

Κουτίνας: Συνεχίζουμε με τον κύριο Μενδρινό Δημήτρη, μεταλλειολόγο μηχανικό, με MASTER στη γεωθερμική ενέργεια που πρόσφατα έκανε στη Νέα Ζηλανδία.

Το θέμα του είναι η αξιολόγηση του γεωθερμικού δυναμικού της Μήλου.

Θέμα: Αξιολόγηση του γεωθερμικού δυναμικού της Μήλου.

Εισηγητής: **Δημ. Μενδρινός, MMM, Msc.**

Αξιολόγηση του γεωθερμικού δυναμικού της Μήλου

1. Εισαγωγή

Η εκμετάλλευση του γεωθερμικού πεδίου της Μήλου επιβάλλεται τόσο από το συμφέρον της εθνικής οικονομίας, όσο και από εκείνο των κατοίκων του νησιού. Είναι φυσικό λοιπόν να περιμένουμε ότι κάποια στιγμή θα γίνουν σημαντικές επενδύσεις στον τομέα αυτό. Οι επενδύσεις αυτές, προκειμένου να εξασφαλίζεται εκ των προτέρων με μικρό σχετικά ρίσκο, ότι θα αποβούν παραγωγικές, πρέπει να βασίζονται σε σειρά από τεχνικά δεδομένα, σημαντικότερο των οποίων είναι τα αποθέματα γεωθερμικής ενέργειας του νησιού. Ο υπολογισμός αυτών των αποθεμάτων επιτρέπει τον καθορισμό του μεγέθους της επένδυσης, και την εκτίμηση της διάρκειας ζωής της.

Παρόλο που υπάρχει στη Μήλο εγκατεστημένος σταθμός ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 2MW, και παρόλο που η δυνατότης παραγωγής καθεμιάς από τις 5 βαθειές γεωτρήσεις που έχουν ορυχθεί στο νησί είναι γνωστή, τα συνολικά θερμικά αποθέματα του πεδίου δεν έχουν εκτιμηθεί.

Στη σημερινή μου εισήγηση τα αποθέματα του γεωθερμικού πεδίου της Μήλου εκτιμούνται και χαρακτηρίζονται ως βέβαια, δυνατά και πιθανά.

Ο τρόπος υπολογισμού έγινε σύμφωνα με τη μέθοδο της αποθηκευμένης θερμότητας, η οποία έχει εφαρμοστεί σε πολλά γεωθερμικά πεδία στη Νέα Ζηλανδία, Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, Ιταλία, Φιλιππίνες και αλλού.

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, η αποθηκευμένη θερμότητα στο υπέδαφος μιας γεωθερμικής περιοχής υπολογίζεται ογκομετρικά, θεωρώντας σαν θερμοκρασία αναφο-

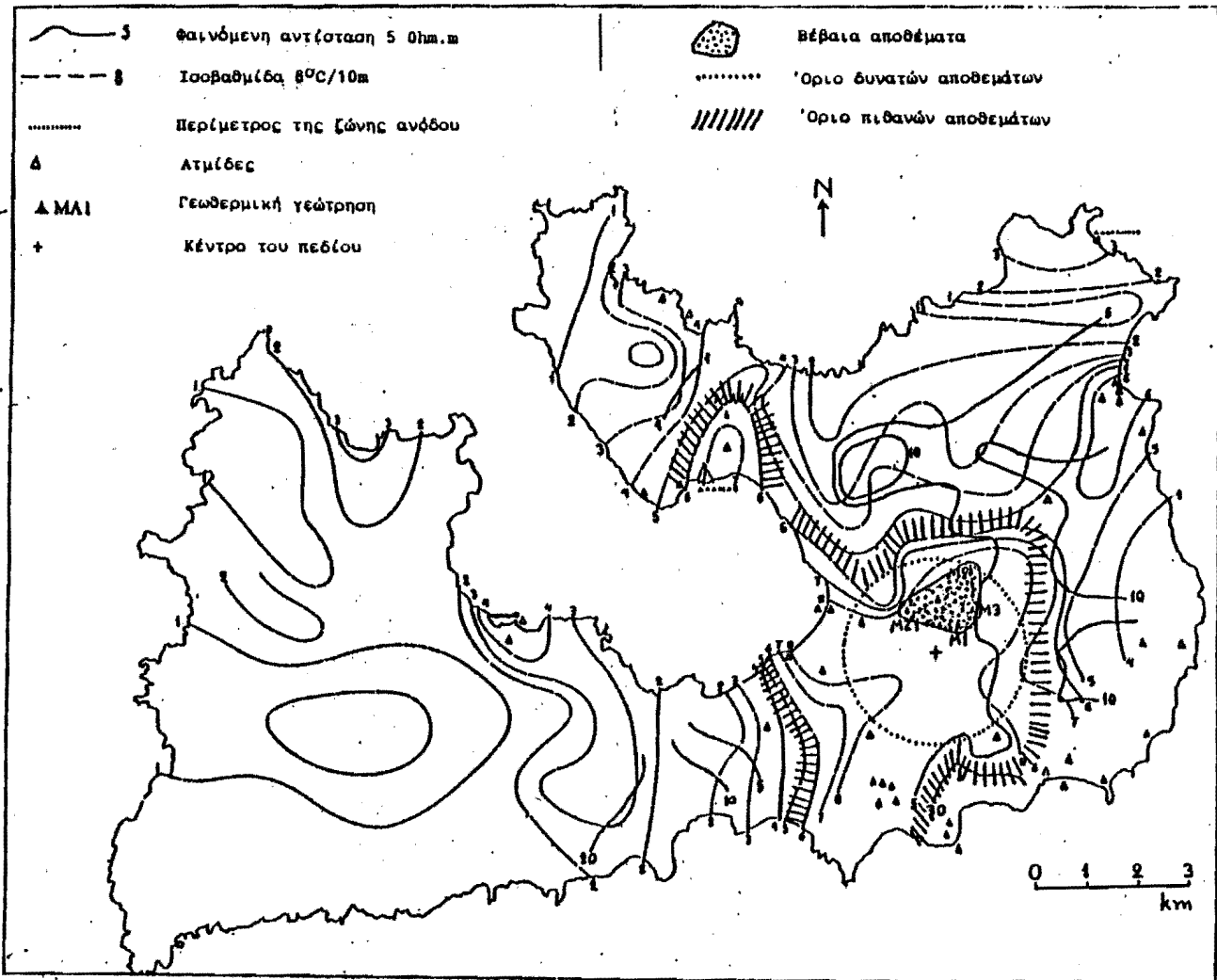
ράς, τη θερμοκρασία εκείνη κάτω από την οποία η εκμετάλλευση του πεδίου δεν είναι εφικτή. Το ποσό αυτής της θερμότητας πολλαπλασιάζεται, επί τον συντελεστή αποληψιμότητας για να υπολογιστεί η ωφέλιμη θερμική ενέργεια ώστε να υπολογιστεί η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Η θερμοκρασία αναφοράς επιλέγεται αφού καθοριστεί τέτοια πίεση διαχωρισμού, η οποία περιορίζει τυχόν προβλήματα αποθέσεων, και ο συντελεστής μετατροπής υπολογίζεται αφού προταθούν πιθανές συνθήκες λειτουργίας του στροβίλου. Οι περιοχές που αντιστοιχούν στα βέβαια, δυνατά και πιθανά αποθέματα προσδιορίζονται από γεωφυσικά δεδομένα και μετρήσεις στις γεωτρήσεις, ενώ τα εκτιμώμενα αποθέματα εκφράζονται σε MW εγκατεστημένης ισχύος και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα προσομοίωσης του πεδίου με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Τέλος, θέσεις γεωτρήσεων προτείνονται για περαιτέρω έρευνα.

2. Αποθέσεις πυριτικών αλάτων και προτεινόμενη πίεση διαχωρισμού και πίεση στην είσοδο της τουρμπίνας.

Η παρουσία χλωριούχου νατρίου διαλυμένου σε μεγάλες ποσότητες στο γεωθερμικό ρευστό, προκαλεί αύξηση στη διαλυτότητα του χαλαζία, σε υψηλές θερμοκρασίες και μείωση της διαλυτότητας του αμόρφου SiO₂. Μεγάλη διαλυτότητα του χαλαζία συνεπάγεται υψηλή συγκέντρωση SiO₂ στον ταμιευτήρα, ενώ χαμηλή διαλυτότητα των αμόρφων πυριτικών προκαλεί αυξημένα προβλήματα αποθέσεων στην επιφάνεια. Γι' αυτόν τον λόγο, για την λειτουργία του σταθμού 2MW ο διαχωρισμός γίνεται στα 25bar ενώ οι πρώτες προσπάθειες διαχωρισμού στα 8bar απέτυχαν λόγω σοβαρών προβλημάτων αποθέσεων.

Η προβλεπόμενη συγκέντρωση SiO₂ στο αλμόλοιπο σε



Εικόνα 1. Περιοχές που αντιστοιχούν στα βέβαια, δυνατά και πιθανά αποθέματα της γεωθερμικής ενέργειας στη Μήλο.

Πίνακας 1: Δείκτης υπερκορεσμού πυριτικών για διαφορετικές πιέσεις διαχωρισμού.

Πίεση,	8	20	25	30	35
Θερμοκρασία, °C	170	212	224	234	243
NaCl στο αλμόλοιπο, %	12,2	11,0	10,7	10,5	10,2
SiO ₂ , ppm	1225	1105	1073	1047	1022
Διαλυτότητα αμ. SiO ₂ ppm	536	804	886	956	1022
Δείκτης υπερκορεσμού	2.3	1.37	1.21	1.09	1.0

σύγκριση με τη διαλυτότητα του άμορφου SiO₂ για διάφορες πιέσεις διαχωρισμού παρουσιάζεται στον πίνακα 1. Η περιεκτικότητα σε SiO₂ του ρευστού στον ταμειυτήρα θεωρείται ίση με τη διαλυτότητα του χαλαζία στους 315°C (μέση θερμοκρασία του ταμειυτήρα) και σε 8% περιεκτικότητα σε NaCl που είναι 800ppm.

Όταν ο δείκτης υπερκορεσμού, που ορίζεται ως ο λόγος της συγκέντρωσης του SiO₂ δια τη διαλυτότητα του άμορφου SiO₂, γίνει 2,5 ή περισσότερο, τότε γίνεται άμεσος πολυμερισμός του SiO₂ και ακολουθούν αποθέσεις με τρομακτικό ρυθμό. Διαφορετικά η καταβύθιση του SiO₂ γίνεται σχετικά αργά και αποτίθεται κατευθείαν σε στερεές επιφάνειες.

Γενικά στη γεωθερμική τεχνολογία θεωρείται ως καλή πρακτική να εκλέγεται τέτοια πίεση διαχωρισμού, ώστε ο δείκτης υπερκορεσμού να είναι περίπου ίσος με τη μονάδα. Όμως, σύμφωνα με τον πίνακα 1, για να συμβαίνει αυτό στη Μήλο, η πίεση διαχωρισμού θα πρέπει να είναι 35 bar. Επειδή διαχωρισμός σε τόσο υψηλή πίεση θεωρείται αφενός ως σπατάλη ενέργειας και αφετέρου αυξάνει σημαντικά το κόστος εκμετάλλευσης, προτείνεται να εκλεγεί χαμηλότερη πίεση, ενώ τα προβλήματα αποθέσεων να αντιμετωπιστούν χρησιμοποιώντας σωλήνες μεγαλύτερης διαμέτρου και με μηχανικό καθαρισμό κάθε 1-2 χρόνια.

Η ερώτηση τώρα είναι: Πόσο χαμηλή πίεση διαχωρισμού πρέπει να επιλεγεί; Για να απαντήσει κανείς σ' αυτήν την ερώτηση, πρέπει να γνωρίζει τον ρυθμό αύξησης των αποθέσεων (mm/έτος) ως συνάρτηση της πίεσης διαχωρισμού και να συγκρίνει το κόστος καθαρισμού με την αξία της εξοικονομούμενης ενέργειας. Δυστυχώς δεν υπάρχει μέθοδος γνωστή σε μένα που να υπολογίζει επιτυχώς τον ρυθμό των αποθέσεων για αλμόλοιπα με υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένα άλατα, όπως αυτό της Μήλου.

Είναι επίσης φανερό ότι η πίεση διαχωρισμού δεν μπορεί να είναι 8bar επειδή τότε ο δείκτης υπερκορεσμού πλησιάζει την τιμή 2.5.

Τα 25bar φαίνονται σαν λογική εναλλακτική λύση, παρόλο που ο δείκτης υπερκορεσμού (=1,21) θεωρείται υψηλός. Μετρήσεις στο εργοτάξιο του ρυθμού αποθέσεως για 25bar πίεση διαχωρισμού, δείχνουν ότι αυτές βρίσκονται σε ανεκτά όρια.

Έχοντας επιλέξει την πίεση διαχωρισμού ως 25bar, μας δίνεται η δυνατότητα να καθορίσουμε μια σχετικά υψηλή πίεση στην είσοδο του στροβίλου μια και όσο ψηλότερη είναι αυτή η πίεση τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοση της παραγωγής ηλεκτρισμού. Περιμένοντας ότι στο μέλλον η εξέλιξη της τεχνολογίας και η αποκτηθείσα εμπειρία θα

επιτρέψει τον διαχωρισμό σε ακόμη μικρότερες πιέσεις, διαλέγουμε ως πίεση εισόδου της τουρμπίνας τα 15bar.

3. Προσδιορισμός των περιοχών που αντιστοιχούν στα βέβαια, δυνάτα και πιθανά αποθέματα.

Βέβαια αποθέματα, ονομάζεται εκείνο το μέρος ενός κοιτάσματος, η έκταση του οποίου, η οροφή του και ο πυθμένας του έχουν προσδιοριστεί από γεωτρήσεις. Στην περίπτωση όμως ενός γεωθερμικού πεδίου, το κόστος των γεωτρήσεων είναι πολύ υψηλό, με αποτέλεσμα όταν σχεδιάζεται η εκμετάλλευσή τους να έχουμε λίγες διαθέσιμες γεωτρήσεις.

Όταν μια γεώτρηση είναι παραγωγική, είναι λογικό να δεχτούμε ότι σε ακτίνα 250 μέτρων γύρω του υπάρχουν διαπερατοί σχηματισμοί. Επί πλέον, εάν βρίσκεται στην περιοχή ανόδου του ρευστού του πεδίου (οπότε δε θα υπάρχουν σημαντικές θερμοκρασιακές αναστροφές στη γεώτρηση) και τροφοδοτείται από τον πυθμένα της, είναι λογικό να δεχτούμε ότι οι διαπερατοί σχηματισμοί εκτείνονται τουλάχιστον 250μ. βαθύτερα. Αυτές οι παραδοχές είναι κανόνες στις Φιλιππίνες με τη διαφορά ότι ο πυθμένας του ταμειυτήρα λαμβάνεται ως 500 μέτρα βαθύτερα από τον πυθμένα της βαθύτερης παραγωγικής γεώτρησης.

Για το πεδίο της Μήλου τα βέβαια αποθέματα φαίνονται σαν τη γραμμοσκιασμένη περιοχή στην εικόνα 1. Η περιμετρος της περιοχής αυτής σχεδιάστηκε χαράσσοντας κύκλους ακτίνας 250μ. γύρω από κάθε γεώτρηση και ενώνοντάς τους με εφαπτόμενες ευθείες γραμμές, ενώ το εμβαδόν της είναι 2,65km². Η οροφή του ταμειυτήρα θεωρήθηκε ως -800m. (η μέση τιμή από κάθε γεώτρηση), ενώ ο πυθμένας του ως -160m., δηλαδή 250m, βαθύτερα από τον πυθμένα της βαθύτερης γεώτρησης M2.

Σαν **δυνάτα αποθέματα**, χαρακτηρίζεται εκείνο το τμήμα ενός κοιτάσματος, μέρος του οποίου έχει προσδιοριστεί με γεωτρήσεις, ενώ η ύπαρξη του υπόλοιπου ενδεικνύεται από γεωλογικά, γεωφυσικά ή γεωχημικά δεδομένα. Εάν αυτός ο ορισμός εφαρμοστεί στο πεδίο της Μήλου, χρειάζεται προσοχή γιατί είναι δυνατόν να καθορισουμε όλο το νησί σαν δυνάτα αποθέματα. Σε άλλα γεωθερμικά πεδία υπάρχει ένα καλά σχεδιασμένο όριο ειδικής αντιστάσεως (π.χ. στο Wairakei-Tauhara, στο Broadlands κ.ά.), αλλά τέτοιο όριο στη Μήλο συναντάται μόνο νότια της πεδιάδας της Ζεφυρίας, όπου η φαινόμενη ειδική αντίσταση υπερβαίνει τα 30 Ohm.m (εικόνα 1). Επί πλέον, χαμηλές τιμές της ειδικής αντίστασης δεν αντιστοιχούν απαραίτητα στον γεωθερμικό ταμειυτήρα στη Μήλο, αλλά μπορεί να προκαλούνται από την ύπαρξη ψυχρού θαλασσινού νερού στο υπέδαφος. Η έκταση της εκμεταλλεύσιμης περιοχής του πεδίου μπορεί να καθο-

ριστεί σαν η περιοχή με χαμηλές ειδικές αντιστάσεις και υψηλές τιμές της θερμοβαθμίδας, αλλά από την άλλη μεριά, ύπαρξη θερμού νερού σε μικρό βάθος μπορεί να προκαλέσει παρόμοιες συνθήκες, χωρίς να συναντάται υψηλή θερμοκρασία βαθύτερα.

Γι' αυτούς τους λόγους, ως δυνατά αποθέματα για τη Μήλο θα θεωρηθεί εκείνο το τμήμα του γεωθερμικού πεδίου που αντιστοιχεί στην περιοχή ανόδου του γεωθερμικού ρευστού. Προκειμένου να καθοριστεί αυτή η περιοχή λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

α) Η γεώτρηση M1 παρουσιάζει θερμοκρασιακό προφίλ που ακολουθεί την καμπύλη κορεσμού μέχρι τον πυθμένα της (εικ. 2), άρα βρίσκεται στη ζώνη ανόδου του ρευστού.

β) Η γεώτρηση M2 παρουσιάζει μικρή θερμοκρασιακή αναστροφή κοντά στον πυθμένα (εικ. 3) πράγμα που εξηγείται εάν η γεώτρηση αυτή βρίσκεται στην περίμετρο της ζώνης ανόδου.

γ) Όλες οι γεωτρήσεις στην πεδιάδα της Ζεφυρίας (M1, M2, M3 και MZ1) έχουν περίπου 25bar πίεση στην κεφαλή όταν είναι κλειστές, πράγμα που σημαίνει ότι όλες διατρυπούν την ίδια περιοχή του πεδίου.

δ) Το κέντρο αυτής της περιοχής λαμβάνεται ως το κέντρο της περιοχής όπου η γεωθερμική βαθμίδα υπερβαίνει τους 8°C/10m (εικόνα 1).

Επειδή δεν υπάρχουν σαφή όρια της περιοχής αυτής, σχεδιάζουμε έναν κύκλο ακτίνας 1,75km όπως φαίνεται στην εικόνα 1 και αυτός θεωρείται ως η ζώνη ανόδου του ρευστού και ως τα δυνατά αποθέματα του πεδίου, η

έκταση των οποίων είναι 9,62km². Για όσους δεν συμφωνούν με αυτόν τον τρόπο προσέγγισης του θέματος, προτείνουμε ως δυνατά αποθέματα εκείνη την περιοχή που περικλείεται από την καμπύλη ισοβαθμίδας 8°C/10m, πράγμα που οδηγεί περίπου στην ίδια έκταση.

Η οροφή του ταμειευτήρα λαμβάνεται ξανά στα -800μ, ενώ ο πυθμένας του (για τα δυνατά αποθέματα) στα -2100μ, βάθος που ενδύκνεται από προσομοίωση του πεδίου με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

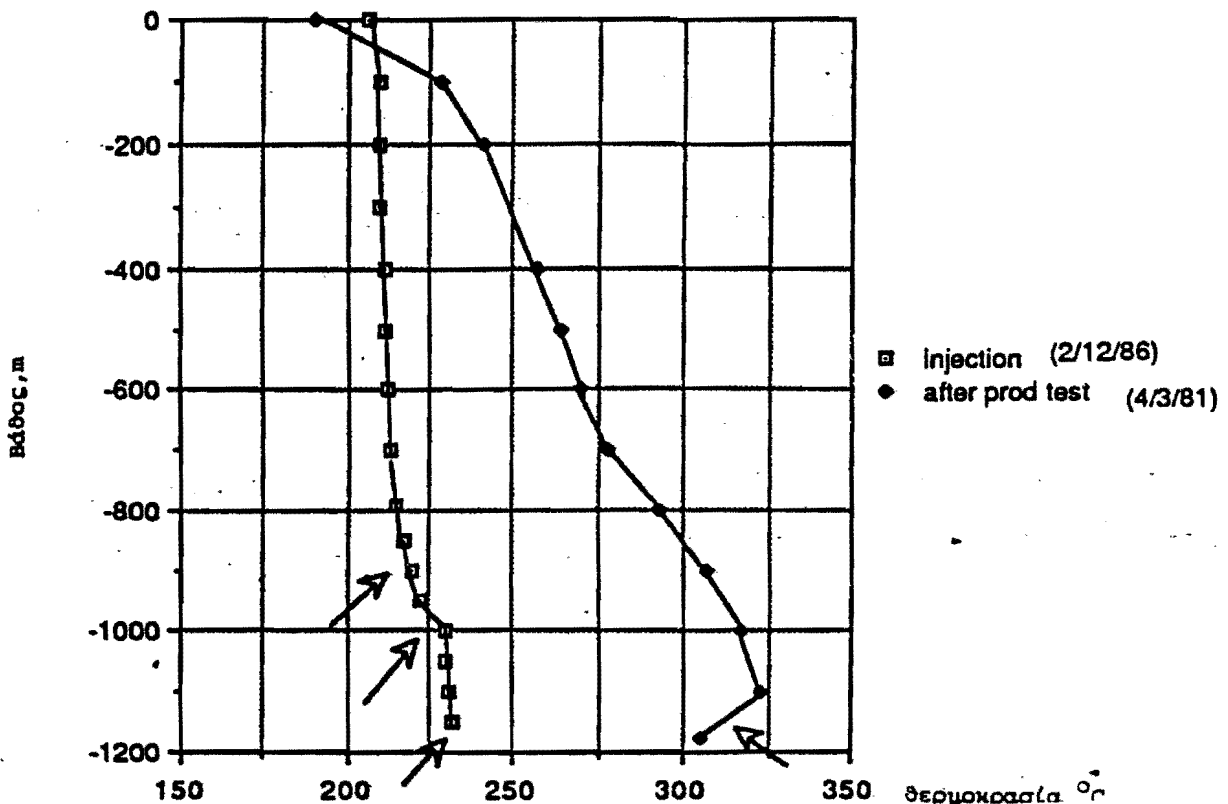
Πιθανά αποθέματα, ορίζονται εκείνα τα οποία η ύπαρξή τους ενδεικνύεται από γεωφυσικά, γεωχημικά και γεωλογικά δεδομένα μόνο. Ειδικότερα για το πεδίο της Μήλου τα πιθανά αποθέματα προσδιορίζονται από τις φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις και τις καμπύλες ισοβαθμίδας ως εξής:

α) Επειδή η γεώτρηση M3 βρίσκεται επί της καμπύλης 5 Ohm.m φαινόμενης ειδικής αντιστάσεως, σαν όριο του πεδίου λαμβάνεται η καμπύλη 8 Ohm.m (για AB/2=1000m).

β) Λόγω των πολλών αποθέσεων, η θερμοκρασία αναφοράς (ή θερμοκρασία εγκατάληψης του πεδίου) λαμβάνεται ως 224°C αντί για 180°C που συνήθως χρησιμοποιείται.

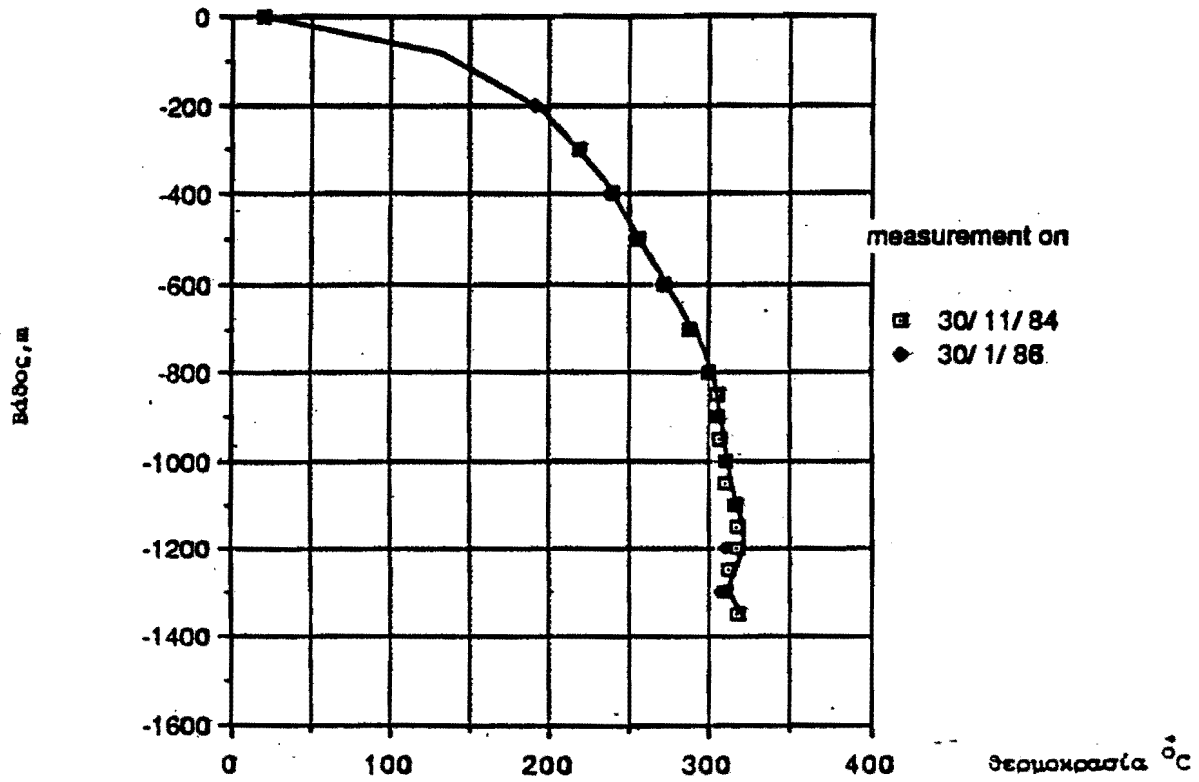
γ) Η θερμοκρασία στη γεώτρηση MA1 υπερβαίνει τους 250°C, ενώ η γεώτρηση αυτή είναι τοποθετημένη εντός της 6°C/10m καμπύλης ισοβαθμίδας.

Γι' αυτούς τους λόγους σαν πιθανά αποθέματα λαμβάνονται εκείνες οι περιοχές που περικλείονται από την

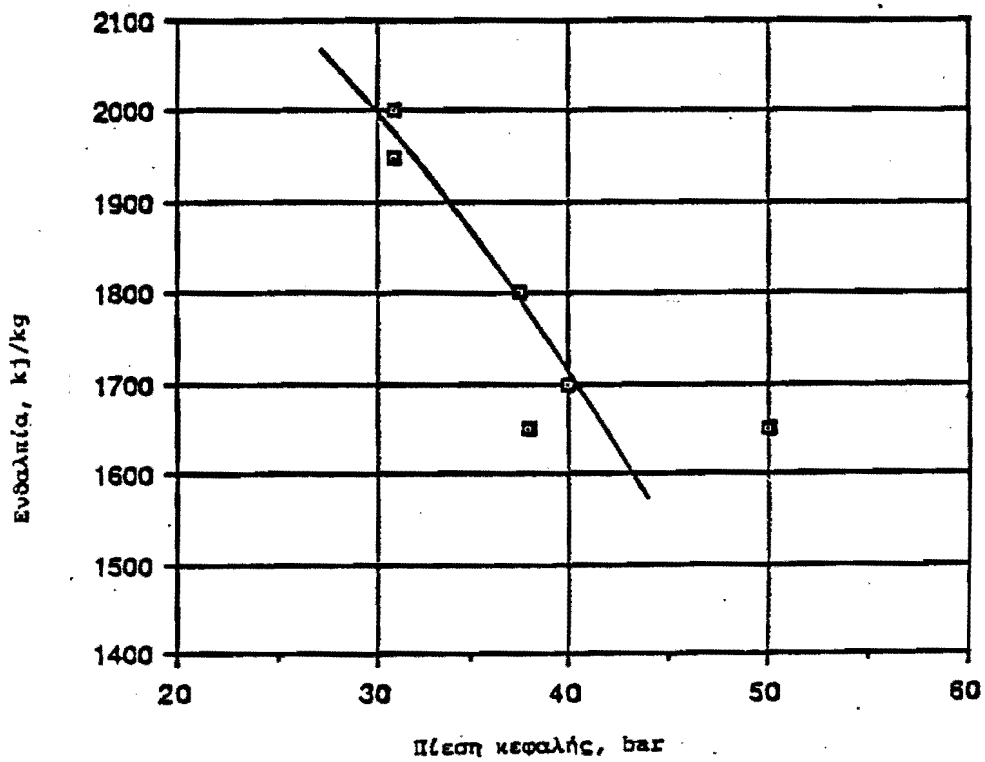


Εικόνα 2. Θερμοκρασιακό προφίλ στη γεώτρηση M1

well M2 static temperature profile



Εικόνα 3. Θερμοκρασιακό προφίλ στη γεώτρηση M2



Εικόνα 4. Ενθαλπία του παραγόμενου ρευστού για διαφορετικές πιέσεις στη γεώτρηση M2.

6°C/10m καμπύλη ισοβαθμίδας και την 8 Ohm.m καμπύλη ισοηλεκτρικής αντιστάσεως, όπως φαίνεται στην εικόνα 1. Όπως προηγουμένως η οροφή και ο πυθμένας του ταμιευτήρα λαμβάνονται στα -800μ. και -2100μ. αντίστοιχα.

4. Υπολογισμός της αποθηκευμένης θερμότητας

Ως θερμοκρασία αναφοράς επιλέγεται αυτή που αντιστοιχεί στην πίεση διαχωρισμού (=25bar), δηλαδή 224°C.

Οι συντελεστές αποληψιμότητας που συνήθως χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των γεωθερμικών αποθεμάτων, κυμαίνονται μεταξύ 10% και 50% για συστήματα όπου κυριαρχεί η υγρή φάση στον ταμιευτήρα, με μέση τιμή γύρω στο 25%, σύμφωνα με τους Nathenson και Muffler. Η αποθηκευμένη θερμότητα E_{st} σε έναν ταμιευτήρα όπου κυριαρχεί η υγρή φάση όγκου V και θερμοκρασίας T δίνεται από τον τύπο:

$$E_{st} = [(1-\Phi) \rho_r C_r + \Phi \rho_l C_l] \cdot V \cdot (T - T_0)$$

όπου Φ είναι το πορώδες, ρ_r και ρ_l είναι οι ειδικές θερμότητες των πετρωμάτων και της υγρής φάσης του ρευστού, ενώ T_0 είναι η θερμοκρασία αναφοράς.

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

$$\Phi = 10\%, \rho_r = 2.700 \text{ kg/m}^3 \text{ και } C_r = 940 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}$$

Ύστερα από τους υπολογισμούς βρίσκουμε ότι:

	Αποθηκευμένη θερμότητα	Ωφέλιμη θερμότητα
Βέβαια αποθέματα:	5.10^{17} J	$1.25.10^{17} \text{ J}$
Δυνατά αποθέματα:	$3.10.18^{17} \text{ J}$	$7.4.10^{17} \text{ J}$
Επιπλέον πιθανά:	2.10^{18} J	$5.0.10^{17} \text{ J}$

5. Συντελεστής μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική σε ένα γεωθερμικό πεδίο.

Ο συντελεστής μετατροπής σε γεωθερμικούς ηλεκτρο-

παραγωγικούς σταθμούς εξαρτάται κυρίως από την ενθαλπία του παραγόμενου ρευστού και από τις συνθήκες λειτουργίας της τουρμπίνας. Μπορεί να είναι 20% για πεδία ξηρού ατμού ή ακόμα 5% για πεδία θερμού νερού. Συνήθως οι τιμές που χρησιμοποιούνται κυμαίνονται μεταξύ 10-15%. Ας υπολογίσουμε τώρα τον συντελεστή μετατροπής για τις προτεινόμενες συνθήκες λειτουργίας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής στη Μήλο.

Η μέση ενθαλπία του παραγόμενου ρευστού στη Μήλο λαμβάνεται ως 2000kj/kg, που αντιστοιχεί σε εκείνη της γεώτρησης M2 όταν έχει πίεση στην κεφαλή 30 bar. (εικόνα 4). Σαν πίεση διαχωρισμού και πίεση εισόδου του ρευστού στο στρόβιλο θεωρούμε 25 bar και 15bar αντίστοιχα, όπως εξηγήθηκε νωρίτερα. Η πίεση στο συμπυκνωτή θεωρείται ως 0.07 bar, ενώ η απόδοση του στρόβιλου ως 75% και της γεννήτριας 95%. Επιτρέποντας 5% απώλειες λόγω των μη υγραποιοιμένων αερίων στον ατμό και λόγω της συμπύκνωσης του ατμού στις γραμμές μεταφοράς, ύστερα από τους υπολογισμούς βρίσκουμε ότι ο συντελεστής μετατροπής είναι 15%.

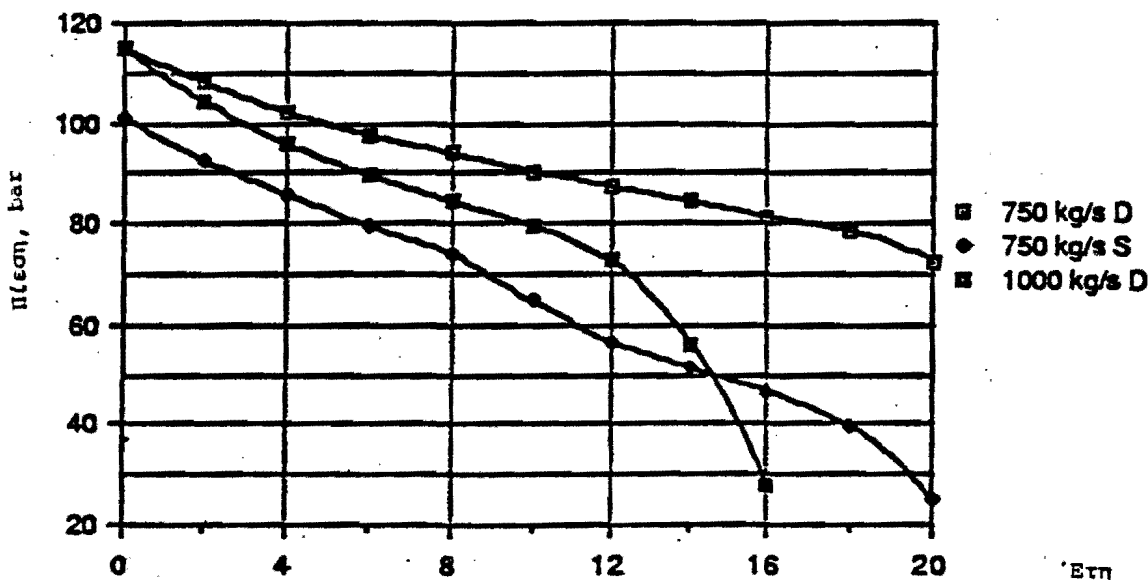
Ο άνω προτεινόμενος μηχανισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αντιστοιχεί σε κατανάλωση ατμού 6.72kg/kwh (e) τυπική τιμή για τους πρόσφατους τύπους εργοστασίων ηλεκτροπαραγωγής με συμπυκνωτή.

6. Αποθέματα σε MW εγκατεστημένης ισχύος

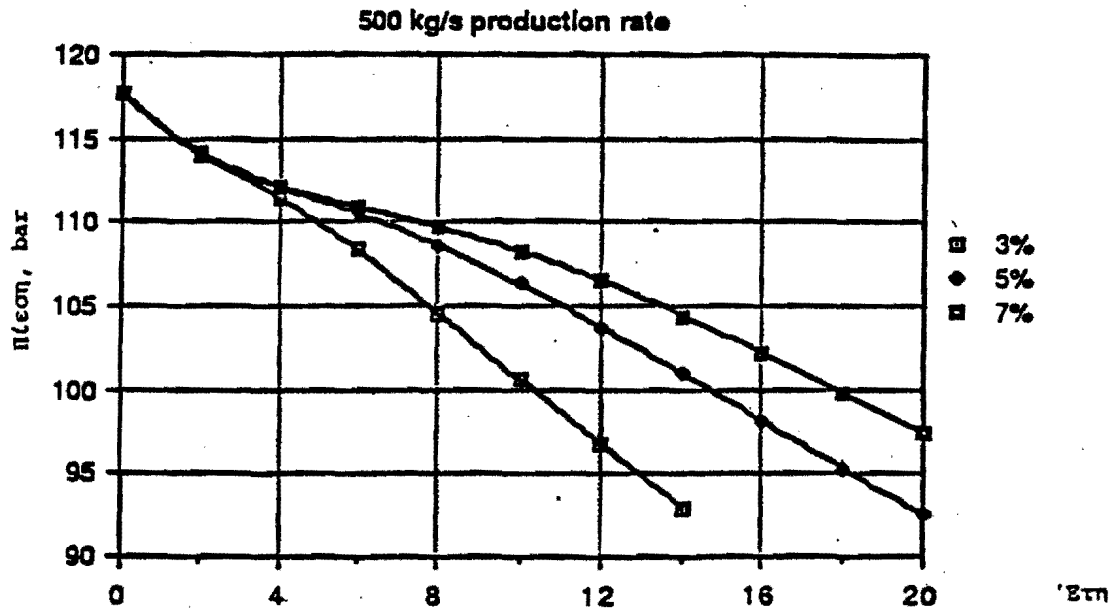
Η ισχύς που μπορεί να εγκατασταθεί σε MW δίνεται από τον τύπο:

$$MW_e = \frac{\text{Ωφέλιμη Θερμότητα} \times \text{Συντελεστή Μετατροπής}}{\text{Συντελεστή Λειτουργίας} \times \text{Διάρκεια Ζωής του έργου}}$$

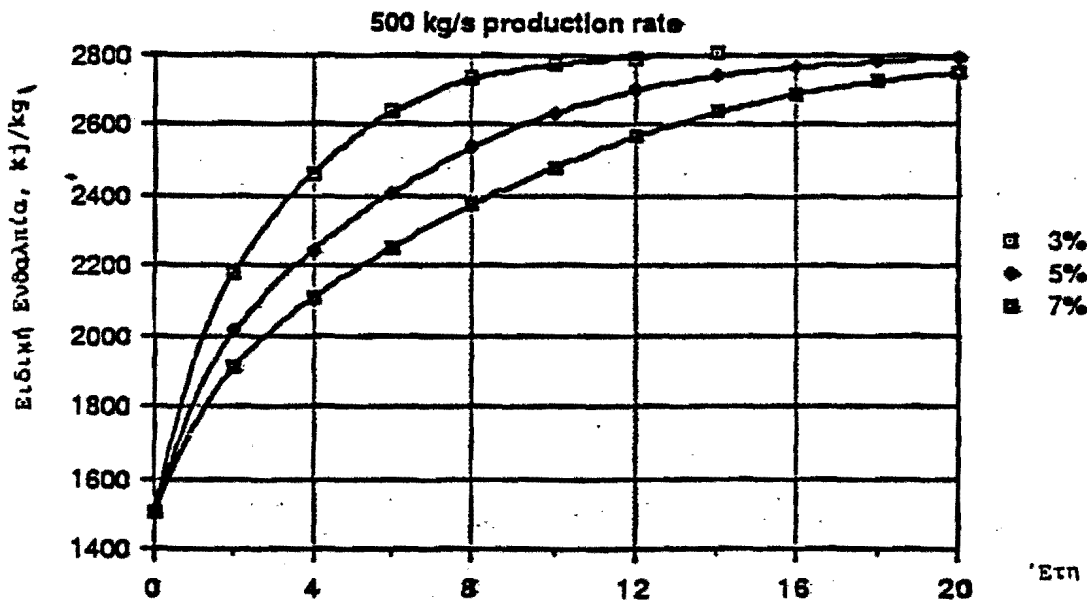
Θεωρώντας 90% συντελεστή λειτουργίας του σταθμού και 25 χρόνια τη διάρκεια ζωής του βρίσκουμε ότι:



Εικόνα 5. Μεταβολές της πίεσης στον ταμιευτήρα, για διάφορα σενάρια παραγωγής. Το D αντιστοιχεί σε παραγωγή από γεωτρήσεις βάθους 1330M, ενώ το S αντιστοιχεί σε παραγωγή από γεωτρήσεις βάθους 1060μ.



Εικόνα 6. Μεταβολή της πίεσης σε βάθος 1170μ. στον ταμιευτήρα για παραγωγή 500kg/s ρευστού και για διαφορετικές τιμές του πορώδους.



Εικόνα 7. Ειδική ενθαλπία του παραγόμενου ρευστού για 500kg/s παραγωγή από γεωτρήσεις βάθους 1330μ. και για διάφορες τιμές του πορώδους.

Βέβαια αποθέματα:	25 MW
Δυνατά αποθέματα:	150 MW
Επιπλέον πιθανά:	100 MW
Συνολικά πιθανά απόθ.:	250 MW

7. Προσομοίωση του πεδίου με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή

Ο προσομοιωτής MULKOM χρησιμοποιήθηκε σε υπολογιστή IBM 4341 για να προσομοιώσει τη φυσική ροή διαμέσου του γεωθερμικού πεδίου της Μήλου. Οι κύριες μεταβλητές ήταν οι διαπερατότητες των πετρωμάτων και η θερμική ροή της περιοχής ενώ η προσομοίωση θεωρείτο επιτυχής όταν το μοντέλο μπορούσε να αναπαράγει επιτυχώς τις μετρήσεις στις γεωτρήσεις καθώς και τα γεωφυσικά και γεωχημικά δεδομένα.

Τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν, κατόπιν χρησιμοποιήθηκαν για να μελετήσουν τη συμπεριφορά του ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης. Η παραγωγή του ρευστού θεωρήθηκε ότι γίνεται από την περιοχή που αντιστοιχεί στα δυνατά αποθέματα, δηλαδή από την περιοχή της Ζεφυρίας.

Η πίεση στον ταμιευτήρα για 750kg/s παραγωγή ρευστού από γεωτρήσεις βάθους 1050m και 1330m καθώς και για 1000 kg/s παραγωγή από 1300m γεωτρήσεις, φαίνεται στην εικόνα 5. Ροή ρευστού 750 kg/s μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε σταθμό ηλεκτροπαραγωγής της τάξεως των 150 MW, ενώ 1000 kg/s σε σταθμό της τάξεως των 200MW. Στην περίπτωση των 1000kg/s παραγωγή, η πίεση στον ταμιευτήρα ύστερα από 16 χρόνια πέφτει σε πολύ χαμηλά επίπεδα (25bar), επομένως το πεδίο δεν μπορεί να ανεχτεί τόσο μεγάλη παραγωγή, τουλάχιστον όχι με 1330μ βαθειές γεωτρήσεις. Όταν η

παραγωγή είναι 750 kg/s, ύστερα από 20 χρόνια η πίεση στον ταμιευτήρα παραμένει 70bar όταν γίνεται από βαθειές γεωτρήσεις, ενώ όταν γίνεται από ρηχές γεωτρήσεις πέφτει στα 25 bar. Στη δεύτερη περίπτωση βαθύτερες γεωτρήσεις πρέπει να ορυχθούν ώστε να διατηρηθεί η παροχή ατμού στους στρόβιλους. Αυτό δείχνει ότι η όρυξη βαθειών γεωτρήσεων, αν και είναι ακριβή, είναι δυνατό να αποβεί οικονομική μακροπρόθεσμα.

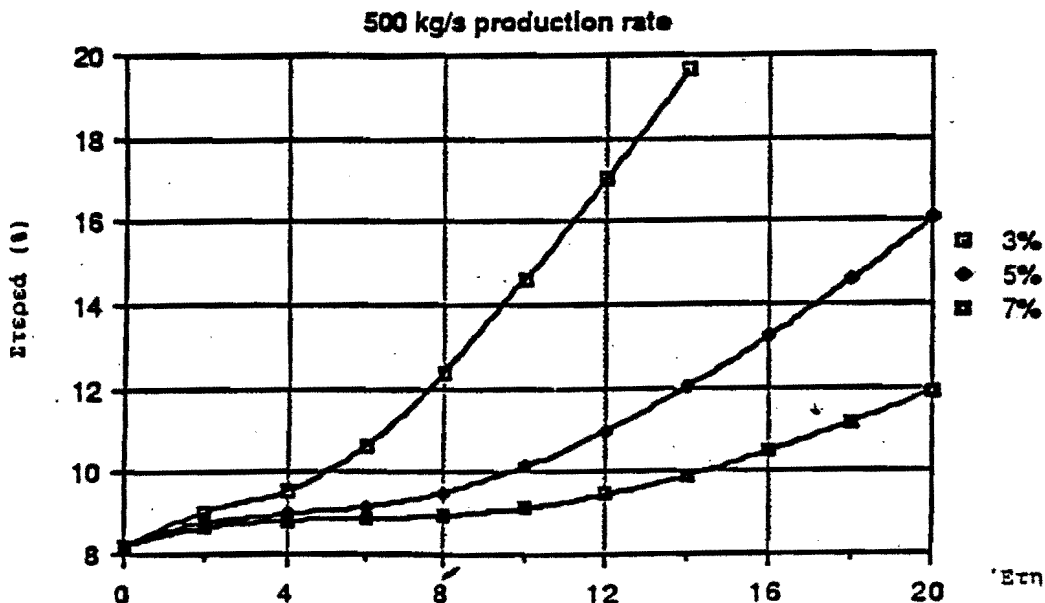
Η πίεση στον ταμιευτήρα, η ενθαλπία του παραγόμενου ρευστού και η περιεκτικότητα σε στερεά της υγρής φάσης του ρευστού του ταμιευτήρα για 500kg/s ρυθμό παραγωγής από γεωτρήσεις βάθους 1330μ. και για διαφορετικές τιμές του πορώδους του ταμιευτήρα, φαίνονται στις εικόνες 6,7 και 8.

Παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις η πίεση διατηρείται σε υψηλά επίπεδα, ενώ η περιεκτικότητα σε διαλυμένα στερεά αυξάνει συνεχώς. Ειδικότερα στην περίπτωση όταν το πορώδες είναι 3%, ύστερα από 10 χρόνια παραγωγής τα στερεά υπερβαίνουν το 15% της υγρής φάσης του ρευστού. Αυτό πιθανώς να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα αποθέσεων στον ταμιευτήρα, στις γεωτρήσεις και στις επιφανειακές σωληνώσεις.

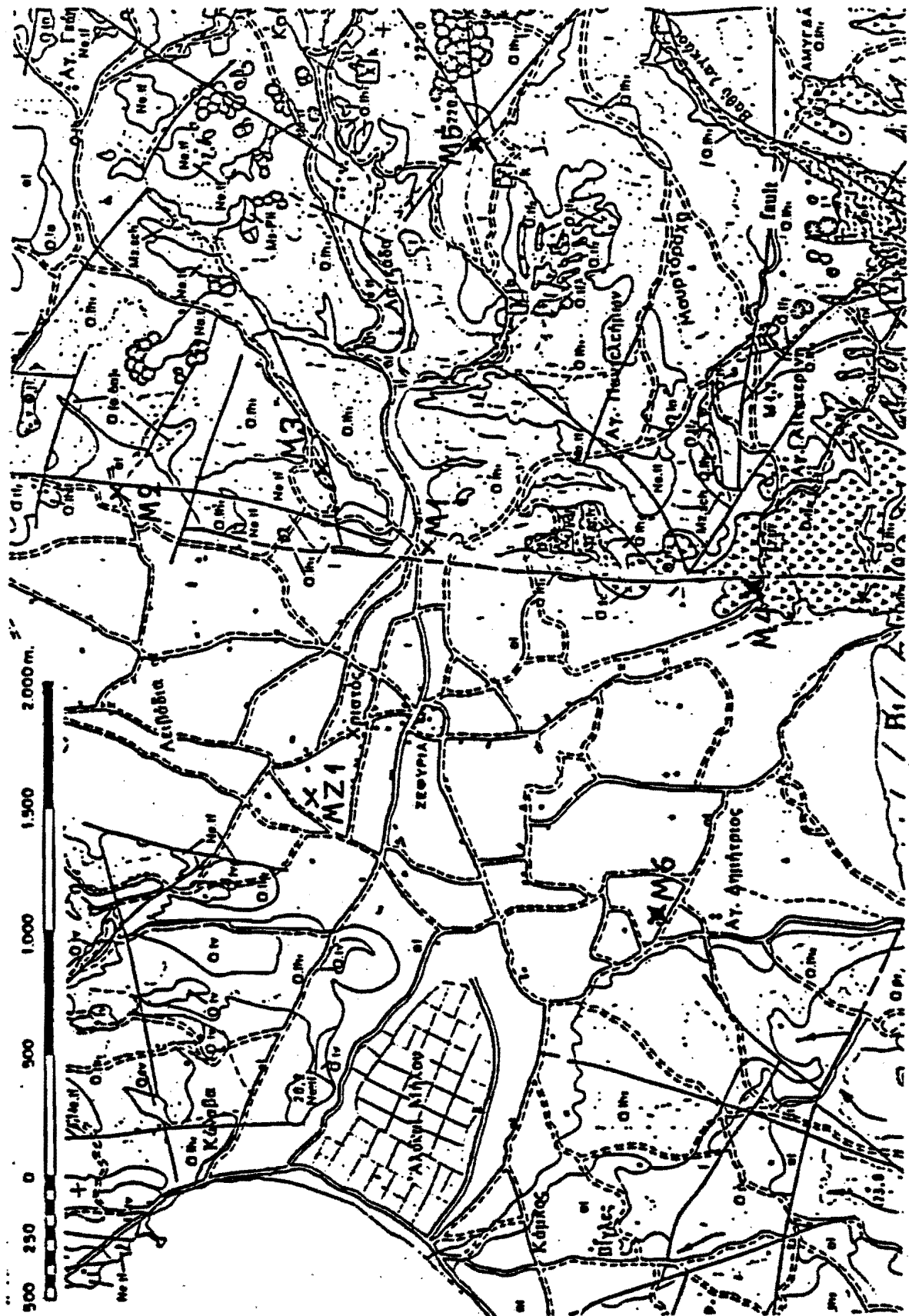
Γενικά παρατηρούμε ότι η εκμετάλλευση του πεδίου με 100-150 MW ηλεκτρικής ισχύος πιθανόν να είναι εφικτή, πράγμα που συμφωνεί με τον προσδιορισμό των γεωθερμικών αποθεμάτων του νησιού με τη συμβατική μέθοδο.

8. Προτεινόμενη στρατηγική για περαιτέρω έρευνα

Προτού τοποθετήσουμε καινούργιες ερευνητικές γεωτρήσεις, πρέπει να αποφασίσουμε ποιά στρατηγική εκμετάλλευσης του πεδίου θα ακολουθηθεί. Επειδή τα πιθα-



Εικόνα 8. Περιεκτικότητα σε στερεά στην υγρή φάση του ρευστού του ταμιευτήρα για 500kg/s παραγωγή και για διάφορες τιμές του πορώδους.



Εικόνα 9. Προτεινόμενες θέσεις για τρεις ερευνητικές γεωτρήσεις στη Μήλο.

νά αποθέματα του πεδίου ανέρχονται περίπου σε 150 MW εγκατεστημένης ισχύος, προτείνεται να εγκατασταθεί σταθμός 120MW. Αυτή η τιμή αντιστοιχεί στην ελάχιστη οικονομικά συμφέρουσα επειδή υποβρύχιο καλώδιο είναι αναγκαίο να συνδέσει το εργοστάσιο με το ηπειρωτικό δίκτυο της ΔΕΗ, ενώ ταυτόχρονα αφήνεται 25% περιθώριο ασφαλείας μέχρι την τιμή των δυνατών αποθεμάτων του πεδίου.

Ο στόχος της περαιτέρω έρευνας θα πρέπει να είναι να εντοπιστούν βέβαια αποθέματα που να αντιστοιχούν σε ηλεκτρική ισχύ τουλάχιστον 120 MW αυξάνοντας τόσο την ένταση του γνωστού ταμιευτήρα, όσο και το βάθος του. Επειδή η πεδιάδα της Ζεφυρίας αντιστοιχεί στη ζώνη ανόδου του γεωθερμικού ρευστού το ρίσκο είναι μικρότερο εάν τρυπήσουμε βαθύτερα, από το να τρυπήσουμε πιο μακριά. Παρόλο που πιστεύεται ότι ο ταμιευτήρας εκτείνεται σε βάθος τουλάχιστον 2 χιλιόμετρα τόσο βαθιές ερευνητικές γεωτρήσεις δε συνιστώνται λόγω του μεγάλου κόστους τους.

Αρχικά προτείνονται τρεις ερευνητικές γεωτρήσεις βάθους 1600 μέτρων στις θέσεις που φαίνονται στο χάρτη της εικόνας 9. Η πρώτη, η M4, τοποθετήθηκε νότια της M1 στη συμμετρική θέση της M2, για να ερευνηθεί η νότια περιοχή του ταμιευτήρα. Η δεύτερη, η M4, τοποθετήθηκε 1,6 χιλιόμετρα ανατολικά της M1, προκειμένου να ερευνηθεί το ανατολικό όριο του ταμιευτήρα και η τρίτη, η M5, 1,6 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά της M1. Και οι τρεις αυτές γεωτρήσεις τοποθετήθηκαν δίπλα σε ρήγματα ή στην προέκταση ρηγμάτων, ώστε να επιτύχουν μεγάλη διαπερατότητα.

Η περαιτέρω έρευνα προτείνεται να εξαρτηθεί από τα αποτελέσματα αυτών των γεωτρήσεων.

Συμπεράσματα

Τα αποθέματα της γεωθερμικής ενέργειας του πεδίου της Μήλου εκτιμήθηκαν και χαρακτηρίστηκαν ως βέβαια (=25MW), δυνατά (=150MW) και πιθανά (=250 MW) εγκατεστημένης ισχύος για ηλεκτροπαραγωγή και για 25 χρόνια διάρκεια ζωής του εργοστασίου. Το χαρακτηριστικό αυτό της αξιολόγησης είναι η μεγάλη αβεβαιότητα που υπάρχει ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η αβεβαιότητα αυτή πηγάζει από το μεγάλο εύρος τιμών μέσα στο οποίο μπορεί να κυμαίνονται οι παράμετροι: συντελεστής αποληψιμότητας (10-50%) και συντελεστής μετατροπής (10-15%), ενώ οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 25% και 15% αντίστοιχα. Από την άλλη μεριά όμως πολλά γεωθερμικά πεδία του εξωτερικού έχουν αξιοποιηθεί βασιζόμενα σε εκτίμηση αποθεμάτων με παρόμοιες τιμές των συντελεστών που χρησιμοποιήθηκαν σ' αυτή την εισήγηση.

Λόγω του μεγάλου ρίσκου το οποίο αυξάνει ακόμα περισσότερο λόγω του υποκειμενικού παράγοντα που υπεισέρχεται στον προσδιορισμό των δυνατών και πιθανών αποθεμάτων, πιστεύεται ότι οποιοδήποτε έργο στη Μήλο, πρέπει να βασίζεται σε βέβαια αποθέματα μόνο. Γι' αυτό οι τρεις ερευνητικές γεωτρήσεις που προτάθηκαν, αποβλέπουν στον προσδιορισμό αρκετών βέβαιων αποθεμάτων με στόχο την εγκατάσταση σταθμού ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 120MW στο νησί.

Βιβλιογραφία

Muffler and Cataldi 1978: Methods for Regional Assessment of Geothermal Resources, Geothermics, Vol. 7, 53-89.

Rybach and Muffler 1981: Geothermal Systems. Principles and Case Histories, John Wiley and Sons.

Cataldi et al 1978: Assessment of Geothermal Potential of Central and Southern Tuscany, Geothermics, Vol 7, 2-4, 91-131.

Watson and Maunder 1982: Geothermal Resource Assessment for Power station planning, 4th N.Z. Geothermal Workshop, 75-79.

Fournier and Marshall 1983: Calculation of Amorphous Silica Solubilities at 25°C to 300°C and Apparent Cation Hydration Numbers in Aqueous Salt solutions using the Concept of Effective Density of Water, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol 47, 587-596.

Chen and Marshal 1982: Amorphous silica solubilities. TV. Behavior in Pure Water and Aqueous Sodium Chloride, Sodium Sulfate, Magnesium Chloride and Magnesium Sulfate Solutions up to 350°C Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol 46, 279-287.

Fournier 1983: A Method of Calculating Quartz Solubilities in Aqueous Sodium Chloride Solutions, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol 47, 579-586.

Weres, Yee and Tsao 1982: Equations and Type Curves for Predicting the Polymerization of Amorphous Silica in Geothermal Brines, SPEJ, Feb 82, 9-16.

Rimstidt and Barnes 1980: The Kinetics of Silica-Water Reactions, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol 44, 1683-1699.

Grant, Donaldson and Bixley 1982: Geothermal Reservoir Engineering, Academic Press.

Bolton 1980: Status of Geothermal Energy Developments in New Zealand October 1980, Meeting of the Standing Advisory Committee on Geothermal Training, Piza, Italy.

Armstead 1983: Geothermal Energy, Second Edition, E & F.N. Spon.

Mandrinou 1988: Modelling of Milos Geothermal Field in Greece, Master's Thesis, University of Auckland, New Zealand.

Κουτίνας: Ευχαριστούμε τον κύριο Μενδρινό για τη σύνομη και μεστή επιστημονική του εισήγηση, που τεκμηριώνει το κατά πολλούς, πολύ ευνοϊκό γεωθερμικό δυναμικό της Μήλου. Περνάμε στον επόμενο εισηγητή που είναι η κυρία Δέλλιου, μηχανολόγος, μηχανικός της ΔΕΗ, που θα μας παρουσιάσει το θέμα «εκμετάλλευση γεωθερμικής ενέργειας υψηλής ενθαλπίας, αναφορά στη γεωθερμική μονάδα 2MW της Μήλου».