μεταλλικές σωληνώσεις. Το θερμοσκληρυνόμενο υλικό είναι από εποξικές ρητίνες, ενώ το ενισχυτικό υλικό (συνήθως ίνες υάλου) βελτιώνει τις μηχανικές αντοχές και τη θερμική συμπεριφορά του. Αντέχει μέχρι 120°C με ανώτερη πίεση λειτουργίας τα 16 bar για εύρος θερμοκρασιών 20-50°C και τα 10 bar για εύρος θερμοκρασιών 50-80°C.

Ανάλογα με την σκοπιμότητά τους διακρίνονται οι ακόλουθοι τύποι σωλήνωσης:

- **Επιφανειακή ή περιφραγματική σωλήνωση (με τσιμέντωση):** Τοποθετείται στην αρχή της γεώτρησης (10-30 m) για την προστασία του γεωτρητικού εξοπλισμού από τις τυχόν καταπτώσεις και καθιζήσεις.
- **Ενδιάμεσες σωληνώσεις (με τσιμέντωση):** Ο αριθμός των ενδιάμεσων σωληνώσεων (μια ή και περισσότερες) εξαρτάται από το βάθος της γεώτρησης και το τεχνικό πρόγραμμά της. Οι ενδιάμεσες σωληνώσεις φθάνουν πάντα μέχρι την επιφάνεια και είναι τσιμεντωμένες. Στην τελική ενδιάμεση σωλήνωση τοποθετείται ο αντiekρηκτικός μηχανισμός ασφάλειας (B.O.P).
- **Τελική σωλήνωση ή σωλήνωση παραγωγής:** Το μεγαλύτερο τμήμα της καλύπτει τον ταμιευτήρα με τα απαραίτητα φίλτρα (φιλτροσωλήνωση). Η σωλήνωση αυτή είτε φθάνει μέχρι την επιφάνεια, είτε με ένα ειδικό σύστημα (hanger) αναρτάται στην τελική ενδιάμεση σωλήνωση.
- **Βοηθητικές σωληνώσεις:** Η τοποθέτηση σωληνώσεων μικρής διαμέτρου (1"-2") είναι συχνά απαραίτητη στις γεωθερμικές γεωτρήσεις για τη μέτρηση της στάθμης ή για τη διοχέτευση αναστολέων ή οξέων αντιμετώπισης των διαβρώσεων ή επικαθίσεων αλάτων. Το βάθος τους μέσα στη γεώτρηση είναι μεγαλύτερο από το επίπεδο εκτόνωσης των ρευστών.

5.4. Τσιμέντωση γεωθερμικών γεωτρήσεων

Η τσιμέντωση αποτελεί μια δομική εργασία στην όρυξη των γεωτρήσεων. Με τον όρο «τσιμέντωση» εννοούμε τη διαδικασία πλήρωσης του δακτυλίου μεταξύ τοιχωμάτων γεώτρησης και σωλήνωσης με μίγμα υλικών που έχουν ως βάση το τσιμέντο, γνωστό με τον όρο πολφός ή γαλάκτωμα (slurry).

Τα γεωθερμικά ρευστά κατά την άντλησή τους απαιτούν προστασία από τυχόν ανάμειξη με ανεπιθύμητους υδροφορείς κρύου νερού και την ασφάλεια της γεώτρησης για την αποφυγή επιφανειακών διαρροών και φθοράς της. Κατά την εκτέλεση μιας γεώτρησης συναντώνται διάφοροι οριζόντες ρευστών (κρύο ή ζεστό νερό, αέρια, πετρέλαιο κ.λπ.). Ανάλογα με τον στόχο της έρευνας, ορισμένοι από αυτούς χαρακτηρίζονται ανεπιθύμητοι και πρέπει να απομονωθούν.

Λόγω διαφοράς υδραυλικού φορτίου των οριζόντων, οι γεωτρήσεις λειτουργούν ως κατακόρυφοι αγωγοί υψηλής επικοινωνίας μεταξύ τους. Συνήθως η διακοπή επικοινωνίας γίνεται με τσιμέντωση της σωλήνωσης της γεώτρησης. Για την επιτυχή εκτέλεση μιας γεωθερμικής γεώτρησης απαραίτητη προϋπόθεση θεωρείται η τσιμέντωση (στεγανοποίηση) του διάκενου μεταξύ των τοιχωμάτων της και της σωλήνωσης (ολικής ή μερικής). Η τσιμέντωση αποτελεί ένα από τα βασικά σημεία σχεδιασμού και κατασκευής της γεώτρησης, ώστε κατά τη λειτουργία της να είναι ασφαλής και τα γεωθερμικά ρευστά να διατηρούν τα χαρακτηριστικά τους.

Σκοπός των τσιμεντώσεων στις γεωθερμικές γεωτρήσεις είναι:

- Η διακοπή επικοινωνίας του γεωθερμικού οριζοντα με κρύους επιφανειακούς υδροφόρους, αφού τυχόν ανάμειξή τους θα είχε ως συνέπεια τη μείωση της θερμοκρασίας των ρευστών κατά την άντληση, αλλά και τη μόλυνση των κρύων ρευστών, που χρησιμοποιούνται για ύδρευση ή άρδευση.
- Η ασφάλεια της γεώτρησης για την αντιμετώπιση του έντονου (συνήθως) αρτεσιανισμού των γεωθερμικών ρευστών. Χωρίς τσιμέντωση η διαρροή τους ανάμεσα στα τοιχώματα και στη σωλήνωση της γεώτρησης (κυρίως όταν είναι κλειστή), λόγω των πιέσεων, θεωρείται δεδομένη, με συνέπεια την καταστροφή της και εμφάνιση ανεξέλεγκτων καταστάσεων. Λόγω δε των υψηλών ρυθμών ροής,

των πιέσεων και των θερμοκρασιών, η αντιμετώπιση των διαρροών γίνεται δυσχερής και προβληματική.

- Η προστασία των σωληνώσεων από διαβρωτικά ρευστά, που υπάρχουν στους διατρηθέντες σχηματισμούς.
- Προστασία από απώλειες της λάσπης διάτρησης.
- Συγκράτηση της σωλήνωσης.
- Δημιουργία διαχωριστικών ασπίδων για την προστασία των παραγωγικών ζωνών από την κατάκλυση ρευστών.
- Ασφαλής εγκατάλειψη της γεώτρησης.

Η έλλειψη της τεχνογνωσίας για την εκτέλεση μιας τσιμέντωσης δημιουργεί αρκετά προβλήματα. Οι περισσότερες γεωθερμικές γεωτρήσεις (με αρτεσιανισμό) στην Ελλάδα, που εκτελέστηκαν από μη ειδικούς, παρουσιάζουν διαρροές μέχρι και ολική καταστροφή μετά την έναρξη λειτουργίας ή μετά από κάποιο χρονικό διάστημα.

5.4.1. Τα υλικά για την τσιμέντωση και αναλογία νερού - τσιμέντου

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη τσιμέντωση είναι:

- το τσιμέντο,
- το νερό, και
- οι προσθήκες διάφορων υλικών.

Το τσιμέντο κατασκευάζεται από ασβεστόλιθο, άργιλο ή σχιστόλιθο με προσθήκη οξειδίων σιδήρου και αργίλου σε κλίβανο θερμοκρασίας 1430-1540°C.

Οι υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες, αλλά και η διαβρωτικότητα ορισμένων ρευστών που συναντώνται σε διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς κατά την εκτέλεση των γεωτρήσεων, οδήγησαν στην κατασκευή διαφόρων κατηγοριών τσιμέντου, ανάλογα με τις φυσικές και χημικές συνθήκες του περιβάλλοντος της τσιμέντωσης. Ανάλογα με το βάθος της γεώτρησης και τις αναμενόμενες συνθήκες στον πυθμένα, χρησιμοποιούνται χημικά πρόσθετα στο τσιμέντο για να προσδώσουν συγκεκριμένες ιδιότητες. Οι κατηγορίες

τσιμέντου διαφέρουν ως προς την αντοχή στη θλίψη και τον εφελκυσμό μετά τη πήξη, που επηρεάζονται από τη θερμοκρασία της γεώτρησης, την πίεση και τον χημισμό των ρευστών. Επίσης, οι αναλογίες νερού-τσιμέντου μεταβάλλονται ανάλογα με τον τύπο του τσιμέντου.

Ο πολφός παρασκευάζεται με έντονη ανάμειξη τσιμέντου και νερού που εκτοξεύεται με πίεση. Το μίγμα που προκύπτει οδηγείται σε δεξαμενή όπου ελέγχονται ιδιότητες όπως η πυκνότητα και το ιξώδες. Ακολούθως, αντλείται μέσω ισχυρών αντλιών και εισπίζεται στη σωλήνωση μέσω της κεφαλής τσιμέντωσης. Η κεφαλή τσιμέντωσης ενώνει την κορυφή της σωλήνωσης με το σύστημα αντλιών.

5.4.2. Μέθοδοι τσιμέντωσης

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι τσιμέντωσης των σωληνώσεων στις γεωθερμικές γεωτρήσεις. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από το βάθος, τις γεωλογικές συνθήκες, τα γεωθερμικά χαρακτηριστικά του πεδίου και τις τεχνικές και οικονομικές δυνατότητες του συνεργείου. Οι βασικές μέθοδοι έχουν καθοριστεί κυρίως από την Halliburton Co. για τις γεωτρήσεις πετρελαίου, μερικές δε μέθοδοι από αυτές περιγράφονται παρακάτω.

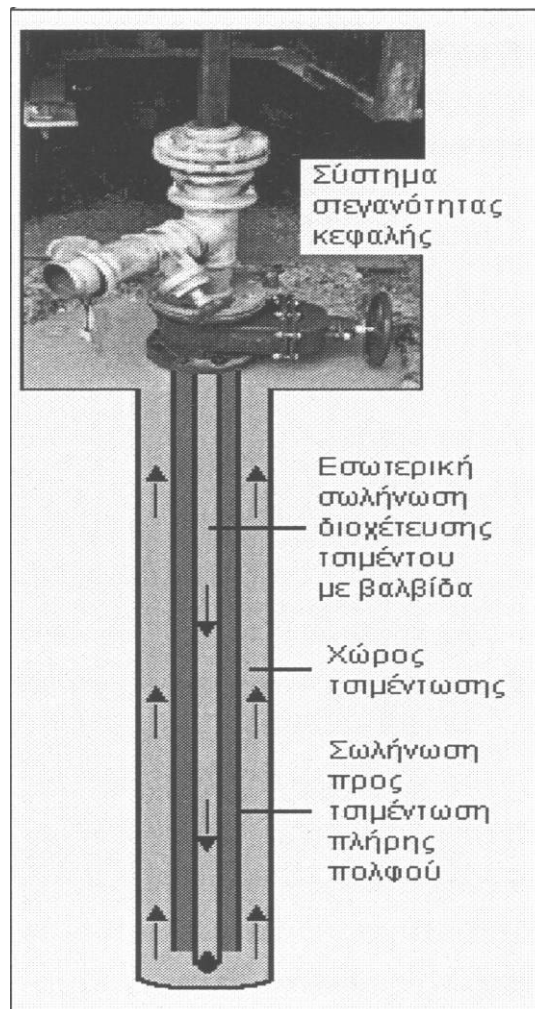
- Τσιμέντωση περιφραγματικών σωληνώσεων

Σε πρώτη φάση υπολογίζεται ο όγκος διάκενου μεταξύ τοιχωμάτων γεώτρησης και σωλήνωσης (διαφορά διαμέτρων 4-6") για την κατασκευή ανάλογου όγκου ρευστού κονιάματος και γίνεται κυκλοφορία πολφού, πριν την τσιμέντωση με μία σχετική αραίωση. Στη συνέχεια διοχετεύεται ο υπολογισμένος όγκος ρευστού κονιάματος δια μέσου σωλήνωσης (1-2") στον πυθμένα της γεώτρησης, ώστε ο πολφός να ωθείται προς την επιφάνεια εκτοπιζόμενος από το βαρύτερο ρευστό κονίαμα. Ακολούθως εισάγεται η προς τσιμέντωση σωλήνωση με πώμα μέχρι τον πυθμένα. Στη φάση αυτή εκτοπίζει το ρευστό κονίαμα, το οποίο ωθείται προς τα πάνω και καλύπτει το διάκενο μεταξύ των τοιχωμάτων.

- Τσιμέντωση με εσωτερική σωλήνωση (1-2") και σύστημα στεγανότητας

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για σχετικά μεγαλύτερα βάθη. Είναι μία τροποποίηση της μεθόδου με σωλήνωση (1-2") και βαλβίδα αντεπιστροφής. Στην αρχή υπολογίζεται ο

όγκος του διάκενου για την κατασκευής ανάλογης ποσότητας ρευστού κονιάματος. Ακολούθως, η προς τσιμέντωση σωλήνωση εισάγεται λίγο πάνω από τον πυθμένα της γεώτρησης (**Σχήμα 5.4**) και στη συνέχεια εισάγεται η σωλήνωση (1-2") διοχέτευσης του ρευστού κονιάματος εντός της προς τσιμέντωσης σωλήνωσης λίγο πιο πάνω από το κάτω άκρο της (περίπου 1 m). Διοχετεύεται ο υπολογισμένος όγκος ρευστού κονιάματος δια μέσου της πλευρικής σωλήνωσης στο διάκενο, ενώ το εσωτερικό της σωλήνωσης παραμένει πλήρες με πολφό υπό πίεση. Εντωμεταξύ, έχει τοποθετηθεί στην κεφαλή της γεώτρησης το σύστημα στεγανότητας μεταξύ των σωληνώσεων τσιμέντωσης και διοχέτευσης (1-2") με την πλευρική βαλβίδα εκτόνωσης κλειστή. Τέλος, εξάγεται η σωλήνωση (1-2") χωρίς πρόβλημα αφού διαθέτει βαλβίδα αντεπιστροφής στον πυθμένα της, για αποφυγή εισόδου ρευστού κονιάματος.



Σχήμα 5.4: Διάτρηση συστήματος τσιμέντωσης με εσωτερική σωλήνωση 2" και σύστημα στεγανότητας σε γεώτρηση στην περιοχή της Υπάτης (Καρυδάκης, 2005)

- Τσιμέντωση με πλευρική σωλήνωση (1-2") και πώμα

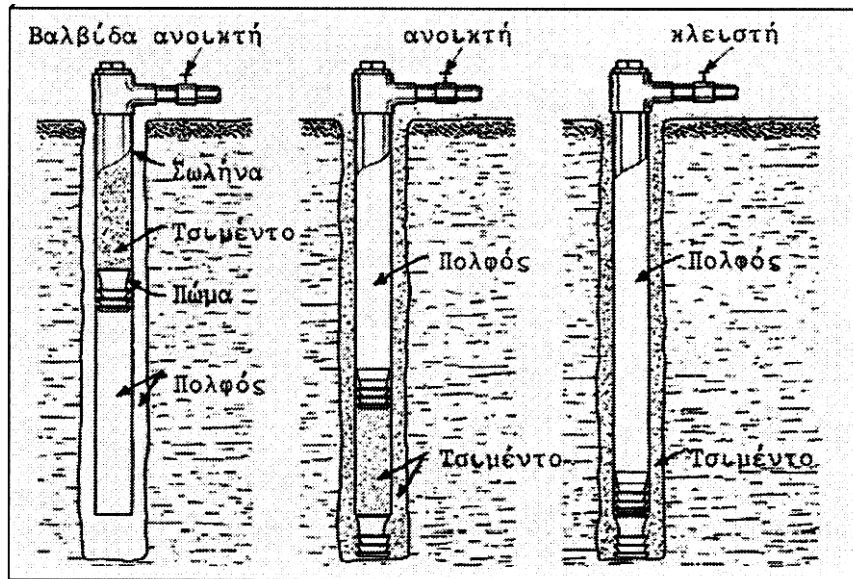
Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται συνήθως για βάθη μέχρι 100-200 m, ενώ έχουν αναφερθεί και σε γεωτρήσεις πετρελαίου για πολύ μεγαλύτερα βάθη. Είναι ουσιαστικά μία παραλλαγή της προηγούμενης μεθόδου, όπου η σωλήνωση (1-2") τοποθετείται πλευρικά και εξωτερικά της προς τσιμέντωση σωλήνωσης, όπου τοποθετείται ένα πώμα στεγανότητας για την αποφυγή του ρευστού κονιάματος. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι το μεγάλο διάκενο 4-8" σε σχέση με τις μεθόδους με εσωτερική σωλήνωση (1-2"), με συνέπεια την αύξηση της ποσότητας του ρευστού κονιάματος κατά 50-100% και να αποφεύγεται για μεγάλα βάθη λόγω του υψηλού κόστους. Όμως είναι και πλεονέκτημα ως προς την επιτυχία της τσιμέντωσης ακριβώς λόγω του μεγάλου διακένου.

- Τσιμέντωση με εσωτερική σωλήνωση (1-2") και βαλβίδα αντεπιστροφής

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για μέσα βάθη, αλλά και σε γεωτρήσεις πετρελαίου σε πολύ μεγαλύτερα βάθη. Η προς τσιμέντωση σωλήνωση εισάγεται λίγο πάνω από τον πυθμένα της γεώτρησης με βαλβίδα αντεπιστροφής. Η σωλήνωση (1-2") διοχέτευσης του ρευστού κονιάματος τοποθετείται συγχρόνως εντός της προς τσιμέντωση σωλήνωσης, η οποία βιδώνεται αριστερόστροφα στη βαλβίδα αντεπιστροφής. Ακολουθεί η διοχέτευση του υπολογισμένου όγκου κονιάματος δια μέσου της σωλήνωσης (1-2") στο διάκενο. Μετά την αναμονή πήξης του ρευστού κονιάματος απαγκιστρώνεται η εσωτερική σωλήνωση (1-2") από τη βαλβίδα και πριν από την εξαγωγή της γίνεται κυκλοφορία πολφού ή νερού για τον καθαρισμό της από το κονίαμα, αλλά και του εσωτερικού της προς τσιμέντωσης σωλήνωσης.

- Τσιμέντωση με διαχωριστικά πώματα

Είναι η πιο συνήθης μέθοδος για μεγάλα βάθη τσιμεντώσεων, που αναπτύχθηκε από την Halliburton Oil Cementing Company χρησιμοποιώντας ένα ή δύο διαχωριστικά πώματα (Cementing Plugs). Εφαρμόστηκε αρχικά στις γεωτρήσεις πετρελαίου και ακολούθως σε γεωθερμικές γεωτρήσεις. Τα διαχωριστικά πώματα παρέχουν στεγανότητα, κατασκευάζονται από υλικά όπως τσιμέντο, καουτσούκ, πλαστικό ξύλο κλπ. και χρησιμοποιούνται για τη διοχέτευση του κονιάματος (**Σχήμα 5.5**) προς τον πυθμένα, δια μέσου του εσωτερικού τμήματος της προς τσιμέντωσης σωλήνωσης. Τα πώματα διαχωρίζουν το κονίαμα από τον πολφό που υπάρχει κάτω και πάνω από αυτό. Υπάρχουν και διάφορες παραλλαγές τις μεθόδου.



Σχήμα 5.5 : Διάταξη συστήματος τσιμεντώσης με διαχωριστικά πώματα (Driscoll, 1987)

- Πώματα τσιμεντώσης

Συχνά οι γεωλογικές συνθήκες, οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις επιτρέπουν την τσιμεντώση μόνο του κατώτερου (μερικού) τμήματος της σωλήνωσης (πάχος 30-50 m) για τη διακοπή επικοινωνίας του γεωθερμικού ορίζοντα με κρύους επιφανειακούς υδροφόρους και την ασφάλεια της γεώτρησης. Τα πώματα αυτής της τσιμεντώσης δεν τοποθετούνται σε υδροφόρους σχηματισμούς, αλλά σε στεγανούς (τουλάχιστον το μεγαλύτερο τμήμα), ώστε να είναι δεδομένη η διακοπή επικοινωνίας μεταξύ των διαφορετικών υδροφόρων. Όλες οι προαναφερόμενες μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν και στην περίπτωση των πωμάτων τσιμεντώσης (πάχος 30-50 m), εξαρτώμενες από τις γεωλογικές συνθήκες, το βάθος, τις θερμοκρασίες και τις πιέσεις.

5.4.3. Παράμετροι σχεδιασμού τσιμεντώσεων

Οι παράμετροι αυτές είναι:

- Η καλή ανάμιξη νερού και τσιμέντου είναι απαραίτητη, όπως επίσης και η απαλλαγή από σβόλους και ξένα υλικά, που επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός κόσκινου, κυρίως όταν προμηθευόμαστε το ρευστό κονίαμα από τα εργοστάσια παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος.

- Η τελική προς τσιμέντωση σωλήνωση ενδείκνυται να σταματά σε στεγανούς σχηματισμούς (αν υπάρχουν) και εφόσον τελικά είναι εφικτό.
- Όταν υπάρχει αρκετό τμήμα της γεώτρησης ασωλήνωτο, πρέπει να καλυφθεί με ψιλή άμμο. Τέτοιο είναι το ασβεστοκονίαμα άμμος, όπου το 50% της άμμου έχει μέγεθος κόκκων 0,3-0,6 mm.
- Για την αποφυγή επαφής των σωλήνων με τα τοιχώματα της γεώτρησης, ώστε η τσιμέντωση να είναι ομοιόμορφη μέσα στο διάκενο, θα πρέπει το τμήμα αυτό να έχει αρκετά καλή κατακορυφότητα. Ενδείκνυται η χρήση αντίβαρων με σταθεροποιητές κατά τη διάτρηση.
- Για τη συμπλήρωση μεγάλων κενών, χωρίς υπερβολικές απώλειες ρευστού κονιάματος, απαιτείται η προσθήκη άμμου ή ογκωδών υλικών, εφόσον δε δημιουργεί τεχνικά προβλήματα στην τσιμέντωση στο βάθος εκείνο.
- Ο υπολογισμός του όγκου του απαιτούμενου ρευστού κονιάματος δεν είναι ακριβής λόγω τυχόν ανωμαλιών και απωλειών στη γεώτρηση από εκπλύσεις ή καταπτώσεις και θα πρέπει να υπάρχει δυνατότητα κατασκευής πρόσθετης ποσότητας.
- Πριν την έναρξη της σωλήνωσης και μετά τη σωλήνωση απαιτείται κυκλοφορία πολφού υψηλής παροχής για την απομάκρυνση θρυμμάτων ή τεμαχίων λάσπης.
- Η αντλία διοχέτευσης του ρευστού κονιάματος πρέπει να είναι υψηλής πίεσης (τύπου duplex), ενώ η χρήση φυγόκεντρου αντλίας αποφεύγεται κυρίως σε μεγάλα βάθη, όπως και η διοχέτευση με βαρύτητα.
- Η διοχέτευση του ρευστού κονιάματος γίνεται πάντα στο κατώτερο άκρο (πυθμένα) της προς τσιμέντωση σωλήνωσης, ώστε να απομακρύνεται το σύνολο του πολφού ανοδικά, λόγω μικρότερης πυκνότητας, και να αποφεύγεται η ανάμιξή του με το ρευστό κονίαμα.
- Η ταχύτητα καθόδου πρέπει να είναι μικρότερη από 9 m/min για σχηματισμούς με απώλειες ή μη ανθεκτικούς σχηματισμούς.
- Η πυκνότητα του κονιάματος επηρεάζει τις πιέσεις που ασκούνται στα τοιχώματα της γεώτρησης και στην εξωτερική πλευρά της σωλήνωσης. Η υδραυλική πίεση αυξάνεται με το βάθος (0,8 psi/ft, για τσιμέντο τύπου Α), με συνέπεια πιθανές απώλειες σε ζώνες κυκλοφορίας ρευστών και την υδραυλική ρωγμάτωση μη ανθεκτικών σχηματισμών.
- Η χρήση εμβόλων στο εσωτερικό της σωλήνωσης για τη διοχέτευση του κονιάματος αυξάνει την πίεση στον πυθμένα, με κίνδυνο ανοίγματος των ζωνών που έχουν κλειστεί προηγούμενα με πολφό.

- Η διαφορά διαμέτρων μεταξύ γεώτρησης και σωλήνωσης θα πρέπει να είναι 4-8", αυξανόμενη με το βάθος, τη διάμετρο της σωλήνωσης και επηρεάζεται αρκετά από τη μέθοδο της τσιμέντωσης.
- Για την αντιμετώπιση των αυξημένων πλευρικών πιέσεων του ρευστού κονιάματος στην εξωτερική πλευρά των σωληνώσεων, όταν είναι στεγανές στο κατώτερο άκρο (πώμα), αυτές πρέπει να πληρούνται με πολφό (λάσπη διάτρησης).
- Στις συνδέσεις οι σωληνώσεις απαιτείται να έχουν πλήρη στεγανότητα.
- Η τοποθέτηση κατά διαστήματα (συνήθως κάθε 6 m) κεντρωτών (οδηγοί κεντραρίσματος) σωληνώσεων είναι απαραίτητη ώστε να αποφεύγεται η επαφή με τοιχώματα της γεώτρησης, όπως επίσης και αποξεστήρων για τον καθαρισμό των τοιχωμάτων.

5.5. Προβλήματα επικαθίσεων στις γεωθερμικές μονάδες

Ιδιαίτερο πρόβλημα στις μεταλλικές σωληνώσεις των γεωθερμικών γεωτρήσεων είναι οι επικαθίσεις αλάτων και η διάβρωσή τους.

Τα γεωθερμικά ρευστά εκτίθενται σε σημαντικές αλλαγές της θερμοκρασίας και της πίεσης, οι οποίες επηρεάζουν τη διαλυτότητα των διαλυμένων αλάτων. Με τη μείωση της θερμοκρασίας, μειώνεται η διαλυτότητα των πυριτικών και των θειούχων αλάτων, με αποτέλεσμα την απόθεσή τους στις επιφάνειες των αγωγών και των εγκαταστάσεων. Αλλαγές στην πίεση του συστήματος μπορεί να προκαλέσουν αλλαγή φάσης, είτε με εκτόνωση, είτε με απελευθέρωση των διαλυμένων αερίων. Με την εκτόνωση και το διαχωρισμό της αέριας φάσης, μειώνεται ο όγκος της υγρής φάσης και η θερμοκρασία της, με συνέπεια την ταυτόχρονη αύξηση της συγκέντρωσης των διαλυμένων στερεών και τη μείωση της διαλυτότητας των αλάτων. Ταυτόχρονα, η μερική ή ολική απελευθέρωση των διαλυμένων αερίων (κυρίως του CO₂ και του H₂S) από την υγρή φάση, μπορεί να επιδράσει δραστικά στο pH του υγρού και, επομένως, στη διαλυτότητα των θειούχων και των ανθρακικών αλάτων.

Είναι γενικά αποδεκτό ότι τα είδη των επικαθίσεων που απαντώνται σε γεωθερμικές εγκαταστάσεις μπορεί να χαρακτηρισθούν ανάλογα με τη σύστασή τους. Οι ανθρακικές επικαθίσεις είναι συνηθέστερες σε μονάδες χαμηλής θερμοκρασίας, ενώ οι πυριτικές και οι θειούχες προκύπτουν από ρευστά υψηλής θερμοκρασίας. Ειδικότερα, ρευστά υψηλής θερμοκρασίας με χαμηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένα άλατα σχηματίζουν πυριτικές επικαθίσεις, ενώ ρευστά με υψηλή περιεκτικότητα σχηματίζουν επικαθίσεις με πολύπλοκη χημική σύσταση. Πυριτικά, μεταλλοπυριτικά, οξειδία του σιδήρου και θειούχες ενώσεις είναι τα κυριότερα συστατικά των τελευταίων επικαθίσεων. Τυπικό παράδειγμα τέτοιων επικαθίσεων αποτελούν οι επικαθίσεις που σχηματίζονταν στη διάρκεια της λειτουργίας της γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της **Μήλου** (Ανδρίτσος-Φυτίκας, 2004).

Ο πλέον συνηθισμένος τύπος επικαθίσεων που παρουσιάζεται στις γεωθερμικές γεωτρήσεις είναι λόγω κρυστάλλωσης με τη δημιουργία σκληρών επιφανειών που δύσκολα καθαρίζονται. Οι επικαθίσεις βοηθούν την αρχική διάβρωση και αυξάνουν την πτώση πίεσης των ρευστών μέσα στη γεώτρηση.

5.5.1. Θειούχες επικαθίσεις

Η δημιουργία επικαθίσεων θειούχων ενώσεων βαρέων μετάλλων σε μονάδες υψηλής θερμοκρασίας, οφείλεται συνήθως στη μείωση της διαλυτότητας τους σε συνδυασμό με διεργασίες εκτόνωσης στην αύξηση του pH, μείωση της θερμοκρασίας και στην ως εκ τούτου αύξηση της συγκέντρωσης των διαλυμένων αλάτων στο ρευστό (Andritsos and Karabelas, 1991). Συνοπτικά, κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης για την απόληψη του ατμού, απελευθερώνονται οι μεγαλύτερες ποσότητες CO₂ και H₂S, με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση του pH του υγρού ρεύματος που απομένει. Παράλληλα, υπάρχει μείωση της θερμοκρασίας, με συνέπεια τη μείωση της διαλυτότητας των περισσότερων θειούχων και των πυριτικών ενώσεων, και αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων που συμμετέχουν στις επικαθίσεις λόγω διαχωρισμού του ατμού. Η εξάρτηση της διαλυτότητας ορισμένων θειούχων αλάτων βαρέων μετάλλων από τη θερμοκρασία και το pH, παρουσιάζεται στον **Πίνακα 5.2**. Οι τρεις αυτές αιτίες δημιουργούν συνθήκες υπερ-

κορεσμού του υγρού ως προς μία ή περισσότερες θειούχες ενώσεις (PbS, ZnS, Fe₂S, Sb₂S₃ κτλ.), με αποτέλεσμα την καταβύθισή τους αμέσως μετά το σημείο εκτόνωσης.

Οι θειούχες ενώσεις σχηματίζουν σκληρές και συνεκτικές επικαθίσεις σκούρου χρώματος με τη μορφή στιβάδων, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν και επικαθίσεις πυριτικών ενώσεων. Φωτογραφία με επικαθίσεις σε αγωγό της μονάδας της Μήλου παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.6**.

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά γεωτρήσεων και αναλύσεις δειγμάτων επικαθίσεων σε ελληνικά γεωθερμικά πεδία (Andritsos et al, 1994 και Andritsos & Karabelas, 1991)

| | Νέα Κεσσάνη, Γ- 16 | Σουσάκι, Γ4 | Νιγρίτα, ΤΗ-1 | Νιγρίτα, ΤΗ-2α | Μήλος, αγωγός επανεισόδου | Μήλος, στρόβιλος |
|------------------------------------|--------------------------|----------------|----------------------|-------------------|------------------------------|---|
| Χαρακτηριστικά γεώτρησης | | | | | | |
| Βάθος γεώτρησης (m) | 160 | 200 | 150 | 400 | ~2000 | - |
| Θερμοκρασία υγρού (°C) | 81 | 76 | 59 | 42 | 240 | - |
| pH (25°C) | 7,17 | 6,80 | 7,00 | 6,78 | 5,3 | - |
| Αγωγιμότητα (25°C, μS/cm) | 7930 | 62000 | 3400 | 3610 | 65000 | - |
| Ανάλυση επικαθίσεων | | | | | | |
| Ca (% κ.β.) | 37,4 | 37,4 | 37,5 | 4,1 | 0,1 | 7,5 |
| Mg (% κ.β.) | 0,4 | 0,2 | 0,8 | 0,4 | 0,3 | 0,0 |
| Fe (% κ.β.) | 1,1 | 0,0 | 0,8 | 36,7 | 38 | 30 |
| Na (% κ.β.) | 0,1 | 1,1 | 0,2 | 0,2 | 1,1 | 1,0 |
| Mn (% κ.β.) | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 0,1 |
| Sr (% κ.β.) | 0,0 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Cl (% κ.β.) | 0,1 | 1,8 | 0,2 | 0,3 | 2,2 | 1,5 |
| Pb | - | - | - | - | 3,0 | 0,2 |
| Zn | - | - | - | - | 8,0 | 0,2 |
| SiO ₂ (% κ.β.) | 0,4 | 2,3 | 0,8 | 0,5 | 8,0 | 9,0 |
| Κρυσταλλικές φάσεις | Ασβεστίτης | Αραγωνίτης | Ασβεστ. / Αραγων. | Άμορφο | FeS, ZnS, PbS | CaSO ₄ , FeS ₂ |
| Πυκνότητα (gr/cm ³) | | | 2,7 | - | 3,8 | - |
| Σχετική συνεκτικότητα | 2,7 Υψηλή | 2,45 Μέτρια | Υψηλή | Μηδέν | Υψηλή | Υψηλή |



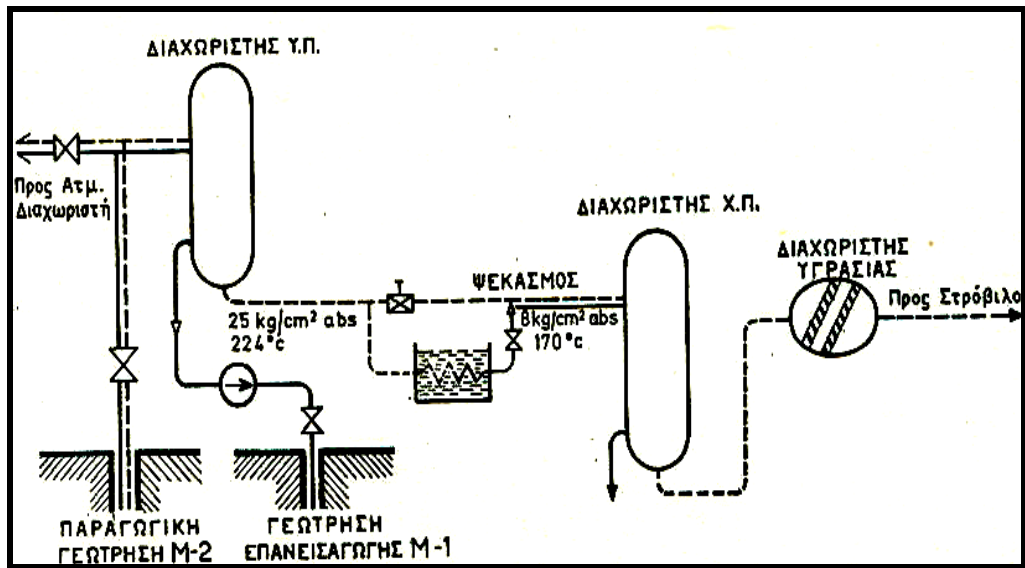
Σχήμα 5.6: Φωτογραφία επικαθίσεων στο αρχικό τμήμα του αγωγού επανεισαγωγής του γεωθερμικού υγρού στη Μήλο (Πηγή: Φυτίκας-Ανδρίτσος, 2004)

Η σύμβαση που υπογράφηκε μεταξύ ΔΕΗ και MITSUBISHI το 1984 προέβλεπε την προμήθεια και εγκατάσταση γεωηλεκτρικής μονάδας, με συμπυκνωτή ονομαστικής ισχύος 2 MW. Η μονάδα αυτή, σύμφωνα με την σύμβαση, έπρεπε να καλύπτει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας της Μήλου μέχρι 2 MWe. Ο αρχικός σχεδιασμός της μονάδας έγινε βάσει των προκαταρκτικών αναλύσεων του ρευστού, που ήταν διαθέσιμες την εποχή εκείνη. Σύμφωνα με το σχεδιασμό αυτό (Σχήμα 5.7), η μονάδα τροφοδοτείται με διφασικό ρευστό από την παραγωγική γεώτρηση M2, το οποίο διαχωρίζεται στη συνέχεια σε κυκλωνικό διαχωριστή ονομαστικής πίεσης 8 kg/cm² abs⁶. Ο κορεσμένος ατμός των 8 Kg/cm² abs οδηγείται μέσω διαχωριστή υγρασίας στο στρόβιλο, όπου εκτονώνεται μέχρι πίεση 100 mbar.

Το παραγόμενο, μετά το διαχωρισμό, αλμόλοιπο (υγρή φάση) επανεισάγεται στον υπόγειο ταμιευτήρα, μέσω της γεώτρησης M1. Η μονάδα με τον παραπάνω σχεδιασμό δεν κατόρθωσε να ξεπεράσει τις 60 ώρες λειτουργίας, λόγω των ανυπέρβλητων προβλημάτων από τις επικαθίσεις αλάτων, τόσο στο σύστημα διαχωρισμού, όσο και στο σύστημα επανεισαγωγής.

Από τις συστηματικές μετρήσεις που έκανε η MITSUBISHI στη συνέχεια (σε συνεργασία με το Σύμβουλό της, την Νεοζηλανδική εταιρεία GEOSPAC Ltd και το Σύμβουλο της ΔΕΗ, VIRKIR/NEA), αποδείχθηκε ότι η συγκέντρωση των πυριτικών στο ρευστό ήταν

⁶ Μονάδες απόλυτης πίεσης



Σχήμα 5.8: Τροποποιημένο σύστημα διαχωρισμού μονάδας 2MW Μήλου (Πηγή: Εθνικό συνέδριο εφαρμογών γεωθερμίας, 1989)

Με τη μορφή αυτή πλέον αυτή η μονάδα συγχρονίστηκε τον Δεκέμβριο του 1986 μπαίνοντας σε ημιεμπορική λειτουργία.

5.5.2. Αντιμετώπιση του σχηματισμού πυριτικών και θειούχων επικαθίσεων

Πραγματική πρόληψη δημιουργίας πυριτικών και θειούχων επικαθίσεων είναι δύσκολο να επιτευχθεί και αυτό μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις, παρά τις σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες που έχουν γίνει τα τελευταία 20 χρόνια. Μερικός έλεγχος του σχηματισμού πυριτικών επικαθίσεων επιτυγχάνεται με τη λειτουργία της μονάδας σε συνθήκες που να δίνουν λιγότερο ατμό και αλμόλοιπο για επανεισαγωγή, απόρριψη ή επεξεργασία σε τέτοια θερμοκρασία που να είναι σχεδόν πλήρως διαλυτό. Επίσης, αλλαγές στις συνθήκες λειτουργίας της μονάδας (πίεση, θερμοκρασία, παροχή) μπορεί να μετατοπίσουν το σχηματισμό επικαθίσεων από τις σωληνώσεις της γεώτρησης στις επιφανειακές εγκαταστάσεις, όπου ο καθαρισμός είναι συνήθως ευκολότερος. Κανένας οργανικός αναστολέας σχηματισμού επικαθίσεων δεν είναι δραστικός για την αντιμετώπιση των δύο αυτών ειδών επικαθίσεων, αν και μερικοί από αυτούς μειώνουν το ρυθμό επικαθίσεων (Gallup, 2002). Αντίθετα, σε μονάδες που δεν λειτουργούν, η αντιμετώπισή τους γίνεται

και με γεωτρητικό εξοπλισμό με το κατάλληλο κοπτικό άκρο, εφόσον το επιτρέπει η σωλήνωση.

Δύο είναι οι επιτυχέστερες μέθοδοι για το μερικό τουλάχιστον έλεγχο των πυριτικών και των θειούχων επικαθίσεων:

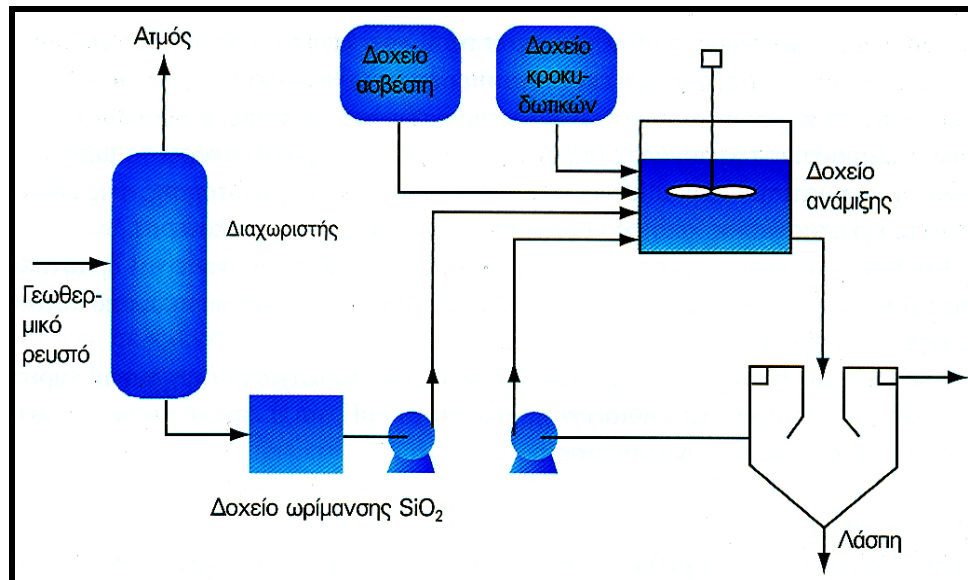
- η μείωση του pH και,
- η επεξεργασία των ρευστών σε επιφανειακές εγκαταστάσεις.

Έλεγχος όμως της δημιουργίας επικαθίσεων μπορεί να επιτευχθεί και με χημικά πρόσθετα.

Η μείωση του pH είναι η πλέον αξιόλογη μέθοδος για την αντιμετώπιση των θειούχων επικαθίσεων, καθώς και των πυριτικών και των μεταλλοπυριτικών. Βασίζεται στην αρχή ότι η μείωση του pH κατά μία μονάδα αυξάνει τη διαλυτότητα των θειούχων ενώσεων κατά μία τάξη μεγέθους, ενώ ελαττώνονται σημαντικά οι ρυθμοί πολυμερισμού και συσσωμάτωσης του διοξειδίου του πυριτίου. Η εισαγωγή του οξέος γίνεται πριν από την αρχική εκτόνωση του γεωθερμικού ρευστού. Το κόστος του οξέος είναι της τάξης του 10% της αξίας της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται. Η μέθοδος έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε αρκετές περιπτώσεις. Ο Gallup (1989) αναφέρει ότι παρατηρήθηκε σχεδόν παντελής αναστολή δημιουργίας σιδηροπυριτικών ενώσεων σε μονάδα του Salton Sea, Η.Π.Α., με μείωση του pH μόνο κατά 0,3 μονάδες, ενώ στην Ισλανδία οι πυριτικές επικαθίσεις ελέγχονται σε ικανοποιητικό βαθμό με μείωση του pH σε τιμές 3 με 4. Επίσης, οι Rothbaurh και Rohde (1979) αναφέρουν ότι σε γεωθερμικές εγκαταστάσεις στη Ν. Ζηλανδία, η ρύθμιση του pH στην περιοχή του 4 με 5, μειώνει το ρυθμό σχηματισμού των πυριτικών μέχρι 100 φορές.

Αντίθετα, η μέθοδος επεξεργασίας του ρευστού αποσκοπεί στην κρυστάλλωση και καταβύθιση των συστατικών των επικαθίσεων σε ειδικά σχεδιασμένες συσκευές, έτσι ώστε να μη σχηματίζονται επικαθίσεις στις εγκαταστάσεις που ακολουθούν αυτές τις συσκευές. Συχνά, η μέθοδος συνδέεται με την ανάγκη για επανεισαγωγή του ρευστού στον ταμιευτήρα, χωρίς να προκληθεί «φράξιμο» της γεώτρησης επανεισαγωγής. Με την τακτική αυτή, μπορεί να κατακρατηθούν οι περισσότερες ποσότητες θειούχων και πυριτικών ενώσεων που υπάρχουν σε ένα γεωθερμικό ρευστό. Αρκετές από αυτές είναι δυνατό να έχουν και εμπορική αξία.

Πολλοί τύποι και διατάξεις συσκευών έχουν προταθεί ή χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία των ρευστών. Ένας τρόπος είναι η κρυστάλλωση του συστατικού που δημιουργεί τις επικαθίσεις μετά την εκτόνωση να γίνεται (τεχνητά) στη μάζα του και όχι στα τοιχώματα. Μια άλλη προσέγγιση παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.9**. Η προσθήκη ασβέστη και κροκιδωτικών βοηθά αποφασιστικά στην καταβύθιση του SiO_2 στο διαυγαστήρα (Hurtado et al, 1989). Οι διαυγαστήρες λειτουργούν συνήθως ως κλειστά συστήματα, ώστε να αποτρέπεται η είσοδος αέρα. Για την εισαγωγή κέντρων κρυστάλλωσης χρησιμοποιείται μέρος της λάσπης που ανακυκλώνεται. Η λάσπη πολλές φορές περιέχει συστατικά με εμπορική αξία (π.χ. άργυρο), τα οποία μπορούν εύκολα να ανακτηθούν.



Σχήμα 5.9: Απλοποιημένο διάγραμμα απομάκρυνσης των πυριτικών αλάτων πριν από την επανεισαγωγή του αλμολοίπου στον ταμιευτήρα (Πηγή: Φυτίκας-Ανδρίτσος, 2004)

Τέλος, τα χημικά πρόσθετα είναι συνήθως οργανικές ουσίες οι οποίες προστίθενται σε μικρές δόσεις πριν από το σημείο εκτόνωσης του γεωθερμικού ρευστού, με σκοπό τον έλεγχο της δημιουργίας επικαθίσεων. Όσον αφορά τις διαβρωτικές τάσεις στις σωληνώσεις, η αντιμετώπισή τους γίνεται κυρίως με την χρήση χημικών αναστολέων, με την επιλογή του κατάλληλου υλικού, με την αύξηση του πάχους και με την επικάλυψη από προστατευτικά στρώματα, κυρίως για ρευστά χαμηλής θερμοκρασίας.

Τα χημικά πρόσθετα έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε ρευστά που σχηματίζουν ανθρακικά άλατα και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- σε αυτά που επιδρούν στη διαδικασία αύξησης του κρυστάλλου (**αναστολείς αύξησης κρυστάλλου**) και,
- σε αυτά που μειώνουν τη διαθεσιμότητα των ιόντων ασβεστίου στο υγρό, μετατρέποντας τα σε ευδιάλυτα σύμπλοκα (**συμπλοκοποιητές**) (Owen και Michels, 1984).

Ο κύριος μηχανισμός με τον οποίο οι ενώσεις αυτές παρεμποδίζουν την αύξηση των κρυστάλλων είναι το να καταλαμβάνουν τις ενεργές θέσεις ανάπτυξης των πυρήνων ή των κρυστάλλων. Βρίσκονται συνήθως με το όνομα αναστολείς "κατωφλίου" (threshold inhibitors) και είναι φωσφονικές ενώσεις ή παράγωγα του μαλεϊκού οξέος. Αποτελούν ίσως τη φθηνότερη μέθοδο για τον έλεγχο της δημιουργίας ανθρακικών επικαθίσεων με επιτυχή αποτελέσματα στην Ελλάδα και στο εξωτερικό (Vetter και Cambell, 1979, και Κάτσης, 1989), όχι όμως πυριτικών και θειούχων. Τα κυριότερα μειονεκτήματα των αναστολέων κατωφλίου είναι η χημική τους αστάθεια σε μεγάλες θερμοκρασίες ($T > 180$ °C) και ο σχηματισμός ψευδο-επικαθίσεων (συνήθως φωσφονικού ασβεστίου) όταν η συγκέντρωσή τους στο διάλυμα είναι μεγάλη. Κύριο βέβαια πλεονέκτημά τους, οι μικρές ποσότητες (της τάξης του 1 ppm) που χρειάζεται να προστεθούν στο γεωθερμικό ρευστό.

Ο ρόλος των συμπλοκοποιητών είναι να ενσωματώσουν τα ιόντα που συνθέτουν τις επικαθίσεις (όπως του ασβεστίου) σε ευδιάλυτα σύμπλοκα. Μία τέτοια ουσία είναι το EDTA που έχει χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις αργού πετρελαίου. Σοβαρό μειονέκτημά τους οι μεγάλες ποσότητες που χρειάζονται να προστεθούν στο γεωθερμικό υγρό, λόγω της ανάγκης ύπαρξης στοιχειομετρικής αναλογίας μεταξύ του συμπλοκοποιητή και των υπάρχοντων ιόντων. Θα πρέπει να τονιστεί ότι, σε εργαστηριακή και σε ημιβιομηχανική κλίμακα, έχουν δοκιμασθεί ενώσεις σαν αναστολείς σχηματισμού πυριτικών επικαθίσεων, χωρίς καμιά να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Μερικές από αυτές (Harrar κ.ά., 1980) δρουν ανασταλτικά στο σχηματισμό πυριτικών αλάτων, αλλά σε μία περιορισμένη περιοχή θερμοκρασιών, περί τους 100 °C.

5.5.3. Αύξηση του κόστους λόγω των επικαθίσεων

Το επιπλέον κόστος που επιφέρει σε μία γεωθερμική μονάδα ο σχηματισμός επικαθίσεων μπορεί να συνοψιστεί στα εξής:

- Επιπλέον πάγιο κόστος. Προέρχεται από το σχεδιασμό μέχρι και κατά 50% μεγαλύτερων εγκαταστάσεων προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι συνέπειες του σχηματισμού των επικαθίσεων. Σχεδιάζονται μεγαλύτεροι εναλλάκτες θερμότητας, αγωγοί με μεγαλύτερη διάμετρο από ό,τι πραγματικά απαιτείται και χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες αντλίες.
- Κόστος συστημάτων για τον έλεγχο των επικαθίσεων. Αναφέρεται στο πάγιο κόστος των συστημάτων που απαιτούνται για την πρόληψη και τον έλεγχο δημιουργίας των επικαθίσεων και για την απομάκρυνση τους. Παραδείγματα αποτελούν τα συστήματα που αποξέουν τις επιφάνειες για να αφαιρέσουν τις επικαθίσεις, τα συστήματα επεξεργασίας των ρευστών και οι αντλίες για την εισαγωγή των χημικών προσθέτων.
- Κόστος από τις ενεργειακές απώλειες. Σχετίζεται με το γεγονός ότι απαιτούνται μεγαλύτερες ποσότητες ρευστών για τη μεταφορά ορισμένης ποσότητας θερμότητας όταν υπάρχουν επικαθίσεις. Επίσης, απαιτείται μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τις αυξημένες ανάγκες άντλησης των ρευστών.
- Απώλειες λόγω επικαθίσεων. Αφορούν στη γενική μείωση της απόδοσης της εγκατάστασης. Ως παράδειγμα αναφέρεται ότι, ακόμη και ελάχιστες ποσότητες επικαθίσεων στον αμοστρόβιλο, μπορεί να προκαλέσουν σημαντική μείωση της απόδοσής του στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Το πρόβλημα αυτό παρατηρήθηκε στη μονάδα της Μήλου. Επίσης, η έντονη δημιουργία επικαθίσεων στους φίλτροσωλήνες ή σε κάποια άλλη θέση στον αγωγό, μπορεί να προκαλέσει έμφραξη και εγκατάλειψη της γεώτρησης.
- Κόστος συντήρησης και καθαρισμού. Είναι το κόστος της αφαίρεσης των επικαθίσεων και το κόστος των χημικών που χρησιμοποιούνται.
- Απώλεια κόστους παραγωγής. Το κόστος αυτό οφείλεται στις ανεπιθύμητες και απρογραμμάτιστες διακοπές της λειτουργίας μέρους ή όλης της μονάδας, για την αφαίρεση των επικαθίσεων.

5.6. Τρόποι διάθεσης γεωθερμικών αποβλήτων

Κατά την αξιοποίηση ενός γεωθερμικού πεδίου λαμβάνονται από τον ταμειυτήρα μεγάλες ποσότητες θερμών ρευστών. Τα ρευστά αυτά, αφού προσδώσουν τη διαθέσιμη ενέργειά τους, συνιστούν πλέον τα γεωθερμικά απόβλητα, για τα οποία στο σημείο αυτό εξετάζεται ο τρόπος διάθεσής τους. Η απόρριψή τους σε επιφανειακούς αποδέκτες όπως ποταμούς, θάλασσες, προκαλεί θερμική και χημική ρύπανση.

Η θερμική ρύπανση οφείλεται στη θερμοκρασία των ρευστών, που είναι, συνήθως αρκετά υψηλότερη από αυτήν του περιβάλλοντος. Η χημική ρύπανση, που ουσιαστικά προβληματίζει, οφείλεται στο πλήθος των στοιχείων και ενώσεων που είναι διαλυμένα στα γεωθερμικά ρευστά. Η επιφανειακή διάθεση των αποβλήτων έχει επιπτώσεις τόσο στο οικοσύστημα του υδάτινου αποδέκτη, όσο και σε τυχόν υπόγεια νερά που επικοινωνούν με αυτόν και πιθανόν να χρησιμοποιούνται ως πόσιμα ή/και αρδευτικά.

Το δεύτερο πρόβλημα προκαλείται στην περίπτωση που τα γεωθερμικά απόβλητα διατίθενται σε δεξαμενές εξάτμισης. Αυτές είναι τεχνητές λίμνες στις οποίες η απομάκρυνση των αποβλήτων πραγματοποιείται με ατμοποίησή τους.

Μια λύση στο πρόβλημα της επιφανειακής διάθεσης των αποβλήτων είναι η επεξεργασία τους για περιορισμό των ανεπιθύμητων συστατικών. Η επεξεργασία αυτή προϋποθέτει ιδιαίτερη μελέτη για κάθε περίπτωση ρευστών, λόγω της διαφορετικής κατά περίπτωση σύστασής τους, έρευνα για να προσδιοριστεί η κατάλληλη μέθοδος και βέβαια η υλοποίηση της μεθόδου σημαίνει υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, που πιθανά να την καθιστά απαγορευτική.

Αντίθετα προς την επιφανειακή διάθεση των αποβλήτων, η απόρριψη των ρευστών μέσα από γεωτρήσεις, σε κάποιο σημαντικό βάθος στο έδαφος (συγκεκριμένα τουλάχιστον κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής), δε δημιουργεί προβλήματα ρύπανσης. Η υπόγεια αυτή απόρριψη ορίζεται ως **επανεισαγωγή**. Για την επανεισαγωγή αρκεί να διανοιχτούν γεωτρήσεις σημαντικού βάθους, μέσα από τις οποίες τα ρευστά, είτε με την υφιστάμενη πίεσή τους, είτε με την βαρύτητα, είτε με την χρήση αντλιών, προωθούνται στο υπέδαφος. Εμφανίζει όμως και αυτή προβλήματα, όπως: η πρακτική εφαρμογή της και

οι επιπτώσεις που μπορεί να έχει στην αξιοποίηση του ταμιευτήρα στο χρόνο. Επίσης, ο σχηματισμός επικαθήσεων, δημιουργεί ολοένα και μεγαλύτερες απαιτήσεις για μεγαλύτερες πιέσεις και τελικά την απόφραξη των αγωγών ροής των ρευστών (Γελεγένης-Κουμούτσος, 1992).

Ως παράδειγμα διερεύνησης της δυνατότητας εφαρμογής της μεθόδου, δίδεται η περίπτωση του γεωθερμικού πεδίου της Μήλου, στο οποίο, η υψηλή θερμοκρασία των ρευστών του ταμιευτήρα (320 °C), είχε σαν αποτέλεσμα τη διάλυση σε αυτά πλήθους ρυπαντών. Τα θετικά ή αρνητικά αποτελέσματα της επανεισαγωγής, όπως θεμελιώνονται θεωρητικά ή/και έχουν προκύψει από τη διεθνή εμπειρία, συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Η απόληψη γεωθερμικών ρευστών από τον ταμιευτήρα έχει ως αποτέλεσμα την ταπείνωση της πίεσης σε αυτόν και τελικά τη μείωση της διαθέσιμης ενέργειας των ρευστών. Η επανεισαγωγή αίρει μερικώς έως και ολικώς το πρόβλημα αυτό. Για να γίνει σαφέστερη η επίδραση των επανεισαγόμενων ρευστών, αρκεί κανείς να ανατρέξει στη δευτερογενή ανάκτηση του πετρελαίου από τους αντίστοιχους ταμιευτήρες, υπό την πίεση ποσοτήτων νερού που εισάγονται σε αυτούς (water drive recovery).
- Η πλήρης απόληψη των γεωθερμικών ρευστών δεν συνεπάγεται και την ολοκληρωτική αξιοποίηση του γεωθερμικού πεδίου. Τα αποθήκευτρα πετρώματα συγκρατούν πολλαπλάσια ποσά θερμότητας από αυτά των ρευστών και ένας τρόπος ανάκτησης και αυτών των ποσών θερμότητας είναι η επανακυκλοφορία των ψυχθέντων ρευστών μέσα από τα πετρώματα του ταμιευτήρα.
- Η διατήρηση της πίεσης του κοιτάσματος με την επανεισαγωγή των ρευστών εμποδίζει τις καθιζήσεις της επιφάνειας του εδάφους πάνω από τον ταμιευτήρα, που συνήθως προκαλείται κατά την αξιοποίηση ενός γεωθερμικού πεδίου.
- Οι γεωθερμικοί ταμιευτήρες περιβάλλονται από άλλα πετρώματα που επιτρέπουν την άφιξη και συγκράτηση ψυχρών ρευστών σε αυτούς. Τα ψυχρά ρευστά είναι, είτε μετεωρικής, είτε θαλάσσιας προέλευσης, και οι θερμικές επιδράσεις της διείσδυσής τους στον ταμιευτήρα είναι αυτονόητες. Η επανεισαγωγή σε πιθανές

θέσεις εισροής ψυχρών ρευστών (περιφερειακές θέσεις του ταμιευτήρα) παρεμποδίζει την ενεργειακή του υποβάθμιση.

Υπάρχουν όμως και οι αρνητικές επιπτώσεις από την επανεισαγωγή, όπως:

- Η ακατάλληλη επιλογή θέσεων επανεισαγωγής προκαλεί ταχύτερη από την αναμενόμενη ψύξη και εξάντληση του ταμιευτήρα. Ειδικότερα, στην περίπτωση ρωγματομένου ταμιευτήρα είναι πιθανή η άμεση επικοινωνία της γεώτρησης επανεισαγωγής με κάποια παραγωγική. Για τον περιορισμό της ψύξης του κοιτάσματος πραγματοποιείται η θερμομόνωση των επιφανειακών αγωγών ροής των επανεισαγομένων ρευστών, ενώ για την αποφυγή της επικοινωνίας παραγωγικών με γεωτρήσεις επανεισαγωγής πραγματοποιούνται πειράματα αλληλεπίδρασης ή/και ιχνηθέτησης, από τα οποία προκύπτει αν η εξεταζόμενη γεώτρηση είναι κατάλληλη για επανεισαγωγή ή όχι.
- Η υπό πίεση επανεισαγωγή των ρευστών αυξάνει τη σεισμική ενεργότητα της περιοχής.

Όπως αναφέρθηκε και στην **ενότητα 5.5.1** του παρόντος Κεφαλαίου για την ανάπτυξη του γεωθερμικού πεδίου της Μήλου εγκαταστάθηκε μονάδα-πilotος 2 MWe. Η τροφοδοσία της μονάδας αυτής γινόταν με διαφασικά ρεύματα από τη γεώτρηση M2. Για περιβαλλοντικούς λόγους η άλμη της M2 δεν απορριπτόταν στη θάλασσα αλλά επανεισάγεται στον ταμιευτήρα μέσω της γεώτρησης M1. Τα χαρακτηριστικά ροής που μετρήθηκαν στη γεώτρηση M1 παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.3**.

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά ροής της M1 (Γελεγένης, 1992)

| | |
|--------------------------|------------------------|
| Συνολικός ρυθμός ροής* | 119 tn/h |
| Ενθαλπία | 1460 kJ/kg |
| Διαλυμένα στερεά | 120000 ppm |
| Θερμοκρασία στον πυθμένα | 323 °C |
| Πίεση στον πυθμένα | 120 kg/cm ² |

*αντιστοιχεί σε πίεση κεφαλής 12 kg/cm²

Για την καταλληλότητα της M1 ως γεώτρησης επανεισαγωγής, διεξήχθησαν δύο μακράς διάρκειας δοκιμές επανεισαγωγής κατά τις οποίες εκτελέστηκαν πέντε πειράματα έγχυσης-αποκατάστασης. Οι Γελεγένης (1988) και Γελεγένης και Κουμούτσος (1989) δίνουν το μοντέλο της γεώτρησης M1. Αποδεικνύουν την ύπαρξη δύο ζωνών τροφοδοσίας, μία στα 900 m και μία κοντά στον πυθμένα, στα 1150 m. Αποδεικνύουν επίσης την εισροή ρευστών από την ανώτερη ζώνη, στα 900 m, προς τη γεώτρηση κατά τη διάρκεια της επανεισαγωγής, που υπολογίζεται να φτάνει και τους 1,45 tn/h. Με τη διακοπή της επανεισαγωγής η ροή αυτή περιορίζεται συνεχώς και τελικά αντιστρέφεται, έτσι ώστε, μετά τη θερμοκρασιακή αποκατάσταση, ρευστά με ρυθμό 0,12 tn/h να ρέουν από την κατώτερη ζώνη στην ανώτερη.

Στην περίπτωση του γεωθερμικού σταθμού της Μήλου, η διάθεση στην θάλασσα αποτελεί έναν εναλλακτικό τρόπο διάθεσης του αλμολοίπου. Η ανάγκη όμως προστασίας του θαλάσσιου και παράκτιου περιβάλλοντος επιβάλλει τη διερεύνηση και το σχεδιασμό κατάλληλων έργων επεξεργασίας για τον περιορισμό των ρυπαντικών παραμέτρων σε επιτρεπτά επίπεδα, ώστε η διάθεση στη θάλασσα να είναι περιβαλλοντικά αποδεκτή.

Όπως προέκυψε από έρευνα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και της Υγειονομικής Σχολής Αθηνών, αλλά και από μετρήσεις της ΔΕΗ, τα γεωθερμικά ρευστά της Μήλου ανήκουν στην κατηγορία των πιο “βεβαρημένων” ρευστών. Πράγματι, το αλμολοίπο έχει θερμοκρασία 90 °C, pH 5,0 και περιέχει υψηλές ποσότητες διαλελυμένων αλάτων, κυρίως NaCl, αμμωνίας και ιχνοστοιχείων όπως Fe, Mn, B, Ba, και As (**Πίνακας 5.4**). Χαρακτηριστική επίσης είναι η υψηλή συγκέντρωση πυριτικών που είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία των γνωστών προβλημάτων των επικαθίσεων.

Σύμφωνα με την προαναφερθείσα έρευνα, ο βέλτιστος τρόπος επεξεργασίας όλων ταυτόχρονα των παραμέτρων περιλαμβάνει επεξεργασία του αλμολοίπου με χλώριο σε δόσεις 100 mg/l Cl κατά μέσο όρο για την οξείδωση του αρσενικού και στη συνέχεια κροκίδωση με ασβέστη σε δόσεις 300-400 mg/l για την χημική κατακρήμνιση και καθίζηση των αιωρούμενων και κolloειδών στερεών και των τοξικών ουσιών. Ο βαθμός απομάκρυνσης των συστατικών του αλμολοίπου που επιτυγχάνεται κατά την επεξεργασία αυτή και οι τελικές συγκεντρώσεις στο επεξεργασμένο αλμολοίπο παρουσιάζονται στις στήλες 2 και 3 του **Πίνακα 5.4**.

Όπως προκύπτει τελικά από τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας (Ε.Μ.Πολυτεχνείο και Υγειονομική Σχολή Αθηνών), η διάθεση στη θάλασσα του αλμολοίπου του γεωθερμικού σταθμού της ΔΕΗ στη Μήλο είναι τεχνικά εφικτή και περιβαλλοντικά αποδεκτή, με την προϋπόθεση της προηγούμενης επεξεργασίας του αλμολοίπου. Το σχήμα επεξεργασίας που προτείνεται περιλαμβάνει διαδοχικά ωρίμανση, χλωρίωση, κροκίδωση και καθίζηση. Το υπερκείμενο υγρό πριν την τελική διάθεση θα παραμένει σε δεξαμενή αποθήκευσης για ψύξη, ενώ η ιλύς θα οδηγείται σε κλίνες ξήρανσης για αφυδάτωση. Η αφυδατωμένη ιλύς θα μπορεί να διατίθεται σε εγκαταλειμμένα λατομεία. Επίσης, η προτεινόμενη επεξεργασία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με επανεισαγωγή του αλμολοίπου σε απλή γεώτρηση, για την αποφυγή των προβλημάτων των επικαθίσεων.

Επισημαίνεται πάντως ότι για την πιθανή υλοποίηση της λύσης είναι απαραίτητη η κατασκευή μονάδας-πλότου για τον έλεγχο ενδεχόμενων διαφοροποιήσεων της φυσικοχημικής συμπεριφοράς του αλμολοίπου από την εργαστηριακή στη φυσική κλίμακα. Είναι επίσης προφανές ότι λόγω της μεταβλητής σύστασης των γεωθερμικών ρευστών μέσα στο ίδιο γεωθερμικό πεδίο, όσο και σε γειτονικά πεδία άλλων νήσων του Αιγαίου, επιβάλλεται ιδιαίτερη διερεύνηση σε κάθε περίπτωση σχετικά με το είδος και τον βαθμό της επεξεργασίας.

Πίνακας 5.4: Συνοπτικά στοιχεία συγκεντρώσεων αλμολοίπου στη γεωθερμική μονάδα της Μήλου (TEE, 1989)

| Παράμετρος ή Στοιχείο | Τυπική | Προτεινόμενη Επεξεργασία | | Όρια θαλάσσιου αποδέκτη * | | Εκτιμώμενες συγκεντρώσεις αλμολοίπου | |
|------------------------------|--------------------|--------------------------|--|------------------------------------|------------------------------|--|--|
| | Σύσταση Αλμολοίπου | Βαθμός απομάκρυνσης (%) | Συγκεντρώσεις στο επεξεργασμένο αλμολοίπο (mg/l) | Στην άμεση γειτονία εκβολής (mg/l) | Στην ευρύτερη περιοχή (mg/l) | Μέγιστη στην προσπίπτουσα φλέβα (mg/l) | Μέση τελική στο πυθμενικό ρεύμα (mg/l) |
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) |
| Αιωρούμενα στερεά | 900-1000 | >95 | | | | | |
| Πυρρτικά | 90-110 | 55 | | | | | |
| pH | 5,3-5,5 | | 7,5-8,5 | - | ±0,5 | 7,5-8,5 | 7,5-8,5 |
| Διαλυμένο οξυγόνο | 0 | | 1-2 | - | 70% κορεσμού | >90% κορεσμ. | >95% κορεσμ. |
| Αμμωνία (NH ₃ -N) | 30-35 | 40 | ~20 | - | - | 0,9 | 0,02 |
| Αρσενικό (As) | 5,0-5,6 | 90 | 0,6 | 0,05 | 0,01 | 0,026 | 0,006 |
| Βάριο (Ba) | 40-45 | 40-50 | 20-25 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 0,2 |
| Βάριο (B) | 55-80 | 30 | 40-50 | 5,0 | 0,5 | 2-2,5 | 0,4-0,5 |
| Σίδηρος (Fe) | 17-21 | 70 | 5-6 | 0,3 | 0,05 | 0,25 | 0,05 |
| Μαγγάνιο (Mn) | 30-36 | 80-90 | 5 | - | 0,1 | 0,2 | 0,05 |
| Κάδμιο (Cd) | <0,025 |) | <0,001 | 0,0025 | - | <5x10 ⁻⁴ | <10 ⁻⁵ |
| Μόλυβδος (Pb) | 1,2-1,7 | | ~0,5 | 0,05 | 0,01 | 0,02 | 0,005 |
| Χαλκός (Cu) | 0,09 | ~70% | <0,003 | 0,05 | 0,01 | <1,3x10 ⁻⁴ | <3x10 ⁻⁵ |
| Χρώμιο (Cr) | 0,12 | | 0,035 | 0,05 | 0,01 | 0,0015 | 0,00035 |
| Ψευδάργυρος (Zn) | 0,8-0,9 | | ~0,25 | 0,1 | 0,02 | 0,01 | 0,0025 |
| Υδράργυρος (Hg) | - | | | 0,0005 | | | |

*: Τα όρια αυτά που αναφέρονται αντίστοιχα στην άμεση γειτονία της εκβολής και στην ευρύτερη περιοχή του αποδέκτη, προέρχονται από στοιχεία της διεθνούς βιβλιογραφίας και κυρίως της EPA (Αθήνα, TEE, 1989).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΤΡΗΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗ Μ1

6.1. Εισαγωγή

Κατά την όρυξη μιας γεώτρησης τηρείται πλήρες αρχείο όπου καταγράφονται μια σειρά παραμέτρων που αφορούν στα εξής:

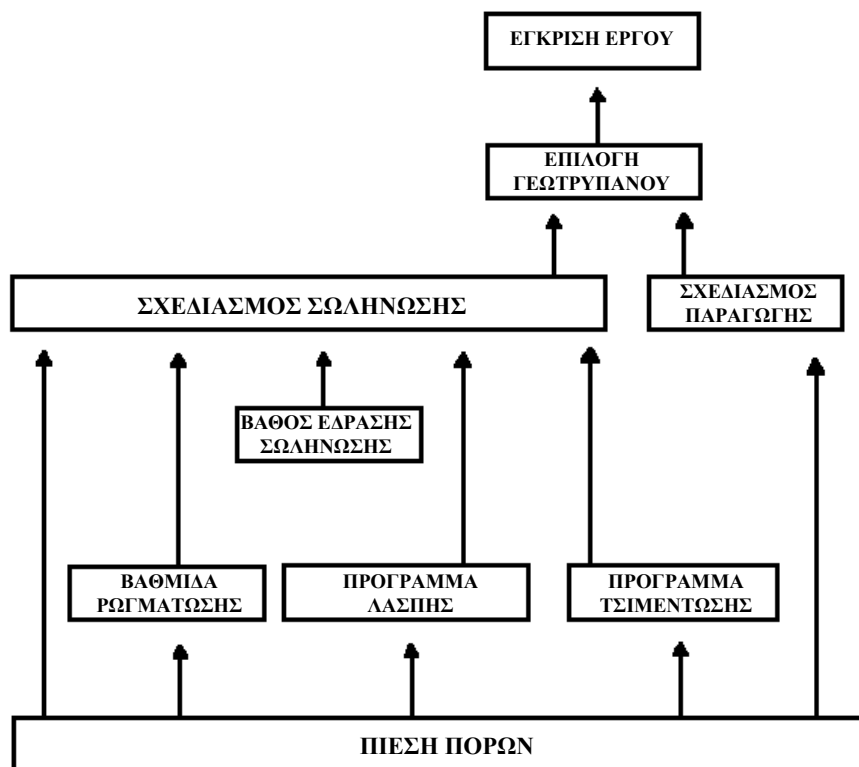
- Χαρακτηριστικά (τύπος και διάμετρος) κοπτικών άκρων.
- Παράμετροι λειτουργίας των κοπτικών (μήκος τμήματος που ορύχθηκε με το κάθε κοπτικό, ρυθμός προχώρησης, βάρος επί του κοπτικού, ταχύτητα περιστροφής, βαθμός και είδος φθοράς).
- Χαρακτηριστικά λάσπης διάτρησης (πυκνότητα, παροχή).
- Χαρακτηριστικά διατρυόμενων σχηματισμών (τύπος).

Τα παραπάνω στοιχεία μπορούν να αξιοποιηθούν για την εκτίμηση μεγεθών και παραμέτρων της διάτρησης που η γνώση τους είναι σημαντική, ώστε η όρυξη μιας επόμενης γεώτρησης να είναι πιο επιτυχημένη και περισσότερο τεχνικά άρτια, οικονομική και ασφαλής.

Μία από τις πιο κρίσιμες πληροφορίες που μπορούν να εξαχθούν από τα δεδομένα μιας γεώτρησης για το υπέδαφος μιας περιοχής, αφορούν κυρίως στις γεωπιέσεις που επικρατούν συναρτήσει του βάθους, τις τάσεις ρωγμάτωσης των σχηματισμών, αλλά και τη συνεκτικότητα και τη διαπερατότητα των σχηματισμών. Έλλειψη ή αδυναμία εκτίμησης των γεωπιέσεων μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα, όπως: απώλεια κυκλοφορίας ρευστών διάτρησης, εκτινάξεις ή εκρήξεις λόγω αδυναμίας ελέγχου των εσωτερικών πιέσεων, μη σταθερότητα των τοιχωμάτων του πηγαδιού, καταπτώσεις και

παγίδευση της διατρητικής στήλης που συνεπάγεται υψηλότερο κόστος, έως και πλήρη αχρήστευση της γεώτρησης.

Πιο συγκεκριμένα, από τα χαρακτηριστικά και τις παραμέτρους λειτουργίας των κοπτικών μπορούν να υπολογιστούν μια σειρά γεωμηχανικές παράμετροι, όπως η *πίεση πόρων του πετρώματος* ή *πίεση του σχηματισμού* και η *βαθμίδα ρωγμάτωσης*, που περιγράφουν τις γεωπιέσεις σε μία περιοχή. Για την εκτίμηση των γεωπιέσεων που επικρατούν στο υπέδαφος χρησιμοποιείται το μοντέλο του εκθέτη d , με τη βοήθεια του οποίου υπολογίζεται και η *πίεση του σχηματισμού (formation pressure), P_f* . Η γνώση των γεωπιέσεων υπεισέρχεται, με ελάχιστες εξαιρέσεις, στο σύνολο του σχεδιασμού μίας γεώτρησης (Σχήμα 6.1). Εάν δεν δοθεί η ανάλογη προσοχή, τα υπόλοιπα στάδια του σχεδιασμού μπορεί να είναι χωρίς σημασία. Για την εκτίμηση της αντοχής των σχηματισμών σε ρωγμάτωση, χρησιμοποιείται η *βαθμίδα ρωγμάτωσης (formation gradient), FG* , η οποία ουσιαστικά, αναφέρεται στην πίεση που αντέχει ο σχηματισμός και εκφράζεται σε ανηγμένη μορφή (psi/ft).



Σχήμα 6.1. Γεωπιέσεις και σχεδιασμός γεωτρήσεων (Πηγή: Σταματάκη, 2003)

Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφεται συνοπτικά η προέλευση των γεωπιέσεων και παρατίθενται σχετικοί ορισμοί, εξηγείται καλύτερα η σημασία της σωστής εκτίμησης των γεωπιέσεων για την όρυξη των γεωτρήσεων και παρουσιάζονται οι μέθοδοι πρόβλεψής τους, με ιδιαίτερη έμφαση στις μεθόδους υπολογισμού τους από τα δεδομένα της διάτρησης.

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι γεωμηχανικές παράμετροι για τη γεώτρηση M1 της Μήλου, καθώς μόνο γι' αυτή υπήρχαν διαθέσιμα στη βιβλιογραφία τα δεδομένα όρυξης.

6.2. Προέλευση γεωπιέσεων - Ορισμοί

6.2.1. Επεξήγηση του όρου «ανώμαλη πίεση»

Εξ ορισμού, *ανώμαλη (abnormal) πίεση* είναι κάθε γεωπίεση που διαφέρει από την κανονική τάση (normal) που εμφανίζουν οι πιέσεις στη δεδομένη περιοχή και στο βάθος ενδιαφέροντος. Η πίεση μπορεί να είναι μικρότερη της κανονικής, οπότε χαρακτηρίζεται *υποπίεση* ή μεγαλύτερη της κανονικής και χαρακτηρίζεται ως *υπερπίεση*.

Ζώνες υποπιέσεων δημιουργούν σχετικά μικρά προβλήματα στη διάτρηση. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ζώνες υπερπιέσεων και, επομένως, η θεώρηση στο εξής της έννοιας ανώμαλη πίεση αφορά στις υπερπιέσεις.

6.2.2. Πίεση σχηματισμού

Πίεση πόρων του πετρώματος ορίζεται η πίεση που ασκείται από τα ρευστά που τυχόν εμπεριέχονται στους πόρους του σχηματισμού (νερό συνήθως αλμυρό, πετρέλαιο ή αέριο). Οι όροι: πίεση πόρων (pore pressure), πίεση σχηματισμού (formation pressure) και πίεση ρευστών του σχηματισμού (formation fluid pressure) είναι συνώνυμοι και στο εξής υιοθετείται ο όρος, *πίεση σχηματισμού (P_f) (formation pressure)*.

Συνεπώς, η πίεση σχηματισμού διαφέρει από την τάση των υπερκειμένων. Ως **τάση υπερκειμένων** (σ_v) ορίζεται η τάση που προκύπτει από το βάρος των στρωμάτων των υπερκειμένων της ζώνης ενδιαφέροντος. Η ανηγμένη έκφρασή της (τάση υπερκειμένων/βάθος) είναι 1 psi/ft (0,2262 bar/m), σε τεκτονικά ήρεμες ζώνες, και χαρακτηρίζεται ως **βαθμίδα υπερκειμένων**. Σε περιοχές όπου υπάρχει τεκτονική δραστηριότητα, π.χ. ιζηματογενείς λεκάνες, όπου συνεχίζεται να υφίσταται συμπίεση ή έντονα ρωγματομένες ζώνες, η βαθμίδα υπερκειμένων μεταβάλλεται με το βάθος και μια μέση τιμή αυτής, της τάξης των 0,8 psi/ft, θεωρείται αντιπροσωπευτική. Γενικά, η βαθμίδα υπερκειμένων μεταβάλλεται από γεωλογική σε γεωλογική περιοχή και αυξάνει με το βάθος, λόγω της συμπίεσης της μάζας του πετρωμάτων. Σε πορώδη πετρώματα, η τάση των υπερκειμένων αντισταθμίζεται από την πίεση της βραχομάζας (σ_c) και την πίεση των πόρων του πετρώματος (P_f), έτσι ώστε:

$$\sigma_v = \sigma_c + P_f$$

6.2.3. Κανονική πίεση σχηματισμού

Κανονική πίεση σχηματισμού είναι η πίεση που αντιστοιχεί στην υδροστατική πίεση που ασκεί στήλη νερού (καθαρού ή αλμυρού) στο βάθος που βρίσκεται ο σχηματισμός. Η πίεση στήλης νερού (P_D), που αντιπροσωπεύει την κατακόρυφη συνέχεια του υγρού στο δίκτυο των πόρων, δίδεται από τη σχέση:

$$P_D = \rho \cdot g \cdot D \quad (6.1)$$

ή

$$P_D = G_w \cdot D \quad (6.2)$$

όπου:

ρ : η πυκνότητα του νερού (lb/gal),

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας ($g=9,807 \text{ m/sec}^2$),

D : το βάθος κάτω από ένα επίπεδο αναφοράς (π.χ. επιφάνεια θάλασσας) (ft),

G_w : η βαθμίδα πίεσης, η πίεση δηλαδή που ασκείται ανά μονάδα ύψους της στήλης νερού (psi/ft) (η βαθμίδα πίεσης είναι η ανηγμένη έκφραση του γινομένου $\rho \cdot g$).

Εάν η πυκνότητα (ρ) του ρευστού δίδεται σε lb/gal, η **βαθμίδα πίεσης (G_w)** δίδεται σε psi/ft, σύμφωνα με τη σχέση:

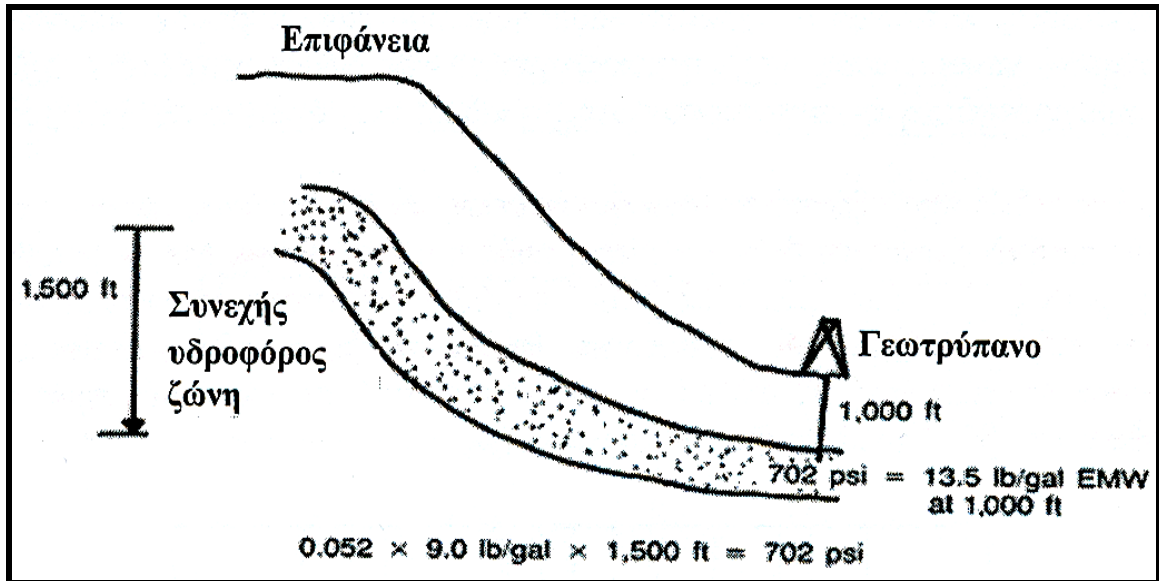
$$G_w = 0,052 \cdot \rho \quad (6.3)$$

όπου ο συντελεστής 0,052 εγκλείει όλες τις μετατροπές μονάδων και την αριθμητική τιμή του g.

Στην περίπτωση του καθαρού νερού, η πυκνότητα του λαμβάνεται ως 8,35 lb/gal (1 gr/cm³), που σύμφωνα με τη σχέση (6.3) αντιστοιχεί σε βαθμίδα πίεσης 0,433 psi/ft. Στην περίπτωση δε του αλμυρού νερού, η πυκνότητα του λαμβάνεται ίση με 8,95 lb/gal (1,073 gr/cm³), που σύμφωνα με τη σχέση (6.3) αντιστοιχεί σε βαθμίδα πίεσης 0,465 psi/ft. Ανεξαρτήτως της πυκνότητας του νερού, η κανονική πίεση θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε ένα ανοικτό υδραυλικό σύστημα το οποίο επικοινωνεί σε κάθε σημείο.

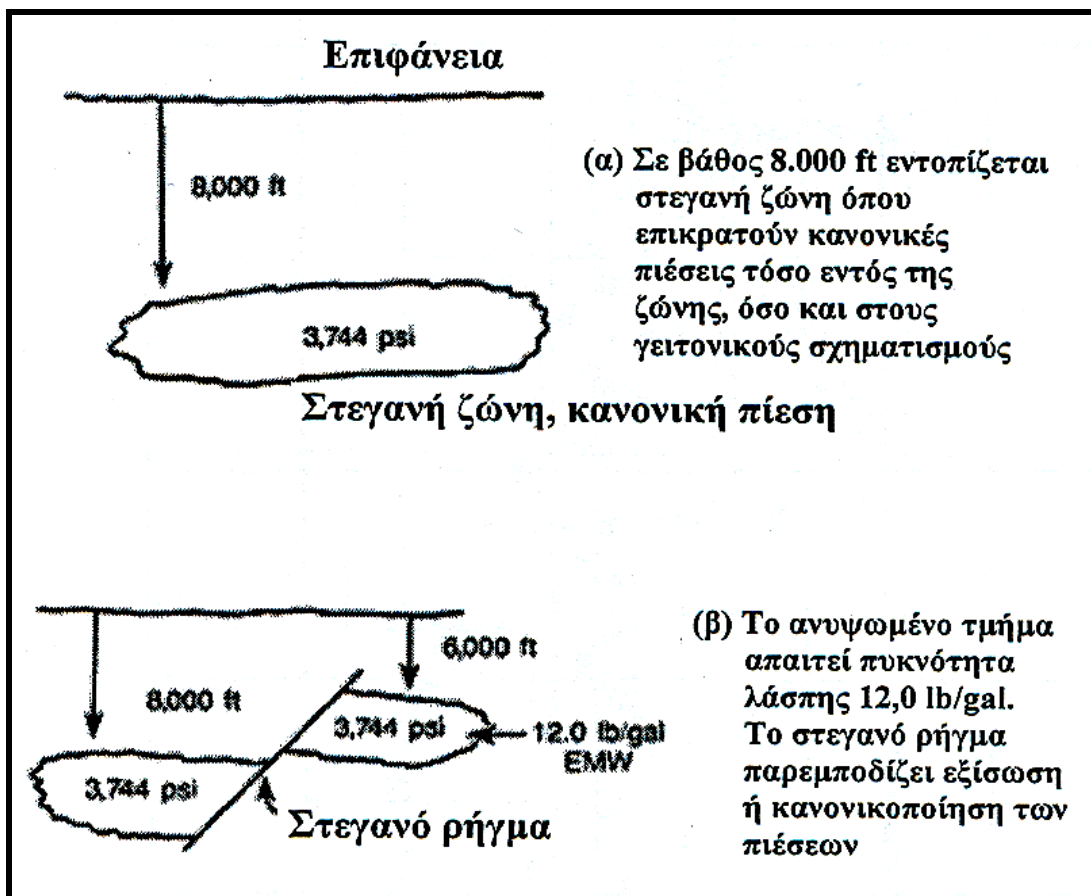
6.2.4. Ζώνες ανωμάτων πιέσεων

Οι ανώμαλες πιέσεις αναφέρονται σε συστήματα που χαρακτηρίζονται από αδυναμία επικοινωνίας. Οι ανώμαλες αυτές πιέσεις είναι, σχεδόν πάντα, μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες. Εάν ήταν δυνατή η επικοινωνία, τότε θα υπήρχε εξισορρόπηση και οι πιέσεις θα ήταν κανονικές. Επομένως, οι ζώνες ανωμάτων πιέσεων θεωρούνται ως κλειστά υδραυλικά συστήματα. Για να προκύψει αυτό σημαίνει ότι κάποιος μηχανισμός παρεμβλήθηκε και διέκοψε την επικοινωνία. Ανώμαλες πιέσεις μπορούν να δημιουργηθούν από αρτεσιανά συστήματα, εάν έχουν την κατάλληλη διαμόρφωση (**Σχήμα 6.2**). Μπορούν ακόμα να δημιουργηθούν από τεκτονικές δράσεις (ρήγματα), εξαιτίας των οποίων τμήματα ζωνών με κανονικές πιέσεις από τα αρχικά βάθη στα οποία βρίσκονταν, μεταφέρονται σε ανώτερα τοπογραφικά σημεία, με αποτέλεσμα, οι πιέσεις των μεταφερθέντων τμημάτων να μην είναι πλέον κανονικές στα μικρότερα βάθη (**Σχήμα 6.3**).



Σχήμα 6.2. Σχηματική παρουσίαση δημιουργίας ανωμάτων πιέσεων από αρτεσιανό σύστημα

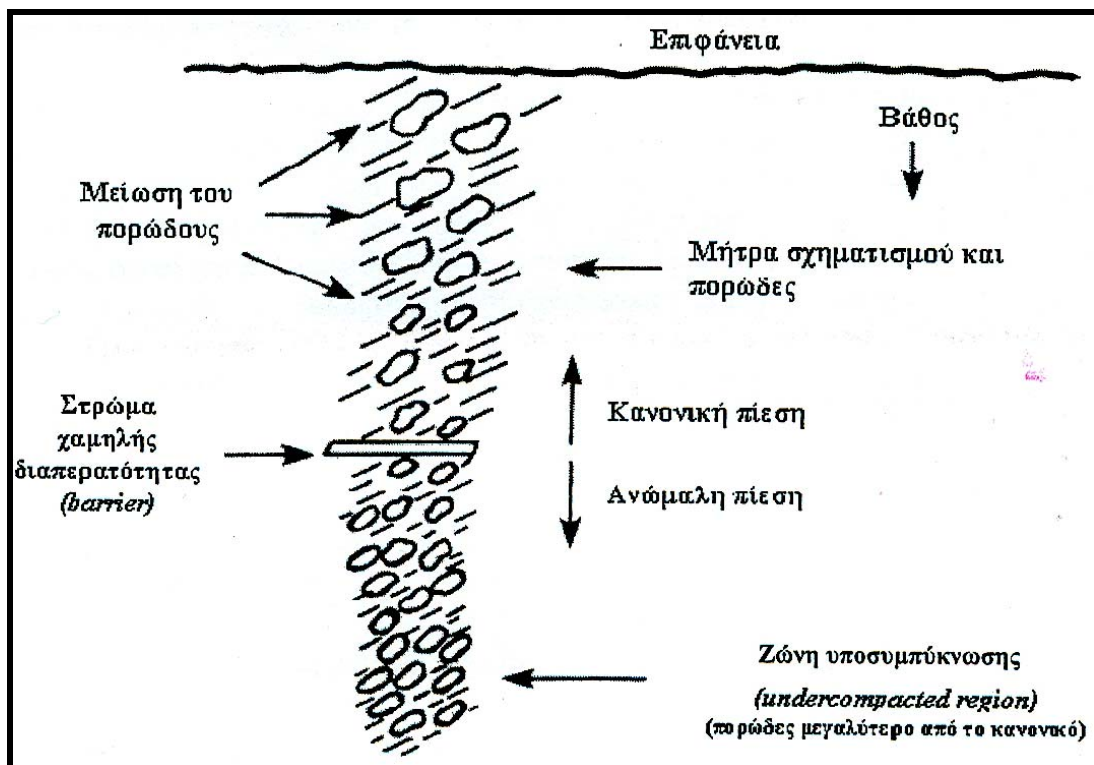
(Πηγή: Σταματάκη, 2003)



Σχήμα 6.3. Τεκτονικές δράσεις και δημιουργία ανωμάτων πιέσεων

(Πηγή: Σταματάκη, 2003)

Εκτός όμως από τις παραπάνω περιπτώσεις, η πιο συνηθισμένη περίπτωση είναι η παρεμβολή αδιαπέρατου στρώματος. Έστω λοιπόν ότι έχουμε την περίπτωση κανονικής απόθεσης ιζημάτων σε ένα δέλτα ποταμού (αλλουβιακές αποθέσεις). Καθώς το φαινόμενο εξελίσσεται τα υποκείμενα στρώματα συνθλίβονται από το αυξανόμενο βάρος των υπερκειμένων, το πορώδες τους μειώνεται και το νερό που υπάρχει στους πόρους ρέει εκτός του συστήματος, έτσι ώστε η πίεση των πόρων να παραμένει πάντα κανονική. Όμως, αν για κάποιο λόγο η εκροή του ρευστού εμποδίζεται, π.χ. από την απόθεση ενός στρώματος πολύ χαμηλής διαπερατότητας, η μείωση του πορώδους δεν μπορεί να συνεχιστεί. Αποτέλεσμα αυτής της «παρεμβολής» είναι η δημιουργία μιας ζώνης υποσυμπίεσης, όπου μόνο τα ρευστά εντός των πόρων αναλαμβάνουν πλέον την αύξηση της τάσης των υπερκειμένων, χωρίς να την μοιράζονται με τον σκελετό του πετρώματος. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται την αύξηση της πίεσης του ρευστού των πόρων του εν λόγω σχηματισμού πέραν της αναμενόμενης για το βάθος που βρίσκεται αυτός. Ο παραπάνω μηχανισμός δημιουργίας μιας ζώνης αυξημένης πίεσης, λόγω παρεμβολής αδιαπέρατου στρώματος, δίνεται στο Σχήμα 6.4.



Σχήμα 6.4. Δημιουργία ανώμαλων πιέσεων σε υποσυμπυκνωμένες ζώνες

(Πηγή: Σταματάκη, 2003)

Η σημασία της γνώσης του βάθους στο οποίο ενδεχομένως να ξεκινά μία ζώνη ανωμάτων πιέσεων έχει μεγάλη σημασία για τον μηχανικό, αφού στην περίπτωση που μία γεώτρηση εισέρθει σε μία τέτοια ζώνη πρέπει να διαφοροποιηθεί αμέσως το πρόγραμμα της λάσπης διάτρησης, ώστε να εξισορροπήσει τις νέες αυξημένες πιέσεις. Σε περίπτωση που δεν γίνει άμεσα εξισορρόπηση των πιέσεων, καταρχήν θα μειωθεί απότομα και δραματικά ο ρυθμός προχώρησης, αφού θα αυξηθεί απότομα η διαφορική πίεση. Ένας άλλος πολύ σοβαρός κίνδυνος, στην περίπτωση που η διαφορική πίεση είναι πολύ μεγάλη, είναι η εισροή ρευστών από τους πόρους του σχηματισμού εντός της γεώτρησης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ρεύματος που όχι μόνο θα παρασύρει τεμάχια του σχηματισμού, κατακρημνίζοντας τα τοιχώματα του φρέατος, αλλά ίσως και να σπρώξει ολόκληρα μέρη του διατρητικού εξοπλισμού προς της επιφάνεια.

6.3. Μέθοδοι πρόβλεψης & εκτίμησης γεωπιέσεων

Οι μέθοδοι οι οποίες μπορούν να συμβάλλουν στην πρόβλεψη ή/και στην εκτίμηση των γεωπιέσεων είναι οι εξής:

1. Ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων διαγραφιών (loggings).
2. Ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων επί τόπου διάτρησης.

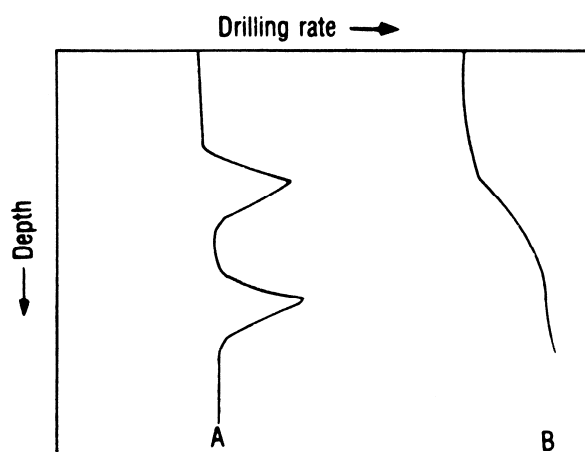
Η επεξεργασία των πληροφοριών που προέρχονται από διαγραφίες (loggings) σε γεωτρήσεις της ευρύτερης περιοχής είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη διαδικασία αξιολόγησης των γεωπιέσεων μιας περιοχής που μας ενδιαφέρει. Η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων είναι σημαντική για τον σχεδιασμό και την όρυξη μιας νέας γεώτρησης. Μέσω των διαγραφιών μπορεί να εκτιμηθεί η πίεση των σχηματισμών συναρτήσει του βάθους και να προσδιοριστεί η τυχόν θέση (βάθος) μετάβασης σε ζώνες ανωμάτων πιέσεων. Οι διαγραφίες που συνήθως χρησιμοποιούνται έχουν σχέση με τις παραμέτρους που επηρεάζονται από τις πιέσεις των σχηματισμών, όπως:

- ο τμηματικός χρόνος διάδοσης ακουστικών κυμάτων (interval transit time of acoustic waves – sonic log),
- η πυκνότητα των πετρωμάτων (density log), και

- η ηλεκτρική αγωγιμότητα, ή το αντίστροφο αυτής, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (resistivity log).

Με την ανάλυση και την επεξεργασία των δεδομένων επί τόπου διάτρησης, το έμπειρο τεχνικό προσωπικό πρέπει και μπορεί να αξιολογεί την «απόκριση» της γεώτρησης κατά τη διάρκεια της όρυξης. Δεν είναι τυχαίο αυτό που συνήθως λέγεται, ότι η γεώτρηση «ομιλεί» μέσω των τεχνικών παραμέτρων της και ιδιαίτερα μέσω της ταχύτητας διάτρησης. Απλά πρέπει να διασφαλίζεται η «καθαρότητα της γλώσσας» με την εξασφάλιση αποτελεσματικού και πλήρη καθαρισμού του μετώπου της διάτρησης από τα θρύμματα.

Η ταχύτητα διάτρησης επηρεάζεται από τη λιθολογία, τις τεχνικές παραμέτρους της διάτρησης (βάρος επί του κοπτικού, ταχύτητα περιστροφής, χαρακτηριστικές ιδιότητες ρευστού διάτρησης) και τις αλλαγές στις πιέσεις των διατρυόμενων σχηματισμών. Εάν θεωρήσουμε ότι οι παράμετροι διάτρησης παραμένουν σταθεροί, τότε οι μεταβολές στην προχώρηση σχετίζονται με τη λιθολογία και τις πιέσεις. Ξαφνικές και έντονες αλλαγές στην ταχύτητα διάτρησης (**Σχήμα 6.5, A**) υποδηλώνουν αλλαγές στη λιθολογία, γεγονός το οποίο μπορεί να επιβεβαιώνεται και από την ανάλυση των θρυμμάτων που ανέρχονται στην επιφάνεια. Σταδιακές αλλαγές (**Σχήμα 6.5, B**) φανερώνουν γενικώς μεταβολές στις πιέσεις των σχηματισμών.



Σχήμα 6.5. Μεταβολή της ταχύτητας διάτρησης λόγω αλλαγής λιθολογίας (A) ή αλλαγής της πίεσης των σχηματισμών (B) (Πηγή: Σταματάκη, 2003)

Το θέμα που απασχολεί είναι η δυνατότητα προσδιορισμού των πιέσεων των σχηματισμών σαν αποτέλεσμα της παρατηρούμενης μεταβολής της ταχύτητας διάτρησης. Είναι γεγονός ότι ο μηχανικός χρησιμοποιεί τις αλλαγές αυτές ως ενδείξεις και οι εκτιμήσεις του είναι περισσότερο ποιοτικές. Θα πρέπει, όμως, ταυτόχρονα να συνεκτιμά και άλλα στοιχεία, καθώς και να αξιοποιεί την εμπειρία του για να είναι σε θέση να δώσει θετικές απαντήσεις.

6.3.1. Ταχύτητα διάτρησης και εκθέτες d και d_{mod}

Οι Garnier και Lingen έδειξαν θεωρητικά ότι η ταχύτητα διάτρησης επηρεάζεται από τη διαφορά μεταξύ της πίεσης που ασκεί το ρευστό διάτρησης και της πίεσης του σχηματισμού στο βάθος που εξετάζεται. Οι Benit και Vidrine έδειξαν, με επί τόπου δοκιμές, ότι διαφορές στις προαναφερόμενες πιέσεις από 0 – 500 psi έχουν σημαντική επίδραση στην προχώρηση της γεώτρησης. Οι Jorden και Shirley ανέπτυξαν ένα χρήσιμο μαθηματικό μοντέλο για τη εκτίμηση της ταχύτητας διάτρησης, γνωστού ως μοντέλο «εκθέτη d », σύμφωνα με το οποίο ισχύει:

$$R = 60 \cdot N \left(\frac{12 \cdot W}{10^3 \cdot D_b} \right)^d \quad (6.4)$$

Όπου:

R: η ταχύτητα προχώρησης (ft/hr),

N: η ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού (rpm – στροφές/min),

W: το βάρος επί κοπτικού (lb βάρους/1000),

D_b : η διάμετρος του κοπτικού (in), και

d: ειδικός εκθέτης.

Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει αλλαγή στην ταχύτητα περιστροφής, στο βάρος επί κοπτικού, στη λιθολογία και τη διάμετρο του κοπτικού (άρα N, W, D_b σταθερά), ο εκθέτης d μεταβάλλεται μόνο με την μεταβολή της ταχύτητας διάτρησης. Έτσι, λύνοντας την

προηγούμενη εξίσωση ως προς d , για συγκεκριμένης διαμέτρου κοπτικό και με δεδομένες, σταθερές, τιμές ταχύτητας περιστροφής και βάρους επί κοπτικού, έχουμε:

$$d = \frac{\log\left(\frac{R}{60 \cdot N}\right)}{\log\left(\frac{12 \cdot W}{10^3 \cdot D_b}\right)} \quad (6.5)$$

Η γραφική απόδοση των τιμών του δείκτη d σε σχέση με το βάθος μας δίνει διαγράμματα στα οποία όταν παρουσιάζεται σοβαρή παρέκκλιση από τις αναμενόμενες (κανονικές) τιμές τότε μεταβαίνουμε σε ζώνες ανωμάτων πιέσεων. Ο εκθέτης d έχει υπόσταση ως μέγεθος μόνο στην περίπτωση που η πυκνότητα του ρευστού διάτρησης παραμένει σταθερή. Όταν στο υπέδαφος μιας περιοχής δεν υπάρχουν ζώνες ανωμάτων πιέσεων, οι τιμές του δείκτη d αυξάνονται ευθέως ανάλογα με το βάθος, δίνοντας ένα σχεδόν γραμμικό διάγραμμα συγκεκριμένης κλίσης. Έτσι, με τον όρο «αναμενόμενες», εννοούμε τις τιμές του d που ανήκουν σε αυτή την ευθεία. Αν η γεώτρηση συναντήσει μία ζώνη αυξημένων πιέσεων, με σταθερή την πυκνότητα της λάσπης, ο εκθέτης d παίρνει αρκετά χαμηλότερες τιμές από τις «αναμενόμενες», με αποτέλεσμα το διάγραμμα να εμφανίζει ξαφνικά μεγάλη απόκλιση από την προαναφερθείσα γραμμή. Έτσι, μέσω του εκθέτη d μπορούμε να εντοπίζουμε ζώνες ανωμάτων πιέσεων, αξιοποιώντας τα δεδομένα της διάτρησης (drilling data).

Η παρέκκλιση του εκθέτη d από τις κανονικές τιμές, μπορεί να οφείλεται είτε στην αύξηση της πίεσης του σχηματισμού, είτε στην αύξηση της πυκνότητας της λάσπης διάτρησης. Επειδή, λοιπόν, μπορεί οι μεταβολές πυκνότητας της λάσπης μπορούν να καλύπτουν τις μεταβολές της πίεσης σχηματισμού, οι Rem και McClendon ανέπτυξαν μία σχέση εξομάλυνσης (διόρθωσης) των τιμών του εκθέτη d , με ένα συντελεστή που αντιστοιχεί στον λόγο της πυκνότητας της λάσπης (p_n) που ισοδυναμεί με την κανονική πίεση των σχηματισμών στην περιοχή ενδιαφέροντος, προς την πυκνότητα της λάσπης διάτρησης (p) που έχει χρησιμοποιηθεί στο βάθος ενδιαφέροντος:

$$d_{\text{mod}} = d \cdot \frac{p_n}{p} \quad (6.6)$$

Όπου:

d_{mod} : ο διορθωμένος εκθέτης,

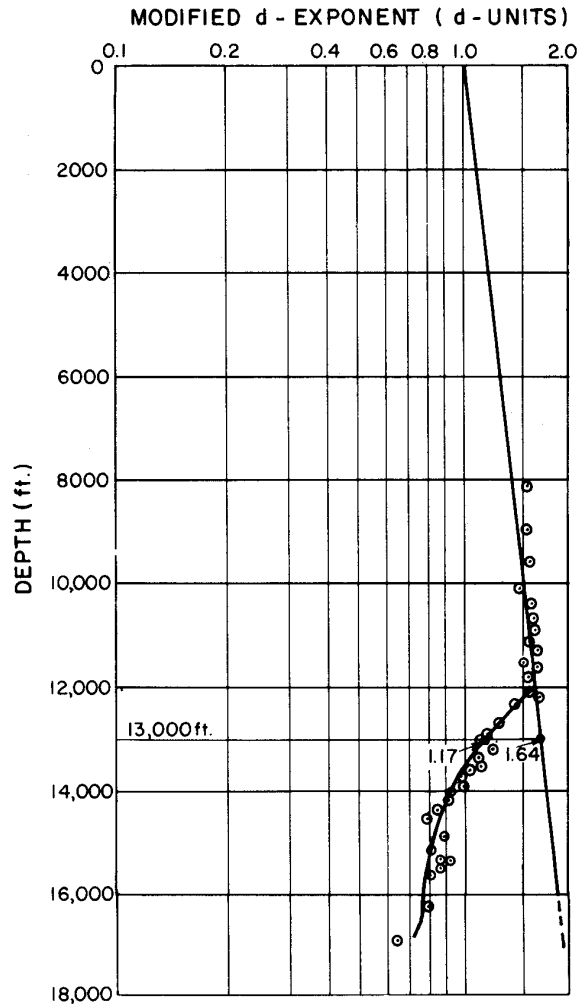
d : ο εκθέτης που έχει υπολογιστεί από την εξίσωση 6.5,

p_n : η ισοδύναμη πυκνότητα που αντιστοιχεί στην κανονική βαθμίδα πίεσης των σχηματισμών της περιοχής (lb/gal), και

p : η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης (lb/gal).

Θα πρέπει να υπενθυμιστεί ότι κάθε περιοχή χαρακτηρίζεται από μία τιμή κανονικής πίεσης που αντιστοιχεί στην υδροστατική πίεση που ασκεί στήλη νερού (καθαρού ή αλμυρού) στο βάθος που βρίσκεται κάθε σχηματισμός. Συνήθως θεωρείται εκείνη του αλμυρού νερού.

Ένα κλασικό παράδειγμα διαγράμματος d_{mod} – βάθος, στο οποίο η γεώτρηση συναντά ζώνη ανωμάτων πιέσεων, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.6**. Μέχρι τα 12000 ft οι τιμές του d_{mod} ακολουθούν τη ευθεία γραμμή των «αναμενόμενων» τιμών. Στα 12000 ft, παρατηρούμε ότι αρχίζει μια αρκετά μεγάλη παρέκκλιση των τιμών του d_{mod} προς τα αριστερά. Έτσι μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι στα 12000 ft ξεκινάει μία ζώνη ανωμάτων πιέσεων.



Σχήμα 6.6. Διάγραμμα διορθωμένου εκθέτη d (d_{mod}) με το βάθος

(Πηγή: Σταματάκη, 2003)

6.3.2. Προσδιορισμός της πίεσης του σχηματισμού (P_f)

Ο Zamora δίδει μια εμπειρική σχέση για τον προσδιορισμό της πίεσης των σχηματισμών από γεωτρητικά δεδομένα, εκφρασμένα μέσα από τον υπολογισμό του εκθέτη d . Οι τιμές του εκθέτη d πρώτα εξομαλύνονται (d_{mod}) και στη συνέχεια αναπαρίστανται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα. Η τιμή του εκθέτη d_{mod} που προκύπτει από την ευθεία των κανονικών τιμών (d_{mod-n}) στο βάθος ενδιαφέροντος και η τιμή του εκθέτη d_{mod} που έχει υπολογιστεί στο αντίστοιχο βάθος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της πίεσης του σχηματισμού στο βάθος ενδιαφέροντος μέσω της σχέσης:

$$P_f = normal P_f \cdot \frac{d_{mod-n}}{d_{mod}} \quad (6.7)$$

Όπου:

P_f : η ζητούμενη βαθμίδα πίεσης του σχηματισμού (psi/ft),

normal P_f : η κανονική βαθμίδα πίεσης της περιοχής (psi/ft),

d_{mod-n} : ο διορθωμένος εκθέτης που προκύπτει από την κανονική τάση που εμφανίζουν οι ζώνες κανονικής συμπίεσης, και

d_{mod} : ο διορθωμένος εκθέτης που υπολογίζεται από τα δεδομένα της γεώτρησης.

6.4. Βαθμίδα ρωγμάτωσης

Στον σχεδιασμό των γεωτρήσεων απαιτείται η γνώση της τάσης υπό την οποία αρχίζει η ρωγμάτωση του σχηματισμού. Η τάση ρωγμάτωσης είναι η τάση υπό την οποία ένας σχηματισμός αρχίζει να ρωγματώνεται. Ως «βαθμίδα ρωγμάτωσης» (fracture gradient – FG) ορίζεται η ανηγμένη έκφραση της τάσης ρωγμάτωσης του σχηματισμού σε σχέση με το βάθος. Με άλλα λόγια, η βαθμίδα ρωγμάτωσης είναι η τάση υπό την οποία ένας σχηματισμός αρχίζει να ρωγματώνεται συναρτήσει του βάθους. Η τάση που ασκείται στο σχηματισμό, στην περίπτωση μιας γεώτρησης, είναι αυτή που ασκεί το χρησιμοποιούμενο ρευστό διάτρησης. Η γνώση λοιπόν της βαθμίδας ρωγμάτωσης του σχηματισμού, είναι μεγάλης σημασίας για τον μηχανικό, γιατί μπορεί δημιουργηθεί ανεξέλεγκτη ρωγμάτωση του πετρώματος εξαιτίας υπέρβασης της οριακής πίεσης. Αποτέλεσμα της ρωγμάτωσης αυτής, είναι η απώλεια κυκλοφορίας του ρευστού και συνακολούθως η απώλεια ελέγχου του πηγαδιού. Έτσι, πρέπει πάντα να ρυθμίζεται η βαθμίδα πίεσης του ρευστού ώστε να απομακρύνει αποτελεσματικά τα παραγόμενα θρύμματα και να αντισταθμίζει την πίεση του σχηματισμού και σε καμία περίπτωση να μην ξεπερνάει την βαθμίδα ρωγμάτωσης.

Η ανηγμένη έκφραση της τάσης ρωγμάτωσης του σχηματισμού (συνολική επί τόπου τάση/βάθος), απετέλεσε αντικείμενο πολλών ερευνητών σε μία προσπάθεια εκτίμησης της παραμέτρου αυτής. Για τον σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν έμμεσες και άμεσες μέθοδοι. Οι μεν πρώτες βασίζονται σε εμπειρικές μαθηματικές εκφράσεις, οι δε άλλες σε επί τόπου δοκιμές σε μη σωληνωμένα τμήματα.

Η μέθοδος του Eaton είναι μια έμμεση μέθοδος εκτίμησης της βαθμίδα ρωγμάτωσης. Ένας από τους πιο αξιόπιστους εμπειρικούς τύπους για τον υπολογισμό της βαθμίδα ρωγμάτωσης (FG) είναι αυτός του Eaton:

$$FG = \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) \cdot \left[\frac{(\sigma_v - P_f)}{D} \right] + \frac{P_f}{D} \quad (6.8)$$

Όπου:

FG: η βαθμίδα ρωγμάτωσης (psi/ft),

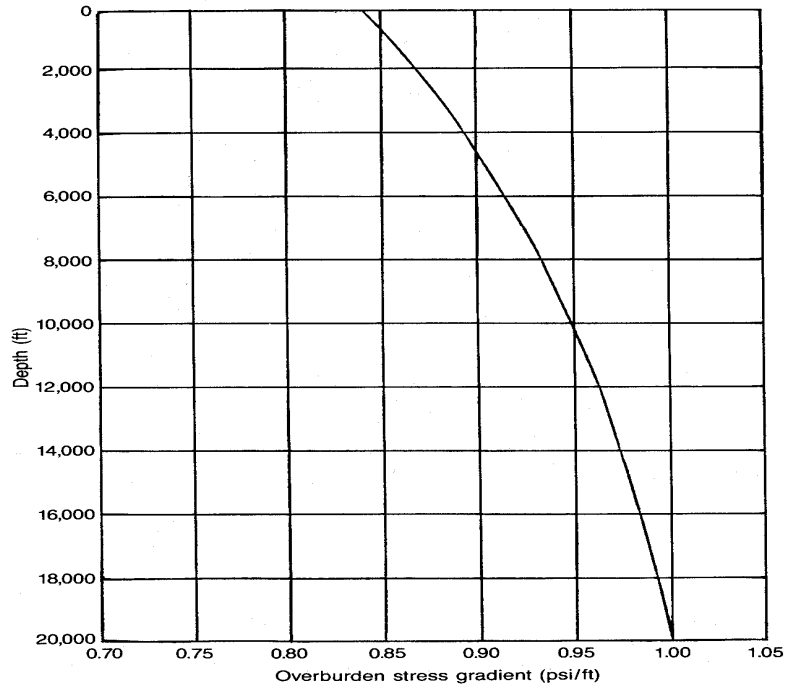
ν : ο λόγος Poisson (λόγος της πλευρικής παραμόρφωσης προς την αξονική παραμόρφωση, ενός πετρώματος υπό αξονική φόρτιση),

σ_v : η τάση των υπερκειμένων (psi),

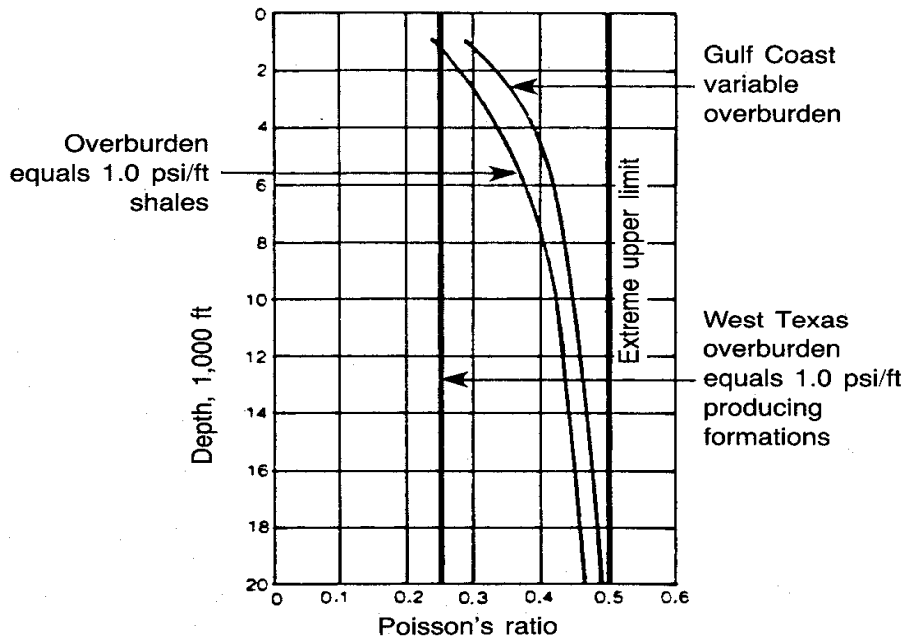
P_f : η πίεση του σχηματισμού (psi), και

D: το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο εν λόγω σχηματισμός (ft).

Η βαθμίδα πίεσης των υπερκειμένων μπορεί, για λόγους απλοποίησης, να λαμβάνεται ίση με 1, αν και μεταβάλλεται ως προς το βάθος από 0,85 – 1. Ο λόγος Poisson κυμαίνεται, σε σχέση με το βάθος, από 0,25 – 0,5, οπότε μία μέση τιμή του λόγου Poisson ίση με 4 είναι αρκετά αντιπροσωπευτική. Εάν υπάρχει απαίτηση για μεγαλύτερη ακρίβεια, τότε μπορούμε να λαμβάνουμε τιμές για την βαθμίδα πίεσης υπερκειμένων και τον λόγο ν , σε σχέση με το εκάστοτε βάθος, από τα διαγράμματα των **Σχημάτων 6.7 και 6.8** αντίστοιχα.



Σχήμα 6.7. Μεταβολή της βαθμίδας πίεσης υπερκειμένων με το βάθος
(Πηγή: Σταματάκη, 2003)

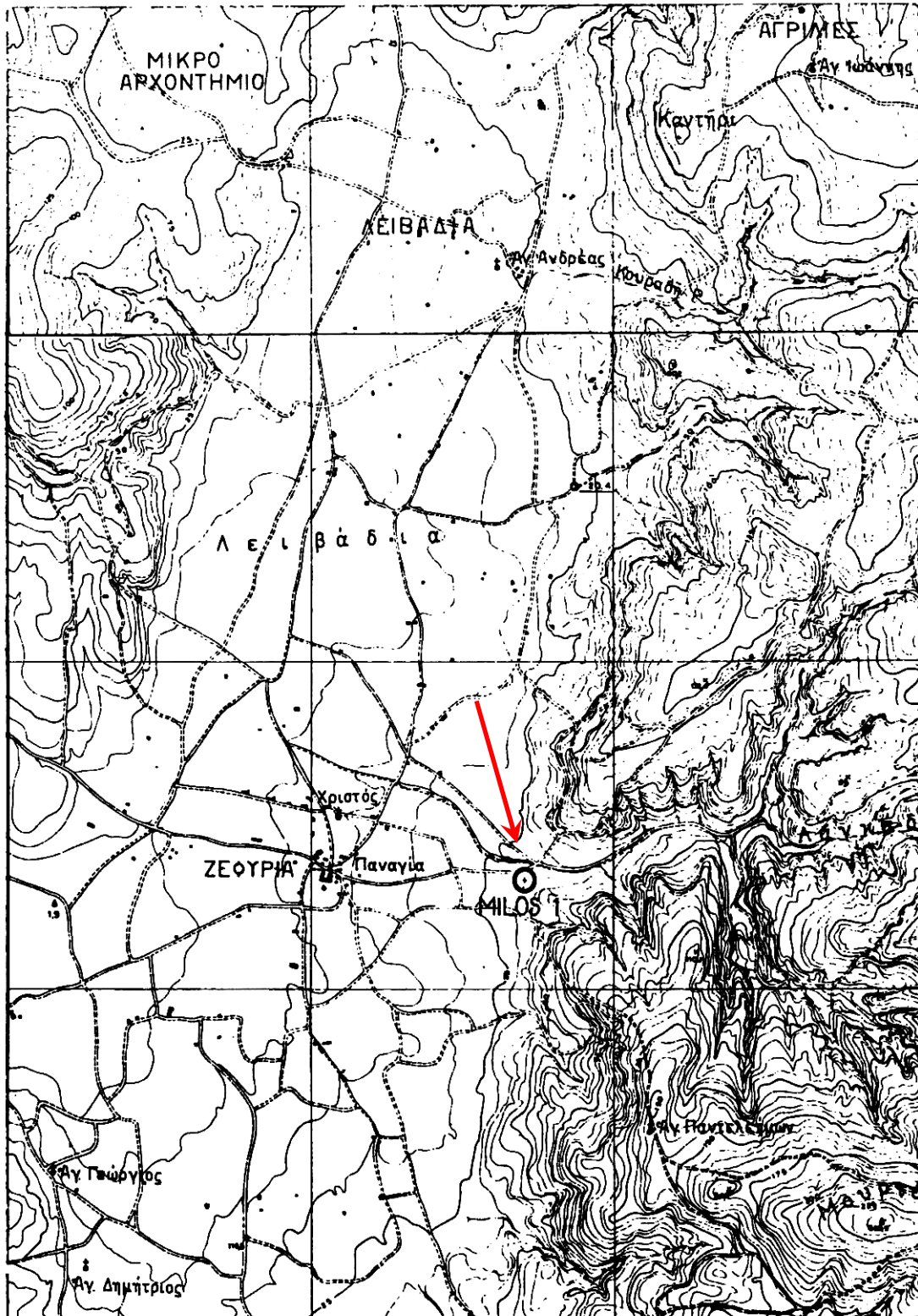


Σχήμα 6.8. Μεταβολή του λόγου Poisson με το βάθος
(Πηγή: Σταματάκη, 2003)

6.5. Εκτίμηση γεωπιέσεων για τη γεώτρηση M1

Όπως αναφέρθηκε και στο **Κεφάλαιο 4**, οι γεωθερμικές έρευνες στη χώρα μας άρχισαν από τη Μήλο το 1971. Μετά τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα που προέκυψαν, η Δ.Ε.Η. αποφάσισε την όρυξη δύο βαθιών γεωτρήσεων έρευνας-παραγωγής στη Ζεφυρία (MZ1) και στον Αδάμαντα (MA1), σε βάθη 1101 m και 1163 m αντίστοιχα, οι οποίες κατασκευάστηκαν το 1975-76 (**Σχήμα 4.5.**). Το Νοέμβριο του 1981 ολοκληρώθηκε η όρυξη τριών ακόμα παραγωγικών γεωθερμικών γεωτρήσεων, M1, M2 και M3 στην περιοχή της Ζεφυρίας, σε βάθος 1180 m, 1381 m και 1017 m, αντίστοιχα (**Σχήμα 4.5.**).

Η συλλογή όμως των απαραίτητων στοιχείων για τον προσδιορισμό των γεωμηχανικών παραμέτρων, αποδείχτηκε εξαιρετικά δύσκολη. Το πέρασμα πολλών ετών από την όρυξη των γεωτρήσεων, καθώς και οι συνεχείς μετακινήσεις των αρμοδίων γραφείων, είχε σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό της έρευνας. Έτσι, για τη μοναδική γεώτρηση που συγκεντρώθηκαν δεδομένα για τον προσδιορισμό των γεωμηχανικών παραμέτρων ήταν η **γεώτρηση M1**, η ακριβή θέση της οποίας φαίνεται στο **Σχήμα 6.9**.



Σχήμα 6.9. Τοποθεσία της γεώτρησης M1 (Πηγή: ΙΓΜΕ)

6.5.1. Υπολογισμός των εκθετών d & d_{mod} και της πίεσης των σχηματισμών (P_f)

Οι υπολογισμοί των εκθετών d και d_{mod} και της πίεσης των σχηματισμών παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.1**. Οι τιμές για τα d , d_{mod} και P_f προκύπτουν από υπολογισμούς που έγιναν με βάση τις εξισώσεις 6.5, 6.6 και 6.7 που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι υπολογισμοί δεν ξεκινούν από την επιφάνεια, αλλά από τα 541,37 ft (165 m). Αυτό γιατί το υπέδαφος έως αυτό το βάθος παραμένει υπό συνθήκες συμπίεσης (compaction) και η εφαρμογή της μεθοδολογίας του εκθέτη d να περιέχει εσφαλμένα αποτελέσματα.

Όσον αφορά στα βάρη επί του κοπτικού και την ταχύτητα περιστροφής, επειδή αυτά κυμαίνονται εντός ενός εύρους τιμών σε κάθε τμήμα προχώρησης, χρησιμοποιείται ο εκάστοτε μέσος όρος των διατρητικών παραμέτρων του τμήματος.

Επίσης, ενώ η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης, στα γεωτρητικά δεδομένα είναι εκφρασμένη σε μονάδες SI, για λόγους απλοποίησης χρησιμοποιείται ως έχει για τον υπολογισμό του εκθέτη d_{mod} . Τέλος, η πυκνότητα ρ_n που αντιστοιχεί στην κανονική βαθμίδα πίεσης των σχηματισμών, λαμβάνεται ίση με $1,073 \text{ gr/cm}^3$, η πυκνότητα για τους αλμυρού νερού.

Πίνακας 6.1. Υπολογισμός των εκθετών d και d_{mod} με αξιοποίηση των γεωτρητικών δεδομένων για τη γεώτρηση M1

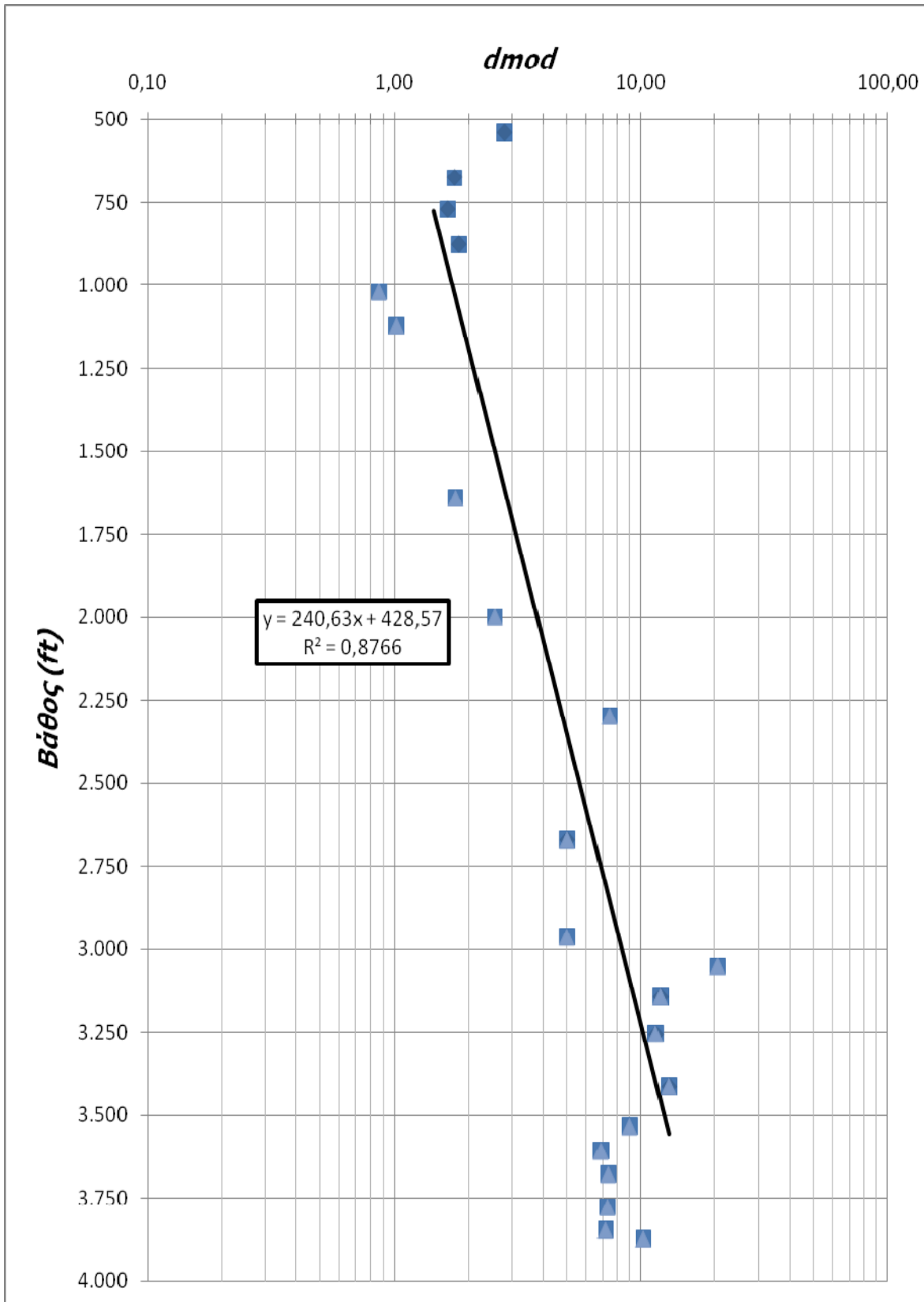
| ΓΕΩΤΡΗΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ | | | | | | ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ | |
|---------------------|---------------------------|---------------------------------|--|--------------------------------|---|-------------|-----------|
| Βάθος - D(ft) | Διάμετρος κοπτικού -D(in) | Ταχύτητα προχώρησης - R (ft/hr) | Βάρος επί του κοπτικού -W (10 ³ lb) | Ταχύτητα περιστροφής - N (rpm) | Πυκνότητα λάσπης διάτρησης - ρ (gr/cm ³) | d | d_{mod} |
| 326,46 | 24,00 | 9,11 | 4,41 | 62,5 | 1,10 | 9,418 | 9,182 |
| 426,53 | 17,50 | 6,46 | 8,82 | 65,0 | 1,10 | 3,157 | 3,078 |
| 541,37 | 17,50 | 5,94 | 8,82 | 65,0 | 1,16 | 3,022 | 2,794 |
| 675,89 | 17,50 | 4,72 | 11,02 | 62,5 | 1,16 | 1,897 | 1,754 |
| 771,04 | 17,50 | 4,64 | 11,02 | 57,5 | 1,16 | 1,778 | 1,644 |
| 877,67 | 17,50 | 4,27 | 8,82 | 47,5 | 1,16 | 1,975 | 1,826 |
| 1.018,75 | 17,50 | 4,52 | 16,53 | 42,5 | 1,16 | 0,934 | 0,864 |
| 1.120,46 | 17,50 | 4,62 | 15,43 | 47,5 | 1,16 | 1,103 | 1,020 |
| 1.640,50 | 12,25 | 6,15 | 17,64 | 62,5 | 1,18 | 1,949 | 1,771 |
| 1.998,13 | 12,25 | 14,42 | 15,43 | 40,0 | 1,16 | 2,763 | 2,554 |
| 2.296,70 | 12,25 | 13,82 | 9,92 | 60,0 | 1,00 | 6,961 | 7,465 |
| 2.670,73 | 12,25 | 10,45 | 11,02 | 55,0 | 1,00 | 4,681 | 5,020 |
| 2.962,74 | 12,25 | 10,39 | 11,02 | 55,0 | 1,00 | 4,670 | 5,008 |
| 3.051,33 | 8,50 | 9,42 | 11,02 | 60,0 | 1,00 | 19,139 | 20,526 |
| 3.143,20 | 8,50 | 10,81 | 12,13 | 60,0 | 1,00 | 11,200 | 12,012 |
| 3.254,75 | 8,50 | 10,62 | 12,13 | 55,0 | 1,00 | 10,710 | 11,487 |
| 3.412,24 | 8,50 | 14,32 | 12,13 | 55,0 | 1,00 | 12,114 | 12,992 |
| 3.533,64 | 8,50 | 13,49 | 13,23 | 55,0 | 1,00 | 8,396 | 9,005 |
| 3.607,46 | 8,50 | 8,20 | 13,23 | 50,0 | 1,00 | 6,417 | 6,882 |
| 3.678,00 | 8,50 | 7,84 | 13,23 | 60,0 | 1,00 | 6,874 | 7,372 |
| 3.776,43 | 8,50 | 11,58 | 13,23 | 40,0 | 1,00 | 6,823 | 7,318 |
| 3.845,33 | 8,50 | 8,11 | 13,23 | 55,0 | 1,00 | 6,696 | 7,181 |
| 3.871,58 | 8,50 | 17,50 | 13,23 | 60,0 | 1,00 | 9,555 | 10,248 |

¹ : Ο υπολογισμός του d έγινε με την εξίσωση 6.5

² : Ο υπολογισμός του d_{mod} έγινε με την εξίσωση 6.6

Το διάγραμμα του εκθέτη d_{mod} σε συνάρτηση με το βάθος που προκύπτει από τους παραπάνω υπολογισμούς για την γεώτρηση M1 δίδεται στο **Σχήμα 6.10**. Το βάθος αντιστοιχεί στον γραμμικό άξονα και οι τιμές του τοποθετούνται αυξανόμενες από κάτω προς τα πάνω για να αναπαραστήσουν καλύτερα την ανάπτυξη της γεώτρησης. Αντίθετα, λόγω της διαφοράς μεγέθους των τιμών βάθους και του εκθέτη d_{mod} , επιβάλλεται η απόδοση σε ημιλογαριθμική κλίμακα για την εξομάλυνση των διαφορών. Έτσι, οι τιμές του εκθέτη d_{mod} αντιστοιχούν στον λογαριθμικό άξονα.

Αρχικά προσδιορίζεται η ευθεία κανονικής τάσης, η εξίσωση της οποίας δίδεται στο διάγραμμα του **Σχήματος 6.10**, και η οποία αποδίδει τις τάσεις του d_{mod} σε συνθήκες κανονικής εξέλιξης των πιέσεων των σχηματισμών.



Σχήμα 6.10. Διάγραμμα d_{mod} σε συνάρτηση με το βάθος για την γεώτρηση M1

Ερμηνεία διαγράμματος “ d_{mod} – βάθος” για τη γεώτρηση M1

Παρά τη διασπορά των τιμών του d_{mod} ως προς την ευθεία κανονικής τάσης (d_{mod-n}), είναι εμφανές ότι από το βάθος των 3.412 ft (1.040 m) εμφανίζεται σχετική απόκλιση του εκθέτη d_{mod} . Η απόκλιση αυτή ορίζει το βάθος μετάβασης σε ζώνη όπου οι πιέσεις των σχηματισμών είναι μεγαλύτερες από εκείνες που αναμένονται υπό κανονικές συνθήκες.

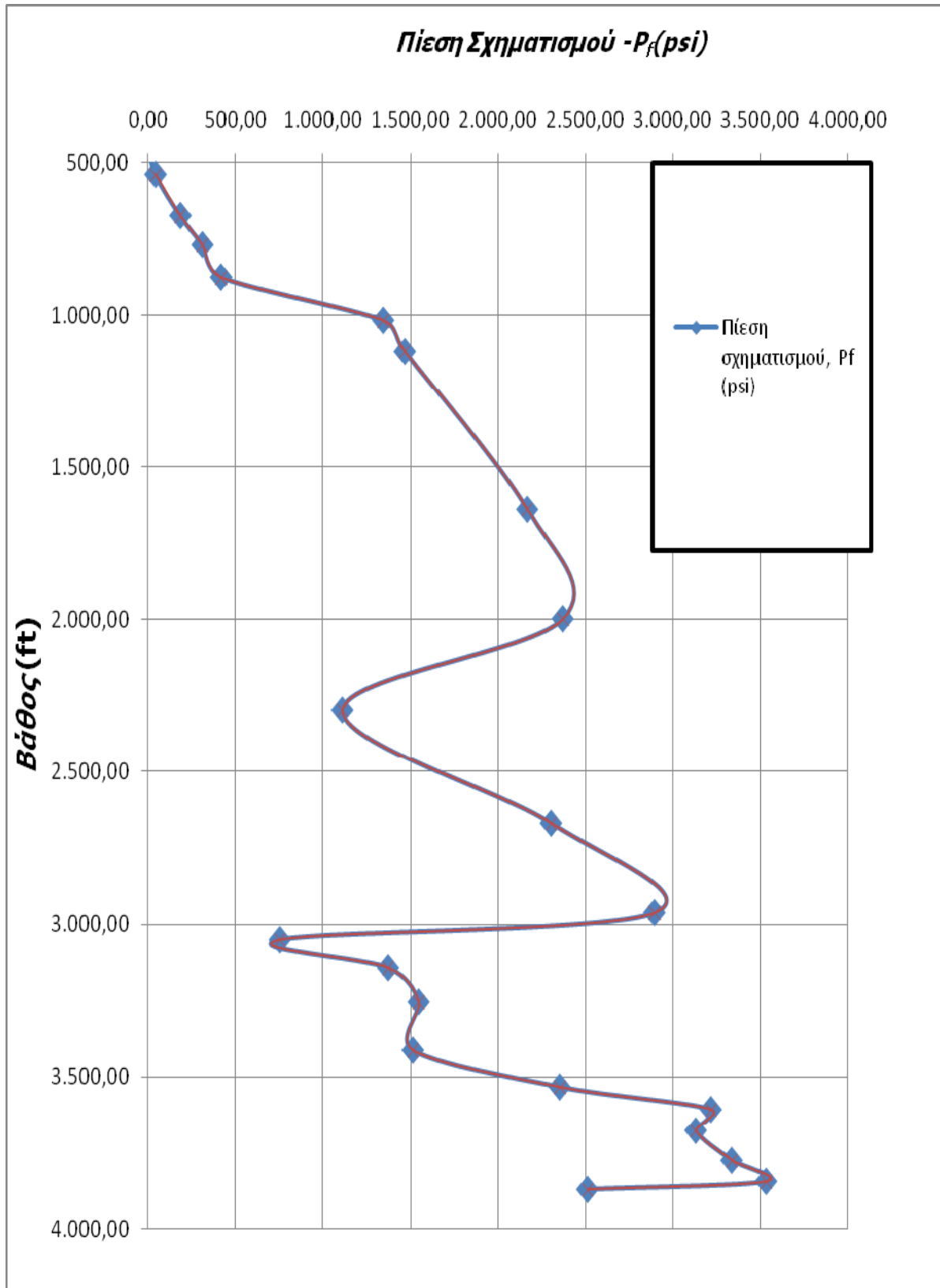
Η βαθμίδα πίεσης (P_f) των σχηματισμών στα διάφορα βάθη υπολογίζεται από τους εκθέτες d_{mod} , d_{mod-n} και την κανονική βαθμίδα πίεσης (normal P_f), σύμφωνα με την εξίσωση 6.7. Ο εκθέτης d_{mod} είναι ήδη προσδιορισμένος, ενώ ο εκθέτης d_{mod-n} προσδιορίζεται από την συνάρτηση της γραμμής κανονικής τάσης στο διάγραμμα του **Σχήματος 6.10** ($y=240,63x+428,57$), όπου y το ζητούμενο βάθος (η γραμμή τάσης και η εξίσωσή της δίδεται στο διάγραμμα του **Σχήματος 6.10**). Η κανονική βαθμίδα πίεσης των σχηματισμών (normal P_f) λαμβάνεται ίση με την βαθμίδα πίεσης του αλμυρού νερού (0,465 psi/ft). Ο **Πίνακας 6.2**, παρουσιάζει τους υπολογισμούς της βαθμίδας πίεσης και της πίεσης των σχηματισμών, για τη γεώτρηση M1.

Πίνακας 6.2: Υπολογισμός της βαθμίδας πίεσης και της πίεσης των σχηματισμών στη γεώτρηση

M1

| Βάθος, D(ft) | d_{mod} | d_{mod-n} | Βαθμίδα πίεσης σχηματισμού, P_f (psi/ft) | Πίεση σχηματισμού, P_f (psi) |
|-----------------|-----------|-------------|--|--------------------------------------|
| 541,37 | 2,793743 | 0,46875 | 0,07802 | 42,24 |
| 675,89 | 1,754343 | 1,02779 | 0,27242 | 184,13 |
| 771,04 | 1,643993 | 1,42320 | 0,40255 | 310,38 |
| 877,67 | 1,825866 | 1,86634 | 0,47531 | 417,16 |
| 1.018,75 | 0,863989 | 2,45265 | 1,32002 | 1.344,77 |
| 1.120,46 | 1,020231 | 2,87533 | 1,31052 | 1.468,38 |
| 1.640,50 | 1,771274 | 5,03649 | 1,32219 | 2.169,06 |
| 1.998,13 | 2,554459 | 6,52271 | 1,18736 | 2.372,50 |
| 2.296,70 | 7,465239 | 7,76350 | 0,48358 | 1.110,63 |
| 2.670,73 | 5,020368 | 9,31789 | 0,86305 | 2.304,97 |
| 2.962,74 | 5,008405 | 10,53141 | 0,97778 | 2.896,90 |
| 3.143,20 | 12,012178 | 11,28134 | 0,43671 | 1.372,66 |
| 3.254,75 | 11,486509 | 11,74493 | 0,47546 | 1.547,51 |
| 3.412,24 | 12,991991 | 12,39941 | 0,44379 | 1.514,32 |
| 3.533,64 | 9,004507 | 12,90391 | 0,66637 | 2.354,70 |
| 3.607,46 | 6,882262 | 13,21069 | 0,89258 | 3.219,95 |
| 3.678,00 | 7,372294 | 13,50385 | 0,85174 | 3.132,71 |
| 3.776,43 | 7,318005 | 13,91290 | 0,88405 | 3.338,56 |
| 3.845,33 | 7,181152 | 14,19924 | 0,91944 | 3.535,56 |
| 3.871,58 | 10,248016 | 14,30832 | 0,64923 | 2.513,56 |

Από τα στοιχεία του **Πίνακα 6.2** προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα της πίεσης του σχηματισμού σε συνάρτηση με το βάθος (**Σχήμα 6.11**).



Σχήμα 6.11: Διάγραμμα πίεση σχηματισμού σε συνάρτηση με το βάθος για τη γεώτρηση M1

Ερμηνεία του διαγράμματος πίεση σιγματισμού – βάθος, για τη γεώτρηση M1

Με βάση τα γεωτρητικά δεδομένα του **Πίνακα 6.1**, η όρυξη της γεώτρησης έως το βάθος των 2000 ft πραγματοποιήθηκε με τη χρήση λάσπης. Στον ίδιο Πίνακα καταγράφονται και οι διαφοροποιήσεις στην πυκνότητα λάσπης για την καλύτερη ισορροπία του πηγαδιού.

Από τα 2000 ft και έως το τελικό βάθος, η όρυξη πραγματοποιήθηκε με χρήση νερού ως ρευστό διάτρησης (**Πίνακας 6.1**). Η εξισορρόπηση των πιέσεων εντός της γεώτρησης, υπό συνθήκες διάτρησης με νερό, δεν βασίζεται πλέον στη υδροστατική πίεση που ασκεί η στήλη ρευστού στο βάθος ενδιαφέροντος, αλλά στη συνολική υδραυλική πίεση που ασκεί η αντλία εισπίεσης (μεγάλες παροχές) και από τη ρύθμιση της παροχής επιστροφής (εξόδου) του ρευστού από τη γεώτρηση.

Ως εκ τούτου, η εφαρμογή της μεθοδολογίας του εκθέτη d στις περιπτώσεις αυτές, ενέχει σοβαρό σφάλμα και επομένως μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΤΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗ Μ1

7.1. Εισαγωγή

Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των κοπτικών άκρων και την επιλογή του πλέον κατάλληλου για ένα συγκεκριμένο σχηματισμό χρησιμοποιούνται, γενικά, οι τέσσερις ακόλουθες μέθοδοι:

- *Κόστος ανά μονάδα διατρυθέντος μήκους (cost per foot).*
- *Ειδική ενέργεια κοπτικού άκρου (specific energy).*
- *Βαθμός φθοράς κοπτικού άκρου (bit dullness).*
- *Αρχείο διατρητικών στοιχείων (bit records) και πληροφορίες για τη γεωλογία από γεωτρήσεις της ευρύτερης περιοχής (offset wells).*

Από τις μεθόδους που προαναφέρθηκαν, η ειδική ενέργεια είναι μια σχετικά απλή και πρακτική μέθοδος για την αξιολόγηση των κοπτικών άκρων. Ιδιαίτερα, στην περίπτωση της αξιολόγησης της συμπεριφοράς των κοπτικών μετά την όρυξη της γεώτρησης, όπως και στην περίπτωση της υπό εξέταση γεώτρησης Μ1, οπότε είναι διαθέσιμο και το αρχείο των διατρητικών στοιχείων (bit record), αλλά και γεωλογικές πληροφορίες.

Επιπλέον, η ειδική ενέργεια αποτελεί ένα μέγεθος που χρησιμοποιήθηκε από τον Teal, ήδη από τη δεκαετία του '60, ως μια γρήγορη μέθοδος για τον προσδιορισμό της διατρησιμότητας (drillability) ενός σχηματισμού. Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται η έννοια και η μέθοδος υπολογισμού για την ειδική ενέργεια και την διατρησιμότητα και στη συνέχεια τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται για τη γεώτρηση Μ1 που εξετάζεται.

7.1.1. Ειδική ενέργεια (SE)

Η ειδική ενέργεια (specific energy) ορίζεται ως η ενέργεια που απαιτείται για την όρυξη μιας μονάδας όγκου πετρώματος. Η εξίσωση της ειδικής ενέργειας προκύπτει από την θεώρησης της μηχανικής ενέργειας, η οποία καταναλώνεται επί του κοπτικού άκρου στη μονάδα του χρόνου (min) και εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E = W \cdot 2\pi R \cdot N \quad (7.1)$$

Όπου:

W: το βάρος επί του κοπτικού (weight on bit (lb ή kg)),

R: η ακτίνα του κοπτικού (in), και

N: η ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού (rpm).

Αντίστοιχα, ο όγκος του πετρώματος που απομακρύνεται από το πέτρωμα σε ένα λεπτό, δίδεται από τη σχέση:

$$V = (\pi R^2) \cdot PR \quad (7.2)$$

Όπου:

PR: ο ρυθμός προχώρησης της γεώτρησης (ft/h)

Η εξίσωση της ειδικής ενέργειας, SE, προκύπτει από το λόγο της μηχανικής ενέργειας (E) που καταναλώνεται επί του κοπτικού άκρου στη μονάδα του χρόνου (min) (εξίσωση 7.1), προς τον όγκο του πετρώματος που εξορύσσεται στη μονάδα του χρόνου (min), V (εξίσωση 7.2):

$$SE = \frac{E}{V} = \frac{W \cdot 2\pi R \cdot N}{(\pi R^2) \cdot PR} \frac{lb \cdot in \cdot \frac{1}{min}}{in^2 \cdot \frac{ft}{h} \cdot \frac{h}{60 min} \cdot \frac{12 in}{ft}} \Rightarrow$$

$$SE = 10 \cdot \frac{W \cdot N}{R \cdot PR} \frac{lb \cdot in}{in^3} \quad (7.3)$$

Αντικαθιστώντας το R με D/2, η προηγούμενη εξίσωση γίνεται:

$$SE = 20 \cdot \frac{W \cdot N}{D \cdot PR} \frac{in \cdot lb}{in^3} \quad (7.4)$$

ή

$$SE = 2,35 \cdot \frac{W \cdot N}{D \cdot PR} \frac{M \cdot J}{m^3} \quad (7.5)$$

Όπου:

W: το βάρος (Kg),

D: η διάμετρος (mm),

PR: ο ρυθμός προχώρησης (m/h), και

W/D: βάρος ανά μονάδα διαμέτρου του κοπτικού άκρου (lb/in ή Kg/mm).

Η μορφή του τύπου της ειδικής ενέργειας (SE) είναι τέτοια ώστε να δίδει περισσότερη έκφραση στην επίδραση του κοπτικού και όχι τόσο στον τύπο του πετρώματος. Η ειδική ενέργεια δεν είναι ένα μέγεθος που εξαρτάται αποκλειστικά από τις εσωτερικές ιδιότητες του πετρώματος (αν και καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από αυτές). Εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, από τον τύπο και το σχεδιασμό του κοπτικού. Αυτό σημαίνει ότι για ένα σχηματισμό δεδομένης αντοχής, ένα κοπτικό για μαλακούς σχηματισμούς θα δώσει μία τελείως διαφορετική τιμή ειδικής ενέργειας, από ένα κοπτικό για σκληρούς σχηματισμούς. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η παράμετρος ειδική ενέργεια να παρέχει ένα ακριβές κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου τύπου κοπτικού. Το κοπτικό που καταναλώνει τη μικρότερη ειδική ενέργεια σε ένα τμήμα γεώτρησης είναι και το καταλληλότερο κοπτικό για τη διάτρηση του εν λόγω σχηματισμού, αφού αποτελεί την πιο οικονομική και γρήγορη λύση. Βέβαια, μπορούμε να πούμε ότι για δεδομένο τύπο κοπτικού που διατρέπει δύο διαφορετικούς σχηματισμούς, ο σχηματισμός που απαιτεί την μικρότερη ειδική ενέργεια, είναι και ο σχηματισμός που διατρύεται ευκολότερα.

Επίσης, από την εξίσωση 7.4 διαπιστώνεται ότι, για δεδομένο τύπο κοπτικού που χρησιμοποιείται σε ένα σχηματισμό σταθερής αντοχής, η ειδική ενέργεια μπορεί να θεωρηθεί σταθερή για οποιοδήποτε συνδυασμό των τιμών του βάρους επί κοπτικού και

ταχύτητας περιστροφής ($W \cdot N$). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αλλαγές στο γινόμενο $W \cdot N$ οδηγούν συνήθως σε αυξημένες τιμές του ρυθμού προχώρησης (PR), με την προϋπόθεση βέβαια ότι εφαρμόζεται το κατάλληλο πρόγραμμα όρυξης της γεώτρησης. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ο όρος $W \cdot N / PR$ παραμένει περίπου σταθερός.

Ο ρυθμός προχώρησης όμως επηρεάζεται σημαντικά από τις αλλαγές του γινομένου $W \cdot N$. Συνεπώς, η ειδική ενέργεια μετρά άμεσα την απόδοση του κοπτικού σε ένα συγκεκριμένο σχηματισμό και αποτελεί ένδειξη της αλληλεπίδρασης κοπτικού και πετρώματος. Το γεγονός ότι η ειδική ενέργεια, συγκρινόμενη με το ρυθμό προχώρησης, είναι λιγότερο ευαίσθητη στις αλλαγές των τιμών του βάρους επί κοπτικού και της ταχύτητας περιστροφής ($W \cdot N$), την καθιστά ένα πρακτικό εργαλείο για την επιλογή κοπτικού.

7.1.2. Διατρησιμότητα (K)

Η διατρησιμότητα (K) είναι ένα μέγεθος που εκφράζει την ευκολία με την οποία διατρήθηκε ένας σχηματισμός από ένα συγκεκριμένο τύπο κοπτικού. Με βάση τα παραπάνω σχετικά με την ειδική ενέργεια, γίνεται κατανοητό ότι η διατρησιμότητα είναι μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο της ειδικής ενέργειας. Δηλαδή, όσο μεγαλύτερη ειδική ενέργεια απαιτείται από ένα κοπτικό για τη διάτρηση ενός σχηματισμού, τόσο μικρότερη είναι η διατρησιμότητα του σχηματισμού από το συγκεκριμένο κοπτικό άκρο

$$(K \propto \frac{1}{SE}). \quad (7.6)$$

Η διατρησιμότητα (K) ενός σχηματισμού υπολογίζεται από την ακόλουθη εμπειρική σχέση:

$$K = \frac{PR}{\left(\frac{W}{D}\right) \cdot N} = \frac{D \cdot PR}{W \cdot N} \quad (7.7)$$

Όπου:

PR: ο ρυθμός προχώρησης της γεώτρησης (ft/h),

W: το βάρος επί του κοπτικού (weight on bit (lb ή kg)),

D: η ακτίνα του κοπτικού (in), και

N: η ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού (rpm).

Από τις εξισώσεις 7.6 και 7.7 προκύπτει ότι:

$$K = \frac{20}{SE} \quad (7.8)$$

Αν και η εμπειρική σχέση προσδιορισμού της διατρησιμότητας βασίζεται μόνο σε παραμέτρους που σχετίζονται με το κοπτικό (βάρος επί του κοπτικού, διάμετρος κοπτικού, ταχύτητα περιστροφής), εν τούτοις χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της διατρησιμότητας των σχηματισμών, και τούτο διότι ο ρυθμός προχώρησης (PR) επηρεάζεται σημαντικά από την αλληλεπίδραση του πετρώματος και του κοπτικού, από τον τύπο, τη σύσταση και τις ιδιότητες του υπό διάτρηση σχηματισμού.

7.2. Υπολογισμός της ειδικής ενέργειας και της διατρησιμότητας των σχηματισμών για τη γεώτρηση M1

Ο υπολογισμός της ειδικής ενέργειας (SE) και της διατρησιμότητας (K), σύμφωνα με τις εξισώσεις 7.4 και 7.8, αντίστοιχα, προϋποθέτει τη γνώση των παρακάτω μεγεθών: βάρος επί του κοπτικού (W), διάμετρο κοπτικού (D), ταχύτητα περιστροφής (N) και ρυθμού προχώρησης (PR). Τα μεγέθη αυτά παρατίθενται αναλυτικά στον **Πίνακα 7.1.** Οι τιμές των μεγεθών της ειδικής ενέργειας (SE) και της διατρησιμότητας (K), που αντιστοιχούν σε ένα βάθος, αφορούν ουσιαστικά στην ειδική ενέργεια που καταναλώθηκε ή τη διατρησιμότητα που επιτεύχθηκε από το βάθος που σταμάτησε η αμέσως προηγούμενη προχώρηση, μέχρι το βάθος που αντιστοιχείται στην εν λόγω SE ή K.

Πίνακας 7.1. Υπολογισμός της ειδικής ενέργειας (SE) και της διατρησιμότητας (K) για τη γεώτρηση M1

| Βάθος - D(ft) | Ταχύτητα προχώρησης - R (ft/hr) | Βάρος επί του κοπτικού -W (lb) | Διάμετρος κοπτικού -D(in) | Ταχύτητα περιστροφής - N (rpm) | SE=20·[(WN)/DR] σε in·lb/in ³ | Διατρησιμότητα K από K=20/SE σε in ³ /in·lb |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------|--|--|
| 326,4595 | 9,11 | 4409,246 | 24 | 62,5 | 25212,66358 | 7,933E-04 |
| 426,53 | 6,46 | 8818,492 | 17,5 | 65 | 101467,1022 | 1,971E-04 |
| 541,365 | 5,94 | 8818,492 | 17,5 | 65 | 110260,592 | 1,814E-04 |
| 675,886 | 4,72 | 11023,115 | 17,5 | 62,5 | 166813,4542 | 1,199E-04 |
| 771,035 | 4,64 | 11023,115 | 17,5 | 57,5 | 156067,9633 | 1,281E-04 |
| 877,6675 | 4,27 | 8818,492 | 17,5 | 47,5 | 112235,5138 | 1,782E-04 |
| 1018,751 | 4,52 | 16534,6725 | 17,5 | 42,5 | 177754,5773 | 1,125E-04 |
| 1120,462 | 4,62 | 15432,361 | 17,5 | 47,5 | 181206,0473 | 1,104E-04 |
| 1640,5 | 6,15 | 17636,984 | 12,25 | 62,5 | 292832,9987 | 6,830E-05 |
| 1998,129 | 14,42 | 15432,361 | 12,25 | 40 | 69888,42039 | 2,862E-04 |
| 2296,7 | 13,82 | 9920,8035 | 12,25 | 60 | 70306,92982 | 2,845E-04 |
| 2670,734 | 10,45 | 11023,115 | 12,25 | 55 | 94739,89076 | 2,111E-04 |
| 2962,743 | 10,39 | 11023,115 | 12,25 | 55 | 95251,32323 | 2,100E-04 |
| 3051,33 | 9,42 | 11023,115 | 8,5 | 60 | 165129,4436 | 1,211E-04 |
| 3143,198 | 10,81 | 12125,4265 | 8,5 | 60 | 158384,985 | 1,263E-04 |
| 3254,752 | 10,62 | 12125,4265 | 8,5 | 55 | 147698,1088 | 1,354E-04 |
| 3412,24 | 14,32 | 12125,4265 | 8,5 | 55 | 109601,3744 | 1,825E-04 |
| 3533,637 | 13,49 | 13227,738 | 8,5 | 55 | 126909,4315 | 1,576E-04 |
| 3607,46 | 8,20 | 13227,738 | 8,5 | 50 | 189723,1906 | 1,054E-04 |
| 3678,001 | 7,84 | 13227,738 | 8,5 | 60 | 238257,03 | 8,394E-05 |
| 3776,431 | 11,58 | 13227,738 | 8,5 | 40 | 107509,808 | 1,860E-04 |
| 3845,332 | 8,11 | 13227,738 | 8,5 | 55 | 211179,98 | 9,471E-05 |
| 3871,58 | 17,50 | 13227,738 | 8,5 | 60 | 106719,2947 | 1,874E-04 |

7.3. Υπολογισμός της μέσης διατρησιμότητας για τη γεώτρηση M1

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι για την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά στη διατρησιμότητα των σχηματισμών, τα τμήματα με σχετικά κοντινές τιμές διατρησιμότητας ενοποιούνται σε ζώνες όμοιας διατρησιμότητας, χρησιμοποιώντας τους μέσους όρους των τιμών αυτών των ζωνών. Θεωρείται σαν δεδομένο ότι οι μεγάλες διακυμάνσεις στις τιμές της διατρησιμότητας (K) προκαλούνται από έντονες μεταβολές της λιθολογίας, ενώ οι μικρές διακυμάνσεις οφείλονται σε άλλους, εκτός λιθολογίας, παράγοντες.

Οι μέσοι όροι των ζωνών όμοιας διατρησιμότητας, που θα χρησιμοποιηθούν, είναι σταθμισμένοι. Με αυτό τον όρο, εννοείται ότι στην εξαγωγή του μέσου όρου συνυπολογίζεται το μήκος της προχώρησης που αφορά στην κάθε διατρησιμότητα που επιτεύχθηκε, πολλαπλασιάζοντας την κάθε επιμέρους τιμή της διατρησιμότητας (K) με το μήκος της προχώρησης στο οποίο αναφέρεται και διαιρώντας, στην συνέχεια, τον αριθμητή με το συνολικό μήκος της προχώρησης που αντιστοιχεί σε κάθε διατρησιμότητα η οποία ανήκει στην εκάστοτε ζώνη.

Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται απόδοση ξεχωριστής βαρύτητας στον καθορισμό του μέσου όρου για την κάθε τιμή της διατρησιμότητας (K), ανάλογα με το μήκος προχώρησης στο οποίο αντιστοιχεί.

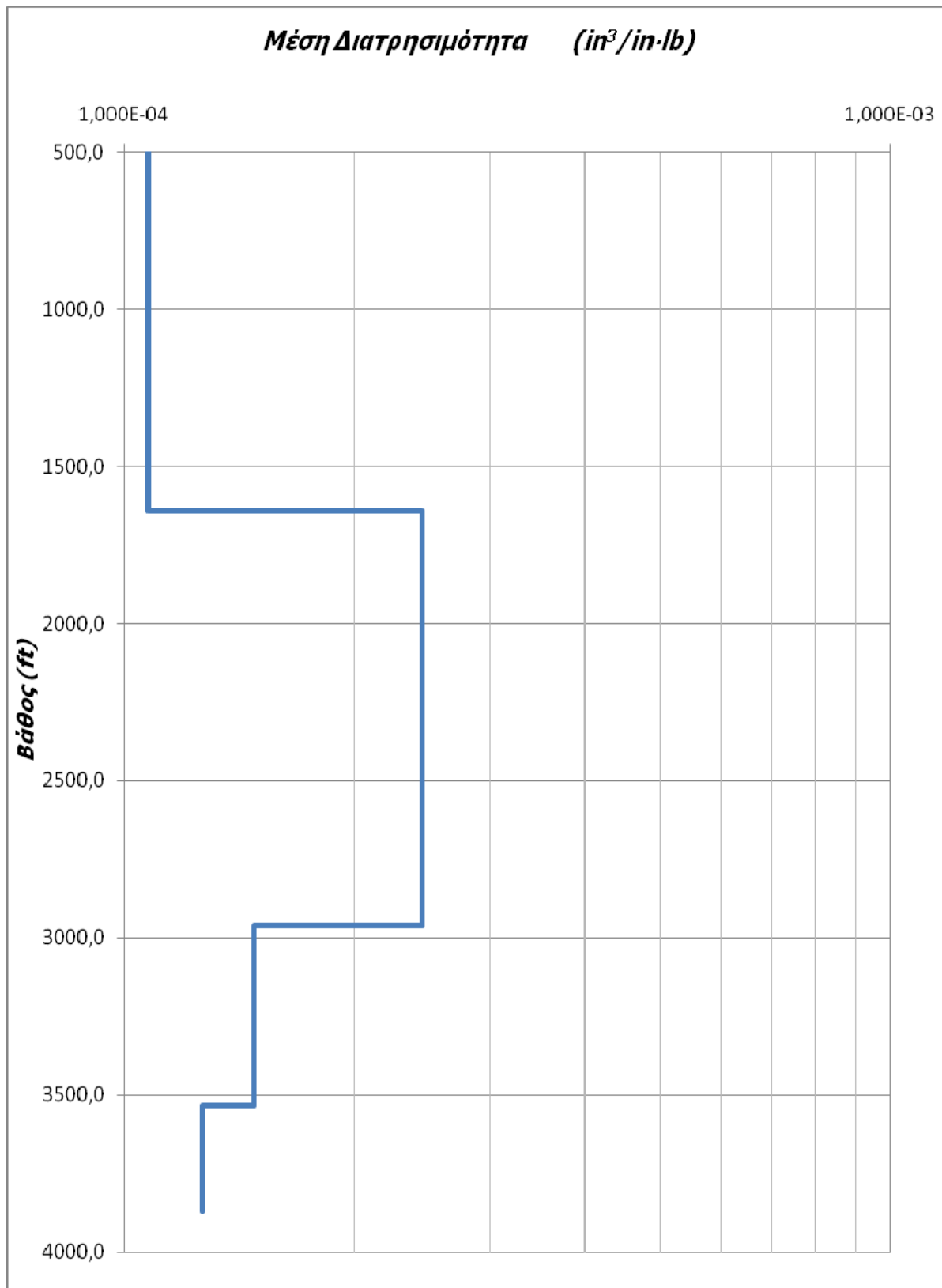
7.3.1. Μέση διατρησιμότητα (\bar{K}) για τη γεώτρηση M1

Ο υπολογισμός της μέσης διατρησιμότητας (\bar{K}) για τη γεώτρηση M1 παρουσιάζεται στον ακόλουθο **Πίνακα 7.2**, στον οποίο οι ζώνες διατρησιμότητας διαχωρίζονται με τα διαφορετικά χρώματα γεμίματος των κελιών.

Πίνακας 7.2. Υπολογισμός της μέσης διατρησιμότητας για τη γεώτρηση M1

| Βάθος, D (ft) | Διατρησιμότητα K από K=20/SE | Μήκος Τμήματος, (ft) | Σταθμισμένη τιμή K για το τμήμα | Μέσος Όρος K για τη Ζώνη (in ³ /in·lb) | Μέση Διατρησιμότητα [(in ³ /in·lb) x 1000] | ΖΩΝΕΣ |
|---------------|------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|--------|
| 426,5 | 1,971E-04 | | | 1,971E-04 | 0,1971 | |
| 541,4 | 1,814E-04 | 114,835 | 2,0830E-02 | 1,077E-04 | 0,1077 | ΖΩΝΗ Α |
| 675,9 | 1,199E-04 | 134,521 | 1,6128E-02 | 1,077E-04 | | |
| 771,0 | 1,281E-04 | 95,149 | 1,2193E-02 | 1,077E-04 | | |
| 877,7 | 1,782E-04 | 106,6325 | 1,9002E-02 | 1,077E-04 | | |
| 1018,8 | 1,125E-04 | 141,083 | 1,5874E-02 | 1,077E-04 | | |
| 1120,5 | 1,104E-04 | 101,711 | 1,1226E-02 | 1,077E-04 | | |
| 1640,5 | 6,830E-05 | 520,0385 | 3,5518E-02 | 1,077E-04 | | |
| 1998,1 | 2,798E-04 | 357,629 | 1,0007E-01 | 2,450E-04 | 0,2450 | ΖΩΝΗ Β |
| 2296,7 | 2,834E-04 | 298,571 | 8,4610E-02 | 2,450E-04 | | |
| 2670,7 | 2,120E-04 | 374,034 | 7,9279E-02 | 2,450E-04 | | |
| 2962,7 | 2,055E-04 | 292,009 | 6,0005E-02 | 2,450E-04 | | |
| 3051,3 | 1,180E-04 | 88,587 | 1,0451E-02 | 1,478E-04 | 0,1478 | ΖΩΝΗ Γ |
| 3143,2 | 1,264E-04 | 91,868 | 1,1613E-02 | 1,478E-04 | | |
| 3254,8 | 1,337E-04 | 111,554 | 1,4915E-02 | 1,478E-04 | | |
| 3412,2 | 1,797E-04 | 157,488 | 2,8303E-02 | 1,478E-04 | | |
| 3533,6 | 1,571E-04 | 121,397 | 1,9077E-02 | 1,478E-04 | | |
| 3607,5 | 1,054E-04 | 73,8225 | 7,7798E-03 | 1,268E-04 | 0,1268 | ΖΩΝΗ Δ |
| 3678,0 | 8,075E-05 | 70,5415 | 5,6964E-03 | 1,268E-04 | | |
| 3776,4 | 1,844E-04 | 98,43 | 1,8153E-02 | 1,268E-04 | | |
| 3845,3 | 9,195E-05 | 68,901 | 6,3354E-03 | 1,268E-04 | | |
| 3871,6 | 1,861E-04 | 26,248 | 4,8857E-03 | 1,268E-04 | | |

Το ημιλογαριθμικό διάγραμμα της μέσης διατρησιμότητας σε συνάρτηση με το βάθος για τη γεώτρηση M1 παρουσιάζεται στο **Σχήμα 7.2**.



Σχήμα 7.2. Διάγραμμα μέσης διατρησιμότητας σε συνάρτηση με το βάθος για τη γεώτρηση M1

7.4. Συμπεράσματα από τα διαγράμματα μέση διατρησιμότητα (\bar{K}) σε συνάρτηση με το βάθος σχετικά με την διατρησιμότητα των σχηματισμών για την γεώτρηση M1

- Όπως παρατηρείται και στο **Σχήμα 7.2**, φαίνεται ότι μέχρι τα 1640 ft (500 m) περίπου, η μέση διατρησιμότητα (\bar{K}) εμφανίζει την τιμή , $1,077 \times 10^{-4} \text{ in}^3/\text{in}*\text{lb}$ (**Πίνακας 7.2**).

Όσο αφορά τη διατρησιμότητα έως τα 1120 ft (342 m) παρουσιάζει μερικές διακυμάνσεις, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 7.1**. Τα κοπτικά άκρα που χρησιμοποιούνται είναι του οίκου SMF, ενώ παρατηρείται μία εναλλαγή στους τύπους των κοπτικών άκρων. Έως τα 675 ft (205 m) χρησιμοποιείται το κοπτικό TH-3 ενώ στα 675 ft (205 m) περίπου αλλάζει το υπάρχων κοπτικό με TH-2. Η αλλαγή αυτή, βάσει το διάγραμμα, φαίνεται να ήταν σωστή αφού αυξάνεται η διατρησιμότητα στα 771 ft ($1,2815 \times 10^{-4}$) και συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι και τα 877 ft ($0,7820 \times 10^{-4}$). Στο σημείο αυτό επανατοποθετείται κοπτικό TH-3, επιλογή που φαίνεται να είναι λανθασμένη αφού η διατρησιμότητα μειώνεται στα αρχικά επίπεδα ($1,1251 \times 10^{-4}$). Τέλος, η διατρησιμότητα συνεχίζει να μειώνεται, σχετικά, παρά την επανατοποθέτηση του κοπτικού TH-2.

- Από τα 1120 ft (342 m) έως τα 1640 ft (500 m) περίπου, όπως παρατηρείται στο **Σχήμα 7.1**, η διατρησιμότητα (K) ελαττώνεται σε $1,1037 \times 10^{-4} \text{ in}^3/\text{in}*\text{lb}$. Αυτή η περαιτέρω μείωση της K πιθανόν να οφείλεται σε ένα συνδυασμό από παράγοντες. Αρχικά παρατηρείται ότι υπάρχει αλλαγή στην διάμετρο της γεώτρησης. Η γεώτρηση από 17 ½’’ μειώνεται σε 12 ¼’’. Η αλλαγή στη διάμετρο σε συνδυασμό και στην αλλαγή στη λιθολογία, δηλαδή η μετάβαση από το χλωριτικό σχιστόλιθο σε ασβεστιτικό σχιστόλιθο, είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση της K. Η παρεμβολή δηλαδή κάποιων ασβεστιτικών πετρωμάτων μπορεί να είναι δυνατόν να καθόρισε τη μείωση της διατρησιμότητας. Τέλος, ένας άλλος παράγοντας που έπαιξε ρόλο, είναι η λανθασμένη επιλογή κοπτικού (το TH-2 του οίκου SMF αλλάζει με το JD-8 του οίκου HUGH).

- Από τα 1640 ft (500 m) μέχρι τα 2962 ft (903 m) περίπου, η μέση διατρησιμότητα (\bar{K}) αυξάνεται σημαντικά σε $2,450 \times 10^{-4} \text{ in}^3/\text{in}\cdot\text{lb}$, αφού η γεώτρηση εισέρχεται ξανά σε χλωριτικό σχιστόλιθο. Το εν λόγω στρώμα του χλωριτικού σχιστόλιθου, δίνει αρκετά υψηλές τιμές διατρησιμότητας, όπως παρουσιάζεται και στο διάγραμμα του **Σχήματος 7.1**, υψηλότερες μάλιστα και από της Ζώνης Α ($1,1077 \times 10^{-4} \text{ in}^3/\text{in}\cdot\text{lb} > 2,450 \times 10^{-4} \text{ in}^3/\text{in}\cdot\text{lb}$). Το γεγονός αυτό δείχνει ότι πρόκειται για ένα πολύ συμπαγές και συνεκτικό πέτρωμα. Στην υψηλή τιμή της \bar{K} , σίγουρα όμως, αποφασιστικό ρόλο έπαιξε και η επιλογή του κατάλληλου κοπτικού. Το κοπτικό που χρησιμοποιήθηκε στα 1640 ft (500 m) ήταν το J-44 του οίκου HUGH.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι η διατρησιμότητα (K) στο βάθος των 1969 ft (600 m) παραμένει σταθερά σε υψηλά επίπεδα, παρά την εναλλαγή στη λιθολογία. Από χλωριτικό σχιστόλιθο η γεώτρηση περνάει σε μαρμαρυγιάκο σχιστόλιθο. Παρατηρώντας όμως τον πίνακα που περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες για τα κοπτικά που χρησιμοποιήθηκαν (**Πίνακας 4.2**), παρατηρούμε ότι στα 1998 ft έγινε αλλαγή στο κοπτικό και χρησιμοποιήθηκε το κοπτικό S216 του οίκου REED. Η επιλογή του συγκεκριμένου κοπτικού, προφανώς και είναι σωστή γιατί η διατρησιμότητα παραμένει σταθερή χωρίς καμία μεταβολή, μέχρι το βάθος των 2296 ft (700 m). Στο βάθος αυτό, η διατρησιμότητα μειώνεται στα $2,8447 \times 10^{-4} \text{ in}^3/\text{in}\cdot\text{lb}$. Η μείωση αυτή δεν μπορεί να αιτιολογηθεί ούτε με την λανθασμένη επιλογή κάποιου κοπτικού (το κοπτικό παραμένει το S216 του οίκου REED) αλλά και ούτε από στρωματογραφικές εναλλαγές. Αυτή η μείωση προφανώς οφείλεται στο ότι οι υπεδάφικοί σχηματισμοί κάτω από την πίεση των υπερκειμένων, η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται και το βάθος, έχει σαν αποτέλεσμα να συμπεριφέρονται σαν ένα περισσότερο συμπαγές πέτρωμα. Στον ίδιο λόγο, πιθανόν να οφείλεται και η περαιτέρω μικρή μείωση της διατρησιμότητας ($2,111 \times 10^{-4} \text{ in}^3/\text{in}\cdot\text{lb}$) στο βάθος των 2670 ft (814 m).

Επιπλέον, θα πρέπει να αναφερθεί στο σημείο αυτό, ότι από το βάθος των 2000 ft (610 m) μέχρι και το τέλος της γεώτρησης, παρατηρώντας και τον **Πίνακα 6.1**, διαπιστώνεται ότι η πίεση της στήλης της λάσπης διατηρείται μικρότερη από την πίεση του ταμιευτήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ρευστά από τον σχηματισμό να μπορούν να εισέρχονται εντός της γεώτρησης και ο όγκος των ρευστών που εξέρχεται από τη γεώτρηση (λάσπη διάτρησης +

ρευστά σχηματισμού) να είναι μεγαλύτερος από τον όγκο των ρευστών (λάσπη διάτρησης) που εισέρχεται σε αυτή (“overflow”).

Υπό αυτές τις συνθήκες, για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα, θα πρέπει να αυξηθεί η πίεση της στήλης της λάσπης. Αυτό μπορεί να γίνει με την αύξηση της πυκνότητας του πολφού, για παράδειγμα από πυκνότητα 1,10 kg/l, η πυκνότητα αυξάνεται σε 1,17 kg/l με προσθήκη μπεντονίτη. Η χρησιμοποίηση του μπεντονίτη, εκτός του ότι μπορεί να αυξήσει την πυκνότητα του πολφού, χρησιμοποιείται και για τη συγκράτηση των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Με τον τρόπο αυτό η συνολική πίεση της στήλης της λάσπης αυξάνει κατάλληλα (ώστε να καταστεί μεγαλύτερη της πίεσης του σχηματισμού) και η γεώτρηση παύει να προχωράει σε συνθήκες “overflow”.

Στη Μήλο, όμως, φαίνεται πως ηελημένα η γεώτρηση προχώρησε από το βάθος των 2000 ft (610 m) και μέχρι και το τέλος της σε συνθήκες “overflow”. Όπως προκύπτει και τον **Πίνακα 6.1**, από το βάθος των 2000 ft (610 m) και κάτω η γεώτρηση προχωρούσε μόνο με εισπίεση νερού (θαλασσινό νερό), αφού η λιθολογία της περιοχής το επέτρεπε και τα τοιχώματα ήταν αρκετά σταθερά (μεταμορφωμένο υπόβαθρο). Αυτό διαπιστώνεται παρατηρώντας ότι η πυκνότητα της λάσπης διάτρησης που χρησιμοποιούνταν ήταν 1 g/cm³. Επομένως, για τα όποια συμπεράσματα και τις όποιες εκτιμήσεις γίνονται από το βάθος των 2000 ft (610 m) μέχρι το τέλος της γεώτρησης, θα πρέπει να συνεκτιμηθεί και το ότι η γεώτρηση προχωρούσε σε συνθήκες “overflow”.

- Από τα 2962 ft (903 m) μέχρι τα 3533 ft (1077 m) περίπου, η μέση διατρησιμότητα (\bar{K}) συνεχίζει να μειώνεται και φτάνει τα $1,478 \times 10^{-4}$ in³/in*lb. Η μείωση αυτή προφανώς οφείλεται στην λανθασμένη επιλογή κοπτικού. Το κοπτικό που χρησιμοποιείται είναι το TH-8 του οίκου SMF. Μελετώντας όμως καλύτερα τον πίνακα που περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα για τα κοπτικά που χρησιμοποιήθηκαν (**Πίνακας 4.2**), παρατηρούμε ότι η διάμετρος της γεώτρησης μειώνεται από 12 ¼” σε 8 ½”, δίνοντας έτσι μια ακόμα πιθανή αιτιολόγηση για τη μείωση της μέσης διατρησιμότητας.

Η αλλαγή κοπτικού (TH-8 του οίκου SMF) από τα 2962 ft (903 m) μέχρι τα 3254 ft (992 m), επιφέρουν μία μικρή αύξηση στην διατρησιμότητα, όπως παρατηρείται

και στο διάγραμμα του **Σχήματος 7.1** . Αυτό οφείλεται πιθανόν στο ότι το συγκεκριμένο τμήμα της γεώτρησης, ο υπό διάτρηση σχηματισμός δεν εμφανίζει τόσες πολλές εναλλαγές από πλευράς σύστασης. Το παραπάνω επιβεβαιώνεται και από το ότι το συγκεκριμένο τμήμα ορύχθηκε με το ίδιο κοπτικό (ΤΗ-8 του οίκου SMF).

- Τέλος, από τα 3533 ft (1077 m) μέχρι και το τέλος της γεώτρησης που είναι στα 3871 ft (1180 m), η μέση διατρησιμότητα (\bar{K}) μειώνεται μέχρι τα $1,268 \times 10^{-4}$ in³/in*lb. Η μείωση αυτή της \bar{K} πιθανό να οφείλεται στην λιθολογία του συγκεκριμένου τμήματος. Η ύπαρξη γραφίτη, ο οποίος είναι δυσδιάτρητος, μπορεί να είναι μία εξήγηση για τη χαμηλή \bar{K} .

Παρατηρώντας μάλιστα και το διάγραμμα του **Σχήματος 7.1**, βλέπουμε ότι η διατρησιμότητα (K) συνεχίζει να μειώνεται και μετά το βάθος των 3533 ft (1077 m). Στα 3678 ft η τιμή της διατρησιμότητας μειώνεται ακόμα περισσότερο φτάνοντας στα $8,3943 \times 10^{-5}$ in³/in*lb. Η αλλαγή κοπτικού όμως (YC20 του οίκου REED) έχει σαν αποτέλεσμα τη κατακόρυφη αύξηση της K στα $1,8603 \times 10^{-4}$ in³/in*lb, δείχνοντας με αυτό το αποτέλεσμα ότι ήταν σωστή η επιλογή του συγκεκριμένου κοπτικού.

Την λανθασμένη επιλογή κοπτικού (ΤΗ-8 του οίκου SMF) την βλέπουμε στα 3776 ft (1150 m), όπου η διατρησιμότητα πέφτει ξανά στα $9,4706 \times 10^{-5}$ in³/in*lb, και ενώ αναφερόμαστε σε τμήμα με ίδια λιθολογία. Τέλος, στα 3845 ft (1172 m) αλλάζει για τελευταία φορά κοπτικό και βάζει το ΤΗ-5 του οίκου REED. Η επιλογή αυτή προφανώς και είναι και σωστή, γιατί το προηγούμενο κοπτικό απέτυχε, αφού και πάλι η τιμή της διατρησιμότητας αυξάνεται και φτάνει τα $1,8741 \times 10^{-3}$ in³/in*lb.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο ΣΥΝΟΨΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ

Η νήσος Μήλος του νομού Κυκλάδων, είναι από τα πρώτα και πιο χαρακτηριστικά νησιά του ηφαιστειακού τόξου του Ν. Αιγαίου, που προκάλεσε το γεωθερμικό ενδιαφέρον ήδη από το 1970 και στην οποία έχει εντοπιστεί το πρώτο γεωθερμικό πεδίο υψηλής θερμοκρασίας της χώρας.

Η Μήλος βρίσκεται στο νοτιοδυτικό άκρο του νησιώτικου συμπλέγματος των Κυκλάδων. Οι πρώτες γεωηλεκτρικές έρευνες στη Μήλος εκτελέσθηκαν το 1972 από τη γαλλική εταιρεία για λογαριασμό της ΔΕΗ και το διάστημα 1982-84 από το ΙΓΜΕ. Τόσο ο χάρτης των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων (Τσόκας, 1985) όσο και ο χάρτης των ειδικών αντιστάσεων της CGG (Companie Generale de Geophysique) συμφωνούν στο ότι οι περιοχές χαμηλών ειδικών αντιστάσεων συμπίπτουν με την περιοχή υψηλής θερμικής ροής, κυρίως στην περιοχή της Ζεφυρίας.

Επίσης, τα αποτελέσματα της βαρυμετρικής διερεύνησης, που πραγματοποιήθηκε το 1982 από το ΙΓΜΕ, ταυτοποιούν την ανωμαλία της περιοχής μέγιστης θερμικής ροής, στην περιοχή της Ζεφυρίας, και την κύρια τεκτονική γραμμή διεύθυνσης Β-Ν που διέρχεται από το γεωθερμικό πεδίο. Η προέλευση όμως της σεισμικής δραστηριότητας της περιοχής, η οποία παρατηρείται στον κόλπο της Μήλου, παραμένει ακόμη αναπάντητο πρόβλημα, καθώς κάποιες μελέτες θεωρούν ότι είναι τεκτονικής προέλευσης και υποστηρίζουν ότι οφείλεται είτε στις μεταβολές της πίεσης, είτε ότι είναι μαγματικής προέλευσης. Τέλος, με την σεισμολογική μελέτη, σύμφωνα με τους Hirn et al (1989) και Ochmann et al (1989), καταδεικνύεται ότι τα επίπεδα διάρρηξης έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, γεγονός που επιβεβαιώνεται πλήρως και από τα αποτελέσματα της μαγνητοτελλουρικής μεθόδου.

Η ΔΕΗ κατά το διάστημα 1974 - 1981 εκτέλεσε, κυρίως στην περιοχή της Ζεφυρίας, 5 γεωτρήσεις σε βάθη 1000 -1400 m, όπου εντοπίστηκαν γεωθερμικοί ταμιευτήρες με θερμοκρασίες 290 - 320°C. Μερικές από τις γεωτρήσεις αυτές μπορούν να παράγουν υγρό

ατμό με απόδοση 40-120 tn/h και θερμοκρασία 180 - 240°C, ενώ το συνολικό δυναμικό του πεδίου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται άνω των 120MWe.

Το 1984, η ΔΕΗ εγκατέστησε μια πρόδρομη μικρή μονάδα 2MWe, που όμως δεν λειτούργησε λόγω πολλαπλών τεχνικών προβλημάτων. Τα προβλήματα της μονάδας παραγωγής εστιάζονται στη δέσμευση του H₂S και στην αντιμετώπιση επικαθίσεων θειούχων και πυριτικών αλάτων, κυρίως στο δίκτυο απομάκρυνσης των γεωθερμικών ρευστών. Η μονάδα λειτούργησε για μικρά χρονικά διαστήματα μέχρι τις αρχές του 1989, οπότε και σταμάτησε οριστικά ύστερα από τις έντονες διαμαρτυρίες των κατοίκων, εξαιτίας της οσμής των εκπομπών υδρόθειου στην περιοχή της Ζεφυρίας. Τον Σεπτέμβριο του 1993, για άγνωστους μέχρι τώρα λόγους, υπήρξε αρχικά διαρροή θερμού νερού για περίπου μία εβδομάδα και κατόπιν διάρρηξη του τοιχώματος της παραγωγικής γεώτρησης M2. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη εκτόξευση μεγάλων ποσοτήτων γεωθερμικών ρευστών στην ατμόσφαιρα για διάστημα ορισμένων εβδομάδων.

Με βάση την επεξεργασία και την ανάλυση των γεωτρητικών δεδομένων που έχει γίνει στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα τα οποία αφορούν τόσο στην επισήμανση εξειδικευμένων παρατηρήσεων, οι οποίες θα μπορούσαν να εμπλουτίσουν το αντικείμενο της τεχνολογίας των γεωτρήσεων, όσο και στην κατανόηση των ήδη καταγεγραμμένων θεωριών. Επίσης, εξήχθησαν και σημαντικά συμπεράσματα που αφορούν σε χαρακτηριστικά του υπεδάφους της περιοχής της Ζεφυρίας στη Μήλο, όπου εκτελέστηκαν οι γεωτρήσεις.

Σχετικά με τις γεωμηχανικές παραμέτρους της περιοχής προκύπτουν τα παρακάτω:

- Για μικρά σχετικά βάθη (περίπου μέχρι τα 300 ft) τα συμπεράσματα, τόσο για τις γεωπιέσεις των σχηματισμών όσο και για τη διατηρησιμότητά τους, ενέχουν μεγάλο βαθμό ανασφάλειας λόγω της συμπίεσης των σχηματισμών, που είναι ακόμα ενεργός.
 - Για την εκτίμηση της πίεσης των σχηματισμών το ενδιαφέρον πρέπει να εστιάζεται σε μεγάλες και ομαλές διακυμάνσεις των τιμών του ρυθμού της ταχύτητας προχώρησης και όχι σε μικρές αλλαγές οι οποίες κυρίως οφείλονται σε αλλαγή της λιθολογίας ή τύπου κοπτικών άκρων.

- Οι τιμές της διαφορικής πίεσης [η διαφορά μεταξύ της υδροστατικής πίεσης που ασκεί η λάσπης διάτρησης (P_m) και της πίεσης του σχηματισμού (P_f)] και της ταχύτητας διάτρησης είναι αντιστρόφως ανάλογες, επιβεβαιώνοντας τις παρατηρήσεις των Garnier και Lingen:
 - ✓ Όταν η διαφορική λαμβάνει μεγάλες τιμές, δηλαδή η υδροστατική πίεση της λάσπης υπερβαίνει κατά πολύ την πίεση του σχηματισμού, η ταχύτητα διάτρησης μειώνεται έντονα.
 - ✓ Όταν η διαφορική λαμβάνει αρνητικές τιμές, δηλαδή η πίεση του σχηματισμού γίνεται μεγαλύτερη από την πίεση της λάσπης, η ταχύτητα διάτρησης αυξάνεται.
- Όσο πιο ομοιογενής είναι ένας σχηματισμός που διατρύεται, τόσο πιο ομαλή είναι η σχέση μεταξύ της διαφορικής πίεσης και της ταχύτητας προχώρησης. Επίσης, όσο η γεώτρηση εισέρχεται σε μεγαλύτερα βάθη, τόσο καλύτερη είναι η σχέση μεταξύ των τιμών της διαφορικής πίεσης και της ταχύτητας προχώρησης. Στα τμήματα μετάβασης από μία λιθολογία σε μία άλλη, οι τιμές της ταχύτητας προχώρησης και της διαφορικής πίεσης δεν συσχετίζονται με τον αναμενόμενο τρόπο.

Οι ανωτέρω παρατηρήσεις έχουν ισχύ μόνο στην περίπτωση που η διάτρηση εξελίσσεται με συμβατικό τρόπο, δηλαδή τη χρήση λάσπης και όχι όταν αυτή πραγματοποιείται υπό συνθήκες «overflow».

Όσον αφορά στη διατρησιμότητα των σχηματισμών της περιοχής της Ζεφυρίας όπου έχει ορυχθεί η γεώτρηση που εξετάστηκε, προκύπτουν τα παρακάτω:

- Η διατρησιμότητα των σχηματισμών ελαττώνεται με τη αύξηση του βάθους. Αυτό οφείλεται στην αλλαγή της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων όσο μεγαλώνει η εντατική κατάσταση στην οποία βρίσκονται.

- Η ύπαρξη ασυνεχειών στους σχηματισμούς συνεπάγεται μείωση του ρυθμού προχώρησης, άρα και της διατρησιμότητας. Όταν η γεώτρηση συναντά ασυνέχειες προκαλούνται κραδασμοί στη διατρητική στήλη, απώλεια λάσπης και φθορές στα κοπτικά. Όλα τα παραπάνω διαταράσσουν την ομαλή και σωστή λειτουργία της διάτρησης με αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού προχώρησης.
- Η σκληρότητα ενός σχηματισμού δεν αποτελεί τον μοναδικό παράγοντα που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη στην επιλογή κοπτικού. Για τη βέλτιστη επιλογή κοπτικού απαιτείται η γνώση όλων των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του κάθε σχηματισμού. Παράγοντες όπως η ψαθυρότητα, που εμφανίζεται ιδιαίτερα αυξημένη σε κάποια ηφαιστειακά πετρώματα, πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπ' όψη στην επιλογή της διάταξης και της αιχμηρότητας των οδόντων του κοπτικού, όπως και στο βάρος που θα εφαρμοστεί επί αυτού. Γενικότερα, πολύ σκληροί σχηματισμοί μπορεί να αποσυντίθενται πολύ πιο εύκολα και γρήγορα από ένα κοπτικό για μέτριας σκληρότητας σχηματισμούς παρά από ένα κοπτικό για σκληρούς. Μάλιστα, μπορεί να απαιτείται τόσο μικρό βάρος επί του κοπτικού που να ελαχιστοποιούνται οι φθορές στους οδόντες και τους τριβείς.

Για μία σωστή και όσο γίνεται πιο ολοκληρωμένη και σαφή εκτίμηση, είναι απόλυτα επιβεβλημένη η επεξεργασία όλων των διαθέσιμων στη βιβλιογραφία γεωτρητικών δεδομένων για μία περιοχή. Με αυτό τον τρόπο ο μηχανικός θα μπορεί να στηριχθεί σε στοιχεία, δημιουργώντας έτσι μία πλατφόρμα δεδομένων, την οποία θα μπορεί να αξιοποιήσει κατά το σχεδιασμό και την όρυξη μιας νέας γεώτρησης στην ευρύτερη περιοχή ή σε ανάλογους σχηματισμούς. Η χρησιμοποίηση επιβεβαιωμένων δεδομένων καθώς επίσης και δεδομένα από ανάλογες μελέτες για την εκάστοτε περιοχή που μελετάται, θα οδηγήσει σε συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και θα μπορεί να δώσει τεκμηριωμένες εκτιμήσεις για τις γεωμηχανικές παραμέτρους των σχηματισμών και της διατρησιμότητάς τους. Θα υπάρξουν με αυτό τον τρόπο καλύτερες επιλογές χρήσης κατάλληλων κοπτικών, αλλά και καλύτερες εκτιμήσεις για όλες τις τεχνικές παραμέτρους που μπορούν να επηρεάσουν με κάθε τρόπο την όρυξη της γεώτρησης.

Η ανάλυση των γεωτρητικών δεδομένων της γεώτρησης M1 που πραγματοποιείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, συμβάλει στην κατεύθυνση αυτή και μπορεί να αξιολογηθεί σημαντικά στο σχεδιασμό νέων γεωθερμικών γεωτρήσεων στην περιοχή της

Μήλου, δεδομένου ότι επιβάλλεται η συστηματική και ορθολογική ανάπτυξη του γεωθερμικού δυναμικού της. Η επανάληψη λαθών θα είναι καταστροφική για το εγχείρημα της γεωθερμίας. Οι δυνατότητες που σήμερα προσφέρει τόσο η τεχνολογία όσο και η συσσώρευση γνώσης και εμπειρίας, σε συνδυασμό με τα «μαθήματα» που μπορούν και πρέπει να προκύψουν από την ανάλυση των διαθέσιμων στοιχείων της περιοχής, μπορούν να διασφαλίσουν μία απόλυτα τεχνικά άρτια και περιβαλλοντικά ασφαλή γεωτρητική έρευνα και ανάπτυξη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ανδρίτσος Ν., Καράμπελας Α. (1989) «Σχηματισμός και μέθοδοι πρόληψης επικαθήσεων θειούχων ενώσεων» σε: Κουμούτσος Ν. και Καρκούλιας Β., Εθνικό Συνέδριο Εφαρμογών Γεωθερμίας, Θεσσαλονίκη, Υπουργείο Βιομηχανίας Ενέργειας και Τεχνολογίας, 361-371.
2. Αντσέτα Σαφινέ (1983), «Γεωμορφολογική μελέτη νησιών Μήλου, Αντίμηλου, Κιμώλου Πολυαίγου», Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα
3. Abatzoglou Seraphim (1992), «Exploration for epithermal gold in Milos island (Aegean sea, Greece) – Lithogeochemistry as an alternative initial – Stage exploration method», Mining Geology Division Department of Geology Imperial College of Science, Technology and Medicine University of London, London.
4. Βλαχαντώνης Α., Κουτίνας Γιώργος (1977), «Γεωθερμική ενέργεια και αξιοποίησης εν Ελλάδι», Ε.Μ.Π., έδρα μεταλλευτικής Β', Επιβλέπων: Τσουτρέλης Χ., Αθήνα, 253-361.
5. Βουγιουκαλάκης Γ. (1992), «Έκθεση ηφαιστειολογικών και τεκτονικών παρατηρήσεων στη νήσο Μήλο για το σεισμό της 20/2/92», Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα.
6. Γελεγένης Γ. Ι. (1984), «Γεωθερμία και ανάπτυξη. Δυνατότητες και προοπτικές (Αναφορά στη Μήλο)» Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Χημικών - Μηχανικών, Αθήνα.
7. Γελεγένης Γ. Ι., Κουμούτσος Ν. Γ. (1989), «Η Επανεισαγωγή ως μέθοδος διάθεσης των γεωθερμικών αποβλήτων. Η περίπτωση της Μήλου», Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
8. Γελεγένης Γ. Ι., Κουμούτσος Ν. Γ. (1991) «Ανάλυση της συμπεριφοράς της γεώτρησης Μ1 της Μήλου κατά τη διάρκεια δοκιμών επανεισαγωγής», Επιστημονική Έκδοση του Περιοδικού Τεχνικά Χρονικά (Επιστ. Περιοχή Γ), Αθήνα.
9. Δέλλιου Ε. Ε. (1989) «Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση γεωθερμικών ρευστών υψηλής ενθαλπίας. Γεωθερμική μονάδα 2 MW Μήλου» σε: Κουμούτσος

- N. και Καρκούλιας Β., Εθνικό Συνέδριο Εφαρμογών γεωθερμίας, Υπουργείο Βιομηχανίας Ενέργειας και Τεχνολογίας, Θεσσαλονίκη, 346-360.
10. Δρούγκας Ιάκωβος, Καρυδάκης Γρηγόρης (1983) «Γεωθερμία και Εκμετάλλευση του ορυκτού πλούτου της Μήλου», Η συμβολή της γεωθερμίας και άλλων ήπιων μορφών ενέργειας στην ανάπτυξη της Μήλου, Τ.Ε.Ε., Μήλος.
11. Edwards L. M., Chilingar G. V., Riekie III H. H., Fertl W. H. (1982), «Handbook of Geothermal Energy», Gulf Publishing Company, Houston, Texas, σ.243-325.
12. Καρυδάκης Γρηγόριος Ι. (2005), «Γεωθερμική Ενέργεια», ΑΘΛΟΤΥΠΟ, Αθήνα.
13. Καρυδάκης Γρηγόριος Ι. (2006), «Γεωθερμικά πεδία – Έρευνα – Παραγωγή - Αξιοποίηση», Ε.Μ.Π., Αθήνα.
14. Κουζέλη – Κατσίρη Α., Κατσίρης Ν., Χριστοδούλου Γ. (1989), «Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη διάθεση στη θάλασσα γεωθερμικών αποβλήτων», Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
15. Κουτίνας Γιώργος (1989), «Εκτίμηση και διαχείριση του γεωθερμικού δυναμικού υψηλής ενθαλπίας. Αναφορά στον Ελληνικό χώρο» σε: Κουμούτσος Ν. και Καρκούλιας Β., Εθνικό Συνέδριο Εφαρμογών Γεωθερμίας, Υπουργείο Βιομηχανίας Ενέργειας και Τεχνολογίας, Θεσσαλονίκη, σ. 317-345.
16. Luheshi M. N. (1982), «Estimation of formation temperature from borehole measurements»
17. Μαυρίδου Φ., Καραντάση Σ. (1984), «Ορυκτολογική – πετρολογική μελέτη των ηφαιστειωτών του νησιώτικου συμπλέγματος της Μήλου», Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα.
18. Μητρόπουλος Π., Kita I., Nagao K., Matsuda J. (1992), «Γεωχημεία σταθερών ισοτόπων Ο,Η και C ηφαιστειακών αερίων και θερμών νερών του τόξου του Αιγαίου», Annales Géologiques des Pays Helléniques, Τόμος XXXIX, Series 1, Αθήνα, σ. 381–388.
19. Μητρόπουλος Π., Matsuda J., Senoh K., Maruoka T. (1998), «Συμβολή στη μελέτη της εξέλιξης της ηφαιστειακής δράσης στο τόξο του Αιγαίου με βάση νέες ραδιοχρονολογήσεις K/Ar ασβεσταλκαλικών λαβών», Annales Géologiques des Pays Helléniques, Τόμος XXXIVIII, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα, σ. 187-194.
20. Μποντόζογλου Β., Καράμπελας Α. (1989) «Έλεγχος και τεχνολογίες συγκράτησης αερίων από γεωθερμικά πεδία», Εθνικό Συνέδριο Εφαρμογών Γεωθερμίας, Υπουργείο Βιομηχανίας Ενέργειας και Τεχνολογίας, Θεσσαλονίκη, σ. 387-397.

21. Περάκης Γιώργος, (2006) «Αξιολόγηση Γεωμηχανικών Παραμέτρων – Διατρησιμότητας Σχηματισμού & Κοπτικών Άκρων σε Γεωτρήσεις Υδρογονανθράκων» Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Τομέας Μεταλλευτικής, Επιβλέπων: Σ. Σταματάκη, Αθήνα.
22. Σημιαϊκής Κ. (1985), «Γεωθερμική έρευνα νησιώτικου συμπλέγματος Μήλου υπέρ Δ.Ε.Η. – Συμπεράσματα νεοτεκτονικής μελέτης», Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα.
23. Σημιαϊκής Κ. (1985), «Νεοτεκτονική εξέλιξη νησιώτικου συμπλέγματος Μήλου», Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα.
24. Σταματάκη Σοφία (2003) «Τεχνολογία Γεωτρήσεων», Ε.Μ.Π., Αθήνα.
25. Τζάνης Ανδρέας (2003) «Σημειώσεις για την έρευνα γεωθερμικών πεδίων», Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα
26. Τσόκας Γρηγόρης Ν. (1985), «Γεωφυσική διασκόπηση των νησιών Μήλος και Κίμωλος», Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, επιστημονική επετηρίδα της σχολής θετικών επιστημών, παράρτημα αριθμ. 50 ΤΟΥ 23^{ου} τόμου, Θεσσαλονίκη, σ. 12-21, σ. 108-126.
27. Φυτίκας Μιχάλης Δ., Ανδρίτσος Νικόλαος Β. (2004), «Γεωθερμία», εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη.
28. Φυτίκας Μιχάλης Δ. (1977), «Γεωλογική και Γεωθερμική μελέτη της νήσου Μήλου», Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, ΤΟΜ. XVIII VOL. Γεωλογικές και Γεωφυσικές μελέτες Νο 1, Αθήνα.
29. Φυτίκας Μιχάλης Δ. (1979), «Εκθεση για τις δυνατότητες χρησιμοποίησεως των γεωθερμικών ρευστών της νήσου Μήλου», Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα.
30. Φυτίκας Μιχάλης Δ., Μαυρογιαννόπουλος Γ. (1985), «Γεωθερμική ενέργεια από πεδία θερμών εδαφών και ατμίδων στη Μήλο», Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα.
31. Φυτίκας Μιχάλης Δ., Παπαχρήστου Μ. (2008), «Γεωθερμική ενέργεια (What is Geothermal energy)», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
32. Φυτίκας Μιχάλης Δ., Βουγιουκαλάκης Γ. (1992), «Ηφαιστειακή δομή και εξέλιξη Κιμώλου και Πολυαίγου (Νησιώτικο σύμπλεγμα Μήλου)», 6^ο Συνέδριο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Αθήνα.

33. Χριστοδούλου Γ., Κουζέλη-Κατσίρη Α. (1989) «Γεωθερμία και περιβάλλον: Υγρά γεωθερμικά απόβλητα», Εθνικό Συνέδριο Εφαρμογών Γεωθερμίας, 23-25 Οκτωβρίου 1989, Θεσσαλονίκη, Υπουργείο Βιομηχανίας Ενέργειας και Τεχνολογίας, σ. 398-406.
34. Chiotis E., Vrellis G. (1995), «Analysis of Casing Failures of Deep Geothermal Wells in Greece», Geothermics Vol. 24. No. 5/6, pp. 695-705.
35. Galanopoulos D, Hutton VRS, Dawes GJK (1991), «The Milos geothermal field: modelling and interpretation of electromagnetic induction studies», Physics of The Earth and Planetary Interiors Volume 66, Issues 1-2, Department of Geology and Geophysics, University of Edinburgh, Edinburgh, Pages 76-91.
36. Vrouzi F. (1985), «Research and development of geothermal resources in greece: present status and future prospects », Geothermics Volume 14, Issues 2-3, 1985, Pages 213-227.

Ηλεκτρονικές πηγές

1. <http://www.aidengineering.gr/gr/profile/Projectstudies/geothermal.htm>
(25-05-2009) (Εταιρεία που έχει σαν ειδίκευση την εγκατάσταση γεωθερμικών αντλιών)
2. http://www.renewablesb2b.com/ahk_greece/el/default/index/intro
(24-10-2009) (Επιχειρησιακή πλατφόρμα στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας)
3. http://www.geothermie.nl/img/images_inline.php?id=116
(10-04-2009) (Ενημερωτική διεθνή πλατφόρμα για την γεωθερμία)
4. <http://ape.chania.teicrete.gr/ape/geothermia/geothermia>
(20-04-2009) (Εργαστήριο Ανανεώσιμων Ενεργειακών Τεχνολογιών)
5. <http://www.geocities.com/grphysics/energy/geotherme>
(15-03-2009) (Ενημερωτική διεθνή πλατφόρμα για την γεωθερμία)
6. <http://iga.igg.cnr.it/geoworld/geoworld.p>
(15-03-2009) (Διεθνής Οργανισμός για την Γεωθερμική ενέργεια)
7. <http://users.hol.gr/~kkamakari/geomilo.html>
(15-03-2009) Του Γιώργου Αποστολίδη / Το υδρόθειο καταστρέφει τα πάντα - Ο αργός θάνατος της Μήλου

8. <http://www.energia.gr>
(05-03-2009) (Ιστοσελίδα που έχει ως αντικείμενο γενικά την ενέργεια)
9. <http://www.s.andb.gr>
(05-03-2009) (Εταιρεία που δραστηριοποιείται στη Μήλο)
10. <http://www.milos-island.gr/geology/geology.gr>
(08-06-2009) (Γεωλογία και μορφολογία εδάφους/Γεωλογικά στοιχεία της Μήλου)
11. <http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo765e/santorini-milos/>
(05-05-2010)(Τμήμα γεωλογίας Α.Π.Θ.)
12. <http://www.elinyae.gr>
(14-09-2010)(Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής & Ασφάλειας Της Εργασίας)
13. <http://www.sciencedirect.com/science>
(18-09-2010) (Ενημερωτική διεθνή πλατφόρμα για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των γεωθερμικών ρευστών)