

2. ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ - ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1. Γενικά

Η γεωθερμική ενέργεια η οποία θεωρείται «ως η μεγάλη αγνοούμενη στην Ελλάδα» και για την οποία θα αναφερθούμε αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια των εδώ σημειώσεων, ορίζεται ως το τμήμα της γήινης θερμότητας που βρίσκεται αποθηκευμένο με τη μορφή θερμού νερού ή ατμού ή σε μίγμα των παραπάνω, ή θερμών – ξηρών πετρωμάτων σε ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες. Είναι μία καθαρή, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας επειδή η θερμότητα που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης είναι ουσιαστικά απεριόριστη. Η πηγή της γεωθερμικής ενέργειας, η θερμότητα της Γης, είναι διαθέσιμη 24 ώρες την ημέρα, 365 ημέρες το χρόνο. Αντιθέτως, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των ημερησίων και εποχιακών διακυμάνσεων και των εναλλαγών του καιρού. Γι' αυτούς τους λόγους, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται με την χρήση γεωθερμικής ενέργειας είναι σταθερά πιο αξιόπιστη, από τη στιγμή που αξιοποιείται ο πόρος, από πολλές άλλες μορφές ηλεκτρικής ενέργειας. Η θερμότητα που ρέει συνεχώς από το εσωτερικό της Γης υπολογίζεται ότι αντιστοιχεί σε 42 εκατομμύρια μεγαβάτ ηλεκτρικής ενέργειας (Heatbalance των Stacey and Loper, 1988). «Σημειώνεται ότι ένα μεγαβάτ (MW) μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες περίπου 1.000 σπιτιών».

Η θερμική ενέργεια της Γης βρίσκεται σε αφθονία και είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αλλά είναι πολύ διεσπαρμένη, σπανίως συγκεντρώνεται και συχνά βρίσκεται σε βάθη πολύ μεγάλα για να μπορεί να είναι αξιοποιήσιμη. Μέχρι σήμερα η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας έχει περιοριστεί σε περιοχές όπου οι γεωλογικές συνθήκες επιτρέπουν. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση της γεωθερμίας είναι αρκετά μικρές και εύκολα ελεγχόμενες. Στην πραγματικότητα, η γεωθερμική ενέργεια παράγει ελάχιστες εκπομπές στην ατμόσφαιρα. Οι εκπομπές υποξειδίου του αζώτου, υδρόθειου, διοξειδίου του θείου, αμμωνίας, μεθανίου, αιωρούμενων σωματιδίων και διοξειδίου του άνθρακα είναι εξαιρετικά χαμηλές, ειδικά όταν συγκρίνονται με τις εκπομπές από τα συμβατικά καύσιμα. Στην άμεση χρήση της θερμότητας από γεωθερμικό ζεστό νερό, οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι αμελητέες. Η οικονομική πτυχή της χρήσης των θερμών υδάτων εξακολουθεί να αποτελεί περιορισμό όσον αφορά την ευρύτερη διάδοσή τους στον τομέα της παραγωγής ενέργειας. Στην πραγματικότητα, το οικονομικό όφελος προέρχεται από την χρήση τους για μεγάλη χρονική περίοδο κατά τη διάρκεια των ετών με χαμηλό λειτουργικό κόστος σε σχέση με την αρχική επένδυση που μπορεί να είναι σημαντική.

Η πιο σημαντική παράμετρος στην αξιοποίηση αυτής της ενέργειας είναι η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών, η οποία καθορίζει το είδος της εφαρμογής της γεωθερμικής ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θερμικές χρήσεις ή για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Επειδή η γεωθερμική ενέργεια περιγράφεται ως ανανεώσιμη (renewable) και αιεφορική (sustainable), είναι σημαντικό να διαχωρίσουμε τις δύο αυτές έννοιες: Ο όρος «ανανεώσιμη» περιγράφει μια ιδιότητα του ενεργειακού πόρου, ενώ η «αιεφορία» τον τρόπο με τον οποίο αυτός αξιοποιείται.

Το πιο σημαντικό κριτήριο για την ταξινόμηση της γεωθερμικής ενέργειας στις ανανεώσιμες πηγές είναι ο ρυθμός επαναφόρτισης του ενεργειακού συστήματος. Κατά την εκμετάλλευση ενός φυσικού γεωθερμικού συστήματος, η επανατροφοδοσία επιτυγχάνεται με την αναπλήρωση του θερμού νερού στον ταμιευτήρα στο ίδιο χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται η παραγωγή των θερμών ρευστών. Αυτή ακριβώς η διαδικασία δικαιολογεί την

ταξινόμηση της γεωθερμικής στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στην περίπτωση των θερμών ξηρών πετρωμάτων και κάποιων θερμών εγκλωβισμένων υδροφόρων σε ιζηματογενείς λεκάνες, η ενεργειακή φόρτιση ελέγχεται αποκλειστικά από την αγωγή θερμότητας, η οποία είναι μια ιδιαίτερος αργή διαδικασία. Για το λόγο αυτό, ίσως θα έπρεπε τα συστήματα αυτά να κατατάσσονται στις πεπερασμένες πηγές ενέργειας (Stefansson, 2000).

Η αειφορία που αφορά την κατανάλωση ενός πόρου εξαρτάται από το αρχικό του μέγεθος, το ρυθμό εκμετάλλευσης (παραγωγής ρευστών) και το ρυθμό κατανάλωσης. Η κατανάλωση μπορεί προφανώς να διατηρηθεί σταθερή για τη χρονική περίοδο κατά την οποία η επαναφόρτιση της πηγής είναι ταχύτερη ή ίση με την αποφόρτιση. Ο όρος αειφόρος ανάπτυξη χρησιμοποιείται από την Παγκόσμια Επιτροπή για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη (World Commission on Environment and Development) για να περιγράψει την ανάπτυξη η οποία «...ανταποκρίνεται στις ανάγκες της σημερινής γενιάς, χωρίς όμως να θέτει σε κίνδυνο την κάλυψη των αναγκών των μελλοντικών γενεών...». Σε αυτό το πλαίσιο, η αειφόρος ανάπτυξη δεν υποδηλώνει ότι κάθε δεδομένη πηγή ενέργειας πρέπει να αξιοποιείται με έναν εξολοκλήρου αειφόρο τρόπο, αλλά ότι θα πρέπει να βρεθεί μια «φόρμουλα» αντικατάστασης του πόρου που υφίσταται εκμετάλλευση, έτσι ώστε οι επόμενες γενιές να μπορούν να εξασφαλίσουν για αυτές τους κατάλληλους ενεργειακούς πόρους, ανεξάρτητα αν ο συγκεκριμένος θα έχει εξαντληθεί. Με την έννοια αυτή, οι μελέτες που αφορούν την αειφορική ανάπτυξη ενός συγκεκριμένου γεωθερμικού πεδίου θα έπρεπε πιθανώς να προσανατολίζονται καταρχήν στην απόκτηση και στη συνέχεια στην εξεύρεση τρόπων διατήρησης ενός σταθερού επιπέδου παραγωγής γεωθερμικής ενέργειας σε εθνικό ή περιφερειακό πλαίσιο. Αυτό βέβαια ισχύει τόσο για τις ηλεκτρικές όσο και για τις άμεσες χρήσεις, και θα αφορά κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, για παράδειγμα μια περίοδο 300 ετών, με καινούρια γεωθερμικά πεδία να αντικαθιστούν αυτά που έχουν εξαντληθεί (Wright, 1998).

2.2 Εσωτερική θερμότητα – Γεωθερμική βαθμίδα – Θερμική ροή

2.2.1. Γενικά

Η θερμότητα, όπως προαναφέρθηκε είναι μια μορφή ενέργειας και η γεωθερμική ενέργεια ορίζεται ως η φυσική θερμότητα από το εσωτερικό της Γης, η οποία προκαλεί τη δημιουργία διαφόρων γεωλογικών φαινομένων σε παγκόσμια κλίμακα και η οποία δεσμεύεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή και για άμεσες χρήσεις. Βρίσκεται παντού κάτω από την επιφάνεια της Γης, αν και οι υψηλότερες θερμοκρασίες, και συνεπώς οι καταλληλότερες πηγές για αξιοποίηση, συγκεντρώνονται σε περιοχές ενεργών ή γεωλογικά νεαρών ηφαιστειών. Συνήθως όμως, ο όρος «γεωθερμική ενέργεια» χρησιμοποιείται σήμερα για να δηλώσει εκείνο το τμήμα της γήινης θερμότητας που μπορεί να ανακτηθεί και να αξιοποιηθεί από τον άνθρωπο, και με την έννοια αυτή θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια ο όρος.

Η παρουσία ηφαιστειών, θερμών πηγών, οι επιφανειακές θερμές ατμίδες, οι θερμοπίδακες (τα geysers) καθώς και άλλες επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας αποτελούν κατά μία έννοια την ορατή εκδήλωση της θερμότητας (εικ. 2.1) του εσωτερικού της Γης (εσωτερική θερμότητα). Η θερμότητα αυτή όμως προκαλεί και τη δημιουργία άλλων φαινομένων, που είναι λιγότερο διακριτά από τον άνθρωπο, τέτοιου μεγέθους όμως ώστε η ύπαρξή τους να οδηγεί στην παρομοίωση της γης με μια τεράστια «θερμική μηχανή». Τα φαινόμενα αυτά αναφέρονται συνοπτικά στη «θεωρία των τεκτονικών πλακών». Η θερμοκρασία με βάση απλές παρατηρήσεις και συστηματικές μετρήσεις, όπου είναι δυνατόν, προκύπτει ότι η αυξάνει με το

βάθος. Ήδη το γεγονός αυτό παρατηρήθηκε για πρώτη φορά μεταξύ του 16^{ου} και 17^{ου} αιώνα, με την κατασκευή των πρώτων μεταλλείων. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας με το βάθος ονομάζεται **γεωθερμική βαθμίδα**. Με τον όρο **θερμική ροή** χαρακτηρίζεται η θερμότητα που μεταδίδεται από το εσωτερικό της γης προς την επιφάνεια σε συνάρτηση με το χρόνο.

Για να γίνουν περισσότερο κατανοητές οι έννοιες αυτές θα περιγραφεί εν συντομία η δομή της Γης και η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών.



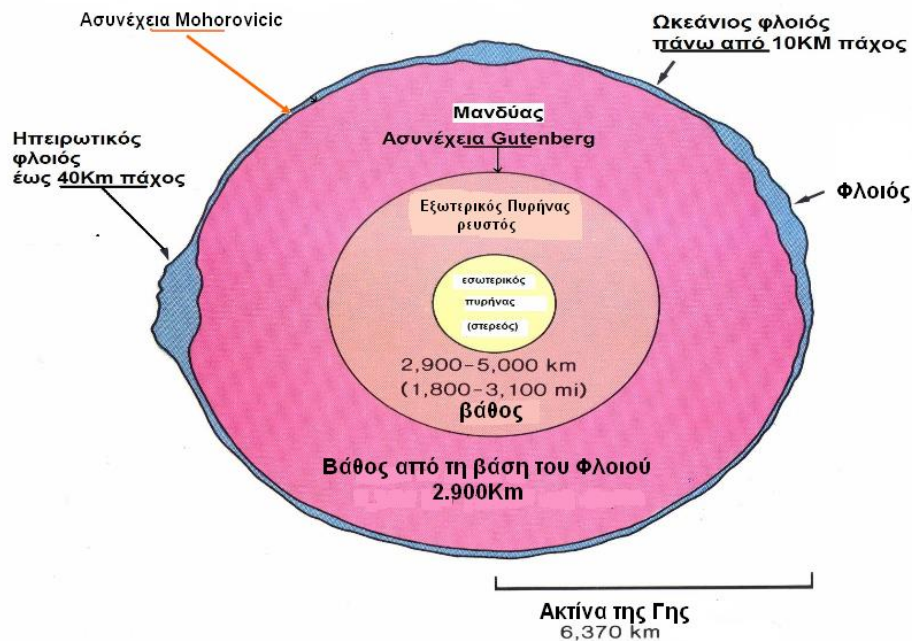
Εικ. 2.1. Μορφές επιφανειακής εκδήλωσης της θερμότητας (Ηφαίστεια, Θερμές πηγές, θερμοπίδακες, θερμές ατμίδες).

2.1.2. Δομή της Γης

Σήμερα, οι γνώσεις μας για τη δομή και σύσταση του εσωτερικού της Γης, από άμεσες παρατηρήσεις, είναι πολύ περιορισμένες, αν σκεφτούμε ότι δεν μπορέσαμε να έχουμε δείγματα από γεωτρήσεις σε βάθος πάνω από 15.000 m (ακτίνα της γης 6.371 km). Οι πληροφορίες μας λοιπόν στηρίζονται κυρίως σε υποθέσεις και δεδομένα από έμμεσες παρατηρήσεις, όπως για παράδειγμα τις ηφαιστειακές εκρήξεις, που ευκαιριακά μεταφέρουν στην επιφάνεια δείγματα που πιστεύεται ότι προέρχονται από τον μανδύα (εσωτερική ζώνη της γης). Επίσης η σύσταση της γης και η γνώση ύπαρξης των ζωνών μανδύα και πυρήνα συμπεραίνεται από τα αποτελέσματα γεωφυσικών μεθόδων και κυρίως γεωσεισμικών μετρήσεων που έχουν γίνει για το σκοπό αυτό. Η μελέτη της μεταβολής της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων αποτελεί μια τέτοια μέτρηση. Η ταχύτητα των κυμάτων θεωρείται μια συνάρτηση των ελαστικών ιδιοτήτων και της πυκνότητας των πετρωμάτων. Δηλαδή, η μέτρηση των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων, μας επιτρέπει, να υπολογίσουμε την πυκνότητα των στρωμάτων και

στη συνέχεια με διάφορες υποθέσεις να προσδιοριστεί η πετρογραφική τους φύση. Με βάση τέτοιες μετρήσεις ανακαλύφθηκε ότι η πυκνότητα αλλάζει με το βάθος, αλλά όμως όχι ομαλά.

Σε μερικά βάθη, απότομες αυξήσεις της ταχύτητας δείχνουν ξαφνικές αλλαγές στην πυκνότητα (εικ. 2.2.). Από τις διαπιστώσεις αυτές έχει προκύψει ότι η στερεά γη δεν έχει ομοιόμορφη σύσταση, αλλά αντιθέτως αποτελείται από ευδιάκριτα στρώματα με διαφορετικές πυκνότητες. Γνωρίζοντας αυτές τις πυκνότητες μπορεί στη συνέχεια να εκτιμηθεί με περισσότερη ακρίβεια ότι τα στρώματα έχουν και διαφορετική σύσταση. Με βάση τα παραπάνω διαπιστώθηκε ότι το εσωτερικό της γης διαχωρίζεται από διάφορες ασυνέχειες, πέρα από τις οποίες, οι φυσικές ιδιότητες των μαζών αλλάζουν αισθητά. Πρόκειται για δυο κύριες ασυνέχειες: α) την ασυνέχεια του Mohorovicic (Moho) που εντοπίζεται σε βάθος 30-70 km κάτω από τις ηπείρους και σε 6-8 km βάθος κάτω από τους ωκεανούς (εικ. 2.2) και β) την ασυνέχεια του Gutenberg που εντοπίζεται σε βάθος 2.900 km. Με βάση τις ασυνέχειες αυτές, η γη διαιρείται σε τρεις ευδιάκριτες περιοχές (ζώνες), το στερεό φλοιό, που αποτελεί την εξωτερική στοιβάδα της γης και εκτείνεται από την επιφάνειά της μέχρι την ασυνέχεια Mohorovicic, το μανδύα, που πρόκειται για περιοχή της γης μεταξύ των δύο προαναφερομένων ασυνεχειών και τον πυρήνα, που καταλαμβάνει το εσωτερικό μέρος της Γης. Το πάχος του στερεού φλοιού της γης δεν είναι παντού το ίδιο σε αντίθεση με τον μανδύα και το πυρήνα που έχουν παντού ομοιόμορφο πάχος.

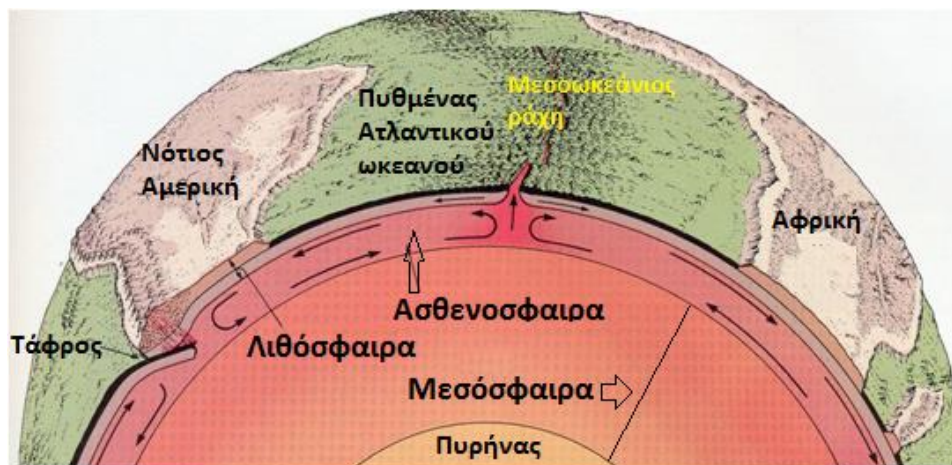


Εικ. 2.2. Τομή απεικόνισης του εσωτερικού της Γης, με βάση τις κύριες ασυνέχειες.

Οι διαφορές στη θερμοκρασία και την πίεση οδήγησαν στο διαχωρισμό των πετρωδών στρωμάτων πάνω από τον πυρήνα, σε τρεις ευδιάκριτες περιοχές. Στο βαθύτερο τμήμα του μανδύα τα πετρώματα είναι αρκετά πιεσμένα, γεγονός που τους έχει προσδώσει μια μεγάλη αντοχή αν και η θερμοκρασία στην περιοχή αυτή είναι αρκετά υψηλή. Έτσι λοιπόν, μια στερεή περιοχή με υψηλές θερμοκρασίες, αλλά μεγάλης αντοχής πετρώματα, εκτείνεται από το όριο μεταξύ πυρήνα και μανδύα (σε βάθος 2.883 km) έως το βάθος περίπου τω 350 km (εντός του ανωτέρου μανδύα) και ονομάζεται μεσόσφαιρα. Πάνω από την μεσόσφαιρα, από τα 350 km έως τα 100 km κάτω από την επιφάνεια της γης, εντοπίζεται μια άλλη ευδιάκριτη περιοχή η

ασθενόσφαιρα (εικ. 2.3), όπου η ισορροπία μεταξύ πίεσης και θερμοκρασίας έχει περιορίσει την αντοχή των πετρωμάτων. Έτσι τα πετρώματα στην περιοχή αυτή βρίσκονται σε μια πλαστική κατάσταση και συνεπώς εύκολα παραμορφώνονται.

Πάνω από την ασθενόσφαιρα και κατά μέσο όρο 100 km από την επιφάνεια της γης εντοπίζεται η τρίτη ευδιάκριτη περιοχή όπου τα πετρώματα είναι ψυχρότερα, ισχυρότερα και άκαμπτα απ' ό,τι στην πλαστική ασθενόσφαιρα. Αυτή η σκληρή εξωτερική περιοχή, η οποία περιλαμβάνει το φλοιό της γης και μέρους του ανώτερου μανδύα, ονομάζεται λιθόσφαιρα. Η ασθενόσφαιρα, εξαιτίας της πλαστικότητας, επιτρέπει στη λιθόσφαιρα να μετατοπίζεται και να εισχωρεί μέσα σ' αυτή σε βάθος μεγαλύτερο από 100 km.



Εικ. 2.3. Διάκριση σε τρεις ζώνες (Λιθόσφαιρα, Ασθενόσφαιρα, Μεσόσφαιρα) του μανδύα και του φλοιού, με βάση την κατάσταση των πετρωμάτων.

2.1.3. Θεωρία λιθοσφαιρικών πλακών

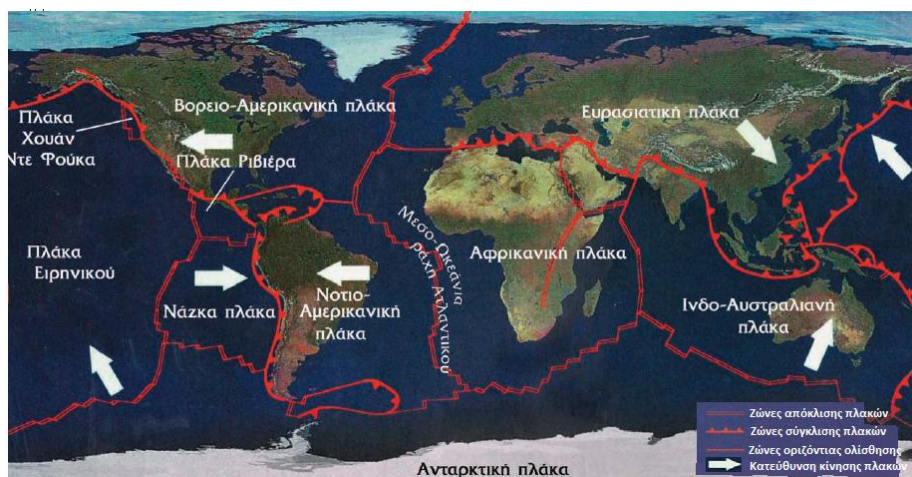
Από παλιά έχουν γίνει προσπάθειες από διάφορους ερευνητές να ερμηνεύσουν τα αίτια των γεωδυναμικών φαινομένων, δηλαδή της σεισμικότητας, της ηφαιστειότητας, της ορογένεσης κ.α. Τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη της γεωφυσικής επιστήμης και της σεισμολογίας έχει αναπτυχθεί η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών. Πράγματι, σήμερα με τη θεωρία αυτή εξηγούνται με ικανοποιητικό τρόπο, τόσο η ύπαρξη των διαφόρων σεισμικών ζωνών στη γη, όσο και οι περιοχές με τη μεγαλύτερη ηφαιστειότητα (θερμές ζώνες).

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, η λιθόσφαιρα δεν είναι συνεχής αλλά χωρίζεται από ένα σύστημα ζωνών διάρρηξης σε 7 μεγάλες συμπαγείς τεκτονικές πλάκες (Αφρικανική, Ευρασιατική, Ινδο-Αυστραλιανή, Ανταρκτική, πλάκα του Ειρηνικού, Βορειο-Αμερικανική, Νοτιο-Αμερικανική) και σε πολλές άλλες μικρότερες (εικ. 2.4), που ονομάζονται λιθοσφαιρικές πλάκες και οι οποίες ολισθαίνουν πάνω στο υποκείμενο παχύρρευστο μανδυακό υλικό την ασθενόσφαιρα, πραγματοποιώντας σχετικές μεταξύ τους κινήσεις. (εικ. 2.5).

Το μέγεθος των πλακών ταξινομείται από μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα έως μερικές χιλιάδες χιλιόμετρα σε εύρος. Οι λιθοσφαιρικές πλάκες θεωρούνται άκαμπτες και ολισθαίνουν, όπως ειπώθηκε, πάνω στην ασθενόσφαιρα (στρώματα του μανδύα που είναι μηχανικά ασθενέστερα) από την πίεση ρευμάτων μεταφοράς (θερμικά ρεύματα της μάζας του μάγματος). Η μετακίνηση αυτή είναι της τάξης ολίγων εκατοστών το χρόνο (1-10 cm).

Καθώς οι πλάκες μετακινούνται η γεωγραφία της γης μπορεί να αλλάξει δραστικά. Αυτές όμως οι αλλαγές είναι αρκετά μακροχρόνιες και μόνο στο γεωλογικό χρόνο είναι αισθητές. Για παράδειγμα, τα Ιμαλάια είναι μια νέα οροσειρά που άρχισε να σχηματίζεται όταν η μικρή

ήπειρος Ινδία συγκρούστηκε με την Ασία, περίπου 45 εκατομμύρια χρόνια πριν. Επίσης, η Ερυθρά θάλασσα είναι μια νέα θάλασσα που άρχισε να σχηματίζεται περίπου 30 εκατομμύρια χρόνια πριν, όταν διασπάστηκε η Αραβική χερσόνησος από την Αφρική και οι δυο μάζες της ξηράς άρχισαν να απομακρύνονται.

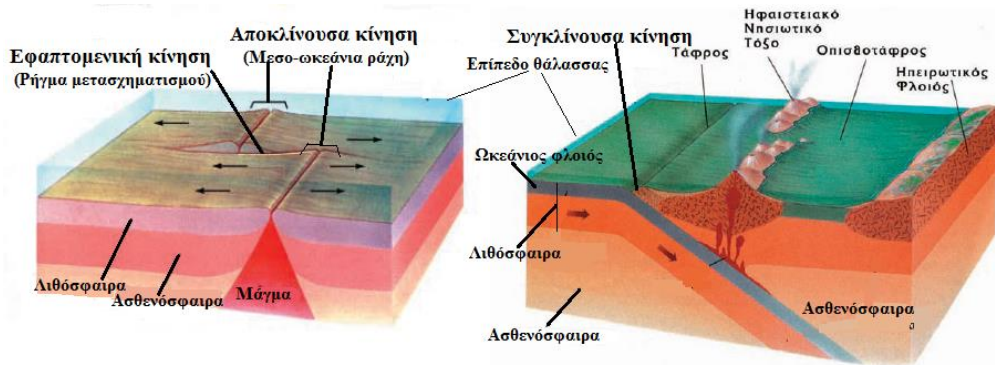


Εικ. 2.4. Απεικόνιση λιθοσφαιρικών πλακών (μεγάλες πλάκες) στην υδρόγειο (ΟΑΣΠ, 2012).

Η μετακίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών πραγματοποιείται με τρεις διαφορετικές κινήσεις τη συγκλίνουσα, την αποκλίνουσα και την εφαπτομενική ή ολισθαίνουσα κίνηση (εικ. 2.5):

- Στην περίπτωση που συγκλίνουν οι λιθοσφαιρικές πλάκες η μία καταδύεται κάτω από την άλλη. Μεταξύ της βυθιζόμενης και της άλλης πλάκας, σχηματίζεται η ωκεάνιος τάφρος, όπου παρατηρούνται τα μεγαλύτερα βάθη των ωκεανών. Στις περιοχές όπου η λιθοσφαιρική πλάκα βυθίζεται, παρουσιάζονται μεγάλες ανωμαλίες στο πεδίο βαρύτητας και αυξημένη ηφαιστειακή και σεισμική δραστηριότητα.
- Στην περίπτωση που οι δύο τεκτονικές πλάκες απομακρύνονται (απόκλιση), πυρακτωμένο υλικό από την ασθενόσφαιρα αποτίθεται πάνω στον πυθμένα των ωκεανών. Καθώς το πυρακτωμένο υλικό ψύχεται, σχηματίζει τον καινούριο πυθμένα των ωκεανών. Καθώς η απόκλιση συνεχίζεται, το πυρακτωμένο υλικό συνεχίζει να εισχωρεί μέσα στην αρχική διάρρηξη της νέας μεσο-ωκεάνιας ράχης και έτσι δημιουργείται μέσα στους ωκεανούς μια μορφολογικά υπερυψωμένη ζώνη σε σχέση με τα γύρω τμήματα του πυθμένα.
- Στην περίπτωση της εφαπτομενικής κίνησης, οι λιθοσφαιρικές πλάκες είναι δυνατόν χωρίς να συγκρούονται να ολισθαίνουν μεταξύ τους πλευρικά. Τα όριά τους στην κίνηση αυτή αποτελούν ρήγματα μετασχηματισμού. Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό ρήγμα είναι το μεγάλο ρήγμα του Αγ. Ανδρέα στην Καλιφόρνια, που αποτελεί εστία μεγάλης σεισμικής έντασης.

Αποτέλεσμα της σχετικής κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών είναι η αργή παραμόρφωση των πετρωμάτων στις παρυφές τους. Για το λόγο αυτό, στα πετρώματα που βρίσκονται κοντά στις περιοχές αυτές συσσωρεύονται τεράστια ποσά δυναμικής ενέργειας (ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης πετρωμάτων) και αναπτύσσονται μεγάλες τάσεις που συνεχώς αυξάνουν. Όταν οι τάσεις αυξηθούν τόσο πολύ, ώστε να υπερβούν το όριο αντοχής του λιθοσφαιρικού υλικού στο σημείο αυτό, επέρχεται θραύση. Ταυτόχρονα πραγματοποιείται απότομη σχετική κίνηση των δύο τμημάτων που έχουν προκύψει κατά μία επιφάνεια έως ότου ισορροπήσουν σε νέες θέσεις.



Εικ. 2.5. Σχηματική παράσταση με τις χαρακτηριστικές κινήσεις των πλακών (ΟΑΣΠ, 2012 με τροποποιήσεις).

2.2. Εσωτερική θερμότητα της Γης

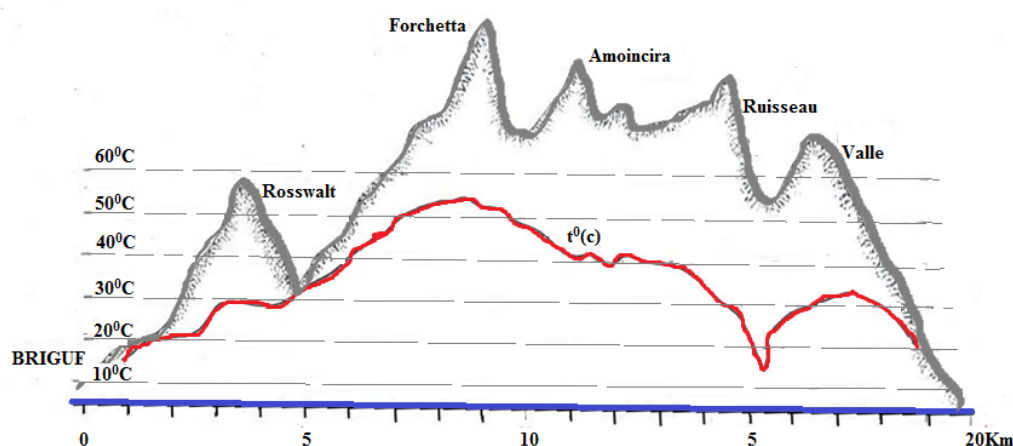
Όλα τα σύγχρονα πρότυπα (μοντέλα) της θερμικής κατάστασης του εσωτερικού της γης συμπεριλαμβάνουν την πρωτογενή και τη ραδιογενή θερμότητα. *Πρωτογενής* είναι η θερμότητα που εκλύθηκε κατά την διάρκεια σχηματισμού του πλανήτη, όπου θερμές μάζες έχουν εγκλωβιστεί στο εσωτερικό της γης το οποίο ήταν πάντα θερμό, και μάλιστα πολύ θερμότερο στην αρχική του κατάσταση, και δεν πρόλαβε να κρυώσει ακόμη. Αντίθετα στην επιφάνεια της Γης η απώλεια θερμότητας λόγω ακτινοβολίας οδήγησε σε σταδιακή ψύξη και εμφάνιση του πρώτου στερεού φλοιού. *Ραδιενεργή* είναι η θερμότητα που συνεχώς παράγεται από τη διάσπαση των μακράς διάρκειας ζωής ραδιενεργών ισοτόπων του ουρανίου (U^{238} , U^{235}), του θορίου (Th^{232}) και του καλίου (K^{40}), τα οποία βρίσκονται στο εσωτερικό της γης (Lubimova, 1968). Η πρώτη αναφορά της ραδιενέργειας ως πιθανής πηγής ενέργειας στο εσωτερικό της Γης έγινε στην Αγγλία, από δύο διάσημους φυσικούς, τον Ερνέστο Ράδερφορντ (Ernest Rutherford) και τον Ροβέρτο-Ιωάννη Στράττ, 4ο Βαρόνο Ρέϋλι (Robert John Strutt, 4th Baron Rayleigh). Το 1906, ο Rayleigh πρότεινε ότι η ποσότητα της ραδιογενούς θερμότητας που παράγεται στον στερεό φλοιό της Γης είναι ικανή να εξηγήσει σχεδόν ολόκληρη την παρατηρούμενη θερμική ροή. Στα όρια μεταξύ μανδύα και φλοιού, στην ασυνέχεια Mohorovičić, πιστεύεται ότι η θερμοκρασία φτάνει στους $1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ στο κέντρο της γης εκτιμάται περίπου μέχρι στους $6.000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Τα διαφορετικά είδη θερμότητας, δρουν αθροιστικά, σε απροσδιόριστες όμως ποσότητες. Πρόσφατες παρατηρήσεις και θεωρητικοί υπολογισμοί δείχνουν ότι περί το 80% της παρατηρούμενης θερμικής ροής στην επιφάνεια της Γης είναι ραδιογενής, ενώ το υπόλοιπο 20% αποτελεί την συμβολή της πρωτογενούς θερμότητας.

Ως μια γενική ιδέα της φύσης και της κλίμακας του εμπλεκόμενου φαινομένου (Mary H. Dickson και Mario Fanelli 2004), μπορεί να αναφερθεί η λεγόμενη «θερμική ισορροπία», όπως διατυπώθηκε από τους Stacey and Loper (1988). Σύμφωνα με αυτήν, η ολική ροή θερμότητας από τη γη (αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία) εκτιμάται ότι ανέρχεται στα $42 \times 10^{12}\text{ W}$. Από αυτά, $8 \times 10^{12}\text{ W}$ (περίπου το 20%) προέρχονται από το φλοιό, που αντιπροσωπεύει μόνο το 2% του συνολικού όγκου της γης αλλά είναι όμως πλούσιος σε ραδιενεργά ισότοπα, $32,3 \times 10^{12}\text{ W}$ (περίπου το 75%) προέρχονται από το μανδύα, ο οποίος αντιπροσωπεύει το 82% του συνολικού όγκου της γης, και $1,7 \times 10^{12}\text{ W}$ (περίπου το 5%) προέρχονται από τον πυρήνα, ο οποίος αντιπροσωπεύει το 16% του συνολικού όγκου της γης και δεν περιέχει ραδιενεργά ισότοπα (εικ. 2.2.).

Όπως λοιπόν προκύπτει από τα παραπάνω σύμφωνα με τους Mary H. Dickson και Mario Fanelli (2004), η θερμική ενέργεια της γης είναι απέραντη, όμως μόνο τμήμα αυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί τελικά από τον άνθρωπο. Μέχρι σήμερα η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας έχει περιοριστεί σε περιοχές όπου οι γεωλογικές συνθήκες επιτρέπουν σε ένα μέσο (γεωθερμικό ρευστό, νερό σε υγρή ή αέρια φάση) να «μεταφέρει» τη θερμότητα από τις βαθιές θερμές ζώνες στην επιφάνεια ή κοντά σε αυτήν. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται οι *γεωθερμικοί πόροι* (geothermal resources), οι οποίοι σύμφωνα με τον Φυτίκα 2004 είναι οι ποσότητες της θερμικής ενέργειας που βρίσκεται αποθηκευμένη ανάμεσα στην επιφάνεια της γης και σε κάποιο προσβάσιμο βάθος και μπορεί να ανακτηθεί με ανταγωνιστικό κόστος σε σχέση με τις άλλες μορφές ενέργειας.

Η γηγενής θερμότητα δημιουργεί πολλές φορές προβλήματα στην κατασκευή μεγάλων υπόγειων τεχνικών και μεταλλευτικών έργων. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα είναι οι δυσμενείς συνθήκες που δημιουργούνται για τους εργαζόμενους με την αύξηση της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας Simplon των Άλπεων (σχ.2.1) μήκους 20 km, στο 8ο km περίπου, μετρήθηκαν θερμοκρασίες μέχρι 54,5 °C.



Σχήμα 2.1. Τοπογραφική τομή κατά μήκος σιδηροδρομικής σήραγγας Simplon, με την καμπύλη θερμοκρασίας εντός της σήραγγας κατά τη διάρκεια κατασκευής της (1896-1909).

2.3. Γεωθερμική βαθμίδα

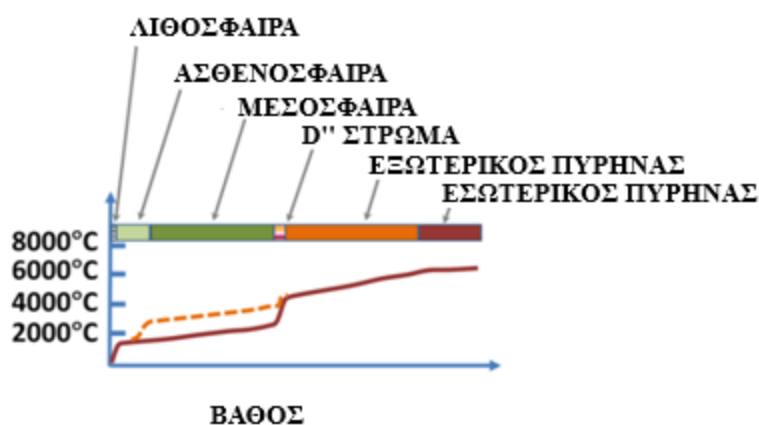
Η πιο σημαντική παράμετρος στην αξιοποίηση αυτής της γεωθερμικής ενέργειας είναι η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών, η οποία καθορίζει το είδος της εφαρμογής της γεωθερμικής ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θερμικές χρήσεις ή για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Η γη όπως αναφέρθηκε είναι ζεστή στο εσωτερικό της και η αύξηση της θερμοκρασίας της συναρτίζεται του βάθους σε κανονικές συνθήκες είναι περίπου σταθερή και ονομάζεται *γεωθερμική βαθμίδα*. Η *γεωθερμική βαθμίδα* λοιπόν ορίζεται ως ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας της γης σε συνάρτηση με το βάθος, μέσα στο γήινο φλοιό.

Στην επιφάνεια της Γης, η θερμοκρασία ελέγχεται κυρίως από τον Ήλιο και την ατμόσφαιρα. Ελάχιστα μόνον μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, οι ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας γίνονται ελάχιστα αισθητές – από το βάθος των 15m περίπου, η θερμοκρασία είναι σχετικά σταθερή με πολύ αργές μεταβολές που εξαρτώνται από τις κλιματολογικές συνθήκες. Παρ' όλα αυτά, οι επιδράσεις της εποχιακής μεταβολής της θερμοκρασίας μπορεί να γίνουν αισθητές με καθυστέρηση ενός περίπου έτους, σύμφωνα με το

Τζανή (2010), σε βάθος 100 m. Κάτω από την ζώνη αυτή, η θερμοκρασία αυξάνεται με το βάθος, σχεδόν παντού, αν και ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται (γεωθερμική βαθμίδα) διαφοροποιείται σημαντικά, ανάλογα με το τεκτονικό καθεστώς και την γεωλογική δομή της περιοχής (θερμική αγωγιμότητα των πετρωμάτων). Σε βάθη που είναι προσβάσιμα με τις σύγχρονες γεωτρητικές μεθόδους, δηλαδή περίπου μέχρι τα 10.000 m, η μέση γεωθερμική βαθμίδα κυμαίνεται περίπου στους 2,5-3 °C/100 m. Με βάση τη μέση γεωθερμική βαθμίδα, εάν η θερμοκρασία στα πρώτα μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ανταποκρίνεται κατά μέσο όρο στη μέση ετήσια θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα, δηλ. περίπου στους 15°C, τότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία στο βάθος των 2000 m θα είναι περίπου 65-75°C, στα 3000 m 90-105°C, κ.ο.κ. για μερικά ακόμα χιλιάδες μέτρα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν πολλές περιοχές στις οποίες η γεωθερμική βαθμίδα αποκλίνει πολύ από τη μέση τιμή. Εκεί όπου το γεωλογικό υπόβαθρο έχει υποστεί πολύ γρήγορη βύθιση και η λεκάνη έχει πληρωθεί με γεωλογικά «πολύ νέα» ιζήματα, η γεωθερμική βαθμίδα μπορεί να είναι μικρότερη και από 1°C/100 m. Αντίθετα, σε μερικές «γεωθερμικές» καλούμενες περιοχές, η τιμή της γεωθερμικής βαθμίδας μπορεί να είναι και δεκαπλάσια της μέσης γήινης.

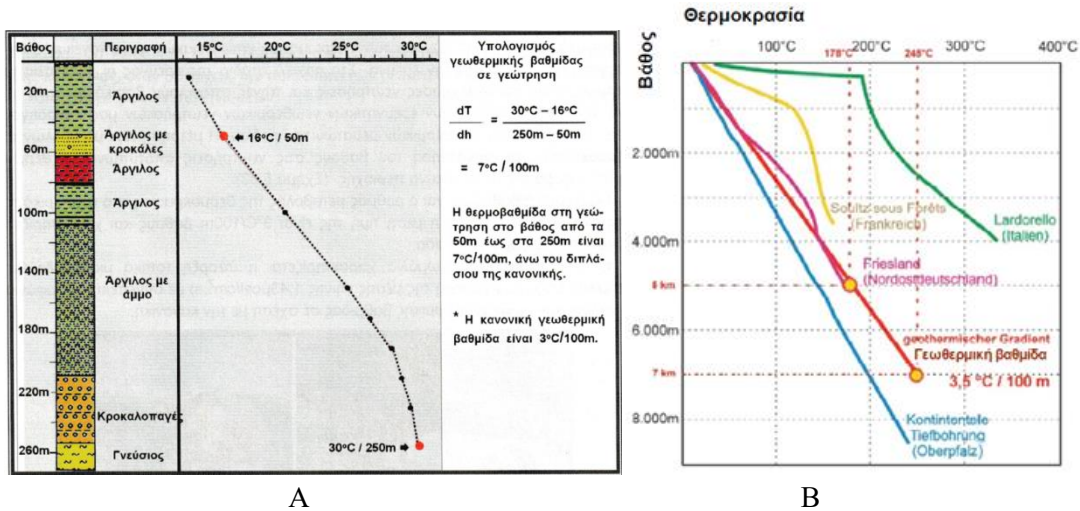
Η φυσιολογική τιμή της γεωθερμικής βαθμίδας στα πρώτα χιλιόμετρα της λιθόσφαιρας κυμαίνεται από 20 έως 50 °C/km, ενώ η μέση τιμή της θεωρείται 33 °C/km. Η τιμή αυτή αποτελεί και τη μέση γεωθερμική βαθμίδα. Αν ο ρυθμός μεταβολής της θερμότητας με το βάθος, με βάση τη μέση γεωθερμική βαθμίδα (33 °C/km) προβληθεί στο κέντρο της Γης προκύπτει μια θερμοκρασία μεγαλύτερη των 72,500 °C, η οποία, σύμφωνα με το Τζανή (2010), είναι πολύ μεγάλη για να είναι αληθινή, καθώς υπερβαίνει την θερμοκρασία ατμών του Fe ή άλλων υλικών στις πιέσεις που επικρατούν σε αυτό το βάθος. Συνεπώς η θερμοκρασιακή βαθμίδα κοντά στην επιφάνεια της Γης, που είναι και οι μόνες μετρήσεις που διαθέτουμε, δεν είναι δυνατόν να ισχύουν σε όλο το εσωτερικό της Γης.



Σχήμα 2.2. Η μεταβολή της θερμότητας με το βάθος (Brews Ohare, 2010 από Wikipedia).

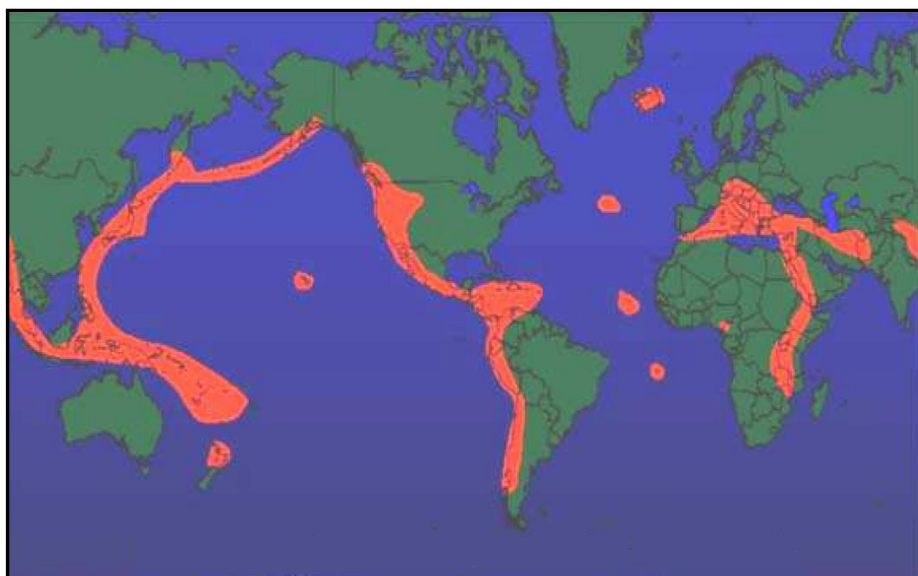
Η γεωθερμική βαθμίδα ελαττώνεται δραστικά με το βάθος για δύο λόγους. Πρώτον, η παραγωγή ραδιογενούς θερμότητας γίνεται κατά κύριο λόγο στη λιθόσφαιρα, και μάλιστα στο ανώτερο μέρος της (φλοιό) όπου υπάρχουν οι υψηλότερες συγκεντρώσεις Ουρανίου, Θορίου και Καλίου. Δεύτερον, ο μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας αλλάζει από αγωγή/ακτινοβολία δια της ύλης στον στερεό φλοιό, σε θερμική μεταφορά ύλης εντός του μανδύα. Έτσι, η γεωθερμική βαθμίδα στο μεγαλύτερο μέρος του μανδύα, σύμφωνα με το Τζανή (2006), πέφτει στους 0,3 °C/km περίπου και καθορίζεται από την αδιαβατική βαθμίδα που αντιστοιχεί στα υλικά του μανδύα (σχ. 2.2)

Η γεωθερμική βαθμίδα στον φλοιό της Γης ποικίλλει σημαντικά στα διάφορα μέρη καθώς η εσωτερική θερμότητα μεταδίδεται αλλού με αγωγή και αλλού με συναγωγή (οι έννοιες αυτές θα αναλυθούν στην επόμενη παράγραφο). Οι περιοχές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τις εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας είναι αυτές στις οποίες η γεωθερμική βαθμίδα είναι πέραν του κανονικού (σχήμα 2.8). Σε ορισμένες περιοχές, είτε λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας κατά τη διάρκεια πρόσφατης γεωλογικής ηλικίας, είτε λόγω της ανόδου ζεστού νερού από μεγάλα βάθη μέσω ρηγμάτων, η γεωθερμική βαθμίδα είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τον μέσο όρο, έτσι ώστε να προκύπτουν θερμοκρασίες 250-350 °C σε βάθος περίπου 2.000-4.000 m.



Σχήμα 2.3. Α. Διάγραμμα εκτίμησης της Γεωθερμικής βαθμίδας (Καρυδάκης, 2016). Β. Θερμοκρασία με το βάθος για τις διάφορες γεωθερμικές βαθμίδες (η θερμοκρασία εδάφους θεωρείται ότι είναι 17°C).

Υψηλές γεωθερμικές βαθμίδες, μέχρι 200 °C/km, παρατηρούνται κατά μήκος των ωκεάνιων επεκτατικών κέντρων όπως η Μεσατλαντική Ράχη, όπου σχηματίζεται καινούριος ωκεάνιος φλοιός λόγω της απόκλισης (απομάκρυνσης) τεκτονικών πλακών και επακόλουθης εξόδου θερμού μαγματικού υλικού από τον μανδύα (εικ .2.6).



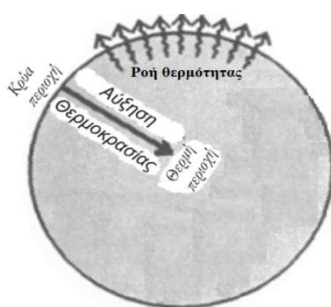
Εικ. 2.6. Περιοχές αυξημένης θερμικής ροής, «ζώνες φωτιάς».

επίσης, παρατηρούνται και κατά μήκος νησιωτικών και ηφαιστειακών τόξων, πίσω από τις ζώνες σύγκλισης (σύγκρουσης) τεκτονικών πλακών, όπως είναι για την Ελλάδα το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου (Νίσυρος – Σαντορίνη – Μήλος – Μέθανα – Σουσάκι Κορινθίας), η Ιαπωνία, Ινδονησία κ.λπ.). Και στην δεύτερη περίπτωση οι υψηλές βαθμίδες οφείλονται σε μάγμα που εξωθείται προς την επιφάνεια, αν και για διαφορετικούς λόγους (βλ. κατωτέρω). Χαμηλές γεωθερμικές βαθμίδες παρατηρούνται κατά μήκος των ζωνών σύγκλισης ηπειρωτικών και ωκεάνιων τεκτονικών πλακών και βύθισης (υπαγωγής) του ωκεάνιου φλοιού κάτω από τον ηπειρωτικό και μέσα στον μανδύα. Σε τεκτονικά σταθερές περιοχές (π.χ. ηπειρωτικές ενδοχώρες, ασπίδες και μεγάλες ιζηματογενείς λεκάνες), η μέση γεωθερμική βαθμίδα είναι 15–30 °C/km.

Η γεωθερμική βαθμίδα έχει μεγάλη σημασία για την έρευνα και εκμετάλλευση υδρογονανθράκων (πετρελαίου και φυσικού αερίου) και γεωθερμικής ενέργειας. Τα γεωτρητικά εργαλεία και όργανα έρευνας πρέπει να έχουν ειδικές κατασκευαστικές προδιαγραφές για να λειτουργήσουν σε μεγάλα βάθη, σε περιοχές υψηλής βαθμίδας. Ο υπολογισμός των γεωθερμικών βαθμίδων του γεωλογικού παρελθόντος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα των ερευνών για τις συνθήκες γένεσης υδρογονανθράκων στις ιζηματογενείς λεκάνες. Τέλος, η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού λαμβάνει χώρα σε περιοχές με γεωθερμικές βαθμίδες γενικά μεγαλύτερες των 40 °C/km.

2.4. Ροή θερμότητας

Λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στα διάφορα στρώματα, προκαλείται ροή θερμότητας από τις βαθιές και θερμές ζώνες του υπεδάφους προς τις ρηχές και ψυχρότερες (σχ. 2.10), τείνοντας έτσι στη δημιουργία ομοιόμορφων συνθηκών. Στην πραγματικότητα όμως, όπως πολύ συχνά συμβαίνει στη φύση, κάτι τέτοιο ουδέποτε επιτυγχάνεται πλήρως.

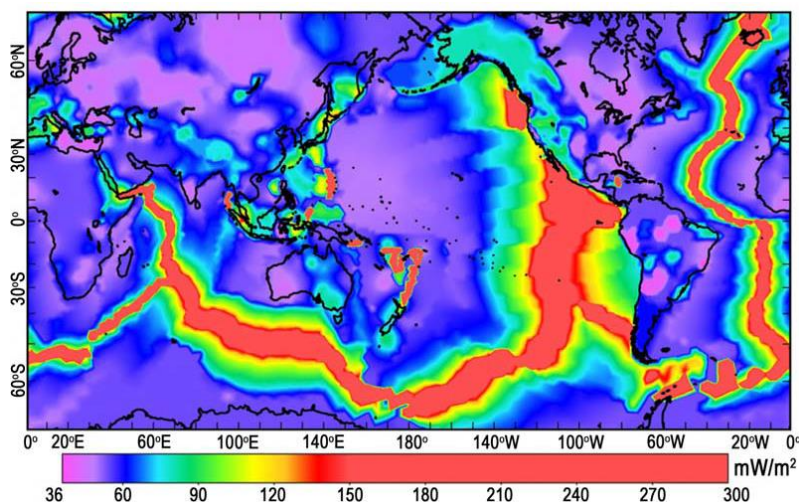


Σχήμα 2.4. Ροή θερμότητας

Στις γεωεπιστήμες, ο όρος θερμική ροή σημαίνει τον ρυθμό με τον οποίο απάγεται η θερμότητα (θερμική ενέργεια) από το εσωτερικό της Γης προς την επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας. Η θερμοκρασιακή διαφορά των βαθύτερων στρωμάτων (σχ. 2.4) προκαλεί ροή θερμότητας από τις βαθύτερες και θερμότερες ζώνες προς τις επιφανειακές και ψυχρότερες τείνοντας προς την επικράτηση ομοιόμορφων θερμοκρασιακών συνθηκών (Barbier, 2002).

Στην εικ. 2.7, γίνεται αναπαράσταση της παγκόσμιας θερμικής ροής βασισμένη στην θερμική αγωγιμότητα των ανώτερων γεωλογικών στρωμάτων βασιζόμενη σε περισσότερες από 21.000 μετρήσεις ανά τον κόσμο. Τα ψυχρά χρώματα στο σχήμα (ιώδες – γαλανό) αντιπροσωπεύουν περιοχές με χαμηλή θερμική ροή, τα ενδιάμεσα χρώματα (πράσινο – κίτρινο)

μέση – αυξημένη θερμική ροή και τα θερμά χρώματα υψηλή θερμική ροή. Υψηλή θερμική ροή παρατηρείται στα ενεργά κέντρα απόκλισης τεκτονικών πλακών όπως τα επεκτατικά κέντρα του Ατλαντικού, Ειρηνικού και Ινδικού ωκεανών, καθώς και πίσω από τις ζώνες σύγκλισης πλακών, κατά μήκος μεγάλων νησιωτικών ηφαιστειακών τόξων (π.χ. Αλεούτιες νήσοι, Ιαπωνία, Πολυνησία – Νέα Ζηλανδία). Μέση ως αυξημένη θερμική ροή παρατηρείται στις θερμές κηλίδες και περιοχές σύγκρουσης ηπείρων, όπως για παράδειγμα η ζώνη Άλπεων, Ιμαλαΐων στην οποία ανήκει και η περιοχή της Ελλάδας. Όλες οι υπόλοιπες περιοχές του πλανήτη εμφανίζουν χαμηλή – μέση θερμική ροή με τιμές παρόμοιες για τις ηπειρωτικές και νησιωτικές περιοχές αντίστοιχα.



Εικ. 2.7. ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗ ΡΟΗ (ο χάρτης εμφανίζει μια παραμόρφωση στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη) (Τζανής, 2010).

Η εκροή θερμικής ενέργειας από την Γη είναι της τάξης των 40×10^9 W και φαντάζει κολοσσιαία, αλλά η μέση θερμική ροή ανά μονάδα επιφάνειας είναι πάρα πολύ χαμηλή. Συγκεκριμένα η μέση γήινη ροή θερμότητας στις ηπείρους και τους ωκεανούς είναι 65 και 101 mW/m² (mW = χιλιοστό του W) αντίστοιχα, οι οποίες υπολογίζοντας, την έκταση των περιοχών, δίνουν ένα παγκόσμιο μέσο όρο της τάξης των 87 mW/m² (Pollack et al., 1993). Οι τιμές αυτές προέκυψαν μετά από μετρήσεις σε μεγάλο αριθμό θέσεων (περίπου 20.000), που καλύπτουν το 62% περίπου της γήινης επιφάνειας (εικ. 2.7). Η ανάλυση της θερμικής ροής από τους Pollack et al. (1993) είναι η πιο πρόσφατη και η μόνη σε έντυπη μορφή.

Η θερμότητα αυτή πολλές φορές μεταφέρεται σε υδροφόρους σχηματισμούς της περιοχής με αποτέλεσμα τα νερά να θερμαίνονται και να κυκλοφορούν μέσα στα πετρώματα φτάνοντας πολλές φορές μέχρι την επιφάνεια (θερμές πηγές). Αντίθετα πολλές φορές τα ζεστά νερά εγκλωβίζονται μεταξύ μη υδροπερατών πετρωμάτων (δημιουργώντας ταμιευτήρες) και τότε η θερμοκρασία τους φτάνει και ξεπερνά τους 350 °C.

Προκειμένου να προσδιορισθεί το μέγεθος της θερμικής ροής (q) σε δεδομένη περιοχή επί της Γης, είναι απαραίτητο να μετρηθούν η θερμική αγωγιμότητα των πετρωμάτων στην περιοχή αυτή, καθώς και η γεωθερμική βαθμίδα. Η θερμική ροή σχετίζεται λοιπόν με τη θερμική αγωγιμότητα και τη γεωθερμική βαθμίδα μέσω της απλής σχέσης:

$$q = K \cdot dZ/dT$$

Όπου:

q είναι η ροή θερμότητας εκφράζεται με μονάδες θερμικής ροής (mW/m^2 ή HFU, δηλαδή σε $\mu cal/cm^2/sec$ ($1HFU = 41,8 mW/m^2$),

K είναι η θερμική αγωγιμότητα των πετρωμάτων (Πίνακας 2.1),

dZ/dT είναι η θερμοκρασιακή βαθμίδα που συνήθως εκφράζεται σε $^{\circ}C/km$.

Πίνακας 2.1: Με τις αγωγιμότητες (θερμική ροή) διαφόρων γεωλογικών υλικών και του νερού (Bowen 1989) σε θερμοκρασία δωματίου.

Γεωλογικά υλικά	Αγωγιμότητα σε mW/m^2
Γρανίτης	2,5-3,8
Γάββρος και Βασάλτης	1,7-2,5
Ασβεστόλιθος	1,7-3,3
Ψαμίτης	1,2-4,2
Νερό	0,6

Ο ρυθμός μετάδοσης της θερμότητας μέσω της Γης είναι εξαιρετικά αργός διότι τα πετρώματα και τα γεωλικά γενικότερα είναι θερμοκοιμονωτές.

Σήμερα, η διάδοση της θερμότητας πραγματοποιείται με τρεις τρόπους, με αγωγή, με συναγωγή και με ακτινοβολία (εικ. 2.8):

1. Αγωγή. Αν μέσα σε ένα συνεχές, ομογενές μέσο υπάρχει μία διαφορά θερμοκρασίας, τότε παρατηρείται ροή θερμότητας χωρίς καμία ορατή κίνηση της ύλης. Μια τέτοια ροή θερμότητας ονομάζεται αγωγή.
2. Συναγωγή. Η συναγωγή αναφέρεται στη ροή θερμότητας που σχετίζεται με την κίνηση ενός ρευστού, όπως συμβαίνει στη θέρμανση χώρων με εκτεινόμενες επιφάνειες. Η συναγωγή μπορεί να είναι φυσική ή εξαναγκασμένη. Στη φυσική ή ελεύθερη συναγωγή η κίνηση των ρευστών προκαλείται από την ίδια τη διαφορά θερμοκρασίας, λόγω διαφορών πυκνότητας. Στην εξαναγκασμένη συναγωγή το ρευστό κινείται κατά μήκος μιας επιφάνειας από κάποιον εξωτερικό παράγοντα, όπως είναι μία αντλία ή ο άνεμος.
3. Ακτινοβολία. Όλα τα σώματα, στερεά, υγρά ή αέρια, έχουν την ικανότητα να εκπέμπουν θερμότητα με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Από την άλλη μεριά, όλα τα σώματα απορροφούν ενέργεια ακτινοβολίας. Σε αντίθεση με τους προηγούμενους μηχανισμούς μετάδοσης της θερμότητας, μετάδοση με ακτινοβολία μπορούμε να έχουμε και στο απόλυτο κενό.



Εικ. 2.8. Τρόποι διάδοσης της θερμότητας (Κουτσούκος, 2016).

Το μεγαλύτερο μέρος της εσωτερικής θερμότητας μεταδίδεται με αγωγή και με ρυθμό $0,04 - 0,06 \text{ W/m}^2$. Τα ηφαιστειακά και υδροθερμικά φαινόμενα από την άλλη μεριά, μεταδίδουν θερμότητα με ρεύματα μεταφοράς, αλλά προορίζονται στις ζώνες κοντά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών. Στην περίπτωση αυτή λαμβάνει χώρα ροή θερμότητας με τιμές πολλαπλάσιες της μέσης γήινης. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί «γεωθερμική ανωμαλία» και η περιοχή χαρακτηρίζεται ως «γεωθερμικό πεδίο».

Από το ανώτερο τμήμα του μανδύα προέρχεται το λιωμένο πέτρωμα (μάγμα) που φθάνει μερικές φορές στην επιφάνεια της γης, δημιουργώντας τις εντυπωσιακές ηφαιστειακές εκρήξεις. Το υλικό που φθάνει στην επιφάνεια (μίγμα λειωμένων υλικών του μανδύα και της υπερκείμενης λιθόσφαιρας, αερίων και μερικών στερεοποιημένων πετρωμάτων) έχει θερμοκρασίες μεταξύ 600 και $1.100 \text{ }^\circ\text{C}$ (ανάλογα με τη χημική σύσταση). Έτσι μεταφέρονται μεγάλες ποσότητες θερμικής ενέργειας, που σπάνια διαχέονται στη ατμόσφαιρα και την επιφάνεια, με την έκρηξη. Συνήθως εγκλωβίζονται σε μικρό βάθος και κινητοποιούν μεγάλες ποσότητες υπεδαφικών ρευστών που θερμαίνονται ως τους $400 \text{ }^\circ\text{C}$ και πλέον. Είναι σημαντικό να τονιστεί η διαφορά μεταξύ της γεωθερμικής βαθμίδας και της ροής θερμότητας, γιατί η υψηλή θερμοκρασιακή (γεωθερμική) βαθμίδα δεν ταυτίζεται πάντα και με μεγάλη θερμική ροή. Υψηλές γεωθερμικές βαθμίδες μπορεί να συνδυαστούν με πετρώματα χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, όπως και το αντίθετο, με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται μεγάλη ροή θερμότητας.

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις είναι το εντυπωσιακότερο φυσικό φαινόμενο της γήινης θερμότητας. Οι λιθοσφαιρικές πλάκες κινούνται ή μια σε σχέση με την άλλη εξαιτίας των ρευμάτων μεταφοράς θερμότητας, που υπάρχουν σε πολλές περιοχές του μανδύα. Τα γεωθερμικά ρευστά, με τη βοήθεια των τεκτονικών κινήσεων στις σεισμικά ενεργές περιοχές, φθάνουν πολλές φορές και στην επιφάνεια του εδάφους, δημιουργώντας και άλλα εντυπωσιακά φυσικά φαινόμενα, τα κυριότερα των οποίων είναι (εικ. 2.9):



Εικ. 2.9. Εντυπωσιακά γεωθερμικά φαινόμενα στην επιφάνεια της γης (υδροθερμικοί κρατήρες, θερμοπηδάκες, ατμίδες, θερμές πηγές).

- i. Οι «υδροθερμικοί κρατήρες» ύστερα από έκρηξη εγκλωβισμένων σε μικρό βάθος υπέρθερμων γεωθερμικών ρευστών, τα οποία ανατινάζουν τα υπερκείμενα πετρώματα.
- ii. Οι «θερμοπίδακες» ή “geysers” είναι δημιουργήματα υπέρθερμων υπογείων νερών που κυκλοφορούν σε μικρό βάθος. Αυτά τα νερά κάθε τόσο αποκτούν πίεση ικανή να προκαλέσει «έκρηξη» νερού και ατμού, που εκτινάσσονται σε αρκετές δεκάδες μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.
- iii. Οι «ατμίδες» είναι έξοδοι υπέρθερμου ατμού που βγαίνει από ρωγμές του εδάφους χωρίς πίεση, αλλά με εντυπωσιακή σταθερότητα, μαζί με ηφαιστειακά αέρια. Γύρω από τις ατμίδες αποτίθενται άλατα και ορυκτά που περιέχονται στον ατμό. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις ξεπερνούν τους 600 °C, αλλά συνήθως έχουν θερμοκρασία γύρω στους 100 °C.
- iv. Οι «θερμές πηγές» είναι έξοδοι ζεστού νερού, κάτω από ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες, με θερμοκρασία μέχρι 100 °C. Σε μερικές περιπτώσεις έχουν εντυπωσιακή παροχή. Οι πηγές των Θερμοπυλών είναι εντυπωσιακές και ενεργές από την εποχή του Λεωνίδα, συνεχίζουν να ρέουν και σήμερα με σημαντική παροχή (1.000 m³/h) και αποδεικνύουν την ανανεωσιμότητα του ενεργειακού αυτού πόρου.

Από διάφορες μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο (εικ. 2.7) προκύπτει ότι η μέση θερμική ροή της γης ανέρχεται περίπου 1,43.10⁻¹ cal/cm²/sec. Η τιμή αυτή διαφοροποιείται σε περιοχές με διαφορετική τεκτονική καταπόνηση, ανάλογα με την ηλικία των σχηματισμών και ανάλογα με το πέτρωμα (πυριγενή ή μη) και την ηφαιστειακή δραστηριότητα της περιοχής.

Περιοχές με τιμές θερμικής ροής μεγάλες που μπορούν να φτάσουν και πολλές φορές εξαπλάσιο της μέσης είναι οι ακόλουθες (Φυτίκας, 2000):

- Περιοχές ωκεάνιας απομάκρυνσης όπου τμήματα του ωκεάνιου φλοιού απομακρύνονται μεταξύ τους. Η αυξημένη θερμική ροή είναι αποτέλεσμα της μεταφορικής κίνησης του μανδύα από τα βάθη προς την επιφάνεια
- Περιοχές βύθισης των λιθοσφαιρικών πλακών, όπου τεράστιες ποσότητες μαγμάτων ανεβαίνουν από το μανδύα.
- Ηπειρωτικές περιοχές διογκώσεων (swellings) ή θερμών κηλίδων (hotspots) Σε μεγάλα βάθη του μανδύα, αναπτύσσονται σταθερές μεταφορικές κινήσεις που δημιουργούν μερικά σταθερά θερμά σημεία
- Περιοχές ηπειρωτικών βυθισμάτων. Τα μεγάλα τεκτονικά βυθίσματα παρουσιάζουν και αυτά ανωμαλίες θερμικής ροής χωρίς βέβαια να φτάνουν σε υψηλές τιμές.

Οι παραπάνω αναφερόμενες περιοχές με αυξημένη θερμική ροή σχετίζονται με ευρείας κλίμακας γεωδυναμικά φαινόμενα, όπως και διάφοροι άλλοι δευτερεύοντες παράγοντες όπως η ηλικία των πετρωμάτων, όπου τα παλαιότερα παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές θερμικής ροής. Στην εικ. 2.10 απεικονίζεται η θερμική ροή στον Ελληνικό χώρο.

2.3. Γεωθερμικά συστήματα – Γεωθερμικά πεδία

Γεωθερμικό σύστημα, χαρακτηρίζεται ένα «σύστημα», που βρίσκεται σε ένα γεωλογικό χώρο στον ανώτερο φλοιό της γης και αποτελεί μια εκμεταλλεύσιμη ενεργειακή πηγή, η οποία σύμφωνα με τον (Hochstein, 1990) αποτελείται από «κινούμενο νερό» το οποίο μεταφέρει θερμότητα από μια «πηγή» σε μια «δεξαμενή» θερμότητας, που συνήθως είναι μια ελεύθερη επιφάνεια. Όταν αυτό το σύστημα εντοπίζεται (οριοθετείται) σε συγκεκριμένη περιοχή και στο οποίο η ποσότητα, η θερμοκρασία και το βάθος των γεωθερμικών ρευστών, χαρακτηρίζονται εκμεταλλεύσιμα (κυρίως με οικονομικά κριτήρια), αυτό το σύστημα προσδιορίζεται ως

γεωθερμικό πεδίο (γεωγραφικός προσδιορισμός του γεωθερμικού συστήματος). Δηλαδή ο όρος *γεωθερμικό πεδίο* αποτελεί ένα γεωγραφικό προσδιορισμό, που συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια περιοχή στην οποία παρουσιάζεται κάποια επιφανειακή γεωθερμική δραστηριότητα. Στις περιπτώσεις όπου δεν παρατηρείται δραστηριότητα στην επιφάνεια, ο όρος αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσει μια περιοχή που αντιστοιχεί στο γεωθερμικό ταμιευτήρα, ο οποίος βρίσκεται στο υπέδαφος ακριβώς κάτω από την οριοθετούμενη περιοχή (Axelsson and Gunnlaugsson, 2000).



Εικ. 2.10. Προκαταρκτικός χάρτης θερμικής ροής Ελλάδας, σε $m Wm^2$ (Fytikas and Kolios, 1979).

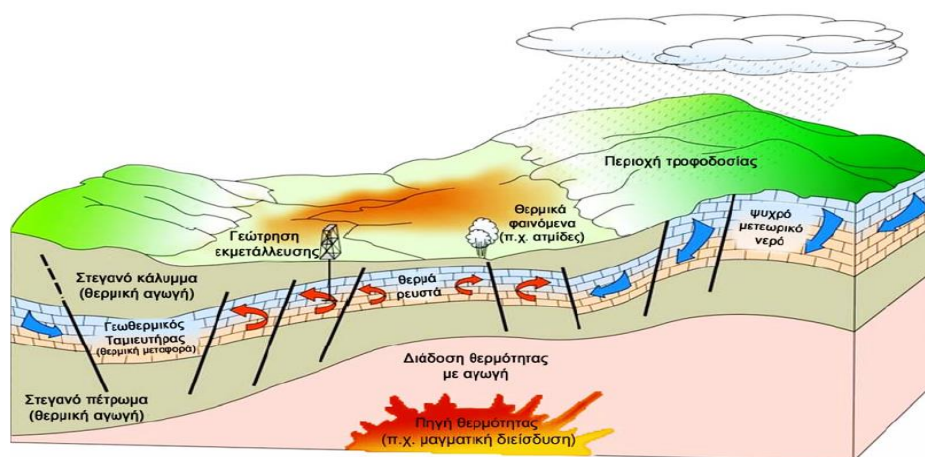
Τα γεωθερμικά συστήματα ή γεωθερμικά πεδία εντοπίζονται στις περιοχές με κανονική ή λίγο μεγαλύτερη από τη μέση γήινη γεωθερμική βαθμίδα, και κυρίως στις περιοχές γύρω από τα περιθώρια των τεκτονικών πλακών (εικ.2.4 και 2.6), όπου η βαθμίδα μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερη της μέσης τιμής.

Στην πρώτη περίπτωση (περιοχές με κανονική ή λίγο μεγαλύτερη ΓΒ), τα γεωθερμικά συστήματα χαρακτηρίζονται από χαμηλές θερμοκρασίες, που συνήθως δεν ξεπερνούν τους $100^{\circ}C$ σε οικονομικά και προσβάσιμα βάθη.

Στη δεύτερη περίπτωση (περιθώρια τεκτονικών πλακών), οι θερμοκρασίες μπορεί να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, από σχετικά χαμηλές τιμές μέχρι και μεγαλύτερες από $400^{\circ}C$.

Τι είναι όμως ένα «γεωθερμικό σύστημα- γεωθερμικό πεδίο» και τι συμβαίνει μέσα σε αυτό; Σχηματικά μπορεί να περιγραφεί ως «ένα σύστημα» που βρίσκεται σε περιορισμένο χώρο στον ανώτερο φλοιό της γης και αποτελείται από μια πηγή θερμότητας (εστία θερμότητας), η οποία τη μεταφέρει σε μια δεξαμενή θερμότητας (ταμιευτήρα), που συνήθως είναι μια ελεύθερη επιφάνεια (Hochstein, 1990). Το νερό (ρευστό) του ταμιευτήρα μετακινείται προς τα επάνω μεταφέροντας τη θερμότητα σε μικρότερα βάθη ή και μέχρι την επιφάνεια. Έτσι λοιπόν, ένα γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από τρία στοιχεία: την εστία θερμότητας, τον ταμιευτήρα και το ρευστό, το οποίο λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας (εικ. 2.11).

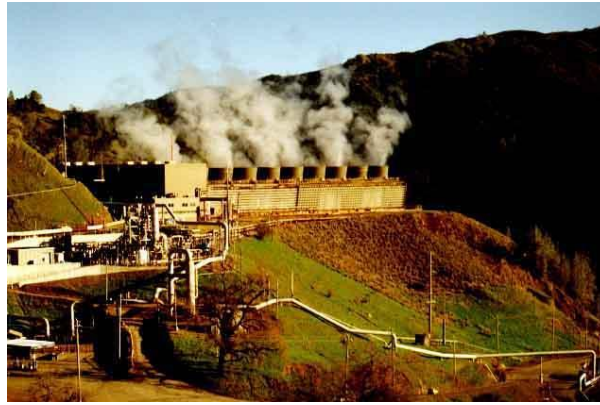
Από τα τρία στοιχεία ενός γεωθερμικού συστήματος, η εστία θερμότητας είναι το μόνο που απαραίτητως πρέπει να έχει φυσική προέλευση. Εάν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές, τα άλλα δύο στοιχεία μπορεί να είναι και «τεχνητά». Για παράδειγμα, τα γεωθερμικά ρευστά που αντλούνται από τον ταμιευτήρα και χρησιμοποιούνται ως η κινητήρια δύναμη ενός γεωθερμικού ατμοστρόβιλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν μετά την ενεργειακή εκμετάλλευσή τους να επανεισαχθούν στον ταμιευτήρα μέσω συγκεκριμένων γεωτρήσεων επανεισαγωγής (injection wells). Έτσι λοιπόν, η φυσική τροφοδοσία ενός ταμιευτήρα μπορεί να συνοδευθεί και να συμπληρωθεί από μια τεχνητή επανατροφοδοσία.



Εικ. 2.11. Σχηματική αναπαράσταση ενός ιδανικού Γεωθερμικού Συστήματος (Dickson and Fanelli, 2005, με τροποποιήσεις από Τζάνης, 2010).

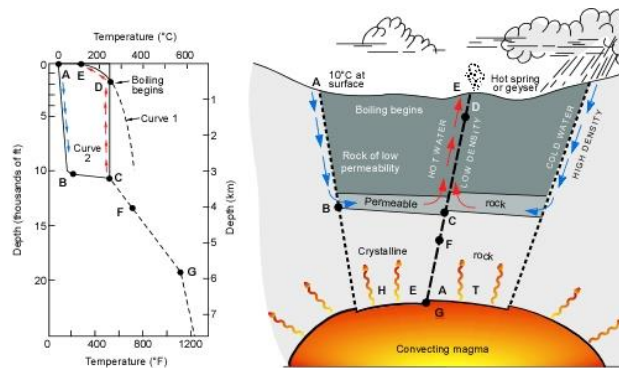
Εδώ και αρκετά χρόνια, η τεχνική επανεισαγωγής των ρευστών στον ταμιευτήρα εφαρμόζεται σε πολλές περιοχές του κόσμου, ως ένα μέσο δραστηκής μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη λειτουργία των γεωθερμικών εγκαταστάσεων. Η χρήση των γεωτρήσεων επανεισαγωγής για τεχνητή επανατροφοδοσία μπορεί επίσης να βοηθήσει στην ανανέωση και συντήρηση κάποιων «παλιών» ή «εξαντλημένων» γεωθερμικών πεδίων. Ως παράδειγμα αναφέρεται η περίπτωση του γεωθερμικού πεδίου «The Geysers» της Καλιφόρνιας (ΗΠΑ), ενός από τα μεγαλύτερα γεωθερμικά πεδία στον κόσμο, όπου παρατηρήθηκε δραστηκή μείωση της παραγωγής στα τέλη της δεκαετίας του 1980, λόγω ακριβώς της έλλειψης ρευστών στον ταμιευτήρα. Το 1997 ξεκίνησε ένα πρόγραμμα, το Southeast Geysers Effluent Recycling Project, που αποσκοπούσε στη μεταφορά επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων στο γεωθερμικό πεδίο από μια απόσταση 48 km. Το πρόγραμμα αυτό οδήγησε στην επαναλειτουργία αρκετών εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (εικ. 2.12), τα οποία είχαν εγκαταλειφθεί εξαιτίας της έλλειψης ρευστών.

Για την προστασία του «ταμιευτήρα» από θερμικές απώλειες, τις περισσότερες φορές είναι απαραίτητη η παρουσία ενός καλύμματος με πετρώματα αδιαπέρατα ή με πολύ χαμηλή διαπερατότητα τα οποία υπέρκεινται του ταμιευτήρα και αποτρέπουν έτσι τη διαφυγή των θερμών ρευστών του ταμιευτήρα με γρήγορη μεταφορά προς τα πάνω. Πάντως η απώλεια θερμότητας με αγωγή δεν αποτρέπεται από το αδιαπέρατο κάλυμμα.



Εικ. 2.12. Εργαστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής Ενέργειας στο γεωθερμικό πεδίο the Geysers της Καλιφόρνιας (ΗΠΑ).

Η θερμή πηγή μπορεί να είναι πολύ υψηλής θερμοκρασίας (>600 °C) από μαγματική διείδυση που έχει φτάσει σε μικρά βάθη (5-10 Km) ή μπορεί να είναι, όπως σε ορισμένα, χαμηλής θερμοκρασίας πεδία, η γηγενής θερμοκρασία, που αυξάνει με το βάθος. Ο ταμιευτήρας σχηματίζεται από θερμά υδροπερατά πετρώματα από τα οποία η θερμότητα μπορεί να αποσπαστεί με τα ρευστά που κυκλοφορούν. Σε πολλές αλλά όχι σε όλες τις περιπτώσεις ο ταμιευτήρας συνδέεται με κάποια επιφανειακή περιοχή τροφοδοσίας, η οποία ανανεώνει το σύνολο ή μέρος των ρευστών τα οποία εμφανίζονται στην επιφάνεια ως φυσικά (πηγές) ή αποσπώνται με φρέατα ή γεωτρήσεις (εικ. 2.13).



Εικ. 2.13. Πρότυπο (μοντέλο) ενός γεωθερμικού συστήματος.(Η γραμμή (1) είναι η καμπύλη αναφοράς του σημείου ζέσεως του καθαρού νερού. Η καμπύλη (2) δείχνει τη θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος μια τυπικής διαδρομής κυκλοφορίας του ρευστού από το σημείο A (τροφοδοσία) προς το σημείο E (αποφόρτιση) (White, 1973).

Στην εικόνα 2.13, αναπαρίσταται ένα πρότυπο μοντέλο γεωθερμικού συστήματος με τη γεωθερμική του βαθμίδα. Η καμπύλη ABCDE αποτελεί το προφίλ κατανομής της θερμοκρασίας κατά μήκος της τυπικής κυκλικής διαδρομής του ρευστού από το σημείο τροφοδοσίας A μέχρι το σημείο εκτόνωσης E στην επιφάνεια της γης. Ο πορώδης εδαφικός σχηματισμός δίνει τη δυνατότητα στο ρευστό να διεισδύσει στο έδαφος φτάνοντας στο σημείο B, όπου θερμαίνεται καθώς συναντά τα θερμά ρηγματωμένα πετρώματα και εμφανίζει την τάση ανόδου λόγω μείωσης της πυκνότητάς του. Στη συνέχεια το νερό βρίσκοντας ρήγμα διαφυγής στο σημείο C οδηγείται προς την επιφάνεια. Κατά την ανοδική του πορεία συναντά

στο σημείο D την καμπύλη αναφοράς του σημείου ζέσεως του καθαρού νερού όπου αρχίζει να μετατρέπεται σε αέρια φάση και εκτονώνεται πάλι στην επιφάνεια τη γης στο σημείο E, με τη μορφή ατμίδων, θερμοπιδάκων και άλλων μορφών.

Συχνά γίνεται διάκριση ανάμεσα στα γεωθερμικά συστήματα όπου το κυρίαρχο ρευστό είναι το νερό στην υγρή φάση και σε εκείνα όπου το κυρίαρχο ρευστό είναι ο ατμός (White, 1973). Στα συστήματα όπου επικρατεί το νερό, η υγρή φάση είναι αυτή που ελέγχει συνεχώς την πίεση. Μέσα στη φάση αυτή μπορεί να περιέχονται και κάποια αέρια με τη μορφή μικρών φυσαλίδων. Αυτά τα γεωθερμικά συστήματα, των οποίων οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 125 °C μέχρι 225 °C, είναι τα πλέον συνηθισμένα παγκοσμίως.

Ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, μπορούν να παράγουν θερμό νερό, μίγμα νερού και ατμού, υγρό ατμό, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις ξηρό ατμό. Στα συστήματα όπου το κυρίαρχο ρευστό είναι ο ατμός, το υγρό νερό και ο ατμός συνήθως συνυπάρχουν στον ταμιευτήρα, με τον ατμό να λειτουργεί ως η φάση που ελέγχει συνεχώς την πίεση. Τέτοιου τύπου γεωθερμικά συστήματα, τα πιο γνωστά εκ των οποίων είναι το Larderello στην Ιταλία και το The Geysers (οι θερμοπίδακες) στην Καλιφόρνια (ΗΠΑ), είναι κατά βάση σπάνια και συνιστούν συστήματα υψηλής θερμοκρασίας. Κατά κύριο λόγο παράγουν ξηρό έως υπέρθερμο ατμό (εικ.2.14).



Εικ. 2.14. Θερμοπίδακας στη φάση έκρηξης ατμού στο Εθνικό Πάρκο Yellowstone των ΗΠΑ.

Οι όροι υγρός, ξηρός και υπέρθερμος ατμός, οι οποίοι χρησιμοποιούνται συχνά από τους γεωθερμικούς, για καλύτερη κατανόηση συσχετίζονται με το παράδειγμα μιας κατσαρόλας γεμάτης νερό, μέσα στην οποία η πίεση μπορεί να κρατηθεί σταθερή και ίση με 1 atm (101,3 kPa). Εάν θερμάνουμε το νερό, τότε μόλις φτάσει στη θερμοκρασία των 100 °C (=σημείο ζέσεως για πίεση ίση με 1atm) θα αρχίσει να βράζει και θα περάσει από την υγρή στην αέρια φάση του ατμού. Μετά από κάποια ώρα, μέσα στην κατσαρόλα το υγρό και ο ατμός θα συνυπάρχουν. Ο υδρατμός συνυπάρχει με το υγρό, βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με αυτό, αποτελώντας ουσιαστικά τον υγρό ατμό. Εάν συνεχίσουμε να θερμαίνουμε την κατσαρόλα, διατηρώντας την πίεση στη 1 atm, το υγρό θα εξατμιστεί εντελώς και τελικά η κατσαρόλα θα περιέχει μόνο ατμό. Αυτός αποκαλείται ξηρός ατμός. Και ο υγρός και ο ξηρός ατμός αποκαλούνται επίσης «κορεσμένοι ατμοί».

Οι διεργασίες που μόλις περιγράφηκαν πιθανώς να φαίνονται πολύ απλές, όμως η κατασκευή ενός καλού προτύπου (μοντέλου), το οποίο να αντιστοιχεί σε ένα πραγματικό γεωθερμικό σύστημα, είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί. Μια τέτοια εργασία απαιτεί πολύπλευρες ικανότητες, ειδικές γνώσεις και μεγάλη εμπειρία, ιδιαίτερα όταν αφορά

συστήματα υψηλής θερμοκρασίας. Εξάλλου, τα γεωθερμικά συστήματα εμφανίζονται στη φύση με πάρα πολλές ιδιαιτερότητες και ιδιομορφίες, οι οποίες σχετίζονται με διάφορους συνδυασμούς γεωλογικών, φυσικών και χημικών *χαρακτηριστικών που μπορεί να οδηγήσουν σε διάφορους τύπους συστημάτων.*

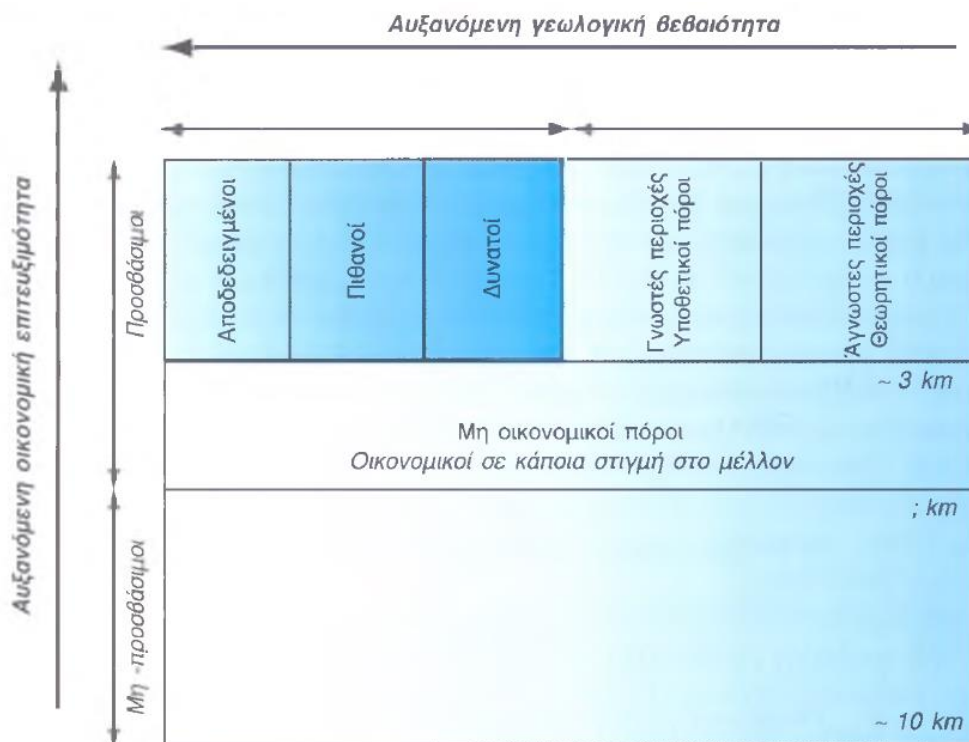
2.3.1. Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων – γεωθερμικών πεδίων

Ως προς την ταξινόμηση των γεωθερμικών συστημάτων δεν υπάρχει δυστυχώς κάποια διεθνώς καθιερωμένη ορολογία που να χρησιμοποιείται από το σύνολο της γεωθερμικής κοινότητας, ώστε να διευκολύνεται η αμοιβαία κατανόηση και συνεννόηση. Στη συνέχεια παρατίθενται μερικοί από τους πλέον κοινώς χρησιμοποιούμενους ορισμούς και ταξινομήσεις σχετικά με τη γεωθερμία.

Ο όρος «Γεωθερμικός Πόρος» χρησιμοποιείται αρκετά για την διάκριση των συστημάτων. Ως γεωθερμικοί πόροι αναφέρονται στη προσβάσιμη θερμική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη κάτω από συγκεκριμένη περιοχή μεταξύ της επιφάνειας της γης και ενός συγκεκριμένου (προσβάσιμου) βάρους στο φλοιό. Η προσβάσιμη πηγή περιλαμβάνει τον ωφέλιμο προσβάσιμο πόρο (*useful accessible resource base*), εκείνο δηλαδή το τμήμα της γεωθερμικής ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί με οικονομικά συμφέροντα και νόμιμο τρόπο, κάποια στιγμή στο σχετικά άμεσο μέλλον. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τους ταυτοποιημένους οικονομικά συμφέροντες πόρους (*identified economic resources*), οι οποίοι είναι γνωστοί και ως αποθέματα (*reserves*) και αναφέρονται στις ποσότητες της γεωθερμικής ενέργειας μιας συγκεκριμένης περιοχής που μπορούν να αξιοποιηθούν με ανταγωνιστικό κόστος σε σχέση με τις άλλες πηγές ενέργειας, και οι οποίοι πόροι είναι γνωστό ότι υπάρχουν και έχουν προκύψει ως αποτέλεσμα γεωτρητικών, γεωχημικών, γεωφυσικών και άλλων γεωλογικών ερευνών-μελετών. Το Σχήμα 2.5 παρουσιάζει (σύμφωνα με τους Dikson and Fanelli, 1995) σε γραφική μορφή τους παραπάνω και άλλους όρους, που μπορούν να χρησιμοποιούνται από τους ειδικούς στη γεωθερμία.

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.

Συνήθως τα γεωθερμικά πεδία (πεδία συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής) ταξινομούνται με βάση γεωλογικά, υδρολογικά και θερμικά χαρακτηριστικά τους. Το πλέον συνηθισμένο κριτήριο για την ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων είναι αυτό που βασίζεται στην ενθαλπία των γεωθερμικών ρευστών, τα οποία λειτουργούν ως ο φορέας «μεταφοράς» της θερμότητας από τα βαθιά και θερμά πετρώματα προς την επιφάνεια. Η *ενθαλπία*, η οποία σε γενικές γραμμές, όπως έχει προαναφερθεί, θεωρείται ότι είναι ανάλογη της θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται για να εκφράσει την περιεχόμενη θερμική ενέργεια των ρευστών και δίνει μια γενική εικόνα της ενεργειακής «αξίας» τους. Οι γεωθερμικοί πόροι διακρίνονται σε χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας (ή θερμοκρασίας), σύμφωνα με το ενεργειακό τους περιεχόμενο και τις πιθανές μορφές αξιοποίησής τους.



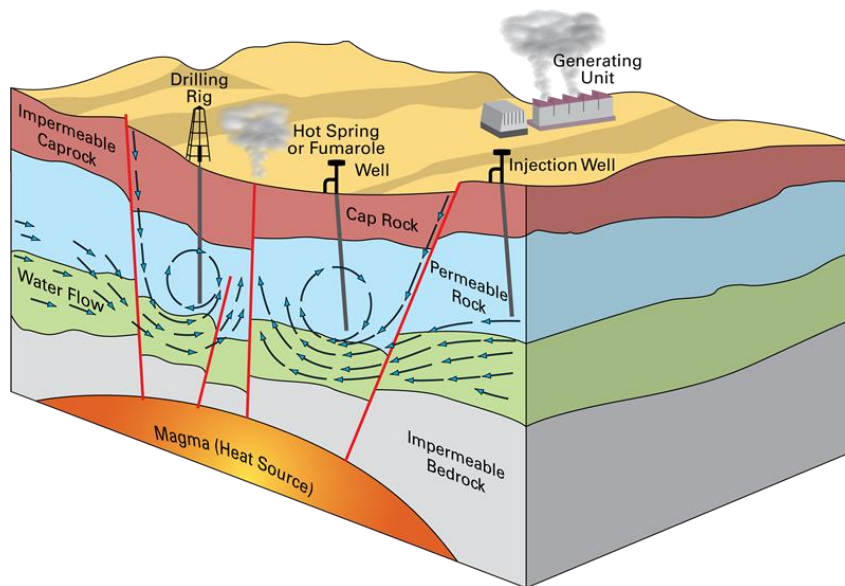
Σχήμα 2.5. Γραφική παράσταση των διαφόρων κατηγοριών γεωθερμικών πόρων (Φυτίκας, 2004).

2.3.1.1. Ταξινόμηση με βάση την κυκλοφορία ή όχι γεωθερμικού ρευστού

Τα γεωθερμικά συστήματα μπορούν να διακριθούν σύμφωνα με τον (Bowen 1989) σε δυο κύριες ομάδες ανάλογα με τη κυκλοφορία ή όχι γεωθερμικού ρευστού δηλαδή σε μεταφορικά (convective) και μεταδοτικά (conductive) γεωθερμικά συστήματα. Η διάκριση αυτή είναι ευρέως αποδεκτή.

ι. Μεταφορικά (convective) γεωθερμικά συστήματα.

Αυτά χαρακτηρίζονται από φυσική κυκλοφορία του ενδιάμεσου ρευστού, ούτως ώστε το πλείστο της θερμότητας να μεταφέρεται από αυτό και μικρό μόνο ποσοστό να μεταφέρεται δια αγωγής μέσα από τη μάζα των πετρωμάτων. Η μεταφορά θερμότητας τείνει να αυξήσει την θερμοκρασία του ανωτέρου μέρους του κυκλοφοριακού συστήματος και να ελαττώσει την θερμοκρασία του κατωτέρου μέρους. Στη περίπτωση αυτή τα θερμά νερά που έχουν μεταφορική προέλευση ακολουθούν τον κύκλο κάθοδος – θέρμανση – άνοδος με τη βοήθεια των επαγωγικών ρευμάτων. Συνεπώς για τη δημιουργία ενός τέτοιου συστήματος απαραίτητη προϋπόθεση είναι να υπάρχουν, (α) κατάλληλοι γεωλογικοί σχηματισμοί και τεκτονικές δομές που θα επιτρέπουν τη κυκλοφορία του επιφανειακής προέλευσης νερού βαθύτερα, (β) πηγή θερμότητας που θα προσφέρει την απαραίτητη θερμική ενέργεια, (γ) ικανή ποσότητα ρευστού, (δ) αρκετός χρόνος και χώρος για την ανταλλαγή της θερμότητας μεταξύ ρευστών και πετρώματος και (ε) δυνατότητα ανόδου του θερμού ρευστού προς τα πάνω κοντά στην επιφάνεια (εικ. 2.15). Μέσα στο ταμιευτήρα το νερό μετακινείται εξ αιτίας της διαφοράς πυκνότητας που προκαλείται από τη θερμοκρασία, μεταφέροντας τη θερμότητα από τα χαμηλότερα προς τα υψηλότερα τμήματα του ταμιευτήρα (Lippmann and Bodvarsson, 1987).



Εικ. 2.15. Σχηματικό μεταφορικό υδροθερμικό γεωθερμικό σύστημα (Convertnews, 2015 <http://convertnews.com/>).

Σύμφωνα με το (Bowen 1989) τα Μεταφορικά συστήματα μπορούν να διακριθούν περαιτέρω σε: Υδροθερμικά και Κυκλοφοριακά

1. Υδροθερμικά συστήματα εντός πετρωμάτων υψηλού πορώδους και διαπερατότητας
 Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τα συστήματα που χαρακτηρίζονται από υψηλό πορώδες αλλά και υψηλή διαπερατότητα, ενώ όλα σχεδόν τα γεωθερμικά συστήματα υψηλών θερμοκρασιών ανήκουν στη κατηγορία αυτή. Η πηγή θερμότητας έχει τη μορφή πρόσφατων μαγματικών διεϊσδύσεων (700-1299 °C) σε μικρό σχετικά βάθος, που απαντώνται σε συγκεκριμένα γεωλογικά περιβάλλοντα σύγκλισης και απόκλισης τεκτονικών πλακών, ηπειρωτικών τάφρων και θερμών κηλίδων (hotspots), που υπερθερμαίνουν τα περιβάλλοντα πετρώματα μετά από τη διεϊσδύση τους, με αποτέλεσμα την αύξηση προς την επιφάνεια της ροής θερμότητας, η οποία μπορεί δυνατόν να φθάσει (και υπερβεί) τα αρκετά mW/m^2 .

Στα συστήματα όπου κυριαρχεί το νερό δημιουργούνται ρεύματα μεταφοράς νερού, που μεταφέρουν τη θερμότητα από τη βαθιά πηγή σε ένα πιο αβαθή ταμιευτήρα. Ο πυθμένας του χώρου μεταφοράς μπορεί να θερμαίνεται με αγωγή από βαθύτερα θερμά πετρώματα (εικ.2.15).

Τα συστήματα νερού είναι τα συνηθέστερα και, ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που επικρατούν, μπορούν να παραγάγουν θερμό νερό (σε θερμοκρασίες <100 °C) ή μίγμα νερού-ατμού (διφασικά συστήματα). Η θερμική εστία των συστημάτων αυτών είναι συνήθως λιωμένο ή πρόσφατα στερεοποιημένο πέτρωμα που βρίσκεται σε βάθος από 3 μέχρι 10 km. Η μεταφορά της θερμότητας επιτελείται με συναγωγή υπόγειων νερών. Ισοτοπικές μελέτες έχουν δείξει ότι το μεγαλύτερο μέρος του νερού και του ατμού που παράγονται είναι μετεωρικής ή επιφανειακής προέλευσης.

Ένα σύστημα θερμού νερού αποκτά οικονομικό ενδιαφέρον για άμεσες χρήσεις όταν ο ταμιευτήρας του βρίσκεται το πολύ σε βάθος 2 km, εφόσον η παροχή του νερού είναι ικανοποιητική (μεγαλύτερη από $100 m^3/h$) και εάν η περιεκτικότητα σε άλατα είναι σχετικά χαμηλή (μικρότερη από 50 g/L). Τα γνωστότερα γεωθερμικά συστήματα θερμού νερού που αξιοποιούνται σε άμεσες χρήσεις βρίσκονται στη λεκάνη του Παρισιού στη Γαλλία, η

Παννονική λεκάνη στην Ουγγαρία, το Klamath Falls στις Η.Π.Α. και στην κοιλάδα του ποταμού Πάδου στην Ιταλία.

Περίπου το 90% των υδροθερμικών συστημάτων που αξιοποιούνται (σε σχέση με τη θερμότητα που λαμβάνεται) είναι συστήματα μίγματος νερού-ατμού (Barbier, 2002). Τα νερά αυτά περιέχουν μεγάλες ποσότητες διαλυμένων αλάτων (από 1 μέχρι και 350 g/L), τα οποία προκαλούν προβλήματα επικαθίσεων και διάβρωσης στις εγκαταστάσεις και κάνουν απαραίτητη την επανεισαγωγή των νερών στον ταμιευτήρα. Μερικά από τα σπουδαιότερα πεδία μίγματος νερού-ατμού είναι: Latera (Ιταλία), Kizildere (Τουρκία), Azores (Πορτογαλία), Krafla (Ισλανδία), κ.α. (Πίνακας 2.2).

Στα συστήματα ατμού, νερό και ατμός συνυπάρχουν στον ταμιευτήρα, αν και στην επιφάνεια εξέρχεται μόνο ξηρός ή υπέρθερμος ατμός, που περιέχει και μικρές ποσότητες μη συμπυκνώσιμων αερίων. Τα συστήματα αυτά είναι γενικά σπάνια και αρκετά από αυτά έχουν αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, όπως για παράδειγμα τα πεδία Larderello και Monte Amiata (Ιταλία), The Geysers (ΗΠΑ), Kamojang και Darajat (Ινδονησία) και Matsukawa (Ιαπωνία). Λόγω φυσικής συναγωγής, νερά συνήθως υψηλής αλατότητας ανέρχονται σε συγκεκριμένο βάθος, όπου λαμβάνει χώρα εξάτμιση. Ο παραγόμενος ατμός κινείται προς τα πάνω μέσα από ρωγμές και μπορεί να γίνει υπέρθερμος σε επαφή με τα θερμά πετρώματα. Πιστεύεται ότι στα συστήματα αυτά, τα πετρώματα έχουν μικρή διαπερατότητα, επειδή προφανώς σε διαφορετική περίπτωση τα νερά σε παρακείμενους σχηματισμούς θα κατέκλυζαν τον ταμιευτήρα. Οι θερμοκρασίες και οι ενθαλπίες του ατμού από τα πεδία ατμού ποικίλλουν αρκετά.

Πίνακας 2.2: Σπουδαιότερα παγκόσμια Γεωθερμικά Συστήματα ατμού, και νερού ατμού με τη μέγιστη δυνατή θερμοκρασία ταμιευτήρα.

Γεωθερμικό πεδίο	Θερμοκρασία στην κεφαλή, °C (μέγιστη θερμοκρασία ταμιευτήρα, °C)	Μέγιστη ενθαλπία (kJ/kg)
Συστήματα Ατμού		
The Geysers (ΗΠΑ)	237 (310)	3000
Larderello (Ιταλία)	200 (420)	3100
Monte Amiata (Ιταλία)	170 (344)	2600
Matsukawa (Ιαπωνία)	220	
Kamojang (Ινδονησία)	175 (248)	2780
Συστήματα Νερού-Ατμού		
Wairakei (Νέα Ζηλανδία)	230 (290)	1175
Broadlands (Νέα Ζηλανδία)	255 (326)	1175
Imperial Valley (Η.Π.Α.)	160 (370)	1000
Cerro Prieto (Μεξικό)	300 (388)	2430
Los Azufres (Μεξικό)	175 (300)	2700
Momotombo (Νικαράγουα)	210 (327)	2700
Tiwi (Φιλιπίνες)	273 (309)	2800
Hatchobaru (Ιαπωνία)	250 (308)	2250
Krafla (Ισλανδία)	205 (344)	2680
Μήλος	225 (320)	
Νίσυρος	240 (350)	

Σε γενικές γραμμές, διακρίνονται δύο επί πλέον υποδιαιρέσεις της κατηγορίας αυτής, αναλόγως του *κυρίου ενδιαμέσου ρευστού*. Τα συστήματα ατμού (υγρού ή ξηρού) και τα κοινότερα υγρά συστήματα, δηλαδή συχνά γίνεται διάκριση ανάμεσα στα γεωθερμικά συστήματα όπου το κυρίαρχο ρευστό είναι το νερό στην υγρή φάση (liquid dominated systems) και σε εκείνα όπου το κυρίαρχο ρευστό είναι ο ατμός (vapour dominated systems ή dry steam systems) (White, 1973). Σύμφωνα με τους (Dickon and Fanelli, 1995) στα συστήματα όπου επικρατεί το νερό, η υγρή φάση είναι αυτή που ελέγχει συνεχώς την πίεση. Μέσα στη φάση αυτή μπορεί να περιέχονται και κάποια αέρια με τη μορφή μικρών φυσαλίδων. Αυτά τα γεωθερμικά συστήματα, των οποίων οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 125 °C μέχρι 225 °C, είναι τα πλέον συνηθισμένα παγκοσμίως. Ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, μπορούν να παράγουν θερμό νερό, μίγμα νερού και ατμού, υγρό ατμό, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις ξηρό ατμό. Στα συστήματα όπου το κυρίαρχο ρευστό είναι ο ατμός, το υγρό νερό και ο ατμός συνήθως συνυπάρχουν στον ταμιευτήρα, με τον ατμό να λειτουργεί ως η φάση που ελέγχει συνεχώς την πίεση. Τέτοιου τύπου γεωθερμικά συστήματα, τα πιο γνωστά εκ των οποίων είναι το Larderello στην Ιταλία και το The Geysers στην Καλιφόρνια (ΗΠΑ) (εικ.2.16), είναι κατά βάση σπάνια και συνιστούν συστήματα υψηλής θερμοκρασίας. Κατά κύριο λόγο παράγουν ξηρό έως υπέρθερμο ατμό.

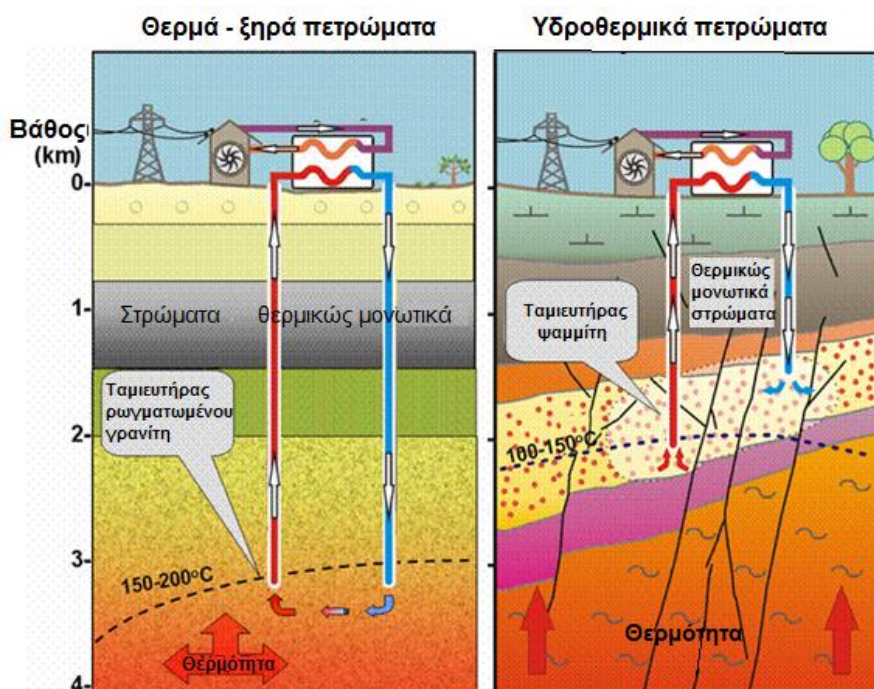


Εικ. 2.16. Γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας, αριστερά: Larderello στην Ιταλία, δεξιά: Steamboat Geysers στο Yellowstone National Park στις ΗΠΑ.

2. Κυκλοφορικά συστήματα εντός πετρωμάτων χαμηλού πορώδους, ρηξιγενούς υδραυλικής διαπερατότητας, σε περιοχές υψηλής ως και κανονικής περιφερειακής θερμικής ροής. Τα κυκλοφορικά αυτά συστήματα απαντώνται σε γεωλογικά περιβάλλοντα με χαμηλό πορώδες και μικρή δευτερογενή περατότητα και μπορούν να αναπτυχθούν σε περιοχές που δεν έχουν πρόσφατες μαγματικές διεισδύσεις και προέρχονται από τη βαθιά κυκλοφορία του μετεωρικού νερού σε περιοχές κανονικής ή υψηλής θερμικής ροής. Είναι προφανές ότι η δημιουργία τέτοιων συστημάτων προϋποθέτει τη παρουσία ρωγμών και ζωνών διάρρηξης επαρκούς διαπερατότητας που να επιτρέπουν τη κυκλοφορία νερού. Η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος της θερμικής ροής και σε κάποιο βαθμό και από το βάθος μέχρι το οποίο είναι δυνατή η κυκλοφορία του γεωθερμικού ρευστού.

Υπάρχουν πολυάριθμα τέτοια κυκλοφορικά συστήματα σε όλο τον κόσμο, τα οποία συναντώνται σε μια τεράστια ποικιλία γεωλογικών περιβαλλόντων, όπου εμπλέκονται πολλοί διαφορετικοί τύποι πετρωμάτων. Τα πετρώματα αυτά χαρακτηρίζονται από χαμηλό ενεργό πορώδες και διαπερατότητα. Ενώ η εκφόρτιση θερμών ρευστών σε τέτοια γεωθερμικά συστήματα γίνεται κοντά ή ακριβώς στη διασταύρωση ρηγμάτων ή ρηξιγενών ζωνών, η τροφοδοσία του γεωθερμικού συστήματος με μετεωρικό νερό γίνεται από την ευρύτερη και

πιο εκτεταμένη περιοχή. Ο χρόνος παραμονής του θερμού νερού μπορεί να φτάσει τα 1000 χρόνια ή και περισσότερο, συνήθως η παραμονή είναι γύρω από τα 105 χρόνια.



Εικ. 2.17. Γεωθερμικά συστήματα σε θερμά ξηρά πετρώματα και σε ιζηματογενής υδροφόρους (Clean Energy Australasia (CEA), 2012).

ii. Μεταδοτικά (conductive) γεωθερμικά συστήματα.

1. Υδροφορείς χαμηλής θερμοκρασίας / ενθαλπίας εντός ιζημάτων υψηλού πορώδους / διαπερατότητας (εικ.2.17), σε περιοχές κανονικής ως ελαφρώς υψηλής θερμικής ροής, συμπεριλαμβανομένων και των λεγομένων «γεωπεπιεσμένων ζωνών».

2. Θερμά ξηρά πετρώματα με συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, χαμηλής διαπερατότητας (εικ. 2.17).

2.3.1.2. Ταξινόμηση με βάση την ενθαλπία

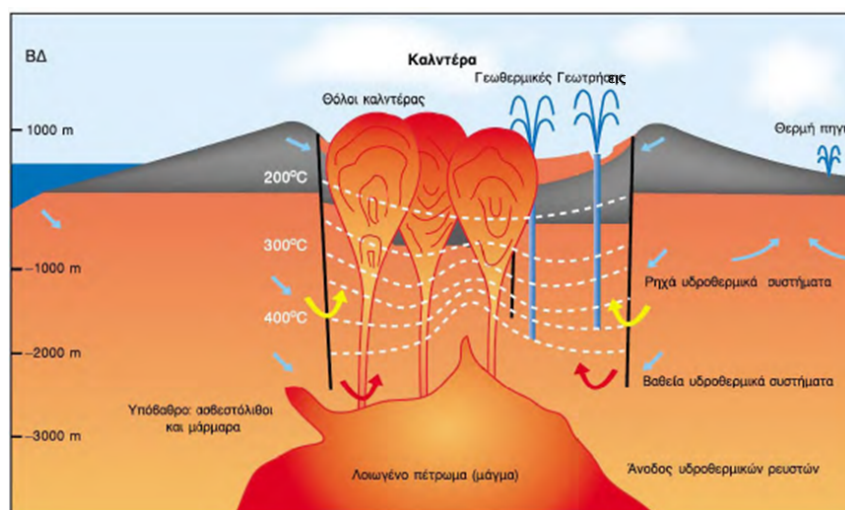
Το πλέον συνηθισμένο κριτήριο για την ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων είναι αυτό που βασίζεται στην ενθαλπία των γεωθερμικών ρευστών, τα οποία λειτουργούν ως ο φορέας «μεταφοράς» της θερμότητας από τα βαθιά και θερμά πετρώματα προς την επιφάνεια. Η ενθαλπία, η οποία σε γενικές γραμμές θεωρείται ότι είναι ανάλογη της θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται για να εκφράσει την περιεχόμενη θερμική ενέργεια των ρευστών και δίνει μια γενική εικόνα της ενεργειακής «αξίας» τους. Οι γεωθερμικοί πόροι διακρίνονται σε χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας (ή θερμοκρασίας), σύμφωνα με το ενεργειακό τους περιεχόμενο και τις πιθανές μορφές αξιοποίησής τους. Στον Πίνακα 2.3 αναφέρονται οι χαρακτηριστικοί

τρόποι ταξινόμησης, όπως αυτοί προτάθηκαν από διάφορους συγγραφείς. Όπως ακριβώς και για την ορολογία, μια κοινώς αποδεκτή μέθοδος ταξινόμησης θα βοηθούσε στην αποφυγή συγχύσεων και παρανοήσεων. Όμως, μέχρι να γίνει αυτό, θα πρέπει κάθε φορά και κατά περίπτωση να δηλώνουμε τις τιμές των θερμοκρασιών ή το εύρος τους, διότι όροι όπως «χαμηλή», «ενδιάμεση» ή «υψηλή» δεν έχουν πάντα την ίδια ερμηνεία και πολλές φορές είναι παραπλανητικοί.

Πίνακας 2.3: Ταξινόμηση γεωθερμικών πεδίων με βάση την ενθαλπία (Dickson and Fanelli, 1990).

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (ταξινόμηση κατά)	Χαμηλής Ενθαλπίας	Μέσης Ενθαλπίας	Υψηλής Ενθαλπίας
Muffler and Cataldi 1978	<90 °C	90-150 °C	>150 °C
Hochstein 1990	<125 °C	125-225 °C	>225 °C
Benderitter and Corny 1990	<100 °C	100-200 °C	100-200 °C
Haenel, Rybach and Stegena 1988	<150 °C		>150 °C

Στα μοντέλα γεωθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας η πηγή θερμότητας συνίσταται κυρίως σε μαγματικές μάζες, οι οποίες διείσδυσαν στο φλοιό της γης από μεγαλύτερα βάθη. Η θερμοκρασία της εστίας φτάνει σε πολύ υψηλά επίπεδα γι' αυτό και αποτελεί τη βάση των πεδίων υψηλής ενθαλπίας. Η θερμότητα μεταφέρεται προς την επιφάνεια της γης με αγωγή, στην περίπτωση όπου δεν υφίστανται ρευστά, ενώ όταν κυκλοφορούν ρευστά αυτά μεταφέρουν τη θερμότητα μέσω συναγωγής. Στις περιπτώσεις αυτές η εκτόνωση της θερμότητας γίνεται διαμέσου υπέρθερμων ατμών και αερίων που εκδηλώνονται στην επιφάνεια ως ατμίδες, θερμοπίδακες, φρεατικοί κρατήρες κ.α. που αναφέρθηκαν στην παρ. 2.4. Στον Ελλαδικό χώρο τα βεβαιωμένα με ΦΕΚ γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας βρίσκονται στη Μήλο και στη Νίσυρο (εικ. 2.18)



Εικόνα 2.18. Γεωθερμικό Σύστημα Νισύρου (Φυτίκας, 2014).

Η απουσία μάγματος στα ανώτερα στρώματα του φλοιού της γης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της θερμικής ανωμαλίας. Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω των ρευστών, τα οποία

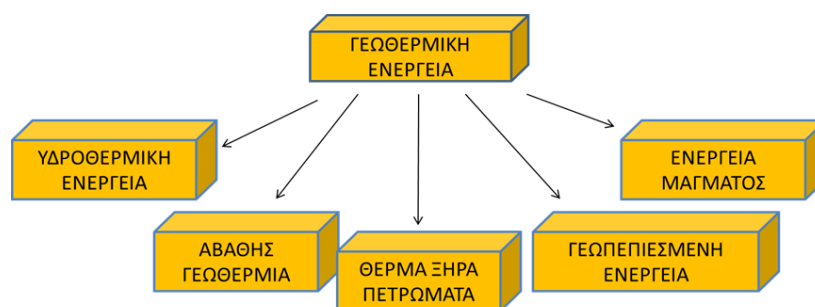
βρίσκουν διέξοδο μέσω πορωδών πετρωμάτων και ρηγματίων που δημιουργήθηκαν λόγω των εφελκυστικών γεωλογικών τάσεων (εικ. 2.19).



Εικόνα 2.19. Σχηματισμός γεωθερμικού πεδίου (Χατζηγιάννης, 2011).

2.3.1.3. Ταξινόμηση με βάση τους γεωθερμικούς πόρους

Τέλος, ο περισσότερο κατανοητός διαχωρισμός είναι αυτός σύμφωνα με το Φυτίκα κ.α. 2004, που βασίζεται στο είδος των γεωθερμικών πόρων. Διακρίνονται πέντε κατηγορίες συστημάτων- ορισμένοι από αυτούς ήδη έχουν περιγραφεί ή αναφερθεί και σε προηγούμενες κατατάξεις (Σχήμα 2.6):



Σχήμα 2.6. Μορφές γεωθερμικής ενέργειας κατά σειρά ενδιαφέροντος χρήσεων σήμερα και προοπτικής στο εγγύς μέλος, από αριστερά προς τα δεξιά.

α) Τα υδροθερμικά συστήματα ή πόροι (hydrothermal systems or resources), δηλαδή τα φυσικά υπόγεια θερμά ρευστά, τα οποία βρίσκονται σε έναν ή περισσότερους ταμιευτήρες, θερμαίνονται από μια εστία θερμότητας και συχνά εμφανίζονται στην επιφάνεια της γης με τη μορφή θερμών εκδηλώσεων. Η διάκριση αυτή σχεδόν ταυτίζεται με τα υδροθερμικά

συστήματα των Μεταφορικών συστημάτων σύμφωνα με τη διάκριση κατά Bower 1989, που αναφέρθηκε προηγουμένως και ισχύουν όσα περιγράφηκαν στην εκεί παράγραφο. Τα συστήματα αυτά συχνά ταυτίζονται με το σύνολο σχεδόν των γεωθερμικών πεδίων, αφού σήμερα ουσιαστικά είναι τα μόνα συστήματα που αξιοποιούνται. Μια άλλη ονομασία που δίνεται σε αυτά τα συστήματα είναι συστήματα συναγωγής (convective systems) ή δυναμικά συστήματα, επειδή η θερμότητα μεταδίδεται κυρίως με το μηχανισμό της συναγωγής. Υπάρχουν βεβαίως και ορισμένα συστήματα αγωγής (conductive systems) ή στατικά συστήματα, που αποτελούνται συνήθως από νερά υψηλής αλατότητας, με θερμοκρασία 60-150°C και σε κανονική πίεση, παγιδευμένα σε βάθος 2-4 km, και τα οποία έχουν θερμομανθεί με το μηχανισμό της αγωγής. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί η Παννονική λεκάνη (Ουγγαρία), η οποία έχει τύχει σημαντικής αξιοποίησης. Για καλύτερη κατανόηση του θέματος τα Υδροθερμικά όπως αναφέραμε διακρίνονται με βάση την ενθαλπία σε πεδία χαμηλής και μέσης ενθαλπίας και σε πεδία υψηλής ενθαλπίας. Στην Ελλάδα με βάση τη νομοθεσία διακρίνονταν σε πεδία χαμηλής ενθαλπίας (<90 °C) και σε πεδία υψηλής ενθαλπίας (>90 °C), τα οποία σήμερα έχουν μετονομαστεί σε πεδία τοπικού ενδιαφέροντος (30 °C- 90 °C) και εθνικού ενδιαφέροντος (>90 °C).

β) **Αβαθής Γεωθερμία.** Μία πολλά υποσχόμενη κατηγορία γεωθερμικής ενέργειας μπορεί να θεωρηθεί η λεγόμενη *αβαθής γεωθερμία* (earth energy), κατά την οποία λαμβάνονται ποσότητες ενέργειας από μικρά βάθη με την ανακυκλοφορία νερού σε κλειστές υδροφόρες ή «ξηρές» γεωτρήσεις ή σε ρηχές επιφάνειες εδάφους/πετρωμάτων. **Αβαθής λοιπόν ή Κανονική Γεωθερμία** (Γεωθερμική Ενέργεια), ορίζεται ως η θερμότητα των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται ως γεωθερμικό δυναμικό, ή διαφορετικά «τα ρηχά γεωθερμικά ρευστά ή η θερμική ενέργεια των πετρωμάτων που βρίσκονται σε πολύ μικρά βάθη.

Στο άρθρο 2 της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2009/28/EK η αβαθής γεωθερμική ενέργεια αναφέρεται κανονικά σε ένα βάθος μέχρι 400 m (και στις περισσότερες πραγματικές περιπτώσεις σε βάθη που δεν ξεπερνούν τα 100 m).

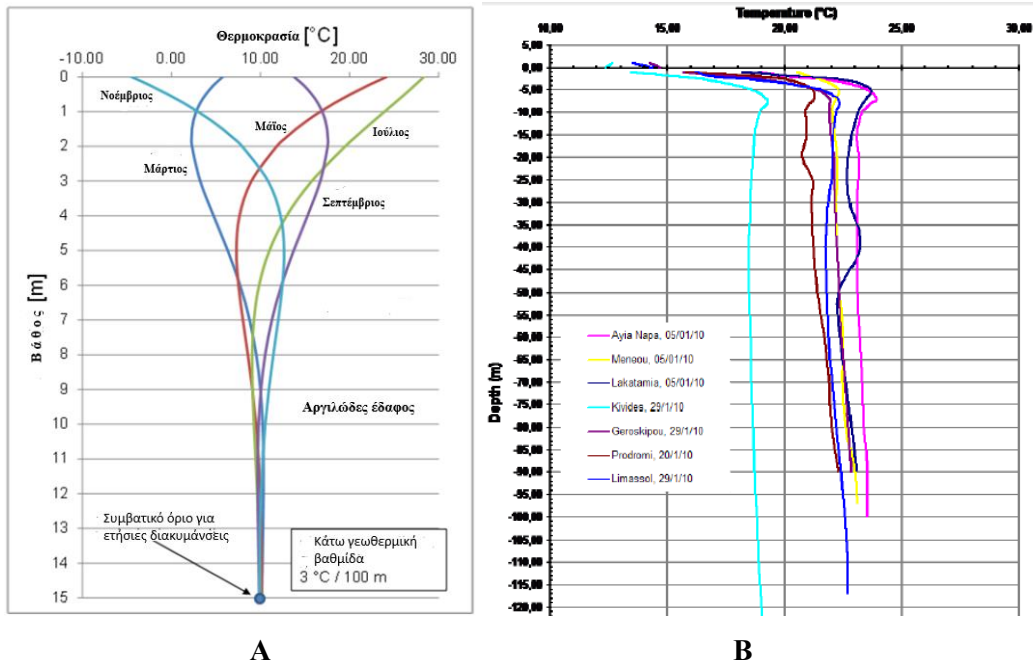
Εναλλακτικά όπως στη χώρα μας, χαρακτηρίζεται ως η θερμότητα που παρουσιάζεται κάτω από κάθε επιφάνεια εδάφους, η θερμότητα των λιμνών, ποταμών και θαλασσών, το ύψος της θερμοκρασίας των οποίων είναι μικρότερο από τους 30°C.

Με βάση πολυάριθμες μετρήσεις που έχουν γίνει στο υπέδαφος διαφόρων σημείων του κόσμου, έχει διαπιστωθεί ότι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες επηρεάζουν τη θερμοκρασία σε μικρό σχετικά βάθος, συνήθως μέχρι τα 15 m (σχ.2.7 και 2.8).

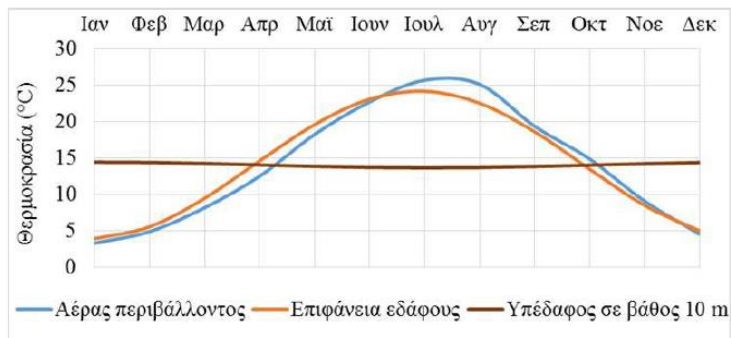
Από εκεί και κάτω, η μεταβολή της θερμοκρασίας υπακούει μόνο στους κανόνες της γεωθερμικής βαθμίδας, δηλαδή αυξάνεται σταθερά με το βάθος και με μέσο ρυθμό της τάξης του 1 °C/30 m, που είναι η *μέση ή ομαλή γεωθερμική βαθμίδα*.

Τα ρηχά γεωθερμικά ρευστά ή η θερμική ενέργεια των πετρωμάτων που βρίσκονται σε πολύ μικρά βάθη (μέχρι 100m περίπου) έχει οριστεί σε πολλές χώρες ως αβαθής γεωθερμία. Η εκμετάλλευση της αβαθούς γεωθερμίας αναπτύσσεται ραγδαία σε ορισμένες ανεπτυγμένες χώρες, με τη χρήση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας (σχ. 2.9).

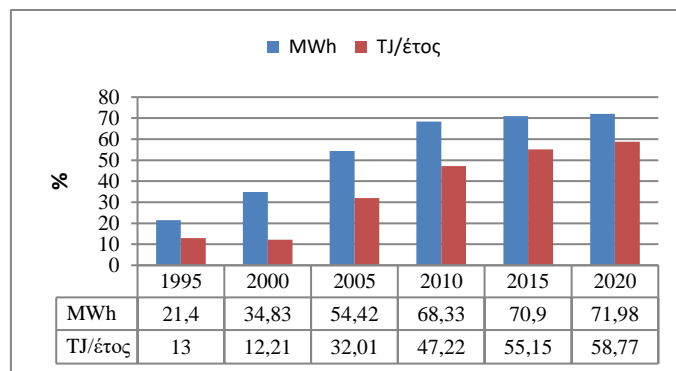
Οι Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας (ΓΑΘ). αποτελούν μια τυποποιημένη, φιλική προς το περιβάλλον και αξιόπιστη τεχνολογία θέρμανσης-ψύξης, η οποία μπορεί, υπό προϋποθέσεις, να εμφανίσει σημαντικά οικονομικά πλεονεκτήματα και να λειτουργήσει αποτελεσματικά και στον αγροτικό τομέα.



Σχήμα 2.7. Α: Διακύμανση θερμοκρασίας αδιατάρακτου εδάφους σε διάφορους μήνες το χρόνο εποχές και σε βάθος μέχρι 15 m. Β: Μετρήσεις Θερμοκρασίας εδάφους σε διάφορες περιοχές στην Κύπρο για τους μήνες Δεκέμβριο 2009 και Απρίλιο 2010 (www.cut.ac.cy/geothermapcy).

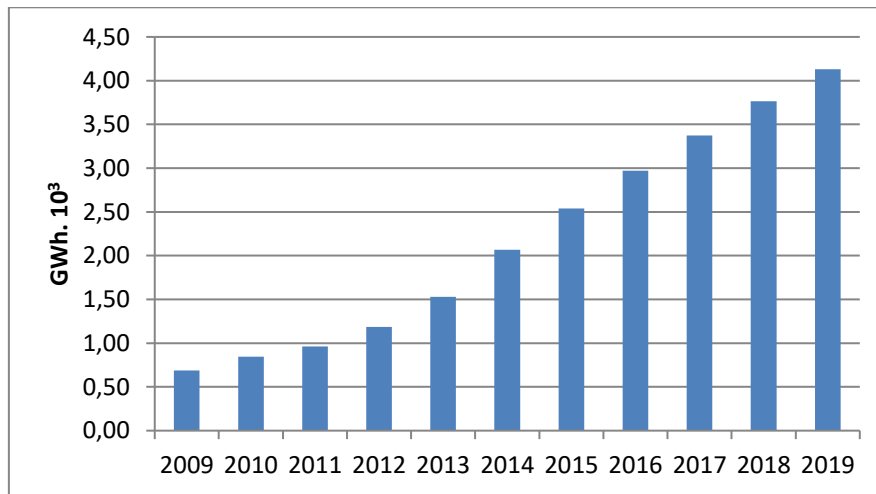


Σχήμα 2.8. Θερμοκρασιακά προφίλ κατά τη διάρκεια ενός έτους. Περιοχή Μεγάλης Παναγίας Χαλ/κης (Ανδρουλάκης και Άρμεν, 2015).



Σχήμα 2.9. Εξέλιξη ποσοστού συμμετοχής των ΓΑΘ (εγκατεστημένη ισχύς και παραγόμενη ενέργεια) στη παγκόσμια χρήση γεωθερμικής ενέργειας για Άμεσες Χρήσεις (στοιχεία από Lund and Toth, 2020).

Κατά την τελευταία δεκαετία η εγκατάσταση συστημάτων αντλιών θερμότητας στην Ελλάδα κυρίως για αστική θέρμανση και ψύξη, εμφανίζει υψηλούς ρυθμούς αύξησης (σχ.2.10).



Σχήμα 2.10. Εξέλιξη της παραγόμενης θερμότητας από τις αντλίες θερμότητας τη δεκαετία 2009-2019 στην Ελλάδα (στοιχεία από τη Eurostat).

γ) Τα γεωπεπιεσμένα συστήματα (geopressed systems), τα οποία αποτελούνται από ρευστά εγκλεισμένα 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. 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 ταμιευτήρες υπό πίεση μη αξιοποιήσιμους. Συγκαταλέγονται στα στατικά συστήματα και συνυπάρχουν με υδρογονάνθρακες (κυρίως αέριου),

Με τον όρο λοιπόν γεωπεπιεσμένα ρευστά εννοούνται τα γεωθερμικά ρευστά του υπεδάφους που βρίσκονται εγκλωβισμένα υπό μεγάλη πίεση (550-1350 bar, πολύ μεγαλύτερης της υδροστατικής) (εικ.2.20) μέσα σε παλαιότερους γεωλογικούς σχηματισμούς, πάντα μαζί με μεθάνιο.



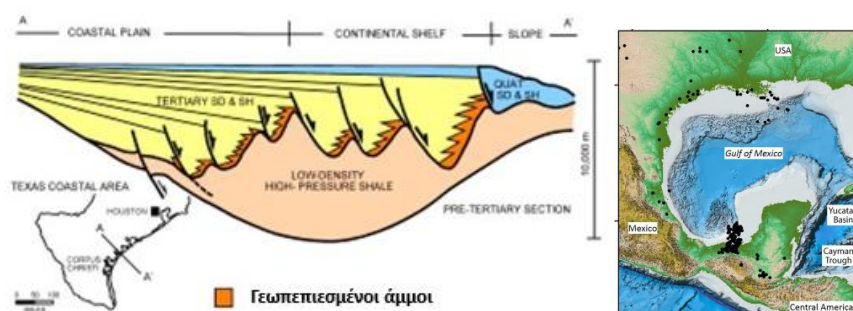
Εικ. 2.20. Ενδεικτικό γεωλογικό μοντέλο γεωπεπιεσμένου γεωθερμικού ταμιευτήρα (Καρυδάκης, 2016).

Τα ρευστά αυτά έχουν υψηλή αλατότητα και θερμοκρασίες στην περιοχή των 50-250°C, αν και οι ταμιευτήρες που έχουν εξερευνηθεί μέχρι σήμερα σπάνια ξεπερνούν τους 150 °C. Οι περατοί σχηματισμοί με τέτοια ρευστά είναι συνήθως ιζηματογενείς και πτυχωμένοι, με τα ρευστά να καταλαμβάνουν τους πόρους των πετρωμάτων.

Τέτοιοι ταμειυτήρες απομονώνονται στο βάθος από υπερκείμενους μη περατούς σχηματισμούς, που είναι συνήθως αργιλικά ιζήματα. Τα περισσότερα δεδομένα για τα γεωπεπιεσμένα συστήματα έχουν προέλθει από γεωτρήσεις πετρελαίου.

Γεωπεπιεσμένα πεδία υπάρχουν σε διάφορες περιοχές του κόσμου. Οι γεωθερμικοί ενδιαφέροντος ταμειυτήρες αυτού του τύπου βρίσκονται συνήθως σε μεγάλα βάθη (3-7 km).

Μία μεγάλη περιοχή με γεωπεπιεσμένα ρευστά βρίσκεται στον Κόλπο του Μεξικού, (εικ. 2.21).



Εικ. 2.21. Γεωπεπιεσμένα συστήματα στο κόλπο του Μεξικού (Bebout, et al., 1978 με προσθήκη).

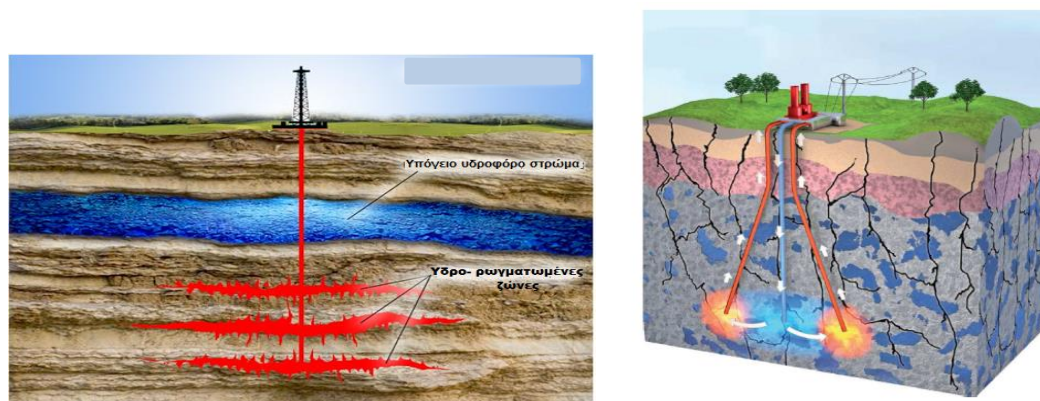
Η έκταση των γεωπιεσμένων αποθεμάτων δεν είναι ακόμη καλά γνωστή παγκοσμίως και η μόνη σημαντική περιοχή πόρων που έχει εντοπιστεί μέχρι σήμερα είναι, όπως αναφέρθηκε στην περιοχή του βόρειου Κόλπου του Μεξικού, όπου τα μεγάλα αποθέματα πιστεύεται ότι καλύπτουν έκταση 160 000 km² και η αποθηκευμένη ενέργεια εκτιμάται σε 1,7x10²³ J. Η ακτή λοιπόν του Κόλπου στο τμήμα των ΗΠΑ κόλπος του Τέξας και της Λουιζιάνας, έχει δοκιμαστεί για αυτή τη γεωθερμική ενέργεια. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου βάθους πολλών χιλιομέτρων, δεν έχει οικονομική αποδοχή. Αυτός ο πόρος είναι δυνητικά όμως πολλά υποσχόμενος επειδή από τις γεωτρήσεις στις περιοχές αυτές μπορούν να εξαχθούν τρεις τύποι ενέργειας, η θερμική ενέργεια από τα θερμαινόμενα ρευστά, η υδραυλική ενέργεια από τις υψηλές πιέσεις και τη μεγάλη διαφορά με την υδροστατική πίεση και η χημική ενέργεια από την καύση του διαλυμένου αερίου μεθανίου (World Energy Council, 1994).

Όσον αφορά την Ευρώπη, η Ουγγαρία αναπτύσσει έργα με γεωπίεση ενώ λειτουργούν μονάδες συμπαραγωγής για την άμεση χρήση της γεωθερμικής θερμότητας και του διαλυμένου μεθανίου. Η Ιταλία έχει επίσης εμπλακεί σε ορισμένες εργασίες, για παράδειγμα οι Alimonti και Gnoni παρουσίασαν μια μελέτη για την ανάκτηση θερμότητας από εξαντλημένα πηγάδια σε ένα γνωστό πεδίο γεωπίεσης στην πεδιάδα του Πάδου (Βόρεια Ιταλία).

Λόγω διαφόρων τεχνικών προβλημάτων (π.χ. της βιωσιμότητας της εκμετάλλευσης), τα συστήματα γεωπίεσης εξακολουθούν να θεωρούνται αντισυμβατικά, δηλαδή απαιτούν περαιτέρω τεχνολογική ανάπτυξη.

δ) Τα συστήματα βαθών θερμών-ξηρών πετρωμάτων (hot dry rock systems), ή ενισχυμένα γεωθερμικά συστήματα (enhanced geothermal Systems) δηλ. τα θερμά πετρώματα σε βάθος από 3 μέχρι 10 km, συνήθως υψηλής θερμοκρασίας, στα οποία όμως η έλλειψη ρωγματώσεων δεν επιτρέπει την κυκλοφορία και ύπαρξη ρευστού, από τα οποία όμως μπορεί να ανακτηθεί ενέργεια χρησιμοποιώντας νερό που διοχετεύεται από την επιφάνεια μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων, σε τεχνητό υδροφορέα, και ανακτάται θερμότερο με τη μορφή νερού ή ατμού μέσω άλλων γεωτρήσεων. Στη περίπτωση αυτή αναφέρεται ως παράδειγμα η περίπτωση των μεγάλων κρυσταλλικών σωμάτων, τα οποία μπορεί να είναι γεμάτα από διακλάσεις, έχουν όμως σχεδόν μηδενικό ενεργό πορώδες και κατά συνέπεια μηδενική υδροπερατότητα, με

αποτέλεσμα να μην μπορούν να συγκρατήσουν ποσότητες νερού. Τα πετρώματα αυτά είναι λοιπόν ξηρά και συγχρόνως θερμά.

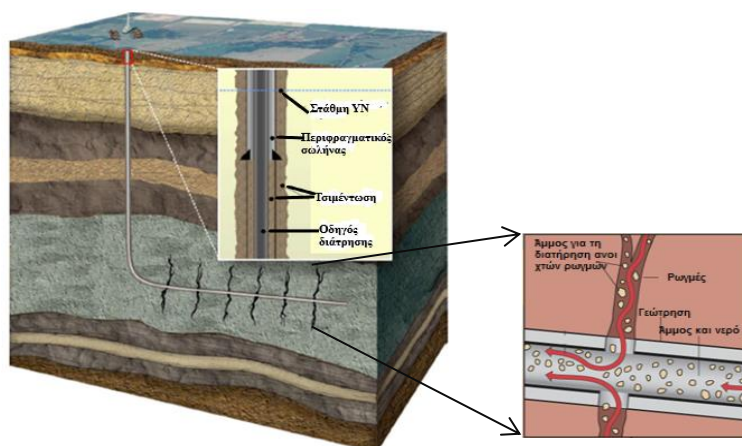


Εικ. 2.22. Σχηματική αναπαράσταση θερμών ξηρών κρυσταλλικών πετρωμάτων - με τεχνητό ταμιευτήρα.

Πρόκειται λοιπόν για μια κατηγορία γεωθερμικής ενέργειας, που βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο, είναι η λεγόμενη **ενέργεια των θερμών ξηρών πετρωμάτων**. Το νερό σαυτές τις περιπτώσεις οδηγείται τεχνητά από την επιφάνεια της γης μέσω γεώτρησης(ων) εισαγωγής εικ. μέχρι τα θερμά, ξηρά και χωρίς νερά πετρώματα, σε βάθος που μπορεί να υπερβαίνει τα 5000 m. Μετά τη θέρμανσή του εκεί, το νερό επιστρέφει στην επιφάνεια μέσω άλλης ή άλλων παραγωγικών γεωτρήσεων. Πολλές φορές δημιουργείται τεχνικά και ταμιευτήρας με υδραυλική θραύση (εικ. 2.22). Για την επίτευξη της Υδραυλικής Θραύσης γίνονται γεωτρήσεις σε μεγάλο βάθος πρώτα κάθετα και μετά οριζόντια ή μόνο κάθετα. Μέσα σ'αυτές τις στοές διοχετεύονται με πολύ μεγάλη πίεση τεράστιες ποσότητες νερού με άμμο και άλλα χημικά συστατικά. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται ρωγματώσεις ή ενεργοποιούνται παλαιότερες σε περιοχές πετρωμάτων με υψηλές θερμοκρασίες και δημιουργείται ένα εκτεταμένο ενεργό πορώδες. Η άμμος χρησιμοποιείται για να κρατήσει ανοιχτές τις ρωγμές. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την εξόρυξη του φυσικού αερίου από τον σχιστόλιθο (εικ. 2.23). 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.

Στα συστήματα αυτά έγιναν για πρώτη φορά πειραματικές δοκιμές το 1970 στο Los Alamos του Νέου Μεξικού (ΗΠΑ). Οι πιο εξελιγμένες επιστημονικά και τεχνολογικά έρευνες στον τομέα των Θερμών Ξηρών Πετρωμάτων πραγματοποιήθηκαν στην Ιαπωνία και στο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα της Αλσατίας (Γαλλία). Πολλά προγράμματα που ξεκίνησαν στην Ιαπωνία τη δεκαετία του 1980 (στις περιοχές Hijiori, Oigachi και Yunomori), είχαν σημαντική χρηματοδότηση από την Ιαπωνική κυβέρνηση και τη βιομηχανία και κατέληξαν σε ενδιαφέροντα αποτελέσματα, τόσο από επιστημονική όσο και από βιομηχανική άποψη.

Σήμερα, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός παραδειγμάτων, όπου έχουν εφαρμοστεί τεχνικές EGS για την αύξηση της απόδοσης των υδροθερμικών πόρων και έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός EGS (π.χ. στη Γαλλία και την Αυστραλία). Όμως ακόμα δεν υπάρχει –από όσο γνωρίζουμε– καθαρό σύστημα EGS που να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Τα συστήματα αυτά μπορούν επίσης να παρέχουν θερμότητα σε πλαίσιο άμεσης χρήσης (π.χ. για δίκτυα τηλεθέρμανσης και άλλες βιομηχανικές εφαρμογές θερμότητας). Η ισχύς από τέτοια συστήματα μόνο στις Ηνωμένες Πολιτείες υπολογίζεται



Εικ. 2.23. Ενισχυμένα Γεωθερμικά Συστήματα (Enhanced Geothermal Systems, E.G.S.) σε σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος Θερμών Ξηρών Πετρωμάτων (Charles W. Indiana Journal of Earth Sciences, με τροποποιήσεις).

σε περίπου 5.150 GW, σύμφωνα με την έκθεση DOE Geovision των ΗΠΑ του 2019.

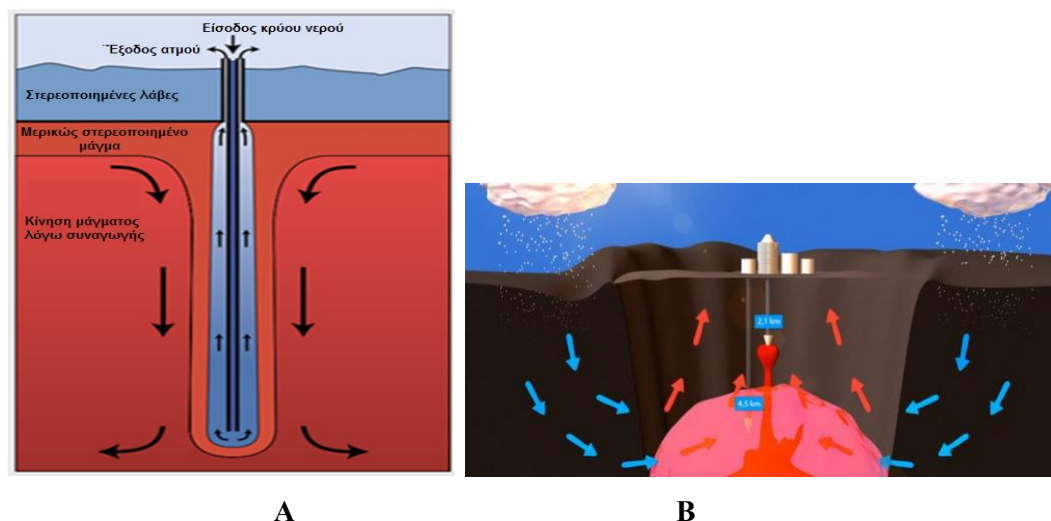
Συμπερασματικά η προσέγγιση στα ενισχυμένα γεωθερμικά συστήματα (EGS) είναι η πρόκληση διαπερατότητας (ρωγματώσεων) μεταξύ των πετρωμάτων και η προσθήκη στη συνέχεια ρευστών που θα τους επέτρεπε να θερμανθούν επαρκώς σε ένα βιώσιμο σύστημα (και έτσι να δημιουργηθούν τεχνητά υδροθερμικοί ταμιευτήρες). Αυτό επιτρέπει στη συνέχεια να αντληθεί η γεωθερμική θερμότητα, η οποία θα μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί στην επιφάνεια. Αυτές οι δημιουργούμενοι τεχνητά ταμιευτήρες επίσης συχνά ονομάζονται μηχανικά γεωθερμικά συστήματα.

Συμπληρωματικά θα μπορούσε να αναφερθεί εδώ ότι για την καλύτερη εκμετάλλευση σήμερα των ενισχυμένων γεωθερμικών συστημάτων έχει επινοηθεί από διάφορες ομάδες η έννοια των προηγμένων γεωθερμικών συστημάτων (Advanced Geothermal Systems (AGS)), που στοχεύουν σε μια προσέγγιση που θα απομακρύνει τον κίνδυνο δημιουργίας τεχνητών ταμιευτήρων, όπως συμβαίνει με τα ενισχυμένα συστήματα (EGS) για τη γεωθερμική ανάπτυξη. Τα AGS το πραγματοποιούν εξάγοντας θερμική ενέργεια χρησιμοποιώντας ένα σύστημα κλειστού βρόχου. Αυτό επιτυγχάνεται με την κυκλοφορία ενός ρευστού εργασίας μέσα σε μια βαθιά γεώτρηση το οποίο μεταφέρει τη θερμότητα από το πέτρωμα που περιβάλλει τη γεώτρηση.

ε) Μαγματικά συστήματα. Οι διεισδύσεις μάγματος αντιπροσωπεύουν τοπικές περιοχές με τεράστια συγκεντρωμένη θερμική ενέργεια με τη μορφή λιωμένου ή σχεδόν λιωμένου μάγματος, σε θερμοκρασίες στην περιοχή των 650-1200 °C. Το μάγμα είναι βασικά η πρωταρχική πηγή θερμότητας όλων των υδροθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας. Για να ταξινομηθεί μια περιοχή μάγματος ως γεωθερμικός πόρος, θα πρέπει να βρίσκεται σε προσβάσιμα βάθη, δηλαδή σε βάθη μικρότερα από 10 km. Συνήθως βέβαια το μάγμα βρίσκεται σε βάθη της τάξης των 5 km. Σε σπάνιες περιπτώσεις, διεισδύσεις μάγματος βρίσκονται πιο κοντά στην επιφάνεια, αυτές είναι κάτω ή γύρω από ενεργά ηφαίστεια.

Θεωρητικά, η αξιοποίηση της ενέργειας από μάγματα φαίνεται απλή, παρομοιάζει με αυτή των προηγμένων γεωθερμικών συστημάτων (Advanced Geothermal Systems (AGS)), που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Κατασκευάζεται μια ειδική γεώτρηση μέχρι τη διεισδυση του μάγματος, μέσα στην οποία κυκλοφορεί ένα θερμαντικό μέσο (πιθανόν νερό). Το μέσο αυτό θερμαίνεται στον πυθμένα της γεώτρησης και ανέρχεται λόγω συναγωγής στην επιφάνεια εικ.

2.24. Τα **μαγματικά συστήματα** λοιπόν γενικά αναφέρονται στην απώληση θερμότητας με κατάλληλες γεωτρήσεις σε μαγματικές διεισδύσεις, που βρίσκονται σε μικρό σχετικά βάθος. Πολλές φορές οι γεωτρήσεις αυτές φτάνουν μόνο μέχρι την επιφάνεια του μαγματικού σώματος, και λόγω ευνοημένης γεωλογικής δομής, όπου σε επαφή με την οροφή του σώματος εντοπίζεται περατά στρώματα (εικ. 2.25), και τα οποία κατεβάζουν το μετεωρικό νερό έως την επαφή με το μαγματικό σώμα και αποτελούν έτσι το μεταφορέα θερμότητας στο μαγματικό σύστημα.



Εικ. 2. 24. Α Τρόπος παραγωγής θερμότητας σε ένα μαγματικό σύστημα (πηγή Φυτίκας 2004). Β Σχηματική απεικόνιση κυκλοφορίας ρευστών σε ένα μαγματικό σύστημα.

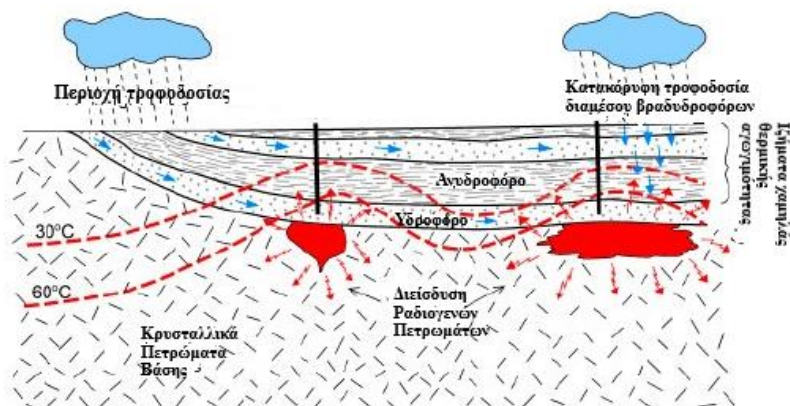
Επίσης, στη κατηγορία αυτή ανήκουν και τα διάφορα μαγματικά) σώματα με μεγάλο ραδιενεργό φορτίο. Πολλές φορές γρανιτικά πλουτώνια πετρώματα είναι σχετικά εμπλουτισμένα σε ραδιενεργά στοιχεία κυρίως ουράνιο και θόριο. Η ραδιενεργή αποσύνθεση των ισοτόπων αυτών στοιχείων εκπέμπει θερμότητα. Έτσι η ροή θερμότητας σε έναν ραδιενεργό μαγματικό πέτρωμα είναι συνεπώς υψηλότερη από αυτή στα παρακείμενα πετρώματα στα οποία το μάγμα έχει διεισδύσει και κατ'αυτό τον τρόπο αυξάνουν τη γεωθερμική βαθμίδα. Αν τα γρανιτικά πετρώματα συγχρόνως καλύπτονται και από ιζημάτα χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, ή βρίσκονται κοντά σαυτά τοπικά υδροφόρα στρώματα, τότε θερμοκρασίες σχετικά υψηλές εμφανίζονται στη βάση του ιζηματογενούς τμήματος πάνω από τη ραδιενεργή πηγή (εικ. 2.25) Η έκταση της ανωμαλίας της γεωθερμίας εξαρτάται από το σχήμα και το πάχος της ραδιενεργούς πηγής, τη συγκέντρωση του ουρανίου και θορίου στη πηγή και την θερμική αγωγιμότητα και το πάχος των υπερκείμενων ιζημάτων.

2.3.1.4. Ταξινόμηση με βάση τη κατάσταση ισορροπίας στο ταμειυτήρα

Ένας άλλος διαχωρισμός των γεωθερμικών συστημάτων είναι αυτός που βασίζεται στην κατάσταση ισορροπίας στον ταμειυτήρα (Nicholson, 1993), σύμφωνα με τον οποίο λαμβάνονται υπόψη η κυκλοφορία των ρευστών του ταμειυτήρα και ο μηχανισμός μεταφοράς της θερμότητας.

1. Στα δυναμικά συστήματα, όπου ο ταμειυτήρας τροφοδοτείται συνεχώς με νερό, το οποίο θερμαίνεται. Στη συνέχεια, ο ταμειυτήρας «αποφορτίζεται», είτε γιατί το θερμό ρευστό ανέβηκε μέχρι την επιφάνεια είτε γιατί άρχισε να γεμίζει τους υδατοπερατούς υπόγειους σχηματισμούς. Η θερμότητα μεταφέρεται στο σύστημα μέσω του μηχανισμού της συναγωγής

(convection) και της κυκλοφορίας του ρευστού. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει συστήματα τόσο υψηλής (>150 °C) όσο και χαμηλής (<100 °C) θερμοκρασίας.



Εικ. 2.25. Σχηματικό μοντέλο γεωθερμικού ταμιευτήρα σε ιζηματογενή πετρώματα χαμηλής θερμοκρασίας που υπέρκειται πλουτωνικών πετρωμάτων εμπλουτισμένων με ουράνιο και θόριο. (πηγή Anderson & Lund, 1979).

2. Στα στατικά συστήματα, τα γνωστά και ως στάσιμα ή συστήματα αποθήκευσης, παρατηρείται ελάχιστη ή καμιά τροφοδοσία του ταμιευτήρα και η μεταφορά θερμότητας γίνεται μόνο με τη βοήθεια του μηχανισμού αγωγής (conduction). Η συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνει τα χαμηλής θερμοκρασίας και τα «γεωπεπιεσμένα» (geopressed) συστήματα. Γεωπεπιεσμένα συστήματα έχουν προσδιοριστεί σε μεγάλες ιζηματογενείς λεκάνες (π.χ. στον Κόλπο του Μεξικού, ΗΠΑ) σε βάθη 3-7 km. Οι γεωπεπιεσμένοι ταμιευτήρες αποτελούνται από περατά ιζηματογενή πετρώματα που βρίσκονται ανάμεσα σε αδιαπέρατα, χαμηλής αγωγιμότητας, στρώματα, και περιέχουν πεπιεσμένο θερμό νερό που εγκλωβίστηκε εκεί κατά την περίοδο δημιουργίας των λεκανών και απόθεσης των ιζημάτων. Η πίεση του θερμού νερού υπερβαίνει κατά πολύ την υδροστατική και προσεγγίζει τη λιθοστατική. Οι γεωπεπιεσμένοι ταμιευτήρες μπορεί επίσης να περιέχουν σημαντικές ποσότητες μεθανίου ή άλλων υδρογονανθράκων, οπότε μπορούν να παράγουν θερμική και υδραυλική ενέργεια (πεπιεσμένο θερμό νερό) καθώς και αέριο μεθάνιο. Τέτοιοι ενεργειακοί πόροι έχουν υποστεί εκτεταμένη έρευνα, αλλά μέχρι στιγμής δεν υπήρξε κάποια βιομηχανική αξιοποίησή τους.

Στον Πίνακα 2.5, που ακολουθεί συνοψίζονται όλες οι ταξινομήσεις που αναφέρθηκαν στην εδώ παράγραφο. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι στις επιμέρους ταξινομήσεις επαναλαμβάνονται πολλές φορές τα ίδια συστήματα με άλλη διάκριση. Συμπερασματικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η ταξινόμηση με βάση τους γεωθερμικούς πόρους (Πίνακας 2.6) αποτελεί μια συγκεντρωτική ταξινόμηση που περιλαμβάνει όλα τα συστήματα τα αναφερόμενα στον Πίνακα 2.5 συστήματα.

Πίνακας 2.4: Ταξινόμηση Γεωθερμικών Συστημάτων (ΓΣ).

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ (ΓΣ)		
Γενική ταξινόμηση με βάση χαρακτηριστικά τους	Α. Γεωλογικά, Β. Υδρολογικά και Γ. Θερμικά	
Ειδικά με βάση	Α. το είδος των γεωθερμικών πόρων, Β. το τύπος των ρευστών Γ. τη θερμοκρασία των ρευστών, Δ. το τύπος του πετρώματος που φιλοξενεί τα ρευστά, Ε. το είδος της εστίας θερμότητας, Η. τη κυκλοφορία των ρευστών (αν κυκλοφορούν ρευστά στον ταμιευτήρα) Θ. την ενθαλπία των γεωθερμικών ρευστών	
Ταξινόμηση με βάση την κυκλοφορία ή όχι Γεωθερμικών Ρευστών	Μεταφορικά ΓΣ	<u>1.Υδροθερμικά συστήματα</u> i. Συστήματα νερού ii. Συστήματα ατμού ή νερού <u>2. Κυκλοφορικά συστήματα</u>
	Μεταδοτικά ΓΣ	1.Υδροφορείς χαμηλής θερμοκρασίας / ενθαλπίας 2 .Θερμά Ξηρά Πετρώματα, γεωπεπιεσμένοι ταμιευτήρες
Ταξινόμηση με βάση την Ενθαλπία	1. Υψηλής ενθαλπίας 2. Μεσαίας ενθαλπίας 3. Χαμηλής ενθαλπίας	
Ταξινόμηση με βάση τους Γεωθερμικούς Πόρους	1. <u>Τα υδροθερμικά συστήματα ή πόροι</u> 2. <u>αβαθής γεωθερμία</u> 3. <u>Τα γεωπεπιεσμένα συστήματα</u> 4. <u>Τα συστήματα βαθών θερμών-ξηρών πετρωμάτων</u> 5. <u>Τα μαγματικά συστήματα</u>	
Ταξινόμηση με βάση την κατάσταση ισορροπίας στον ταμιευτήρα.	<i>1.Δυναμικά συστήματα</i>	Περιλαμβάνουν συστήματα τόσο υψηλής (>150°C) όσο και χαμηλής (<100°C) θερμοκρασίας
	<i>2.Στατικά συστήματα</i>	Περιλαμβάνουν τα χαμηλής θερμοκρασίας και τα «γεωπεπιεσμένα» (geopressured) συστήματα.

Πίνακας 2.5: Ταξινόμηση με βάση τους γεωθερμικούς πόρους (Φυτίκας κ.α. 2004).

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

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Andritsos N, A. Arvanitis, P. Dalabakis, C. Karytsas, D. Mendrinis, M. Papachristou, (2013). Geothermal Energy Use, Country Update for Greece. European Geothermal Congress 2013, Pisa, Italy.
- Αναστασιάδης Γ., Α. Μιχόπουλος, Α. Μπαλτζή, Χ. Μπουσγολίτης, (2012). Γεωθερμία στην Κεντρική Μακεδονία. Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ.ΤΕΕ/ΤΚΜ, Θεσ/νίκη.
- Ανδρουλάκης Ν., Κ. Αρμεν, (2015). Προσομοίωση της λειτουργίας υβριδικού συστήματος με γεωθερμική αντλία θερμότητας και ηλιακή υποβοήθηση για τη θέρμανση σχολικού κτιρίου. Διπλωματική Α.Π.Θ.
- Anderson D. and J. Lund, (1979). Direct utilizations of geothermal energy- A Technical Hand Book.
- Barbier E., (2002). Geothermal Energy Technology and Current Status: An Overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, V6, P3-65. Elsevier.
- Bebout D. et. al., (1978). Frio Sandstone Reservoirs in the Deep Subsurface Along the Texas Gulf Coast. Bureau of Economic Geology. The University of Texas.
- Dickson M., and M. Fanelli, (1995). What is Geothermal Energy. Istituto di Geoscienze e Georisorse, Pisa, Italy. *Μετάφραση Μ. Φυτίκας & Μ. Παπαχρήστου* (σ. 50). Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.
- Δαλαμπάκης Π., Μ. Παπαχρήστου, Π. Κολιός, Α. Αρβανίτης, Ν. Κολιός, (2015). Αξιοποίηση Γεωθερμικών Ρευστών στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης. Θεσσαλονίκη: 9ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής με θέμα «Καινοτομία και Νέες Τεχνολογίες στη Γεωργική Μηχανική και τη Διαχείριση Φυσικών Πόρων».
- Καρυδάκης Γ, (2005). *Γεωθερμική ενέργεια*. Αθήνα, Αθλότυπο.
- Καρυδάκης Γ., (2003). Διδακτορική Διατριβή: Γεωθερμικά Πεδία Χαμηλής Ενθαλπίας Β.Ελλάδας. Τεχνική Γεωτρήσεων, Μηχανική Ταμιευτήρων και Διφασική Ροή Γεωθερμικών Ρευστών. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής, Δ.Π.Θ., Ξάνθη.
- Καρυδάκης Γ., (2016). Γεωθερμικών Συστήματα. Α και Β Τόμος, Αθήνα.
- Lippmann M.J., G.S. Bodvarsson, (1982). Modeling Studies on Cerro Prieto, Presented at the 4th Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, pp. CP-25, Lawrence Berkeley Lab., Guadalajara, Mexico, August 10-12, 1982, Report LBL-14897.
- Lund J.W., (2001). Geothermal heat pumps - an overview. Bulletin Geo-Heat Center, 22, 1, pp. 1-2.
- Nicholson K., (1993). Geothermal Fluids – Chemistry and Exploration Techniques. Springer Verlag, Heidelberg.
- Τζάνης, (2010). Σημειώσεις για την Έρευνα Γεωθερμικών Πεδίων. Τμήμα Γεωλογίας και Περιβάλλοντος, Ε.Κ.Π.Α., Αθήνα.
- Τζεφέρης Π., (2015). Γεωθερμία: Η προβληματική του θεσμικού πλαισίου (<https://energypress.gr/news/geothermia-i-provlimatiki-toy-thesmikoy-plaisiou>).
- Φυτίκας Μ., Ν. Ανδρίτσος, (2004). Γεωθερμία: Γεωθερμικοί Πόροι: Γεωθερμικά Ρευστά: Εφαρμογές: Περιβάλλον. Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Τζιόλα.
- Φυτίκας Μ., (2014). Γεωθερμία, η μεγάλη αγνοούμενη ΑΠΕ στην Ελλάδα. ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ. Σειρά Εισηγήσεων Βιοκλιματικού Σχεδιασμού (Αθήνα, 17-24 Ιανουαρίου 2014). Γεωθερμία στην Ελλάδα Δυναμικό, Εφαρμογές, Προοπτικές. Χατζηγιάννης, Γ.(2011) Οι εφαρμογές της Γεωθερμίας(ειδική

αναφορά στο Δήμο Αχαρνών). ΗΜΕΡΙΔΑ, «Το Ι.Γ.Μ.Ε. ανοίγει τις πόρτες του στους πολίτες του Δήμου Αχαρνών». Γήμιος Αχαρνών.

White D.E., (1973). Characteristics of geothermal resources. In Geothermal Energy, (Kruger, P. and Otte, C., eds). Stanford University Press, Stanford, pp. 69-94.