

# ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ ΚΑΙ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ

**Μ. Φυτίκας** Ομότιμος καθηγητής ΑΠΘ  
**Ν. Ανδρίτσος, ΧΜ, Αναπλ. Καθηγητής Τμήματος Μηχ/γων Μηχ/κών Παν. Θεσσαλίας**  
**Ρ. Δρακούλης, ΜΜ, Σύμβουλος Επιχειρήσεων**

## Λέξεις κλειδιά

Γεωθερμία και εξέλιξή της, γεωθερμία υψηλής-μέσης-χαμηλής ενθαλπίας, τυποποίηση στην έρευνα γεωθερμικών πεδίων, στις μετρήσεις και αποτίμηση δυναμικού, στην ανταλλαγή πληροφοριών, στην υποδομή-εξοπλισμό-αξιοποίηση γεωθερμικών πεδίων, προβλήματα και πλεονεκτήματα.

## 1. Εισαγωγή

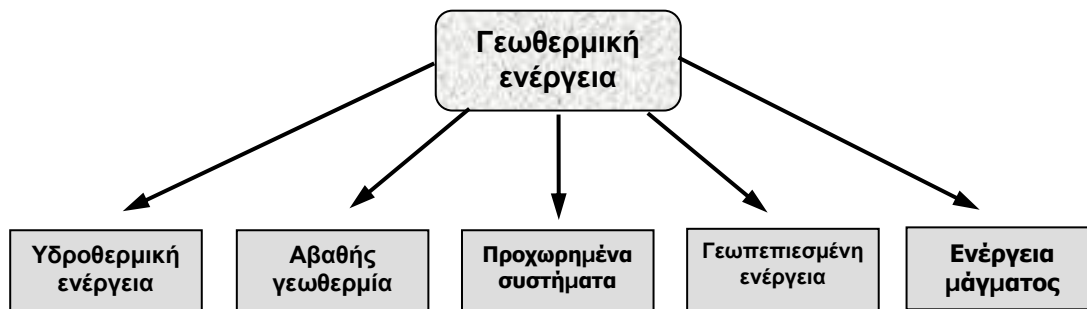
Ο ορισμός της Γεωθερμικής Ενέργειας, σύμφωνα με το ASTM E-957 (Standard Terminology Relating to Geothermal Energy), είναι αρκετά ευρύς: «η θερμική ενέργεια που περιέχεται στα πετρώματα και στα ρευστά της γης». Όμως με τον όρο «γεωθερμική ενέργεια», που συνήθως χρησιμοποιούμε, εννοούμε το τμήμα της γήινης θερμότητας που βρίσκεται αποθηκευμένο με τη μορφή θερμού νερού, ατμού ή θερμών πετρωμάτων σε ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες, δηλαδή περιορίζεται στα πρώτα τρία περίπου χιλιόμετρα από την επιφάνεια της γης (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004). Η ενέργεια αυτή βρίσκεται συνήθως περιορισμένη σε μία *γεωθερμική περιοχή ή πεδίο* με συγκεκριμένα επιφανειακά όρια. Ως *γεωθερμική χρήση* αναφέρεται η οικονομική εκμετάλλευση του ατμού ή των θερμών νερών, είτε αυτά ρέουν φυσικά, είτε βγαίνουν στην επιφάνεια μέσω γεώτρησης. Οι γεωθερμικές χρήσεις ακόμη περιλαμβάνουν την αξιοποίηση της θερμότητας των πετρωμάτων ή του εδάφους. Οι γεωθερμικές χρήσεις ταξινομούνται σε ηλεκτρικές (για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος) και σε άμεσες.

Η πλέον εντυπωσιακή απόδειξη της θερμότητας που υπάρχει στο εσωτερικό της γης αποτελεί η ηφαιστειακή δραστηριότητα. Άλλες γεωθερμικές ενδείξεις είναι οι ατμοί, τα θερμά νερά και τα αέρια που σχηματίζουν θερμοπίδακες (γκέιζερ), θερμές πηγές και ατμίδες. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας με το βάθος από την επιφάνεια της γης είναι γνωστός με το όνομα *γεωθερμική βαθμίδα*. Η γεωθερμική βαθμίδα κυμαίνεται από 5 μέχρι 70°C/km, με μέση τιμή τους 30°C/km. Περιοχές με θεωρητικά γεωθερμικό ενδιαφέρον είναι οι περιοχές που διαθέτουν γεωθερμική βαθμίδα μεγαλύτερη από τη μέση τιμή. Τέτοιες περιοχές είναι πολλές στον πλανήτη μας, αλλά και στη χώρα μας, και οι περισσότερες βρίσκονται στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια σχετικά ήπια, εναλλακτική μορφή ενέργειας, η οποία με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα μπορεί να καλύψει σημαντικό μέρος των αναγκών μας σε ενέργεια. Οι χρήσεις και οι εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας, η οποία απαντά σε αρκετές περιοχές της γης, ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό και περιλαμβάνουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τις αγροτικές διεργασίες (π.χ. ξήρανση σιτηρών), τη θέρμανση οικιών, τη δημιουργία ψύξης κτλ. Η περιοχή των θερμοκρασιών των θερμών νερών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτείνεται από τους 20°C (για θέρμανση χώρων με τη χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας) μέχρι τους 280°C (για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος). Επιπλέον, αρκετά γεωθερμικά ρευστά εκτός από τη θερμότητά τους περιέχουν και αξιοποιήσιμες διαλυμένες ποσότητες στερεών ή αέριων ουσιών (κοινό αλάτι, διοξείδιο του άνθρακα, πολύτιμα μέταλλα), τα οποία μπορούν να ανακτηθούν με οικονομικό τρόπο. Ενώ το δυναμικό της γεωθερμικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο (αλλά και στην Ελλάδα) είναι σημαντικό, υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί στο να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά αυτό το δυναμικό. Οι τύποι των περιορισμών είναι τεχνικής φύσεως (διάβρωση, δημιουργία επικαθίσεων), περιβαλλοντικής φύσεως (εκπομπές τοξικών αερίων, θερμική ρύπανση) και οικονομικής φύσεως. Οι οικονομικοί περιορισμοί παίζουν σπουδαίο ρόλο σε κάθε προσπάθεια αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας. Γενικά είναι πιθανότερη η αξιοποίηση γεωθερμικών ρευστών όταν αυτά βρίσκονται κοντά σε βιομηχανικές, αστικές ή αγροτικές περιοχές, ή όταν υπάρχουν ανάγκες θέρμανσης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Μπορεί να λεχθεί ότι η χώρα μας είναι ιδιαίτερα ευνοημένη γεωθερμικά και τα τελευταία 30 χρόνια έχει γίνει (κυρίως από το ΙΓΜΕ) συστηματική βασική έρευνα για τον εντοπισμό και χαρακτηρισμό των γεωθερμικών πεδίων. Η Ελλάδα μαζί με την Ιταλία (και την Πορτογαλία στις Αζόρες Νήσους) είναι οι μόνες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης στις οποίες υπάρχουν πεδία υψηλής ενθαλπίας, δηλαδή περιοχές στις οποίες μπορούν να παραχθούν ρευστά με θερμοκρασία μεγαλύτερη των 150°C, τα οποία χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Επίσης η χώρα μας διαθέτει πληθώρα περιοχών, κυρίως στην Κεντρική και Βόρεια Ελλάδα, με θερμοκρασίες ταμειυτήρων που ξεπερνούν τους 90°C (Fytikas, 1987, Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004).

## **2. Ταξινόμηση 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 ταμειυτήρα κ.ά. Σε σχέση με το είδος των γεωθερμικών πόρων διακρίνονται πέντε κατηγορίες συστημάτων (Σχήμα 1), που περιγράφονται συνοπτικά ως εξής:



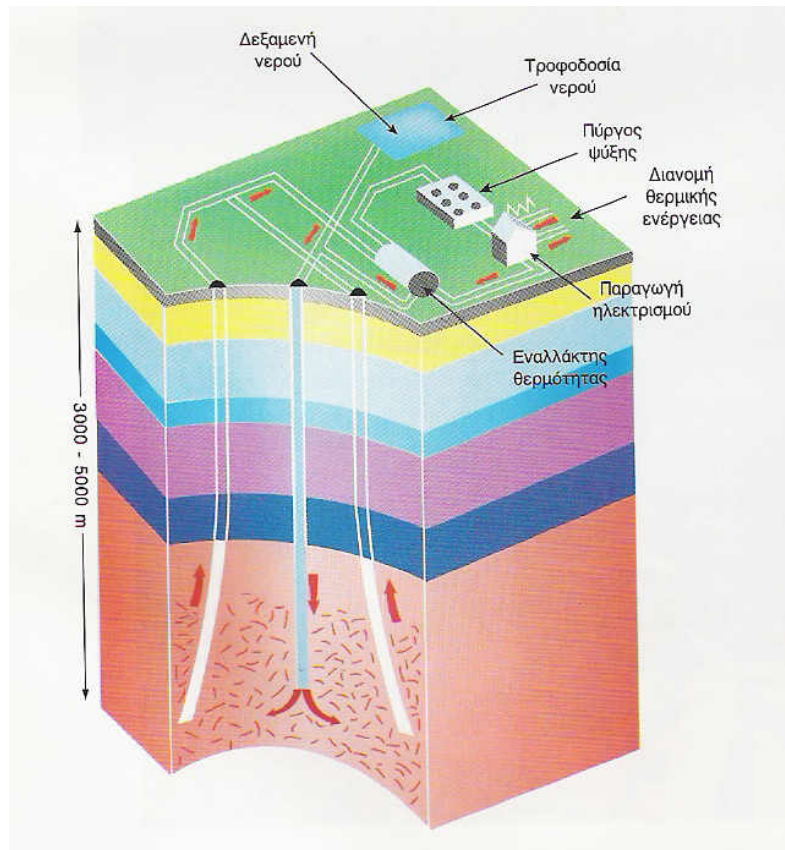
*Σχήμα 1. Μορφές γεωθερμικής ενέργειας κατά σειρά ενδιαφέροντος χρήσεων σήμερα και προοπτικής στο εγγύς μέλος, από αριστερά προς τα δεξιά.*

α) Τα υδροθερμικά συστήματα ή πόροι, δηλ. τα φυσικά υπόγεια θερμά ρευστά που βρίσκονται σε έναν ή περισσότερους ταμιευτήρες, θερμαίνονται από μία εστία θερμότητας και συχνά εμφανίζονται στην επιφάνεια της γης με τη μορφή θερμών εκδηλώσεων. Τα συστήματα αυτά συχνά ταυτίζονται με το σύνολο σχεδόν των γεωθερμικών πεδίων, αφού σήμερα ουσιαστικά είναι τα μόνα συστήματα που αξιοποιούνται.

β) Αβαθής γεωθερμία (earth energy), κατά την οποία λαμβάνονται (ή και απορρίπτονται) ποσότητες ενέργειας από μικρά βάθη με την ανακυκλοφορία νερού στα πρώτα 100 m από την επιφάνεια της γης ή με την κυκλοφορία υπόγειων νερών ή νερών από λίμνες, ποτάμια και τη θάλασσα. Αποτελεί την ταχύτερα αναπτυσσόμενη μορφή της γεωθερμικής ενέργειας.

γ) Τα προχωρημένα γεωθερμικά συστήματα (enhanced geothermal systems) αναφέρονται στα θερμά πετρώματα σε βάθος από 2 μέχρι 10 km, από τα οποία μπορεί να ανακτηθεί ενέργεια χρησιμοποιώντας νερό που διοχετεύεται από την επιφάνεια, μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων, και ανακτάται αρκετά θερμότερο με τη μορφή νερού ή ατμού μέσω άλλων γεωτρήσεων (Σχήμα 2).

δ) Τα γεωπεπιεσμένα συστήματα (geopressed systems) αποτελούνται από ρευστά εγκλεισμένα σε μεγάλο βάθος, βρίσκονται περιορισμένα από μη περατά πετρώματα και η πίεσή τους υπερβαίνει την υδροστατική.



Σχήμα 2. Σχηματική παρουσίαση της αξιοποίησης των θερμών ξερών πετρωμάτων με μία γεώτρηση τροφοδοσίας και δύο παραγωγικές γεωτρήσεις.

ε) Τα *μαγματικά συστήματα* (magma systems) αναφέρονται στην απόληψη θερμότητας με κατάλληλες γεωτρήσεις σε μαγματικές διεισδύσεις, που βρίσκονται σε μικρό σχετικά βάθος.

Τα κύρια τυπικά τμήματα ενός υδροθερμικού συστήματος είναι η εστία θερμότητας, ο ταμειυτήρας, το αδιαπέρατο κάλυμμα και η περιοχή επαναφόρτισης. Ο ταμειυτήρας είναι το σημαντικότερο τμήμα ενός γεωθερμικού συστήματος από την άποψη της ενεργειακής αξιοποίησης των περιεχόμενων ρευστών.

Μία πρώτη ταξινόμηση-τυποποίηση των υδροθερμικών συστημάτων γίνεται συνήθως ανάμεσα στα συστήματα στα οποία το κυρίαρχο ρευστό είναι ο ατμός (συστήματα ατμού, π.χ. στο Larderello, Ιταλία), και τα οποία χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για ηλεκτροπαραγωγή, και στα συστήματα στα οποία κυρίαρχο ρευστό είναι το θερμό νερό (συστήματα θερμού νερού).

Το συνηθέστερο κριτήριο για την ταξινόμηση των υδροθερμικών συστημάτων νερού βασίζεται στην ενθαλπία των γεωθερμικών ρευστών, τα οποία είναι και οι φορείς της θερμότητας στην επιφάνεια της γης από τα θερμά βαθιά πετρώματα. Η ενθαλπία των ρευστών,  $\Delta H$ , η οποία μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της θερμοκρασίας τους, χρησιμοποιείται για να εκφράσει το θερμικό περιεχόμενό τους. Οι γεωθερμικοί πόροι ταξινομούνται συνήθως για λόγους ευκολίας (αν και με κάπως αυθαίρετο τρόπο) σε ρευστά *χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας ή θερμοκρασίας*. Υψηλής ενθαλπίας ορίζονται τα ρευστά με

θερμοκρασία μεγαλύτερη από 150°C, μέσης ενθαλπίας τα ρευστά με θερμοκρασία από 90°C μέχρι 150°C, και χαμηλής ενθαλπίας τα νερά με θερμοκρασία μικρότερη από 90°C (Nicholson, 1993, Dickson & Fanelli, 1995).

### 3. Στάδια Γεωθερμικής Έρευνας

Η αναζήτηση των γεωθερμικών περιοχών με ρευστά που να σχηματίζουν ένα εκμεταλλεύσιμο κοίτασμα, γίνεται με κατάλληλη γεωθερμική έρευνα, η οποία πραγματοποιείται κυρίως στην επιφάνεια με τις μικρότερες κατά το δυνατόν δαπάνες. Αν η επιφανειακή έρευνα δείξει θετικά αποτελέσματα ακολουθεί ανόρυξη ερευνητικών και κατόπιν παραγωγικών γεωτρήσεων, οι οποίες στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα δαπανηρές. Η γεωθερμική έρευνα διακρίνεται σε τέσσερα κύρια τυποποιημένα (ή τυπικά) στάδια :

1) *Γενική επισκόπηση μεγάλης κλίμακας.* Χρήση όσο το δυνατόν περισσότερων στοιχείων (γεωλογικοί και τεκτονικοί χάρτες, αεροφωτογραφίες, βιβλιογραφική ανασκόπηση, αναγνωριστικές επισκέψεις, θερμομετρήσεις, δειγματοληψίες-αναλύσεις νερών κτλ.) για την στην επιλογή και υπόδειξη των περιοχών με τις ευνοϊκότερες συνθήκες.

2) *Λεπτομερής και συστηματική έρευνα των πιθανότερων γεωθερμικών περιοχών.* Ερευνώνται με λεπτομέρεια εκείνοι οι παράγοντες (γεωλογικοί, τεκτονικοί, ηφαιστειολογικοί, στρωματογραφικοί, λιθολογικοί, υδρογεωλογικοί, γεωχημικοί, γεωφυσικοί, θερμοδυναμικοί κτλ.) που μπορούν να χαρακτηρίσουν μια γεωθερμική περιοχή. Τελικός στόχος του σταδίου αυτού είναι ο προσδιορισμός του γεωθερμικού μοντέλου κάθε γεωθερμικού κοιτάσματος και η γνώση της θέσης και κατάστασης στην οποία βρίσκονται τα γεωθερμικά ρευστά ή θερμά πετρώματα. Συγχρόνως προτείνεται η σειρά, το βάθος και τα χαρακτηριστικά των ερευνητικών-παραγωγικών γεωτρήσεων.

3) *Εντοπισμός-περιχάραξη των γεωθερμικών πεδίων και μελέτη των χαρακτηριστικών.* Το στάδιο αυτό καταλήγει στον προσδιορισμό των πιθανότερων γεωθερμικών περιοχών και των θέσεων στις οποίες προτείνεται η εκτέλεση των πρώτων βαθιών γεωτρήσεων έρευνας και παραγωγής. Στη συνέχεια καταρτίζεται το λεπτομερές πρόγραμμα γεωτρήσεων. Οι γεωθερμικές γεωτρήσεις διακρίνονται, αναφορικά με το σκοπό της ανόρυξής τους, σε ερευνητικές, παραγωγικές ή επανεισαγωγής, και σε σχέση με την ενθαλπία των ρευστών, σε χαμηλής, μέσης ή υψηλής ενθαλπίας.

4) *Ανάπτυξη και διαχείριση των γεωθερμικών πεδίων.* Αναφέρεται στα σπουδαιότερα προβλήματα διαχείρισης και λειτουργίας ενός γεωθερμικού πεδίου.

Τα παραπάνω τυποποιημένα (ή τυπικά) στάδια ισχύουν σε όλες τις περιπτώσεις της γεωθερμικής έρευνας, αν και οι επί μέρους γεωλογικές συνθήκες καθορίζουν την ξεχωριστή διάρθρωση και ανάπτυξη του κάθε σταδίου. Μπορεί να αλλάξει η λεπτομερής διάρθρωση και η ανάπτυξη των επί μέρους σταδίων, γενικά όμως οι εργασίες ακολουθούν την προαναφερθείσα τυπική σειρά. Σε κάθε φάση απαιτείται υποχρεωτικά η συνεργασία και ο συντονισμός των διαφόρων επιστημόνων και τεχνικών που εμπλέκονται στην όλη έρευνα.

#### 4. Μετρήσεις και αποτίμηση δυναμικού

Πρωταρχικός σκοπός ενός προγράμματος έρευνας και αποτίμησης σε μία γεωθερμική περιοχή είναι να προσδιορίσει ταχύτατα, αξιόπιστα και με το λιγότερο δυνατό κόστος τα χαρακτηριστικά των γεωθερμικών ρευστών και την ικανότητα του πεδίου για την παραγωγή αξιοποιήσιμων ποσοτήτων ρευστών. Η γεωχημεία παίζει σημαντικό ρόλο στην γεωθερμική έρευνα και αναζήτηση, αφού μπορεί να απαντήσει σε μεγάλο αριθμό ερωτημάτων με τη μελέτη του χημισμού των γεωθερμικών ρευστών και των πετρωμάτων του ταμιευτήρα. Η γεωθερμική έρευνα περιλαμβάνει τη συλλογή δειγμάτων και την ανάλυση των γεωθερμικών ρευστών από φυσικές εκδηλώσεις και από γεωτρήσεις της περιοχής που ερευνάται. Τα γεωχημικά δεδομένα που συγκεντρώνονται βοηθούν στον εντοπισμό του γεωθερμικού συστήματος, στην εκτίμηση της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα, στον προσδιορισμό του χημικού χαρακτήρα των ρευστών και του μηχανισμού τροφοδοσίας του πεδίου, στην εκτίμηση του πιθανού αξιοποιήσιμου δυναμικού κ.α. Οι γεωχημικές μέθοδοι που εφαρμόζονται στα διάφορα στάδια της έρευνας είναι απολύτως απαραίτητες, προτού χρησιμοποιηθούν περισσότερο δαπανηρές μέθοδοι, όπως οι γεωφυσικές και η ανόρυξη ερευνητικών γεωτρήσεων.

Αν και δεν υπάρχει κάποια γενικά αποδεκτή ταξινόμηση των γεωθερμικών νερών, συχνά τα γεωθερμικά νερά διαχωρίζονται σε σχέση με το κυρίαρχο ανιόν, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1 (Henley et al, 1984). Στα γεωθερμικά συστήματα νερού ο συνηθέστερος τύπος που συναντάται σε κάποιο βάθος είναι τα χλωριούχα νερά, με συγκεντρώσεις που φτάνουν τα 10000 mg/L (Ellis & Mahon, 1977). Σπανιότερα, η συγκέντρωση των χλωριόντων μπορεί να υπερβεί και τα 120000 mg/L.

Οι δύο κυριότερες φυσικοχημικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό ενός γεωθερμικού νερού είναι η περιεκτικότητά του σε άλατα (Total dissolved solids-TDS) και το pH. Συνήθως, τα γεωθερμικά ρευστά χαμηλής θερμοκρασίας έχουν μικρότερο TDS από ό,τι τα ρευστά σε υψηλή θερμοκρασία, αν και υπάρχουν εξαιρέσεις αυτού του κανόνα. Οι τιμές του TDS των γεωθερμικών ρευστών κυμαίνονται από λίγες δεκάδες μέχρι και εκατοντάδες χιλιάδες mg/L. Το μέγεθος της αλατότητας ενός νερού προσεγγίζεται στο ύπαιθρο με τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού.

Πίνακας 1. Σύνοψη των διαφόρων τύπων νερού στα γεωθερμικά συστήματα.

Τύπος νερού	Περιοχή pH	Κύρια ιόντα
Υπόγεια	6 – 7,5	λίγα HCO <sub>3</sub>
Πλούσια σε χλωριόντα	4 -9	Cl, λίγα HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Πλούσια σε χλωριόντα-ανθρακικά	7 – 8,5	Cl, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Πλούσια σε θειικά ιόντα	1 – 3	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , λίγα Cl
Πλούσια σε θειικά-χλωριόντα	1 – 5	Cl, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Πλούσια σε όξινα ανθρακικά	5 – 7	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Αραιά χλωριούχα	6,5 – 7,5	Cl, λίγα HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>

Οι ιδιότητες των θερμών ρευστών που εκρέουν από φυσικές πηγές ή από γεωτρήσεις ενός γεωθερμικού πεδίου αντιστοιχούν σε μεγάλο βαθμό στα χαρακτηριστικά του υδροθερμικού συστήματος. Τα φυσικοχημικά και ισοτοπικά δεδομένα των γεωθερμικών ρευστών μπορούν να μας βοηθήσουν για: (1) την εκτίμηση της προέλευσης των ρευστών και του βαθμού ανάμιξής τους με άλλα νερά, (2) την εκτίμηση της θερμοκρασίας του ταμειυτήρα (χημική γεωθερμομετρία), και (3) τον προσδιορισμό των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των ρευστών. Η αξιοπιστία και η χρησιμότητα των αναλύσεων των γεωθερμικών ρευστών εξαρτώνται σχεδόν αποκλειστικά από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή των δειγμάτων και από την προσοχή με την οποία γίνεται αυτή η συλλογή. Υπάρχει πληθώρα μεθόδων για τη συλλογή δειγμάτων των ρευστών που εξέρχονται, είτε από διάφορες θερμές εκροές (θερμές πηγές, ατμίδες), είτε από γεωθερμικές γεωτρήσεις.

Σε γενικές γραμμές οι αναλυτικές τεχνικές για τα γεωθερμικά ρευστά είναι όμοιες με τις τεχνικές ανάλυσης δειγμάτων νερών και αέριων μιγμάτων. Δείγματα υγρού μπορούν να χαρακτηρισθούν ως προς τη σύστασή τους, χρησιμοποιώντας τυποποιημένες μεθόδους ελέγχου όπως φασματοφωτομετρία Ατομικής Απορρόφησης (AA), ιοντική χρωματογραφία (IC), φασματοσκοπία Επαγωγικού Συζευγμένου Πλάσματος (ICP), εκλεκτικά ηλεκτρόδια, διάφορες χρωματομετρικές, σταθμικές και υγρές μεθόδους κτλ. (Owen & Michels, 1984).

Η αέρια χρωματογραφία είναι η πλέον κατάλληλη μέθοδος για την ανάλυση των γεωθερμικών αερίων. Η μέθοδος είναι αρκετά διαδεδομένη, σχετικά φθηνή, έχει μεγάλη αξιοπιστία, απαιτεί μικρό δείγμα (κλάσμα του mL) και μπορεί να ανιχνεύσει σχεδόν όλα τα γεωθερμικά συστατικά. Κατά τη συλλογή των δειγμάτων, δύο προβλήματα πρέπει να προσεχθούν:

- Η «ρύπανση» των δειγμάτων με αέρα, είτε στη φάση της δειγματοληψίας, είτε στην διάρκεια της εισαγωγής δείγματος στο χρωματογράφο.
- Η αποφυγή αντίδρασης μεταξύ των αέριων συστατικών και των τοιχωμάτων των οβίδων συλλογής, ιδιαίτερα όταν αυτές είναι μεταλλικές.

Οι χημικές αναλύσεις των γεωθερμικών ρευστών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για να γίνει μία προσεγγιστική εκτίμηση της θερμοκρασίας του υπόγειου ταμειυτήρα. Η πληροφορία αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον κατά τη διάρκεια της έρευνας, ειδικά όταν δεν είναι διαθέσιμες πληροφορίες από μετρήσεις σε βαθιές γεωτρήσεις.

## **5. Υποδομή, εξοπλισμός γεωθερμικών εγκαταστάσεων**

Ένα τυπικό γεωθερμικό σύστημα χαμηλής θερμοκρασίας, ανεξάρτητα από το είδος της εφαρμογής, αποτελείται συνήθως από τέσσερα τυπικά υποσυστήματα:

(1) Το σύστημα παραγωγής, που περιλαμβάνει τη παραγωγική γεώτρηση, την αντλία παραγωγής και τις συσκευές στην κεφαλή της γεώτρησης. Το πλέον συνηθισμένο σχήμα αξιοποίησης είναι το σύστημα των διπλών γεωτρήσεων («δίπολο»), στο οποίο το σύνολο του γεωθερμικού ρευστού επανεισάγεται στον ταμειυτήρα.

(2) Το σύστημα μεταφοράς των γεωθερμικών ρευστών από την κεφαλή της γεώτρησης μέχρι το σύστημα εφαρμογής, μαζί με το σύστημα διανομής της γεωθερμικής ενέργειας. Για εφαρμογές με θερμοκρασία νερού μικρότερη από 70°C κυριαρχούν οι πλαστικοί σωλήνες.

(3) Το σύστημα εφαρμογής (σύστημα εναλλαγής της θερμότητας). Οι εναλλάκτες πλακών είναι οι κατ' εξοχήν εναλλάκτες που χρησιμοποιούνται στα γεωθερμικά συστήματα θέρμανσης όταν η χημεία των νερών δεν επιτρέπει την απ' ευθείας εφαρμογή. Η θέρμανση των χώρων στα κτίρια επιτελείται με τη διέλευση του θερμού νερού μέσω των μετατροπών θερμότητας αέρα-υγρού (converters), κάτι που γίνεται και με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης. Τρεις τύποι τέτοιων μετατροπών χρησιμοποιούνται κυρίως: (α) Αυτοί που λειτουργούν με εξαναγκασμένη ροή, (β) αυτοί που λειτουργούν με φυσική συναγωγή και (γ) αυτοί που λειτουργούν με ακτινοβολία (σωλήνες τοποθετημένοι στο πάτωμα, σε τοίχους ή στην οροφή).

(4) Το σύστημα διάθεσης των ρευστών.

Μερικές φορές προστίθεται ένα πέμπτο σύστημα, το σύστημα αντιμετώπισης των αυξημένων αναγκών κατά τις ώρες αιχμής.

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος είναι προφανές ότι τα παραπάνω υποσυστήματα τροποποιούνται για να αντεπεξέλθουν στις υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις των γεωθερμικών ρευστών. Ο τύπος (κύκλος) της μονάδας ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της γεωθερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική καθορίζεται συνήθως από το είδος του πεδίου (ξηρός ατμός, διφασικό ρευστό), από τη θερμοκρασία και την πίεση των ρευστών (δηλαδή από την ενθαλπία τους), από τη σύσταση των γεωθερμικών ρευστών (π.χ. ποσοστό μη-συμπυκνώσιμων αερίων, παρουσία αλάτων), από τη δυναμικότητα της μονάδας και από την τάση των ρευστών για δημιουργία επικαθίσεων και διάβρωσης των μεταλλικών επιφανειών.

Οι κυριότεροι τύποι μονάδων που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι ο κύκλος ατμού, ο κύκλος εκτόνωσης διφασικού ρευστού (μονή, διπλή ή και πολλαπλή εκτόνωση) και ο δυαδικός κύκλος (οργανικός κύκλος και κύκλος Kalina).

## 6. Αξιοποίηση γεωθερμικών πόρων

Τα φυσικά θερμά ρευστά χρησιμοποιήθηκαν από πολύ παλιά, κυρίως για τις θεραπευτικές τους ιδιότητες, σπάνια όμως για τις ενεργειακές δυνατότητές τους. Στη σύγχρονη εποχή η πρώτη βιομηχανική αξιοποίηση της γεωθερμίας πραγματοποιήθηκε στο Larderello της Ιταλίας, όπου από τις αρχές του 19ου αιώνα χρησιμοποιήθηκε υπέρθερμος ατμός για την παραγωγή βορικού οξέος (με εξάτμιση των νερών που περιείχαν σημαντικές ποσότητες του οξέος) και για τη θέρμανση κτιρίων, ενώ ένα αιώνα μετά ξεκίνησε στο ίδιο μέρος η γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή. Η πρώτη συστηματική αξιοποίηση της γεωθερμίας για θέρμανση χώρων ξεκίνησε στην Ισλανδία. Σήμερα το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού της Ισλανδίας (και ολόκληρη η πόλη του Reykjavik) θερμαίνονται με γεωθερμικά νερά.

Οι κυριότερες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας παρουσιάζονται επιγραμματικά στο Σχήμα 3, στο τροποποιημένο διάγραμμα Lindal (1973). Στο διάγραμμα αυτό καταγράφονται παραδείγματα χρήσεων, δοκιμασμένων και



πιθανών, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας των ρευστών. Οι περισσότερο καθιερωμένες εφαρμογές είναι η θέρμανση χώρων, οι ιχθυοκαλλιέργειες, η ξήρανση αγροτικών προϊόντων και η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Στο επάνω μέρος του διαγράμματος Lindal ο κορεσμένος ατμός χρησιμοποιείται αποκλειστικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, ενώ οι άμεσες χρήσεις καλύπτουν όλη την κλίμακα θερμοκρασιών. Θα πρέπει να τονιστεί ότι διάγραμμα Lindal δεν περιορίζει το είδος των δυνατών χρήσεων, ούτε πρέπει να ληφθούν αυστηρά υπόψη τα όρια των θερμοκρασιών που θέτει.

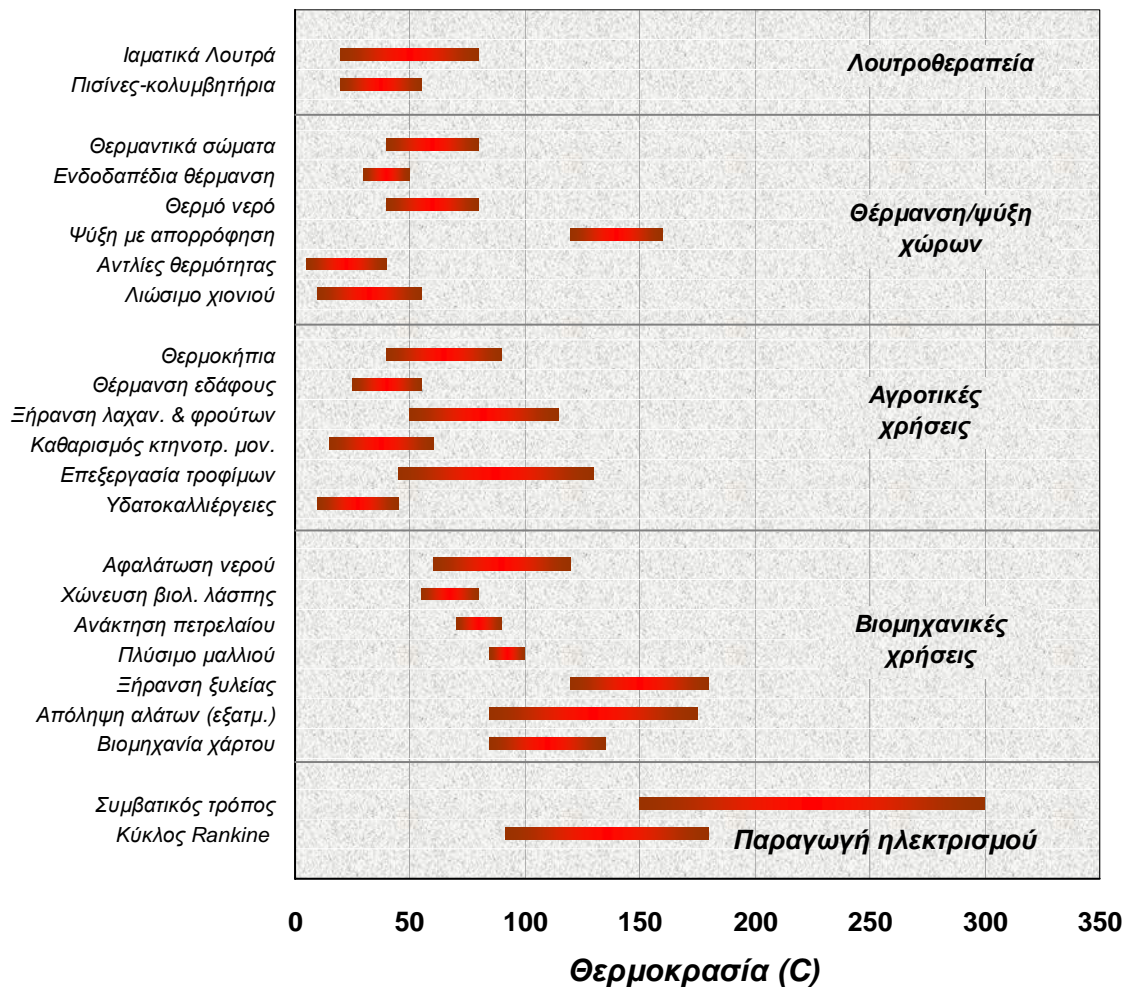
Κατά το 2005, 72 χώρες έχουν αναπτύξει γεωθερμικές εφαρμογές χαμηλής-μέσης θερμοκρασίας, κάτι που δηλώνει σημαντική πρόοδο σε σχέση με το 1995, όταν είχαν αναφερθεί εφαρμογές μόνο σε 28 χώρες. Η εγκατεστημένη θερμική ισχύς γεωθερμικών μονάδων μέσης και χαμηλής θερμοκρασίας ανήλθε το 2007 στα 28268 MWt, παρουσιάζοντας αύξηση 75% σε σχέση με το 2000, με μέση ετήσια αύξηση 12%. Αντίστοιχα, η χρήση ενέργειας αυξήθηκε κατά 43% σε σχέση με το 2000 και ανήλθε στα 273.372 TJ (75.940 GWh/έτος).

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

## 7. Προβλήματα και πλεονεκτήματα

Γενικά, η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας συναντά ορισμένα βασικά προβλήματα, τα οποία θα πρέπει να λυθούν ικανοποιητικά για την οικονομική εκμετάλλευση της εναλλακτικής αυτής μορφής ενέργειας. Οι τύποι αυτοί των προβλημάτων είναι ο *σχηματισμός επικαθίσεων* (ή όπως συχνά λέγεται οι καθαλατώσεις ή αποθέσεις) σε κάθε σχεδόν επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το γεωθερμικό ρευστό, η *διάβρωση* των μεταλλικών επιφανειών, καθώς και ορισμένες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις (διάθεση των ρευστών μετά τη χρήση τους, εκπομπές τοξικών αερίων, ιδίως του υδροθείου).

Όλα αυτά τα προβλήματα σχετίζονται άμεσα με την ιδιαίτερη χημική σύσταση των περισσότερων γεωθερμικών ρευστών. Τα γεωθερμικά ρευστά λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και της παραμονής τους σε επαφή με διάφορα πετρώματα περιέχουν κατά κανόνα σημαντικές διαλυμένων αλάτων και αερίων. Η αλλαγή των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών των ρευστών στο στάδιο της εκμετάλλευσης μπορεί να δημιουργήσει συνθήκες ευνοϊκές τόσο για τη χημική προσβολή των μεταλλικών επιφανειών, όσο και για την απόθεση ορισμένων διαλυμένων ή αιωρούμενων στερεών και την απελευθέρωση στο περιβάλλον επιβλαβών ουσιών.



Σχήμα 3. Το τροποποιημένο διάγραμμα Lindal.

Ο σχηματισμός επικαθίσεων σε γεωθερμικές μονάδες μπορεί να ελεγχθεί σε κάποιο βαθμό, αν όχι ολοκληρωτικά, με μια πληθώρα τεχνικών και μεθόδων. Μερικές από τις πιο τυπικές πρακτικές είναι ο σωστός σχεδιασμός της μονάδας και η επιλογή των κατάλληλων συνθηκών λειτουργίας της, η ρύθμιση του pH του ρευστού, η προσθήκη χημικών ουσιών (αναστολέων δημιουργίας επικαθίσεων) και, τέλος, η απομάκρυνση των σχηματιζόμενων στερεών με χημικά ή φυσικά μέσα, στη διάρκεια προγραμματισμένων ή όχι διακοπών λειτουργίας της μονάδας.

Οι διάφορες δυνατότητες ελέγχου της διάβρωσης στις γεωθερμικές μονάδες επικεντρώνονται (α) στην επιλογή του κατάλληλου υλικού κατασκευής (π.χ. χρήση πολυμερικών υλικών, εναλλακτών θερμότητας από τιτάνιο, Hastelloy κτλ.), (β) στην επικάλυψη των μεταλλικών επιφανειών με ανθεκτικά στη διάβρωση στρώματα, (γ) στην προσθήκη αναστολέων διάβρωσης, και (δ) στον ορθό σχεδιασμό της μονάδας.

Η γεωθερμική ενέργεια θεωρείται «ήπια» μορφή ενέργειας, σε σύγκριση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας, χωρίς βέβαια οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εκμετάλλευσή της να είναι συχνά αμελητέες. Η υψηλότερη περιεκτικότητα των γεωθερμικών ρευστών υψηλής ενθαλπίας σε διαλυμένα άλατα και αέρια σε σχέση με τα ρευστά χαμηλής ενθαλπίας επιβάλλουν το διαχωρισμό των

επιπτώσεων από την αξιοποίηση της γεωθερμίας. Τα προβλήματα από τη διάθεση των νερών που χρησιμοποιούνται για άμεσες χρήσεις είναι κατά κανόνα ηπιότερα (και σχεδόν μηδενικά) από ότι των ρευστών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Επίσης θα πρέπει να τονιστεί από την αρχή ότι στην περίπτωση που εφαρμόζεται η άμεση επανεισαγωγή των γεωθερμικών ρευστών στον ταμιευτήρα, όπως στην περίπτωση των μονάδων με δυαδικό κύκλο, οι επιπτώσεις είναι ελάχιστες. Βεβαίως κατά τη φάση της έρευνας, της ανόρυξης των γεωτρήσεων, των δοκιμών και της κατασκευής της μονάδας μπορούν να υπάρξουν διαρροές και διάθεση γεωθερμικών νερών σε υδάτινους αποδέκτες, καθώς και αυξημένος θόρυβος.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την αξιοποίηση των ρευστών υψηλής ενθαλπίας διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή και ταξινομούνται σε συνάρτηση της αιτίας όπως τη χρήση γης, εκπομπές αερίων, τη διάθεση υγρών αποβλήτων, θόρυβο, δημιουργία μικροσεισμικότητας και καθιζήσεις. Η έκταση γης που απαιτείται για την αξιοποίηση της γεωθερμίας (π.χ. για την εγκατάσταση της μονάδας, το χώρο για τις γεωτρήσεις, τις σωληνώσεις μεταφοράς και τους δρόμους πρόσβασης) είναι γενικά μικρότερη από την έκταση της γης που απαιτούν άλλες μορφές ενέργειας (ατμοηλεκτρικοί σταθμοί άνθρακα, υδροηλεκτρικοί σταθμοί κτλ.).

Το CO<sub>2</sub> που εκπέμπεται από γεωθερμικές μονάδες ποικίλλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πεδίου, καθώς και την τεχνολογία παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, αν και οι εκπομπές του είναι κατά πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες εκπομπές ατμοηλεκτρικών μονάδων (Πίνακας 2) και συγκρίνονται ευνοϊκά και με τις εκπομπές (έμμεσες ή άμεσες) από άλλες ΑΠΕ (Anonymus, 2002). Το H<sub>2</sub>S, λόγω της έντονης οσμής του και της σχετικής τοξικότητάς του, είναι υπεύθυνο τις περισσότερες φορές για τη προκατάληψη που εκδηλώνεται κατά της γεωθερμίας. Οι εκπομπές H<sub>2</sub>S ποικίλλουν από <0,5 g/kWh μέχρι και 7 g/kWh. Οι εκπομπές του H<sub>2</sub>S μπορούν να ελεγχθούν σχετικά εύκολα και να μειωθούν σε συγκεντρώσεις 1 ppb με μια πληθώρα μεθόδων, όπως με τη διεργασία Stredford, με την καύση και επανεισαγωγή, με την οξειδωτική μέθοδο Dow κτλ.

*Πίνακας 2. Εκπομπές επιβλαβών αερίων από διάφορες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (σε kg/MWh παραγόμενης ενέργειας)*

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

\* μέση τιμή – οι μονάδες δυαδικού κύκλου έχουν μηδενικές εκπομπές

\*\* περιλαμβάνει τις εκπομπές από τον κύκλο ζωής της τεχνολογίας

Η κύρια ανησυχία από την αξιοποίηση της γεωθερμίας υψηλής ενθαλπίας προέρχεται από τη διάθεση των γεωθερμικών νερών στους υδάτινους αποδέκτες. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και της περιεκτικότητάς του σε διάφορα χημικά συστατικά, το γεωθερμικό ρευστό προτού διατεθεί σε υδάτινους αποδέκτες θα πρέπει να υποστεί κάποια επεξεργασία και να μειωθεί η θερμοκρασία του. Τονίζεται ξανά ότι η περιβαλλοντικά περισσότερο αποδεκτή μέθοδος διάθεσης των γεωθερμικών ρευστών είναι η επανεισαγωγή τους στον ταμειωτήρα.

Συγκρινόμενη με τις άλλες ΑΠΕ, η γεωθερμία δεν υστερεί σε περιβαλλοντικά οφέλη. Αυτό βέβαια έρχεται σε προφανή αντίθεση με την εντύπωση που κυριαρχεί ότι ορισμένες ΑΠΕ (π.χ. φωτοβολταϊκά, αιολική ενέργεια) δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον. Η εντύπωση αυτή μεταβάλλεται όταν κανείς συνυπολογίσει τις επιπτώσεις οποιασδήποτε μορφής ενέργειας σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής μιας τεχνολογίας, αλλά και την επιβάρυνση στο περιβάλλον από την κατασκευή και λειτουργία των μονάδων.

Τα περιβαλλοντικά οφέλη της γεωθερμίας μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

(α) Συνεχής παροχή ενέργειας, με υψηλό συντελεστή λειτουργίας (load factor), >90%.

(β) Μικρό λειτουργικό κόστος, αν και το κόστος παγίων είναι σημαντικά αυξημένο σε σχέση και με τις συμβατικές μορφές ενέργειας.

(γ) Μηδενικές ή μικρές εκπομπές αερίων στο περιβάλλον.

(δ) Μικρή απαίτηση γης.

(ε) Συμβολή στην επίτευξη των στόχων της Λευκής Βίβλου της Ε.Ε. και του Πρωτοκόλλου του Κιότο.

(στ) Αποτελεί τοπική μορφή ενέργειας με συνέπεια την οικονομική ανάπτυξη της γεωθερμικής περιοχής.

(ζ) Συμβολή στην μείωση της ενεργειακής εξάρτησης μιας χώρας, με τον περιορισμό των εισαγωγών ορυκτών καυσίμων.

## **ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΙ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ**

### ***ASTM Standards***

ASTM E957-03 Standard Terminology Relating to Geothermal Energy, pp. 3

ASTM E947-83(2007) Standard Specification for Sampling Single-Phase Geothermal Liquid or Steam for Purposes of Chemical Analysis, pp. 4

ASTM E1675-04e1 Standard Practice for Sampling Two-Phase Geothermal Fluid for Purposes of Chemical Analysis, pp. 9

ASTM E974-00(2006) Standard Guide for Specifying Thermal Performance of Geothermal Power Systems, pp. 4

### ***Air Conditioning and Refrigeration Institute (ARI) Standard***

Performance rating of direct geothermal heat pumps: ARI standard 870-2005.

Fairfax, VA, Air-Conditioning and Refrigeration Institute, c2005. 15 p. (ANSI/ARI 2005-870). Διαθέσιμο:

[http://ari.org/Content/FindaStandard\\_218.aspx?Listing\\_PK=199](http://ari.org/Content/FindaStandard_218.aspx?Listing_PK=199)

### ***International Organization for Standardization (ISO)***

Water-source heat pumps: testing and rating for performance. Geneva, Switzerland, ISO, 1998. 37 p. (ISO 13256)

### ***Verein Deutscher Ingenieure-VDI***

VDI (2000). Thermische Nutzung des Untergrundes – Richtlinie VDI 4640, Blatt 1 – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. Beuth Verlag, Berlin

VDI (2001). Thermische Nutzung des Untergrundes – Richtlinie VDI 4640, Blatt 2 – Erdgekoppelte Wärmepumpen. Beuth Verlag, Berlin

VDI (2001). Thermische Nutzung des Untergrundes – Richtlinie VDI 4640, Blatt 3 – Unterirdische Thermische Energiespeicher. Beuth Verlag, Berlin

VDI (2004). Thermische Nutzung des Untergrundes – Richtlinie VDI 4640, Blatt 4 – Direkte Nutzungen. Beuth Verlag, Berlin. (Και στα Αγγλικά, VDI 4640, «Thermal use of the underground – Ground source heat pump systems».)

## **ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

Anonymous, Benign Energy? The Environmental Implications of Renewables.

International Energy Agency (2002). Διαθέσιμο:

[<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/1990/benign1998.pdf>]

Dickson, M.H. and Fanelli, M. (Editors), Geothermal Energy, Wiley, John & Sons (1995).

Ellis, A.J. and Mahon, W.A.J. Chemistry and Geothermal Systems. Academic Press, London (1977).

Fytikas, M. Geothermal situation in Greece. *Geothermics*, **17**, 549-556 (1987).

Henley, R.W. and Ellis, A.J., Geothermal systems ancient and modern, a geochemical review. *Earth Sci. Reviews*, **19**, 1-50 (1983).

Lindal, B. Industrial and other applications of geothermal energy. In *Geothermal Energy*, UNESCO, Paris, 135-148 (1973).

Nicholson, K. Geothermal Fluids – Chemistry and Exploration Techniques, Springer Verlag, Heidelberg, 1993.

Owen, L.B. και Michels D.E. Geochemical Engineering Reference Manual. DOE/SF/11520-T1, Salt Lake City (1984).

Φυτίκας Μ. και Ανδρίτσος, Ν. Γεωθερμία– Γεωθερμικοί πόροι, Γεωθερμικά Ρευστά, Εφαρμογές, Περιβάλλον. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2004.