

Τί είναι Γεωθερμική Ενέργεια; (What is Geothermal Energy?)

Συγγραφή : Mary H. Dickson και Mario Fanelli

Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italy

Μετάφραση : Μιχάλης Φυτίκας και Μαρία Παπαχρήστου

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης/Τμήμα Γεωλογίας

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η θερμότητα είναι μια μορφή ενέργειας και η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα που περιέχεται στο εσωτερικό της γης, η οποία προκαλεί τη δημιουργία διαφόρων γεωλογικών φαινομένων σε παγκόσμια κλίμακα. 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 χρησιμοποιήσουμε τον όρο από τώρα και στο εξής.

Σύντομο ιστορικό της γεωθερμίας

Η παρουσία ηφαιστείων, θερμών πηγών και άλλων επιφανειακών εκδηλώσεων θερμότητας είναι αυτή που οδήγησε τους προγόνους μας στο συμπέρασμα ότι το εσωτερικό της γης είναι ζεστό. Όμως, μόνο κατά την περίοδο μεταξύ του 16^{ου} και 17^{ου} αιώνα, όταν δηλαδή κατασκευάστηκαν τα πρώτα μεταλλεία που ανορύχθηκαν σε βάθος μερικών εκατοντάδων μέτρων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, οι άνθρωποι, με τη βοήθεια κάποιων απλών φυσικών παρατηρήσεων, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία της γης αυξάνεται με το βάθος.

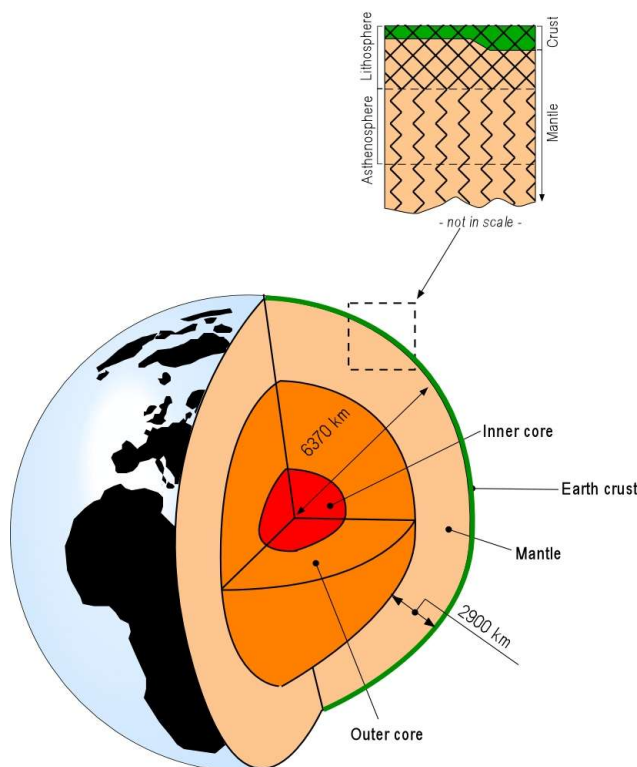
Οι πρώτες μετρήσεις με θερμομέτρο έγιναν κατά πάσα πιθανότητα το 1740, σε ένα ορυχείο κοντά στο Belfort της Γαλλίας (Bullard, 1965). Ήδη από το 1870, για τη μελέτη της θερμικής κατάστασης του εσωτερικού της γης χρησιμοποιούνταν κάποιες προχωρημένες για την εποχή επιστημονικές μέθοδοι, ενώ η θερμική κατάσταση που διέπει τη γη, η θερμική ισορροπία και εξέλιξή της κατανοήθηκαν καλύτερα τον 20^ο αιώνα, με την ανακάλυψη του ρόλου της «ραδιενεργής θερμότητας». Πράγματι, σε όλα τα σύγχρονα πρότυπα (μοντέλα) της θερμικής κατάστασης του εσωτερικού της γης πρέπει να συμπεριλαμβάνεται 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). Εκτός από τη ραδιενεργό θερμότητα, δρουν αθροιστικά, σε απροσδιόριστες όμως ποσότητες, και άλλες δυνητικές πηγές θερμότητας, όπως είναι η «αρχέγονη ενέργεια» από την εποχή δημιουργίας και μεγέθυνσης του πλανήτη. Μέχρι τη δεκαετία του 1980 τα μοντέλα αυτά δεν βασίζονταν σε κάποιες ρεαλιστικές θεωρίες. Τότε όμως αποδείχθηκε ότι αφενός δεν υπάρχει ισοζύγιο μεταξύ της ραδιενεργής θερμότητας που δημιουργείται στο εσωτερικό της γης και της θερμότητας που διαφεύγει από τη γη προς στο διάστημα, και αφετέρου ότι ο πλανήτης μας ψύχεται με αργό ρυθμό και στο εσωτερικό του.

Ως μια γενική ιδέα της φύσης και της κλίμακας του εμπλεκόμενου φαινομένου, 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 42×10^{12} W. Από αυτά, 8×10^{12} W προέρχονται από το φλοιό, που αντιπροσωπεύει μόνο το 2% του συνολικού όγκου της γης αλλά είναι πλούσιος σε ραδιενεργά ισότοπα, $32,3 \times 10^{12}$ W προέρχονται από το μανδύα, ο οποίος αντιπροσωπεύει το 82% του συνολικού όγκου της γης, και $1,7 \times 10^{12}$ W προέρχονται από τον πυρήνα, ο οποίος αντιπροσωπεύει το 16% του συνολικού όγκου της γης και δεν περιέχει ραδιενεργά ισότοπα (βλέπε Σχήμα 1, ένα σχήμα της εσωτερικής δομής της γης). Αφού η ραδιενεργή θερμότητα του μανδύα εκτιμάται σε 22×10^{12} W, η μείωση της θερμότητας στο συγκεκριμένο τμήμα της γης είναι $10,3 \times 10^{12}$ W. Σύμφωνα με πιο πρόσφατες εκτιμήσεις και υπολογισμούς, που βασίζονται σε μεγαλύτερο αριθμό δεδομένων, η ολική θερμική ροή της γης είναι περίπου 6% υψηλότερη από τις τιμές που χρησιμοποίησαν οι Stacey and Loper το 1988. Ούτως ή άλλως όμως, η διαδικασία ψύξης παραμένει αργή. Η θερμοκρασία του μανδύα δεν έχει μειωθεί περισσότερο από 300-350°C τα τελευταία 3 δισεκατομμύρια χρόνια, παραμένοντας περίπου στους 4000°C στη βάση του. Έχει υπολογιστεί ότι το συνολικό θερμικό περιεχόμενο της γης (για θερμοκρασίες πάνω από τη μέση επιφανειακή των 15°C) είναι της τάξης των $12,6 \times 10^{24}$ MJ και του φλοιού $5,4 \times 10^{21}$ MJ (Armstead, 1983).

Όπως λοιπόν προκύπτει από τα παραπάνω, 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 (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*

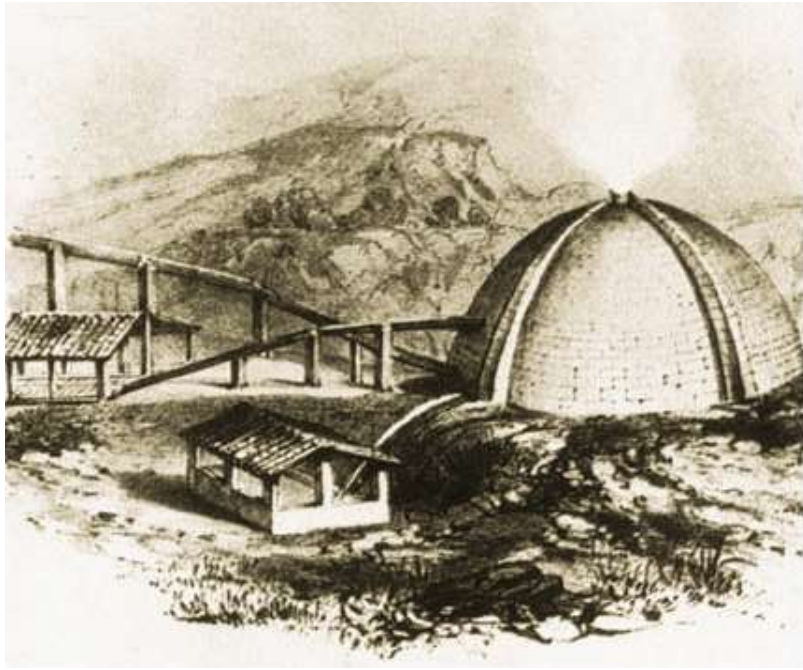
πόροι (geothermal resources). Πιθανώς, στο άμεσο μέλλον, νέες πρωτοποριακές τεχνικές θα μας προσφέρουν καινούργιες προοπτικές στον τομέα αυτόν.



Σχήμα 1

Ο Φλοιός, ο Μανδύας και ο Πυρήνας της γης. Πάνω δεξιά: τομή του φλοιού και του ανώτερου μανδύα

Σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης ζωής οι πρακτικές εφαρμογές προηγούνται της επιστημονικής έρευνας και της τεχνολογικής ανάπτυξης. Η γεωθερμία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα του φαινομένου αυτού. Αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχόμενου των γεωθερμικών ρευστών γινόταν ήδη από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα. Εκείνη την περίοδο, στην Τοσκάνη της Ιταλίας, και συγκεκριμένα στην περιοχή του Larderello, λειτουργούσε μια χημική βιομηχανία για την παραγωγή βορικού οξέος από τα βοριούχα θερμά νερά που ανέβλυζαν από φυσικές πηγές ή αντλούνταν από ρηχές γεωτρήσεις. Η παραγωγή του βορικού οξέος γινόταν με εξάτμιση των βοριούχων νερών μέσα σε σιδερένιους «λέβητες», χρησιμοποιώντας ως καύσιμη ύλη ξύλα από τα κοντινά δάση. Το 1827, ο Francesco Larderel, ιδρυτής της βιομηχανίας αυτής, αντί να καίγονται ξύλα από τα διαρκώς αποψιλούμενα δάση της περιοχής, ανέπτυξε ένα σύστημα για τη χρήση της θερμότητας των βοριούχων ρευστών στη διαδικασία εξάτμισης (Σχήμα 2).



Σχήμα 2

Η καλυμμένη «λιμνούλα» (covered lagoon), που χρησιμοποιούνταν κατά το πρώτο μισό του 19^{ου} αιώνα στην περιοχή του Larderello, για τη συλλογή των βοριούχων υδάτων και την παραγωγή βορικού οξέος.

Η εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του φυσικού ατμού ξεκίνησε περίπου την ίδια περίοδο. Ο γεωθερμικός ατμός χρησιμοποιήθηκε για την ανέλκυση των ρευστών, αρχικά με κάποιους πρωτόγονους αέριους ανυψωτήρες και στη συνέχεια με παλινδρομικές και φυγοκεντρικές αντλίες και βαρούλκα. Ανάμεσα στο 1850 και 1875, οι εγκαταστάσεις του Larderello κατείχαν το μονοπώλιο παραγωγής βορικού οξέος στην Ευρώπη. Μεταξύ του 1910 και του 1940, στην περιοχή αυτή της Τοσκάνης ο χαμηλής πίεσης ατμός άρχισε να χρησιμοποιείται για τη θέρμανση βιομηχανικών κτιρίων, κατοικιών και θερμοκηπίων. Εν τω μεταξύ, ολοένα και περισσότερες χώρες άρχισαν να αναπτύσσουν τους γεωθερμικούς τους πόρους σε βιομηχανική κλίμακα. Το 1892, το πρώτο γεωθερμικό σύστημα τηλε-θέρμανσης (district heating) τέθηκε σε λειτουργία στο Boise του Άινταχο των Η.Π.Α.. Το 1928, μια άλλη πρωτοπόρος χώρα στην εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας, η Ισλανδία, ξεκίνησε επίσης την εκμετάλλευση των γεωθερμικών ρευστών (κυρίως θερμών νερών) για τη θέρμανση κατοικιών.

Το 1904, έγινε η πρώτη απόπειρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικό ατμό, και πάλι στο Larderello της Ιταλίας (Σχήμα 3).



Σχήμα 3

Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε στο Larderello το 1904 κατά την πρώτη πειραματική απόπειρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικό ατμό. Διακρίνεται επίσης ο εφευρέτης της, πρίγκηπας Piero Ginori Conti.

Η επιτυχία της αυτής πειραματικής προσπάθειας έδωσε μια ξεκάθαρη ένδειξη για τη βιομηχανική αξία της γεωθερμικής ενέργειας και σηματοδότησε την έναρξη μιας μορφής εκμετάλλευσης, που επρόκειτο έκτοτε να αναπτυχθεί σημαντικά. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο Larderello αποτέλεσε πράγματι μια εμπορική επιτυχία. Το 1942, η εγκατεστημένη γεωθερμο-ηλεκτρική ισχύς ανερχόταν στα 127.650 kWe. Σύντομα, πολλές χώρες ακολούθησαν το παράδειγμα της Ιταλίας. Το 1919 κατασκευάστηκαν οι πρώτες γεωθερμικές γεωτρήσεις στο Berpu της Ιαπωνίας, ενώ το 1921 ακολούθησαν εκείνες στο The Geysers της Καλιφόρνιας των ΗΠΑ. Το 1958 ένα μικρό εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τέθηκε σε λειτουργία στη Νέα Ζηλανδία, ένα άλλο στο Μεξικό το 1959, στις ΗΠΑ το 1960 και ακολούθησαν πολλά άλλα σε διάφορες χώρες.

Σημερινό καθεστώς χρήσης της γεωθερμίας

Μετά το 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο, η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας έγινε ελκυστική σε πολλές χώρες, επειδή ήταν ανταγωνιστική ως προς άλλες μορφές ενέργειας. Επιπλέον, η ενέργεια αυτή δε χρειαζόταν να εισαχθεί από άλλες χώρες, όπως συμβαίνει με τα ορυκτά καύσιμα ενώ σε πολλές περιπτώσεις αποτελούσε τον μοναδικό διαθέσιμο εγχώριο ενεργειακό πόρο. Στον Πίνακα 1 αναφέρονται οι χώρες που χρησιμοποιούν τη γεωθερμική ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρισμού, καθώς και η εγκατεστημένη γεωθερμική ηλεκτρική ισχύς: 1995 (6.833 MWe), 2000 (7.974 MWe)

και η αύξηση μεταξύ των ετών 1995-2000 (Huttrer, 2001). Στον ίδιο Πίνακα φαίνεται επίσης η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στις αρχές του 2003 (9.028 MWe). Η εγκατεστημένη γεωθερμική ηλεκτρική ισχύς στις αναπτυσσόμενες χώρες το 1995 και το 2000 αντιπροσωπεύει αντίστοιχα το 38% και το 47% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος παγκοσμίως.

Πίνακας 1. Εγκατεστημένη θερμική ισχύς σε παγκόσμια κλίμακα, από το 1995 έως το 2000 (Huttrer, 2001) και στις αρχές του 2003.

Country	1995 (MWe)	2000 (MWe)	1995-2000 (increase in MWe)	% increase (1995-2000)	2003 (MWe)
Argentina	0.67	-	-	-	-
Australia	0.15	0.15	-	-	0.15
Austria	-	-	-	-	1.25
China	28.78	29.17	0.39	1.35	28.18
Costa Rica	55	142.5	87.5	159	162.5
El Salvador	105	161	56	53.3	161
Ethiopia	-	7	7	-	7
France	4.2	4.2	-	-	15
Germany	-	-	-	-	0.23
Guatemala	-	33.4	33.4	-	29
Iceland	50	170	120	240	200
Indonesia	309.75	589.5	279.75	90.3	807
Italy	631.7	785	153.3	24.3	790.5
Japan	413.7	546.9	133.2	32.2	560.9
Kenya	45	45	-	-	121
Mexico	753	755	2	0.3	953
New Zealand	286	437	151	52.8	421.3
Nicaragua	70	70	-	-	77.5
Papua New Guinea	-	-	-	-	6
Philippines	1227	1909	682	55.8	1931
Portugal	5	16	11	220	16
Russia	11	23	12	109	73
Thailand	0.3	0.3	-	-	0.3
Turkey	20.4	20.4	-	-	20.4
USA	2816.7	2228	-	-	2020
Total	6833.35	7972.5	1728.54	16.7	8402.21

Η χρησιμοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας στις αναπτυσσόμενες χώρες παρουσιάζει ενδιαφέρουσες τάσεις με το χρόνο. Μεταξύ των ετών 1975 και 1979 η εγκατεστημένη γεωθερμική ηλεκτρική ισχύς σ' αυτές τις χώρες αυξήθηκε από 75 σε 462 MWe. Στο τέλος της επόμενης πενταετίας (1984) έφτασε στα 1.495 MWe, παρουσιάζοντας ένα ρυθμό αύξησης κατά τη διάρκεια των δύο αυτών περιόδων 500%

και 223% αντίστοιχα (Dickson and Fanelli, 1988). Στα επόμενα 16 χρόνια, από το 1984 έως το 2000, υπήρξε μια περαιτέρω αύξηση της τάξης του 150%.

Η γεωθερμική ενέργεια συμμετέχει σημαντικά στο ενεργειακό ισοζύγιο αρκετών περιοχών. Για παράδειγμα, το 2001 η ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε από γεωθερμικούς πόρους αντιπροσώπευε το 27% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας στις Φιλιππίνες, το 12,4 % στην Κένυα, το 11,4% στην Κόστα Ρίκα και το 4,3% στο Ελ Σαλβαδόρ.

Όσον αφορά τις μη-ηλεκτρικές ή άμεσες εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας, ο Πίνακας 2 δίνει την εγκατεστημένη ισχύ (15.145 MW_e) και την ενεργειακή παραγωγή και χρήση (190.699 TJ) σε παγκόσμια κλίμακα για το έτος 2000. Κατά τη διάρκεια του έτους αυτού, άμεσες χρήσεις (direct uses) της γεωθερμίας καταγράφηκαν σε 58 χώρες, σε σύγκριση με τις 28 το 1995 και τις 24 το 1985. Ο αριθμός των χωρών αυτών είναι πολύ πιθανόν να έχει αυξηθεί από το 2000, όπως φυσικά και το ύψος της εγκατεστημένης ισχύος και της ενεργειακής χρήσης.

Η πιο συνηθισμένη μη-ηλεκτρική χρήση της γεωθερμίας παγκόσμια είναι οι αντλίες θερμότητας (heat-pumps) (34,80%) και ακολουθούν η λουτροθεραπεία (26,2%), η θέρμανση χώρων (21,62%), η θέρμανση θερμοκηπίων (8,22%), οι υδατοκαλλιέργειες (3,93%) και οι βιομηχανικές χρήσεις (3,13%) (Lund and Freeston, 2001).

Πίνακας 2. Μη-ηλεκτρικές χρήσεις της ηλεκτρικής ενέργειας ανά τον κόσμο (2000): εγκατεστημένη ισχύς (σε MW_e) και ενεργειακή χρήση (σε TJ/έτος) (Lund and Freeston, 2001).

Country	Power (MW _e)	Energy (TJ/yr)
Algeria	100	1586
Argentina	25.7	449
Armenia	1	15
Australia	34.4	351
Austria	255.3	1609
Belgium	3.9	107
Bulgaria	107.2	1637
Canada	377.6	1023
Caribbean Islands	0.1	1
Chile	0.4	7
China	2282	37 908
Colombia	13.3	266
Croatia	113.9	555
Czech Republic	12.5	128
Denmark	7.4	75

Egypt	1	15
Finland	80.5	484
France	326	4895
Georgia	250	6307
Germany	397	1568
Greece	57.1	385
Guatemala	4.2	117
Honduras	0.7	17
Hungary	472.7	4086
Iceland	1469	20170
India	80	2517
Indonesia	2.3	43
Israel	63.3	1713
Italy	325.8	3774
Japan	1167	26933
Jordan	153.3	1540
Kenya	1.3	10
Korea	35.8	753
Lithuania	21	599
Macedonia	81.2	510
Mexico	164.2	3919
Nepal	1.1	22
Netherlands	10.8	57
New Zealand	307.9	7081
Norway	6	32
Peru	2.4	49
Philippines	1	25
Poland	68.5	275
Portugal	5.5	35
Romania	152.4	2871
Russia	308.2	6144
Serbia	80	2375
Slovak Republic	132.3	2118
Slovenia	42	705
Sweden	377	4128
Switzerland	547.3	2386
Thailand	0.7	15
Tunisia	23.1	201
Turkey	820	15756
United Kingdom	2.9	21
USA*	3766	20302
Venezuela	0.7	14
Yemen	1	15
Total	15145	190699

Η ΦΥΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Η θερμική μηχανή της γης

Η *γεωθερμική βαθμίδα* ορίζεται ως ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας της γης σε συνάρτηση με το βάθος, μέσα στο γήινο φλοιό. Σε βάθη που είναι προσβάσιμα με τις σύγχρονες γεωτρητικές μεθόδους, δηλαδή μέχρι τα 10.000 m, η μέση γεωθερμική βαθμίδα κυμαίνεται περίπου στους 2,5-3°C/100 m. Για παράδειγμα, εάν η θερμοκρασία στα πρώτα μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ανταποκρίνεται κατά μέσο όρο στη μέση ετήσια θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα, δηλ. 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.

Λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στα διάφορα στρώματα, προκαλείται ροή θερμότητας από τις βαθιές και θερμές ζώνες του υπεδάφους προς τις ρηχές και ψυχρότερες, τείνοντας έτσι στη δημιουργία ομοιόμορφων συνθηκών. Στην πραγματικότητα όμως, όπως πολύ συχνά συμβαίνει στη φύση, κάτι τέτοιο ουδέποτε επιτυγχάνεται πλήρως. Η μέση γήινη ροή θερμότητας στις ηπείρους και τους ωκεανούς είναι 65 και 101 mW/m² 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 24.774 μετρήσεις σε 20.201 θέσεις, που καλύπτουν το 62% περίπου της γήινης επιφάνειας. Υπάρχουν βέβαια και κάποιοι εμπειρικοί υπολογισμοί που αναφέρονται σε γεωλογικές χαρτογραφικές μονάδες και επιτρέπουν την εκτίμηση της θερμικής ροής χωρίς να προηγηθούν μετρήσεις. Η ανάλυση της θερμικής ροής από τους Pollack et al. (1993) είναι η πιο πρόσφατη και η μόνη σε έντυπη μορφή. Το Πανεπιστήμιο της Βόρ. Ντακότα, επιτρέπει σήμερα την πρόσβαση μέσω του Διαδικτύου σε μια ανανεωμένη βάση δεδομένων θερμικής ροής, που περιλαμβάνει στοιχεία τόσο από ωκεάνιες όσο και από ηπειρωτικές περιοχές.

Η θερμοκρασία αυξάνεται με το βάθος, και τα ηφαίστεια, οι θερμοπίδακες (geysers), οι θερμές πηγές κλπ, αποτελούν κατά μία έννοια την ορατή εκδήλωση της θερμότητας του εσωτερικού της γης. 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». Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να τα περιγράψουμε με απλό τρόπο και να αναλύσουμε τη σχέση τους με τους γεωθερμικούς πόρους.

Ο πλανήτης μας αποτελείται από το *φλοιό*, το πάχος του οποίου κυμαίνεται από 20-65 km περίπου στις ηπειρωτικές περιοχές και 5-6 km στις ωκεάνιες, από το *μανδύα*, το πάχος του οποίου είναι κατά προσέγγιση 2.900 km και τον *πυρήνα* με ακτίνα περίπου 3.470 km (Σχήμα 1). Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του φλοιού, του μανδύα και του πυρήνα διαφέρουν από την επιφάνεια προς το κέντρο της γης. Το εξωτερικό στερεό περίβλημα της γης, γνωστό ως *λιθόσφαιρα*, αποτελείται από το φλοιό και το ανώτερο τμήμα του μανδύα. Έχοντας μεταβαλλόμενο πάχος, από λιγότερο των 80 km στις ωκεάνιες ζώνες μέχρι πάνω από 200 km στις ηπειρωτικές, η λιθόσφαιρα συμπεριφέρεται σαν ένα συμπαγές σώμα. Κάτω από τη λιθόσφαιρα βρίσκεται η ζώνη που ονομάζεται *ασθενόσφαιρα*, πάχους 200-300 km και με μια λιγότερο «συμπαγή» και περισσότερο «πλαστική» συμπεριφορά. Με άλλα λόγια, στη γεωλογική κλίμακα, όπου ο χρόνος μετρείται σε εκατομμύρια χρόνια, αυτό το τμήμα της γης συμπεριφέρεται πιο κοντά με ένα ρευστό σε κάποιες διαδικασίες.

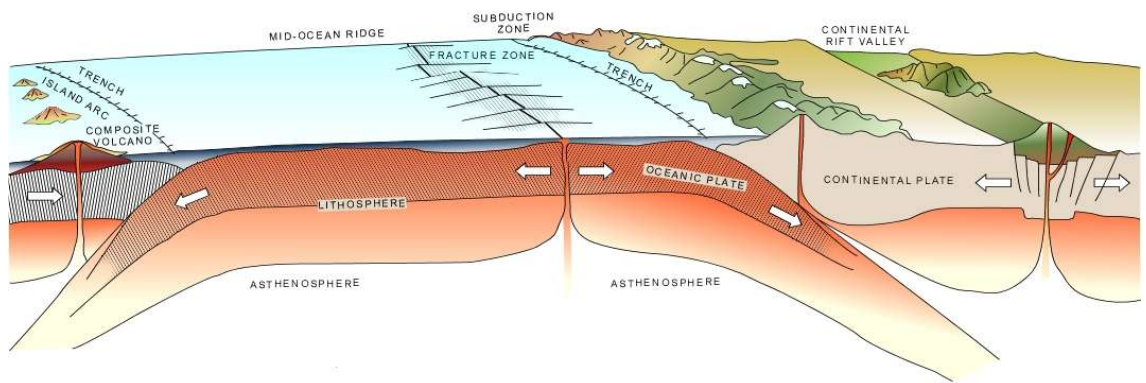
Εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στα διάφορα τμήματα της ασθενόσφαιρας, δημιουργήθηκαν πριν από μερικές δεκάδες εκατομμύρια έτη μεταφορικές (συναγωγικές) κινήσεις μεταξύ της στερεάς βάσης αυτού του στρώματος και της βάσης του φλοιού και πιθανώς κάποιοι συναγωγικοί θύλακες. Οι κινήσεις αυτές θεωρούνται τα βασικά αίτια μετατόπισης των λιθοσφαιρικών πλακών. Είναι εξαιρετικά αργές (λίγα εκατοστά/έτος), παρόλα αυτά σταθερές, λόγω της συνεχούς παραγωγής θερμότητας από τη διάσπαση των ραδιενεργών στοιχείων και της προσφοράς θερμότητας από τα μεγαλύτερα βάθη της γης. Λόγω των κινήσεων αυτών, τεράστιοι όγκοι βαθύτερων και θερμών λιωμένων πετρωμάτων, με μικρότερη πυκνότητα και συνεπώς μικρότερο βάρος, ανέρχονται προς την επιφάνεια, ενώ ψυχρότερα και βαρύτερα πετρώματα, που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια, βυθίζονται, αναθερμαίνονται και ανεβαίνουν πάλι στην επιφάνεια.

Στις ζώνες μικρού λιθοσφαιρικού πάχους, και κυρίως στις ωκεάνιες περιοχές, η λιθόσφαιρα ωθείται προς τα πάνω και στη συνέχεια κατακερματίζεται εξαιτίας της ανόδου των θερμών, και εν μέρει λιωμένων υλικών της ασθενόσφαιρας, εκεί όπου σχηματίζεται ο ανερχόμενος κλάδος των συναγωγικών θαλάμων. Αυτός ακριβώς είναι ο μηχανισμός που δημιούργησε και συνεχίζει να δημιουργεί τις «εκτεινόμενες ράχες (spreading ridges)», οι οποίες εκτείνονται σε μήκος μεγαλύτερο των 60 km

κάτω από τους ωκεανούς. Οι ράχεις αυτές σε κάποιες περιοχές, όπως στις Αζόρες και την Ισλανδία, αναδύονται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ σε άλλες, όπως στην Ερυθρά Θάλασσα, αναδύονται ανάμεσα στις ηπείρους. Ένα σχετικά μικρό ποσοστό αυτών των ασθenoσφαιρικών λωμένων υλικών αναδύονται στην επιφάνεια της γης μέσω των κορυφογραμμών των υποθαλάσσιων οροσειρών (ράχων) και, ερχόμενα σε επαφή με το θαλασσινό νερό, ψύχονται, στερεοποιούνται και σχηματίζουν με τον τρόπο αυτό νέο ωκεάνιο φλοιό. Το μεγαλύτερο όμως μέρος του ασθenoσφαιρικού αυτού υλικού χωρίζεται σε δύο κλάδους, οι οποίοι κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις κάτω από τη λιθόσφαιρα, στη θέση ακριβώς των «μεσο-ωκεάνιων ράχων». Η συνεχής δημιουργία νέου φλοιού και η απόκλιση του ωκεάνιου πυθμένα με ένα ρυθμό της τάξης των λίγων εκατοστών ανά έτος, προκαλεί συνεχή αύξηση της ωκεάνιας λιθόσφαιρας. Σε άλλα σημεία της λιθόσφαιρας σχηματίζονται τεράστιες κατακόρυφες διαρρήξεις, εκατέρωθεν των οποίων παρατηρείται οριζόντια μετακίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών. Οι διαρρήξεις αυτές μπορούν να φτάσουν σε μήκος μερικών χιλιάδων χιλιομέτρων και ονομάζονται «ρήγματα μετασχηματισμού».

Τα φαινόμενα αυτά οδηγούν σε μια εύστοχη παρατήρηση: αφού τελικά η συνολική επιφάνεια των λιθοσφαιρικών πλακών παραμένει περίπου σταθερή στο χρόνο, η συνεχής δημιουργία νέου φλοιού στις μεσοωκεάνιες ράχεις και το άνοιγμα των ωκεάνιων τμημάτων θα πρέπει να εξισορροπείται κατά κάποιον τρόπο από συρρίκνωση (καταστροφή) της λιθόσφαιρας σε άλλα σημεία της γης. Αυτό ακριβώς συμβαίνει στις λεγόμενες «ζώνες καταβύθισης», οι μεγαλύτερες από τις οποίες καταδικνύονται από τις τεράστιες ωκεάνιες τάφρους, όπως αυτές π.χ. που εκτείνονται κατά μήκος των δυτικών ορίων του Ειρηνικού Ωκεανού και των δυτικών ακτών της Νότιας Αμερικής. Στις ζώνες καταβύθισης η λιθόσφαιρα κάμπτεται και βυθίζεται κάτω από την παρακείμενη λιθόσφαιρα και φθάνει μέσα στις πολύ θερμές και βαθιές ζώνες της, όπου αφομοιώνεται από το μανδύα και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Μέρος του υλικού της λιθόσφαιρας επανατήκεται και ανεβαίνει πάλι προς την επιφάνεια μέσω των ρηγμάτων του φλοιού. Συνέπεια αυτών των φαινομένων είναι η δημιουργία «μαγματικών τόξων» με πολλά ηφαίστεια που εντοπίζονται παράλληλα προς τις τάφρους, στην αντίθετη πλευρά των οροσειρών. Όταν οι τάφροι βρίσκονται κατά μήκος των ηπειρωτικών περιθωρίων, τότε τα τόξα αποτελούνται από αλυσίδες οροσειρών με πολλά ηφαίστεια, όπως είναι οι Άνδεις. Όταν οι τάφροι εντοπίζονται σε ωκεάνιες περιοχές, όπως στον Ειρηνικό ωκεανό, τα μαγματικά τόξα αποτελούνται

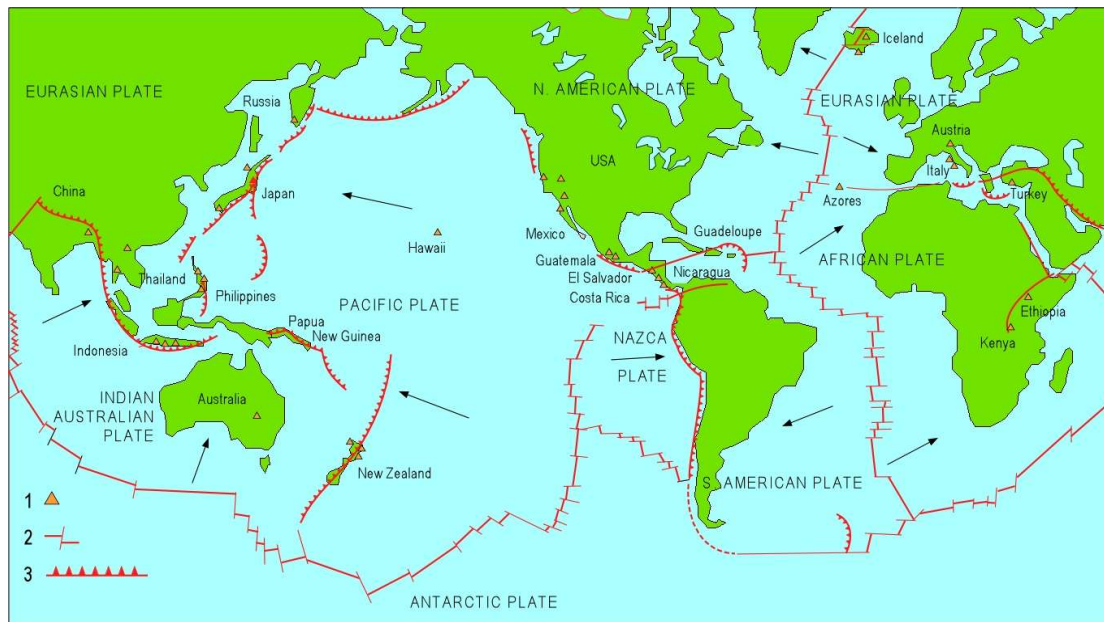
από πολλά ηφαιστειακά νησιά (π.χ. Ιαπωνία, Φιλιππίνες κλπ.). Στο Σχήμα 4 περιγράφονται ακριβώς αυτά τα φαινόμενα.



Σχήμα 4

Σχηματική τομή που δείχνει τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στις τεκτονικές πλάκες.

Οι μεσωκεάνιες ράχες, τα ρήγματα μετασχηματισμού και οι ζώνες καταβύθισης σχηματίζουν ένα εκτεταμένο δίκτυο που χωρίζει την επιφάνεια της γης σε έξι τεράστιες και πολλές άλλες μικρότερες λιθοσφαιρικές περιοχές ή καλύτερα πλάκες (Σχήμα 5). Εξαιτίας των τεράστιων τάσεων που προκαλούνται από τη γήινη θερμική μηχανή και την ασυμμετρία των ζωνών που δημιουργούν και καταστρέφουν λιθοσφαιρικό υλικό, οι πλάκες αυτές κινούνται αργά η μία προς την άλλη, αλλάζοντας συνεχώς τη σχετική τους θέση. Τα όρια των πλακών αντιστοιχούν σε πολύ διαρρηγμένες ζώνες του φλοιού, που χαρακτηρίζονται από έντονη σεισμικότητα, μεγάλο αριθμό ηφαιστείων και, λόγω της ανόδου πολύ θερμών υλικών προς την επιφάνεια, από υψηλή γήινη θερμική ροή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, οι πιο σημαντικές γεωθερμικές περιοχές εντοπίζονται κοντά στα όρια των πλακών.



Σχήμα 5

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

(1) Γεωθερμικά πεδία όπου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια

(2) Μεσωκεάνιες ράχες που τέμνονται από μεγάλα ρήγματα μετασχηματισμού

(3) Ζώνες καταβύθισης, όπου η βυθιζόμενη πλάκα κάμπτεται προς τα κάτω και λιώνει μέσα στην ασθενόσφαιρα.

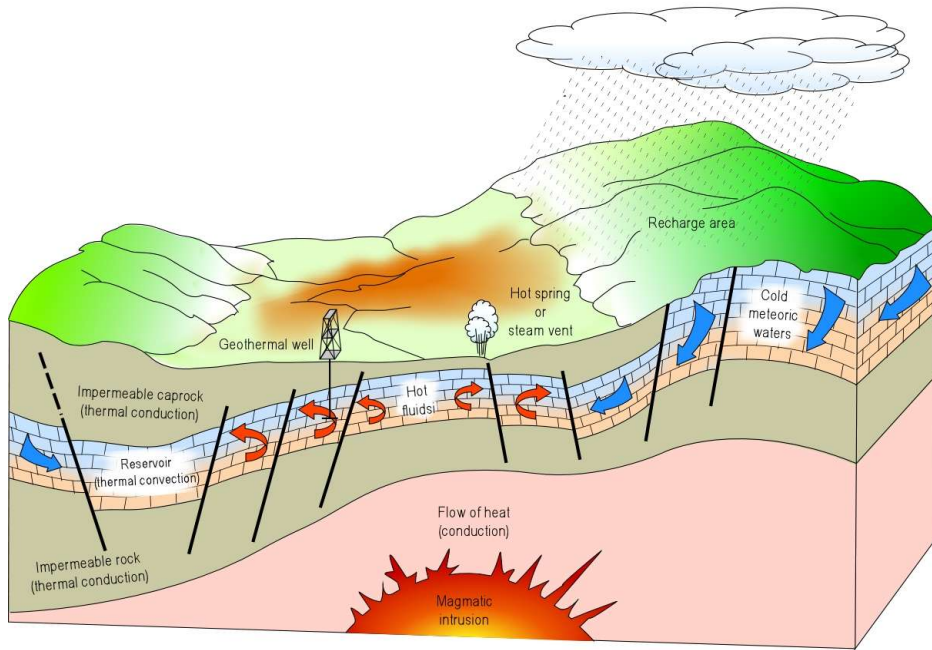
Γεωθερμικά συστήματα

Τα γεωθερμικά συστήματα 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, όπου η βαθμίδα μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερη της μέσης τιμής. Στην πρώτη περίπτωση, τα γεωθερμικά συστήματα χαρακτηρίζονται από χαμηλές θερμοκρασίες, που συνήθως δεν ξεπερνούν τους 100°C σε οικονομικά και προσβάσιμα βάθη. Στη δεύτερη περίπτωση, οι θερμοκρασίες μπορεί να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, από σχετικά χαμηλές τιμές μέχρι και μεγαλύτερες από 400°C.

Τι είναι όμως ένα «γεωθερμικό σύστημα» 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 «κινούμενο νερό» το οποίο μεταφέρει θερμότητα από μια «πηγή» σε μια «δεξαμενή» θερμότητας, που συνήθως είναι μια ελεύθερη επιφάνεια (Hochstein, 1990). Έτσι λοιπόν, ένα γεωθερμικό

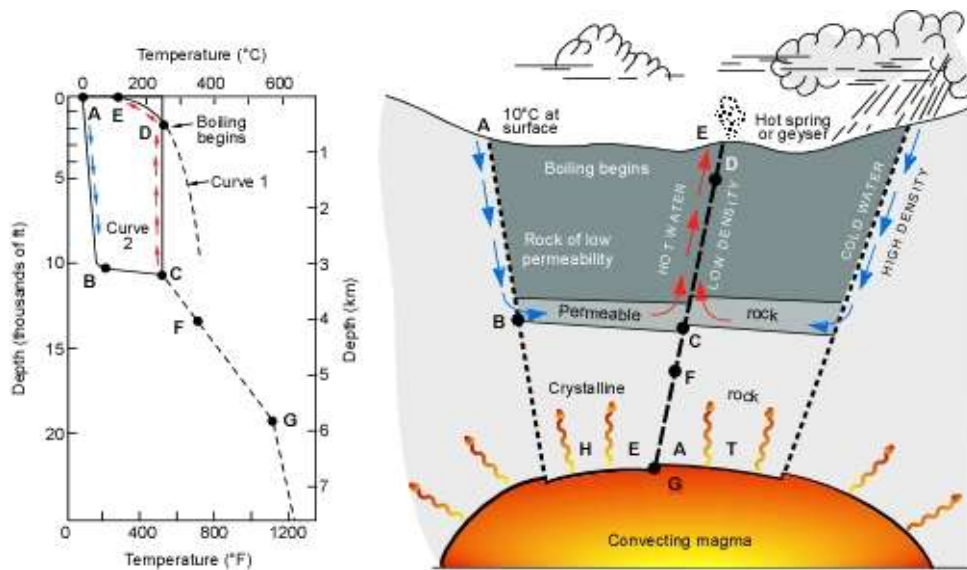
σύστημα αποτελείται από τρία στοιχεία: την *εστία θερμότητας*, τον *ταμιευτήρα* και το *ρευστό*, το οποίο λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας. Η εστία θερμότητας μπορεί να είναι είτε μια πολύ υψηλής (>600°C) θερμοκρασίας μαγματική διείσδυση που έχει φτάσει σε σχετικά μικρά βάθη (5-10 km) ή, στα χαμηλής θερμοκρασίας συστήματα, η κανονική θερμοκρασία των πετρωμάτων του εσωτερικού της γης, η οποία όπως αναφέρθηκε αυξάνεται με το βάθος. Ο ταμιευτήρας είναι ένας σχηματισμός από θερμά υδατοπερατά πετρώματα, που επιτρέπει την κυκλοφορία των ρευστών μέσα σε αυτόν και από τον οποίο τα ρευστά αντλούν θερμότητα. Πάνω από τον ταμιευτήρα βρίσκεται συνήθως ένα κάλυμμα αδιαπέρατων πετρωμάτων. Ο ταμιευτήρας πολλές φορές συνδέεται με μια επιφανειακή περιοχή τροφοδοσίας, διαμέσου της οποίας μετεωρικό ή επιφανειακό γενικά νερό κατεβαίνει και αντικαθιστά μερικώς ή ολικώς τα ρευστά που φεύγουν από τον ταμιευτήρα και εξέρχονται στην επιφάνεια με τη μορφή θερμών πηγών ή αντλούνται από γεωτρήσεις. Το γεωθερμικό ρευστό συνήθως είναι νερό, στις περισσότερες περιπτώσεις μετεωρικής προέλευσης, το οποίο, ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στον ταμιευτήρα, βρίσκεται σε υγρή ή αέρια κατάσταση. Συχνά το ρευστό είναι εμπλουτισμένο σε χημικά στοιχεία και αέρια, όπως CO₂, H₂S, κλπ. Στο Σχήμα 6 αποτυπώνεται σε πολύ απλουστευμένη μορφή ένα πρότυπο γεωθερμικό σύστημα.

Ο μηχανισμός που διέπει τη λειτουργία των γεωθερμικών συστημάτων εν γένει ελέγχεται από τη μεταφορά θερμότητας μέσω της (συναγωγής/κυκλοφορίας) των ρευστών (fluid convection). Στο Σχήμα 7 παριστάνεται σχηματικά ο μηχανισμός στην περίπτωση ενός υδροθερμικού συστήματος ενδιάμεσης θερμοκρασίας. Η θερμική συναγωγή λαμβάνει χώρα λόγω της θέρμανσης και, κατ' επέκταση, της θερμικής διαστολής των ρευστών σε ένα πεδίο βαρύτητας. Η ενέργεια που προκαλεί το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι ουσιαστικά η θερμότητα που προσφέρεται από την εστία στη βάση του συστήματος κυκλοφορίας. Η πυκνότητα των ρευστών που θερμαίνονται μειώνεται, οπότε αυτά παρουσιάζουν τάσεις ανόδου προς μικρότερα βάθη, ενώ αντικαθίστανται στη συνέχεια από ρευστά μικρότερης θερμοκρασίας και μεγαλύτερης πυκνότητας, που προέρχονται από τα περιθώρια του γεωθερμικού συστήματος. Λόγω της θερμικής συναγωγής προκαλείται λοιπόν θερμοκρασιακή αύξηση στο ανώτερο τμήμα του γεωθερμικού συστήματος, καθώς οι θερμοκρασίες στα κατώτερα τμήματα μειώνονται (White, 1973).



Σχήμα 6

Σχηματική αναπαράσταση ενός ιδανικού γεωθερμικού συστήματος



Σχήμα 7

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) (Από White, 1973)

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.

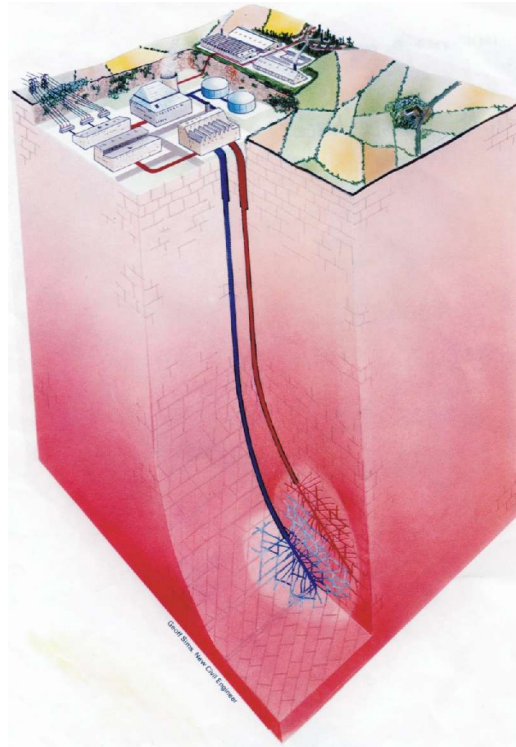
Από τα τρία στοιχεία ενός γεωθερμικού συστήματος, η εστία θερμότητας είναι το μόνο που απαραίτητως πρέπει να έχει φυσική προέλευση. Εάν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές, τα άλλα δύο στοιχεία μπορεί να είναι και «τεχνητά». Για παράδειγμα, τα γεωθερμικά ρευστά που αντλούνται από τον ταμιευτήρα και χρησιμοποιούνται 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.

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, τα οποία είχαν εγκαταλειφθεί εξαιτίας της έλλειψης ρευστών. Σε άλλη περίπτωση, και στα πλαίσια του Santa Rosa Geysers Recharge Project, 41,5 εκατομμύρια λίτρα επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων θα αντλούνται κάθε μέρα από τους τοπικούς σταθμούς επεξεργασίας της Santa Rosa και άλλων γειτονικών πόλεων και θα μεταφέρονται μέσω ενός δικτύου σωληνώσεων συνολικού μήκους 66 km στο γεωθερμικό πεδίο «The Geysers», όπου θα χρησιμοποιηθούν για την επανατροφοδοσία του ταμιευτήρα διαμέσου ειδικά διατηρηθέντων γεωτρήσεων.

Στα Προγράμματα των αποκαλούμενων *Θερμών Ξηρών Πετρωμάτων* (Hot Dry Rocks), για τα οποία έγιναν για πρώτη φορά πειραματικές δοκιμές το 1970 στο Los Alamos του Νέου Μεξικού (ΗΠΑ), τόσο τα ρευστά όσο και ο ταμιευτήρας είναι τεχνητά. Στην περίπτωση λοιπόν των HDR γίνεται, μέσω ειδικών γεωτρήσεων, τεχνητή εισαγωγή νερού με μεγάλη πίεση σε ένα θερμό και συμπαγές πέτρωμα, το οποίο βρίσκεται σε μεγάλο βάθος. Η εισπίεση αυτή προκαλεί στο πέτρωμα «υδραυλική διάρρηξη». Το νερό διαπερνά τις τεχνητές διαρρήξεις και λόγω της επαφής του με μεγάλες επιφάνειες θερμού πετρώματος αντλεί θερμότητα από αυτόν τον μεγάλο σε όγκο σχηματισμό, ο οποίος λειτουργεί ως ένας φυσικός ταμιευτήρας. Στη συνέχεια, ο «ταμιευτήρας» διαπερνάται από μια δεύτερη γεώτρηση, μέσα από την οποία αντλείται το νερό που θερμάνθηκε. Έτσι λοιπόν, το συγκεκριμένο γεωθερμικό σύστημα αποτελείται (i) από τη γεώτρηση που χρησιμοποιείται για την υδραυλική διάρρηξη, μέσω της οποίας εισπιάζεται κρύο νερό στον (ii) τεχνητό ταμιευτήρα και (iii) από τη γεώτρηση άντλησης του θερμού νερού. Όλο αυτό το σύστημα, μαζί με τις εγκαταστάσεις στην επιφάνεια, σχηματίζουν ένα κλειστό κύκλωμα (loop) (Garnish, 1987) (βλέπε Σχήμα 8).

Το ερευνητικό Πρόγραμμα του Los Alamos αποτέλεσε πρόδρομο για άλλες παρόμοιες εφαρμογές στην Αυστραλία, Γαλλία, Γερμανία, Ιαπωνία και Μεγ. Βρετανία. Μετά από μια περίοδο όπου κανείς δεν τις έδινε σημασία, οι εφαρμογές αυτές απέκτησαν νέα ώθηση, λόγω της ανακάλυψης σε πρώτη φάση ότι τα βαθιά πετρώματα έχουν ήδη κάποιες περιορισμένες φυσικές διαρρήξεις και στη συνέχεια ότι οι τεχνικές και η μεθοδολογία που πρέπει να χρησιμοποιηθεί εξαρτώνται κατά πολύ από τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες.

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, Ogachi 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.



Σχήμα 8

Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος Θερμών Ξηρών Πετρωμάτων σε οικονομική κλίμακα (από Richards et al., 1994)

Από την άλλη, το Ευρωπαϊκό HDR Πρόγραμμα εφαρμόστηκε σε διάφορες φάσεις και περιέλαβε την κατασκευή δύο γεωτρήσεων, η μία από τις οποίες έφτασε τα 5.060m βάθους. Οι υδραυλικές δοκιμές και μετρήσεις, όπως εξάλλου και οι γεωφυσικές διασκοπήσεις, κατέληξαν σε καλά και πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα. Έτσι λοιπόν, το Ευρωπαϊκό HDR Πρόγραμμα φαίνεται να είναι για την ώρα το πιο πετυχημένο (Tenzer, 2001).

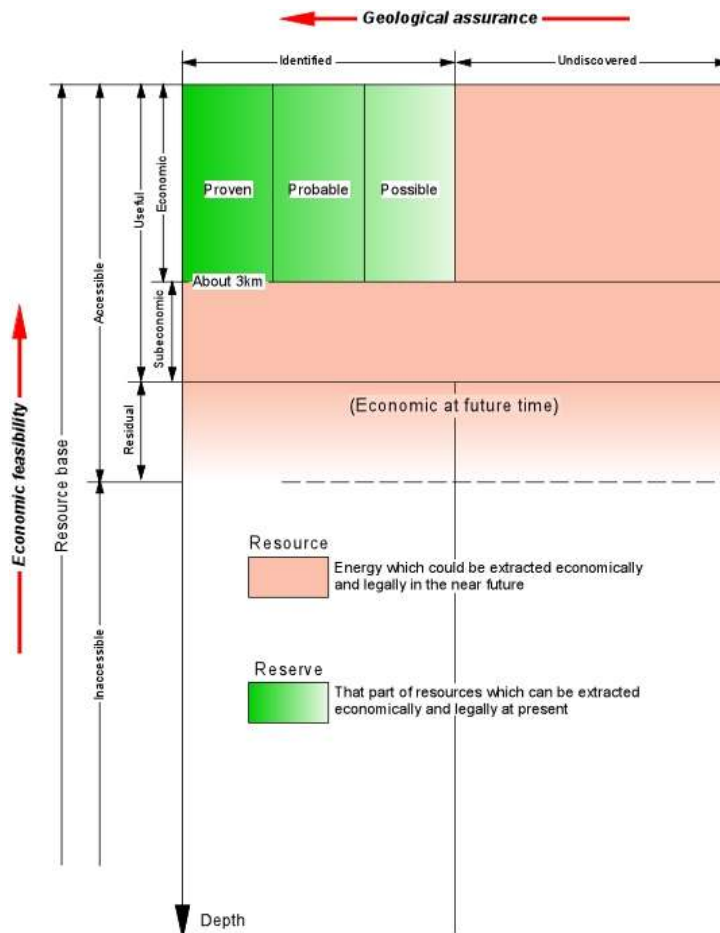
ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

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 του κεφαλαίου παρατίθενται μερικοί από τους πλέον κοινώς χρησιμοποιούμενους ορισμούς και ταξινομήσεις σχετικά με τη γεωθερμία.

Σύμφωνα με τους Muffler & Cataldi (1978), ο γενικός όρος «γεωθερμικός πόρος» αναφέρεται στην προσβάσιμη βασική πηγή (accessible resource base). Η

προσβάσιμη βασική πηγή είναι ουσιαστικά όλη η θερμική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη κάτω από συγκεκριμένη περιοχή μεταξύ της επιφάνειας της γης και ενός συγκεκριμένου βάθους στο φλοιό. Αυτή η ενέργεια ξεκινά από την τοπική μέση ετήσια θερμοκρασία. 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 (μέσα σε λιγότερο από 100 χρόνια). 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 9 παρουσιάζει σε γραφική μορφή τους παραπάνω και άλλους όρους, που μπορούν να χρησιμοποιούνται από τους ειδικούς στη γεωθερμία.

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 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.



Σχήμα 9

Γραφική παράσταση που δίνει τις διάφορες κατηγορίες των γεωθερμικών πόρων (Από Muffler & Cataldi, 1978). Ο κάθετος άξονας παριστάνει το βαθμό της οικονομικής επιτευξιμότητας, ενώ ο οριζόντιος το βαθμό της γεωλογικής βεβαιότητας.

Πίνακας 3. Ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων (°C)

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Low enthalpy resources	< 90	<125	<100	≤150	≤190
Intermediate enthalpy resources	90-150	125-225	100-200	-	-
High enthalpy resources	>150	>225	>200	>150	>190

Source: (a) Muffler and Cataldi (1978).
 (b) Hochstein (1990).
 (c) Benderitter and Cormy (1990).
 (d) Nicholson (1993).
 (e) Axelsson and Gunnlaugsson (2000)

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). 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), είναι κατά βάση σπάνια και συνιστούν συστήματα υψηλής θερμοκρασίας. Κατά κύριο λόγο παράγουν ξηρό έως υπέρθερμο ατμό.

Οι όροι *υγρός*, *ξηρός* και *υπέρθερμος ατμός*, οι οποίοι χρησιμοποιούνται συχνά από τους γεωθερμικούς, χρειάζονται κάποιες επιπλέον επεξηγήσεις, κυρίως για όσους δεν έχουν το σχετικό τεχνικό υπόβαθρο. Για να γίνει όσο το δυνατόν απλούστερο, θα χρησιμοποιήσουμε 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». Τέλος, αυξάνοντας κι άλλο τη θερμοκρασία, για παράδειγμα στους 120°C, και συνεχίζοντας να διατηρούμε την πίεση σταθερή, θα πάρουμε *υπέρθερμο ατμό*, με υπερθέρμανση 20°C πάνω από τη θερμοκρασία εξάτμισης στις συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης. Τα ίδια σε γενικές γραμμές φαινόμενα, αλλά σε διαφορετικά μεγέθη και υπό διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, λαμβάνουν χώρα στο υπέδαφος, σε αυτό που χρόνια ένας συγγραφέας αποκαλούσε «φυσική – γήινη – τσαγιέρα».

Ένας άλλος διαχωρισμός των γεωθερμικών συστημάτων είναι αυτός που βασίζεται στην κατάσταση ισορροπίας στον ταμιευτήρα (Nicholson, 1993), σύμφωνα με τον οποίο λαμβάνονται υπόψη η κυκλοφορία των ρευστών του ταμιευτήρα και ο μηχανισμός μεταφοράς της θερμότητας. Στα *δυναμικά συστήματα* ο ταμιευτήρας τροφοδοτείται συνεχώς με νερό, το οποίο θερμαίνεται. Στη συνέχεια, ο ταμιευτήρας «αποφορτίζεται», είτε γιατί το θερμό ρευστό ανέβηκε μέχρι την επιφάνεια είτε γιατί άρχισε να γεμίζει τους 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. Στα *στατικά συστήματα*, γνωστά και ως στάσιμα ή συστήματα αποθήκευσης, παρατηρείται ελάχιστη ή καμμία 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» (geopressured) 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.

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 αυτήν (Axelsson & Gunnlaugsson, 2000).

Επειδή η γεωθερμική ενέργεια περιγράφεται ως *ανανεώσιμη (renewable)* και *αιφορική (sustainable)*, είναι σημαντικό να διαχωρίσουμε τις δύο αυτές έννοιες: Ο

όρος «ανανεώσιμη» περιγράφει μια ιδιότητα του ενεργειακού πόρου, ενώ η «αιφορία» 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 *αιφορία 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 *αιφόρος 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 αιφόρος ανάπτυξη δεν υποδηλώνει ότι κάθε δεδομένη πηγή ενέργειας πρέπει να αξιοποιείται με έναν εξολοκλήρου αιφόρο 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 αιφορική 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).

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Αντικείμενα έρευνας

Τα αντικείμενα μιας *γεωθερμικής έρευνας* είναι (Lumb, 1981):

1. Ο προσδιορισμός των γεωθερμικών φαινομένων
2. Η επιβεβαίωση της ύπαρξης ενός ωφέλιμου παραγωγικού γεωθερμικού πεδίου
3. Η εκτίμηση του μεγέθους του ενεργειακού πόρου
4. Ο καθορισμός του τύπου του γεωθερμικού πεδίου
5. Ο εντοπισμός των παραγωγικών ζωνών
6. Ο καθορισμός του θερμικού περιεχομένου των γεωθερμικών ρευστών που θα παραχθούν από το γεωθερμικό πεδίο μέσω των παραγωγικών γεωτρήσεων
7. Η συλλογή των βασικών δεδομένων, πάνω στα οποία θα βασιστούν τα αποτελέσματα της μελλοντικής παρακολούθησης του πεδίου
8. Ο καθορισμός της τιμής των ευαίσθητων περιβαλλοντικών παραμέτρων πριν από την εκμετάλλευση
9. Η συλλογή πάσης φύσεως πληροφορίας και γνώσης για κάθε χαρακτηριστικό στοιχείο που θα μπορούσε να προκαλέσει προβλήματα κατά την ανάπτυξη του πεδίου.

Η σχετική σπουδαιότητα καθενός από τα παραπάνω εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι περισσότεροι από τους οποίους συνδέονται με αυτό καθαυτό τον ενεργειακό πόρο, και περιλαμβάνουν το είδος της αναμενόμενης εκμετάλλευσης, τη διαθέσιμη τεχνολογία, τα οικονομικά μεγέθη, ως επίσης την κατάσταση, τη γεωγραφική θέση και τη χρονική περίοδο. Όλα τα παραπάνω επηρεάζουν άμεσα τον προγραμματισμό και την έκβαση μιας γεωθερμικής έρευνας. Για παράδειγμα, οι προκαταρκτικές αναγνωριστικές έρευνες των γεωθερμικών εκδηλώσεων επιφανείας αποκτούν ιδιαίτερη σημασία και χρησιμότητα όταν αφορούν μια απομακρυσμένη και μη μελετημένη περιοχή, σε σχέση με μια γνωστή και εκτενώς μελετημένη. Εξάλλου, η εκτίμηση του ακριβούς μεγέθους του γεωθερμικού πόρου αποκτά ίσως μικρότερη σημασία εφόσον πρόκειται για μια μικρής κλίμακας εφαρμογή, αφού η τελευταία προφανώς απαιτεί πολύ λιγότερη θερμική ενέργεια απ' ό τι ήδη παράγεται με φυσικό τρόπο. Επίσης, εάν η γεωθερμική ενέργεια πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τηλεθέρμανση μιας περιοχής ή σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλού βαθμού θερμότητα, τότε η εύρεση ρευστών υψηλής θερμοκρασίας δεν αποτελεί απαραίτητα τον αντικειμενικό σκοπό της γεωθερμικής έρευνας (Lumb, 1981).

Για την πραγματοποίηση των στόχων μιας γεωθερμικής έρευνας υπάρχουν και εφαρμόζονται πολλές μέθοδοι και τεχνικές. Πολλές από αυτές χρησιμοποιούνται επίσης και σε άλλους τομείς έρευνας. Όμως, παρόλο που μπορεί να έχουν εξαιρετική συμβολή και η εφαρμογή τους να είναι πετυχημένη στην έρευνα π.χ. ορυκτών, πετρελαίου ή φυσικού αερίου, δεν αποτελούν αναγκαστικά την πλέον ενδεδειγμένη λύση στη γεωθερμική έρευνα. Αντίθετα, τεχνικές περιορισμένης χρήσης στην έρευνα πετρελαίου μπορεί να αποδειχθούν ιδανικά εργαλεία στον τομέα της αναζήτησης φυσικής γήινης θερμότητας (Combs & Muffler, 1973).

Μέθοδοι έρευνας

Οι *γεωλογικές και υδρογεωλογικές μελέτες* αποτελούν την αφετηρία κάθε ερευνητικού προγράμματος. Η βασική τους συνεισφορά αφορά στον προσδιορισμό της θέσης και της έκτασης των περιοχών που θα πρέπει να ερευνηθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, καθώς και στην υπόδειξη των καταλληλότερων μεθόδων έρευνας για τις συγκεκριμένες περιοχές. Οι γεωλογικές-υδρογεωλογικές μελέτες παίζουν σημαντικό ρόλο σε όλες τις επόμενες φάσεις της γεωθερμικής έρευνας, ακόμη και στον καθορισμό της θέσης των ερευνητικών και παραγωγικών γεωτρήσεων. Επίσης, παρέχουν τις βασικές πληροφορίες για την ερμηνεία των δεδομένων που συγκεντρώνονται από τις άλλες μεθόδους, την εκτίμηση του δυναμικού του γεωθερμικού πόρου και, τελικά, την κατασκευή ενός ρεαλιστικού προτύπου (μοντέλου) του γεωθερμικού συστήματος. Τα στοιχεία των μελετών αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και στη φάση παραγωγής, αναφορικά με την ορθολογική διαχείριση του γεωθερμικού ταμιευτήρα και γενικότερα του πεδίου. Φαίνεται λοιπόν, ότι η διάρκεια και το συνολικό κόστος μιας ολοκληρωμένης γεωθερμικής έρευνας μπορεί να μειωθούν σημαντικά αν ο προγραμματισμός της γίνει με σωστό σχεδιασμό και αποδοτικό συντονισμό.

Οι *γεωχημικές έρευνες* (συμπεριλαμβανομένης της γεωχημείας ισοτόπων), αποτελούν αξιόλογα εργαλεία για τον καθορισμό της φύσης του γεωθερμικού συστήματος (υγρό ή ατμός), την εκτίμηση της ελάχιστης αναμενόμενης θερμοκρασίας στο βάθος και της ομοιογένειας στην παροχή των ρευστών, την έμμεση εκτίμηση των χημικών χαρακτηριστικών των ρευστών που βρίσκονται στο βάθος καθώς και για τον προσδιορισμό της πηγής τροφοδοσίας του ταμιευτήρα. Επιπλέον, μπορούν να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για το είδος των προβλημάτων που ενδέχεται να προκύψουν κατά την επανεισαγωγή των ρευστών στον ταμιευτήρα και κατά την παραγωγική διαδικασία (π.χ. αλλαγές στη σύσταση των ρευστών, διάβρωση

ή επικαθήσεις στις σωληνώσεις και τις εγκαταστάσεις, περιβαλλοντικές επιπτώσεις), καθώς και για τον τρόπο αντιμετώπισης ή αποφυγής τους. Η γεωχημική έρευνα συνίσταται σε δειγματοληψίες, χημικές και/ή ισοτοπικές αναλύσεις του νερού και των αερίων των γεωθερμικών επιφανειακών εκδηλώσεων (θερμές πηγές, ατμίδες, κλπ.) ή των γεωτρήσεων στην υπό μελέτη περιοχή. Επειδή η γεωχημική έρευνα αφενός παρέχει πολύ χρήσιμα στοιχεία για τον περαιτέρω σχεδιασμό του γεωθερμικού προγράμματος, αφετέρου το κόστος της είναι σχετικά χαμηλό σε σχέση με πιο εξεζητημένες μεθόδους, όπως είναι για παράδειγμα οι γεωφυσικές, θα πρέπει να χρησιμοποιείται όσο τον δυνατόν περισσότερο πριν την εφαρμογή άλλων περισσότερο δαπανηρών μεθοδολογιών.

Οι *γεωφυσικές διασκοπήσεις* σκοπεύουν στην έμμεση απόκτηση γνώσης, από την επιφάνεια ή κοντά σε αυτήν, για τις φυσικές παραμέτρους των γεωλογικών σχηματισμών που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη. Οι παράμετροι αυτές περιλαμβάνουν τα εξής:

- Θερμοκρασία (θερμική έρευνα)
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα (γεωηλεκτρική και ηλεκτρομαγνητική μέθοδος)
- Ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων (σεισμική μέθοδος)
- Πυκνότητα (βαρυτομετρική μέθοδος)
- Μαγνητική επιδεκτικότητα (μαγνητική μέθοδος)

Μερικές από τις παραπάνω μεθόδους, όπως η σεισμική, η βαρυτομετρική και η μαγνητική, οι οποίες κατά παράδοση εφαρμόζονται στην έρευνα πετρελαίου, έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για το σχήμα, το μέγεθος, το βάθος και άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά βαθιών γεωλογικών δομών, οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελούν ένα γεωθερμικό ταμειυτήρα. Όμως, οι μέθοδοι αυτές παρέχουν λίγα έως καθόλου στοιχεία για την ύπαρξη ή όχι ρευστών, κάτι που αποτελεί τον πρωταρχικό στόχο της γεωθερμικής έρευνας. Για το λόγο αυτό, θεωρείται σκοπιμότερη η εφαρμογή των συγκεκριμένων μεθόδων για την αποσαφήνιση λεπτομερειών κατά τα τελευταία στάδια του γεωθερμικού ερευνητικού προγράμματος, πριν ακριβώς τον καθορισμό της θέσης των ερευνητικών γεωτρήσεων. Πληροφορίες για την παρουσία γεωθερμικών ρευστών στις βαθιές γεωλογικές δομές μπορούν να αποκτηθούν με τη βοήθεια των γεωηλεκτρικών και των ηλεκτρομαγνητικών διασκοπήσεων, οι οποίες είναι πιο ευαίσθητες από τις άλλες γεωφυσικές μεθόδους στην ύπαρξη τέτοιων ρευστών καθώς και στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Πράγματι, οι δύο αυτές τεχνικές έχουν ευρεία εφαρμογή στη

γεωθερμική έρευνα και δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η μαγνητοτελλουρική μέθοδος (MT), η οποία αξιοποιεί τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που παράγονται από τις ηλιακές καταιγίδες, έχει βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, προσφέροντας πλέον δυνατότητες για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, παρά το γεγονός ότι προϋποθέτει πολύ εξεζητημένο τεχνολογικό εξοπλισμό και είναι ευαίσθητη στους βασικούς θορύβους των αστικών ή βιομηχανικών περιοχών. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μαγνητοτελλουρικής μεθόδου είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό βαθύτερων, σε σχέση με αυτές που προσδιορίζονται από την ηλεκτρομαγνητική ή τη γεωηλεκτρική μέθοδο, δομών. Η «ηχομαγνητοτελλουρική μέθοδος ελεγχόμενης πηγής» (Controlled Source Audiomagnetotelluric Method-CSAMT) που αναπτύχθηκε πρόσφατα, χρησιμοποιεί τεχνητά επαγόμενα κύματα αντί των φυσικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το βάθος διεύδυσης με αυτήν την τεχνική είναι μικρότερο, αλλά τα αποτελέσματα είναι πιο γρήγορα, το κόστος μικρότερο και οι λεπτομέρειες που τελικά προκύπτουν είναι πολύ περισσότερες σε σχέση με την κλασσική μαγνητοτελλουρική μέθοδο.

Οι θερμικές τεχνικές (μετρήσεις θερμοκρασίας, προσδιορισμός της γεωθερμικής βαθμίδας και της γήινης θερμικής ροής) συχνά παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού, με καλή προσέγγιση, της θερμοκρασίας στην οροφή του ταμιευτήρα.

Όλες γενικά οι μέθοδοι γεωφυσικών διασκοπήσεων έχουν μεγάλο κόστος, κάποιες μάλιστα ιδιαίτερα υψηλό. Για το λόγο αυτό, δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αδιακρίτως και υπό οποιεσδήποτε καταστάσεις και συνθήκες, διότι μια μέθοδος που πιθανώς παρέχει θαυμάσια αποτελέσματα σε ένα συγκεκριμένο γεωλογικό περιβάλλον μπορεί να μην έχει καθόλου ικανοποιητική απόδοση σε κάποιο άλλο. Άρα, η εκ των προτέρων προσεκτική επιλογή της(ων) γεωφυσικής(ών) μεθόδου(ων) είναι πολύ σημαντική όσον αφορά τον περιστολή του κόστους, και θα πρέπει να γίνεται από κατάλληλους και ειδικούς γεωφυσικούς επιστήμονες που με τη σειρά τους θα βρίσκονται σε συνεχή και στενή συνεργασία με τους γεωλόγους (Meidav, 1998).

Η διάνοιξη *ερευνητικών γεωτρήσεων* σηματοδοτεί το τελικό στάδιο ενός ερευνητικού γεωθερμικού προγράμματος και αποτελεί το μόνο μέσο για τον προσδιορισμό των πραγματικών χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα και την εκτίμηση του δυναμικού του (Combs & Muffler, 1973). Τα στοιχεία που προκύπτουν από τις ερευνητικές γεωτρήσεις θα πρέπει λογικά να είναι τέτοια, ώστε να επαληθεύουν όλες τις αρχικές υποθέσεις και τα μοντέλα που είχαν αναπτυχθεί κατά τα προηγούμενα στάδια της έρευνας, καθώς και να επιβεβαιώνουν ότι ο ταμιευτήρας είναι πράγματι

παραγωγικός και περιέχει αρκετή ποσότητα ρευστών, με χαρακτηριστικά κατάλληλα για τη χρήση που προορίζονται. Καθίσταται λοιπόν φανερό πως η επιλογή της σωστής θέσης των ερευνητικών γεωτρήσεων είναι ένα κρίσιμο και δύσκολο εγχείρημα, το οποίο προϋποθέτει μεγάλη εμπειρία, γνώσεις και λεπτούς χειρισμούς.

Κατάρτιση του Ερευνητικού Προγράμματος

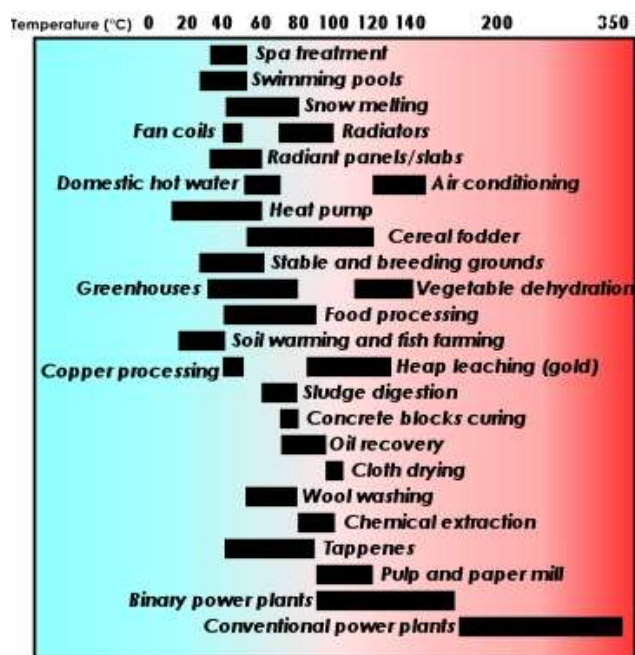
Πριν από το σχεδιασμό ενός γεωθερμικού ερευνητικού προγράμματος, θα πρέπει να συγκεντρωθούν όλα τα υπάρχοντα γεωλογικά, γεωφυσικά και γεωχημικά δεδομένα και να συμπληρωθούν με όλα τα διαθέσιμα στοιχεία από άλλες προηγούμενες έρευνες-μελέτες, που πιθανώς είχαν γίνει με σκοπό την ανεύρεση νερού, μεταλλευμάτων-ορυκτών ή υδρογονανθράκων, τόσο στην υπό μελέτη περιοχή όσο και τις γειτονικές της. Τέτοιες πληροφορίες παίζουν συχνά σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των στόχων του ερευνητικού προγράμματος, ενώ παράλληλα μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του κόστους του.

Ένα ερευνητικό πρόγραμμα συνήθως αναπτύσσεται με την τακτική «βήμα προς βήμα»: *αναγνώριση - προκαταρκτική έρευνα - σκοπιμότητα*. Κατά τη διάρκεια κάθε μιας από τις παραπάνω φάσεις απορρίπτονται σταδιακά οι λιγότερο ενδιαφέρουσες περιοχές ενώ το ενδιαφέρον εστιάζεται στις πιο πολλά υποσχόμενες και ευνοϊκές θέσεις. Καθώς η έρευνα προχωρά, οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι γίνονται όλο και περισσότερο εξεζητημένες και λεπτομερείς. Το μέγεθος και ο προϋπολογισμός του όλου προγράμματος θα πρέπει να είναι ανάλογα των αντικειμενικών στόχων, της σπουδαιότητας και της αξίας των πόρων που αναμένεται να εντοπιστούν και του προβλεπόμενου τρόπου αξιοποίησής τους. Το χρονοδιάγραμμα των ερευνών θα πρέπει να είναι ευέλικτο και ευπροσάρμοστο, αναλόγως των αποτελεσμάτων που θα προκύπτουν από τις επιμέρους ερευνητικά στάδια. Ομοίως, το γεωλογικό-γεωθερμικό μοντέλο θα πρέπει να αναβαθμίζεται και να βελτιώνεται συνεχώς, σύμφωνα με τα νέα κάθε φορά στοιχεία. Οι περιοδικές αναπροσαρμογές του προγράμματος θα πρέπει να αποσκοπούν στην αποφυγή των εργασιών που θα κρίνονται περιττές και στην προσθήκη άλλων, πιο κατάλληλων και απαραίτητων για την επιτυχή διεξαγωγή της έρευνας. Παρόλα αυτά, πρέπει να ξεκαθαρισθεί ότι, κάθε μείωση στο πλήθος ή το μέγεθος των ερευνών, θα οδηγήσει μεν σε μείωση του κόστους, αλλά, από την άλλη, σε αύξηση της πιθανότητας λάθους ή αποτυχίας. Αντιθέτως, για τη μείωση της πιθανότητας σφαλμάτων θα πρέπει γενικά να δαπανηθούν περισσότερα χρήματα. Έτσι λοιπόν, η οικονομική επιτυχία ενός

γεωθερμικού ερευνητικού προγράμματος εντοπίζεται στην εύρεση της σωστής ισορροπίας και της χρυσής τομής ανάμεσα σε αυτά τα δύο.

ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η πιο σημαντική μορφή αξιοποίησης των γεωθερμικών πόρων υψηλής θερμοκρασίας (>150°C). Οι μέσης και χαμηλής θερμοκρασίας πόροι (<150°C) είναι κατάλληλοι για πολλούς και διαφορετικούς τύπους εφαρμογών. Το κλασικό διάγραμμα του Lindal (Lindal, 1973) (Σχήμα 10), το οποίο δείχνει τις πιθανές χρήσεις των γεωθερμικών ρευστών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους, ισχύει ακόμη μέχρι σήμερα. Στο διάγραμμα όμως αυτό θα πρέπει να προστεθεί η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε εγκαταστάσεις δυαδικού κύκλου (binary cycle) από ρευστά που έχουν θερμοκρασία μεγαλύτερη από 85°C. Πρέπει επίσης να σημειωθεί, ότι το κατώτατο όριο των 20°C μπορεί να ξεπεραστεί, αλλά μόνο υπό ορισμένες συνθήκες και κυρίως με τη χρήση των αντλιών θερμότητας. Το διάγραμμα του Lindal δίνει έμφαση σε δύο σημαντικές παραμέτρους που αφορούν στην αξιοποίηση των γεωθερμικών πόρων (Gudmundsson, 1988): (α) με διαδοχικές και συνδυασμένες εφαρμογές μπορούν να αυξηθούν οι πιθανότητες επιτυχούς έκβασης και η αποτελεσματικότητα των γεωθερμικών προγραμμάτων και (β) η θερμοκρασία των ρευστών μπορεί να περιορίσει τις πιθανές χρήσεις. Παρόλα αυτά, το πεδίο εφαρμογών μπορεί να διευρυνθεί εάν ο σχεδιασμός ενός προγράμματος είναι τέτοιος ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται κατά περίπτωση.



Σχήμα 10

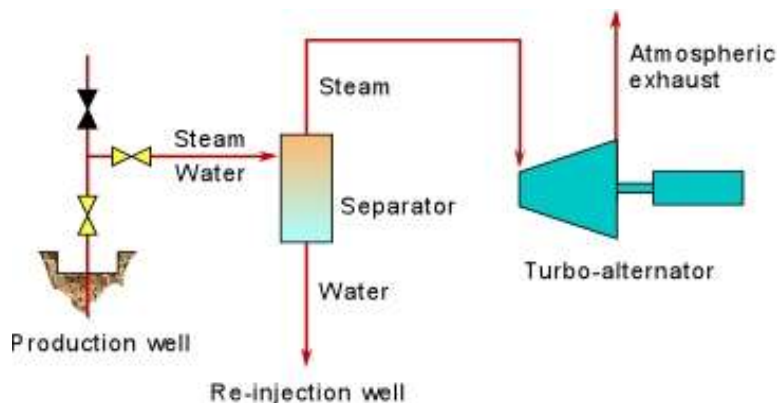
Το διάγραμμα του Lindal (Lindal, 1973)

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά ρευστά λαμβάνει χώρα σε μονάδες που λειτουργούν είτε με συμβατικούς αμοστρόβιλους ή με δυαδικό κύκλο, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του γεωθερμικού πόρου.

Οι συμβατικοί *αμοστρόβιλοι* απαιτούν ρευστά που έχουν θερμοκρασίες τουλάχιστον 150°C. Η μονάδα μπορεί να λειτουργεί με συμπυκνωτές, όπου η πίεση διατηρείται συνεχώς σε χαμηλά επίπεδα (condensing type) ή χωρίς (back pressure type), οπότε γίνεται διάθεση του ατμού στην ατμόσφαιρα. Ο τύπος με αμοστρόβιλους ατμοσφαιρικής εκτόνωσης είναι απλούστερος και φθηνότερος. Ο ατμός που έρχεται, είτε απευθείας από γεωτρήσεις που παράγουν ξηρό ατμό, είτε από γεωτρήσεις με υγρό ατμό αφού γίνει ο διαχωρισμός του νερού, περνά από τον αμοστρόβιλο και στη συνέχεια απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα (Σχήμα 11).

Σε μια τέτοια μονάδα, η κατανάλωση ατμού (με ίδια πίεση εισόδου) ανά παραγόμενη κιλοβατώρα είναι περίπου διπλάσια από αυτήν σε μια μονάδα με συμπυκνωτές. Όμως, οι αμοστρόβιλοι ατμοσφαιρικής εκτόνωσης είναι εξαιρετικά χρήσιμοι σε πιλοτικές ή εφεδρικές μονάδες, σε περιπτώσεις μικρών παροχών από μεμονωμένες γεωτρήσεις, καθώς και στην παραγωγή ηλεκτρισμού στη φάση των δοκιμών παραγωγής των γεωτρήσεων κατά την ανάπτυξη του πεδίου. Χρησιμοποιούνται επίσης στις περιπτώσεις όπου ο ατμός περιέχει μεγάλες ποσότητες μη συμπυκνώσιμων αερίων (>12% κατά βάρος). Οι μονάδες διάθεσης του ατμού στην ατμόσφαιρα κατασκευάζονται και εγκαθίστανται πολύ γρήγορα και μπορούν να τεθούν σε λειτουργία μέσα σε περίπου 13-14 μήνες από την ημερομηνία παραγγελίας τους. Τέτοιου είδους μονάδες είναι συνήθως διαθέσιμες σε μικρά μεγέθη (2,5-5 MWe).

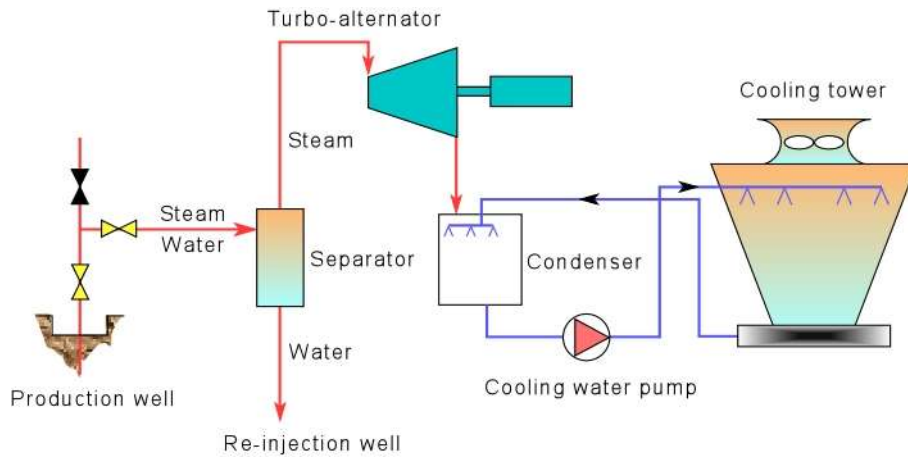


Σχήμα 11

Σκαρίφημα γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με διάθεση του ατμού απευθείας στην ατμόσφαιρα. Η ροή του γεωθερμικού ρευστού σημειώνεται με κόκκινο χρώμα.

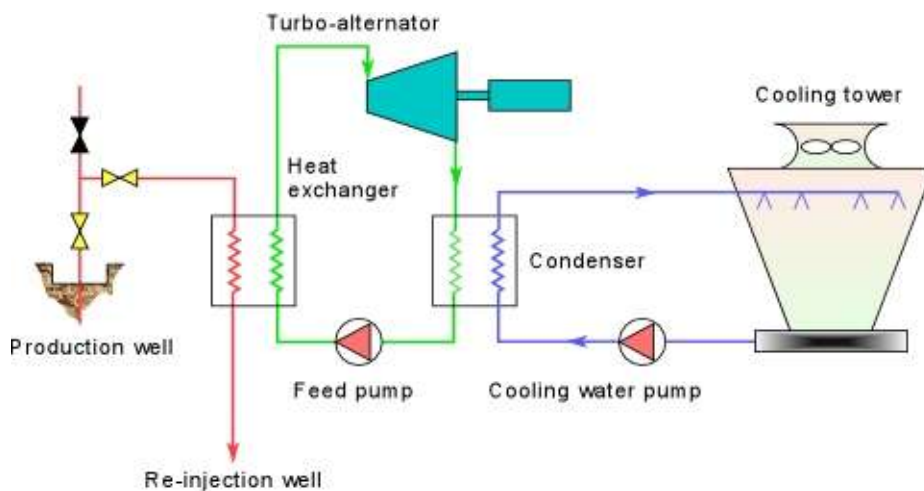
Οι μονάδες με συμπυκνωτές, εξαιτίας του ότι συνοδεύονται από περισσότερο βοηθητικό εξοπλισμό, είναι πιο περίπλοκες στο σχεδιασμό τους από τις προηγούμενες, και αυτές που είναι μεγαλύτερης ισχύος χρειάζονται διπλάσιο χρόνο κατασκευής και εγκατάστασης. Όμως, η κατανάλωση ατμού είναι περίπου μισή σε σχέση με την περίπτωση των αμοστροβίλων ατμοσφαιρικής εκτόνωσης. Οι πιο συνηθισμένες εγκαταστάσεις με συμπυκνωτές έχουν ισχύ 55-60 MWe, όμως πρόσφατα κατασκευάστηκαν και έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται μονάδες με ισχύ 110 MWe (Σχήμα 12).

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ρευστά χαμηλής-μέσης θερμοκρασίας και από το υψηλής θερμοκρασίας νερό που εξέρχεται από τους διαχωριστές στα γεωθερμικά πεδία υγρής φάσης, σημειώνει αξιόλογη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, κυρίως εξαιτίας της προόδου που επιτεύχθηκε στην τεχνολογία των δυαδικών ρευστών. Σε τέτοιου τύπου εγκαταστάσεις χρησιμοποιείται ένα δευτερεύον –συνήθως οργανικό-ρευστό (ισο-πεντάνιο), το οποίο έχει χαμηλό σημείο ζέσεως και υψηλή τάση ατμών σε χαμηλές θερμοκρασίες, αν συγκριθεί με τον υδάτινο ατμό. Το δευτερεύον ρευστό χρησιμοποιείται μέσα σε ένα συμβατικό οργανικό κύκλο Rankine (OCR) ως εξής: το γεωθερμικό ρευστό προσφέρει θερμότητα στο δευτερεύον υγρό μέσω εναλλακτών θερμότητας, οπότε το τελευταίο εξατμίζεται. Ο ατμός που παράγεται κινεί έναν κανονικό στρόβιλο αξονικής ροής, στη συνέχεια ψύχεται και συμπυκνώνεται, οπότε ο κύκλος αρχίζει ξανά (Σχήμα 13).



Σχήμα 12

Σκαρίφημα μιας γεωθερμικής μονάδας ηλεκτρικής ενέργειας με συμπυκνωτές. Η ροή των ρευστών υψηλής θερμοκρασίας σημειώνεται με κόκκινο χρώμα, ενώ του νερού ψύξης με μπλε.



Σχήμα 13

Σκαρίφημα μιας γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με δυαδικό κύκλο. Το γεωθερμικό ρευστό σημειώνεται με το κόκκινο χρώμα, το δευτερεύον ρευστό με πράσινο και το νερό ψύξης με μπλε.

Εάν γίνει σωστή επιλογή του δευτερεύοντος ρευστού, τα δυαδικά συστήματα μπορούν να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αξιοποιούν γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασία που κυμαίνεται μεταξύ 85-170°C. Το ανώτερο όριο εξαρτάται από τη θερμική σταθερότητα του οργανικού ρευστού και το κατώτατο όριο από οικονομοτεχνικούς παράγοντες: κάτω από αυτή τη θερμοκρασία, εξαιτίας του μεγέθους και της ικανότητας των απαιτούμενων εναλλακτών, το όλο πρόγραμμα ίσως κατέληγε ασύμφορο από οικονομική άποψη. Εκτός από τις περιπτώσεις χαμηλής-

μέσης ενθαλπίας, τα δυαδικά συστήματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν εκεί όπου η εφαρμογή του κύκλου εκτόνωσης των ρευστών (flashing) θα πρέπει να αποφεύγεται (π.χ. για την αποφυγή απόφραξης των γεωτρήσεων). Στην περίπτωση αυτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υποβρύχιες αντλίες, ώστε να ρευστά να παραμένουν υπό σταθερή πίεση και σε υγρή φάση, ενώ η ενέργεια μπορεί να λαμβάνεται από το ρευστό κυκλοφορίας με τη βοήθεια του δυαδικού συστήματος.

Τα δυαδικά συστήματα κατασκευάζονται συνήθως σε μικρές αρθρωτές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, των οποίων η ισχύς ποικίλλει από μερικές εκατοντάδες kWe έως λίγα MWe. Τέτοια συστήματα εντούτοις έχουν τη δυνατότητα να κατασκευάζονται σε συστοιχία ώστε τελικά να δημιουργούνται μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνολικής ισχύος κάποιων δεκάδων MWe. Το κόστος τους εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, ιδιαίτερα όμως από τη θερμοκρασία των παραγόμενων ρευστών, η οποία επηρεάζει το μέγεθος των στροβίλων, των εναλλακτών και του συστήματος ψύξης. Το συνολικό μέγεθος των εγκαταστάσεων δεν επηρεάζει κατά πολύ το ειδικό κόστος, καθώς μια σειρά αρθρωτών μονάδων συνδέονται μεταξύ τους, για να επιτευχθεί τελικά μεγαλύτερη συνολική ισχύς.

Η τεχνολογία των δυαδικών συστημάτων είναι ένα οικονομικά συμφέρον και αξιόπιστο μέσο για τη μετατροπή σε ηλεκτρική της ενέργειας των ρευστών ενός γεωθερμικού συστήματος υγρής φάσης με θερμοκρασία μικρότερη από 170°C.

Ένας νέος τύπος δυαδικών συστημάτων, ο επονομαζόμενος κύκλος Kalina που αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1990, χρησιμοποιεί ως δευτερεύον ρευστό εργασίας ένα μίγμα νερού-αμμωνίας. Το ρευστό αυτό εκτονώνεται σε υπέρθερμες συνθήκες όταν διέρχεται από το στρόβιλο υψηλής πίεσης και στη συνέχεια επαναθερμαίνεται πριν εισέλθει στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης. Μετά τη δεύτερη εκτόνωση, οι κορεσμένοι ατμοί μεταφέρονται σε ένα θερμαντήρα και ακολούθως συμπυκνώνονται σε έναν υδρόψυκτο συμπυκνωτή. Ο κύκλος Kalina είναι πιο αποτελεσματικός από τα υπάρχοντα OCR δυαδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά είναι πολύ πιο περίπλοκος.

Μικρές «κινητές», συμβατικές ή όχι, μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θα μπορούσαν όχι μόνο να συμβάλλουν στη μείωση του κινδύνου μερικής αποτυχίας των νέων γεωτρήσεων, αλλά κυρίως να βοηθήσουν στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών απομονωμένων περιοχών. Το βιοτικό επίπεδο απομονωμένων κοινοτήτων θα μπορούσε να βελτιωθεί σημαντικά εάν υπήρχε η δυνατότητα να βασιστούν σε τοπικούς ενεργειακούς πόρους. Η ηλεκτρική ενέργεια θα διευκόλυνε

πολλές, φαινομενικά απλοϊκές, αλλά, εξαιρετικά σημαντικές εργασίες, όπως η άντληση νερού για άρδευση και η ψύξη φρούτων και λαχανικών για συντήρηση σε μεγάλο χρονικό διάστημα.

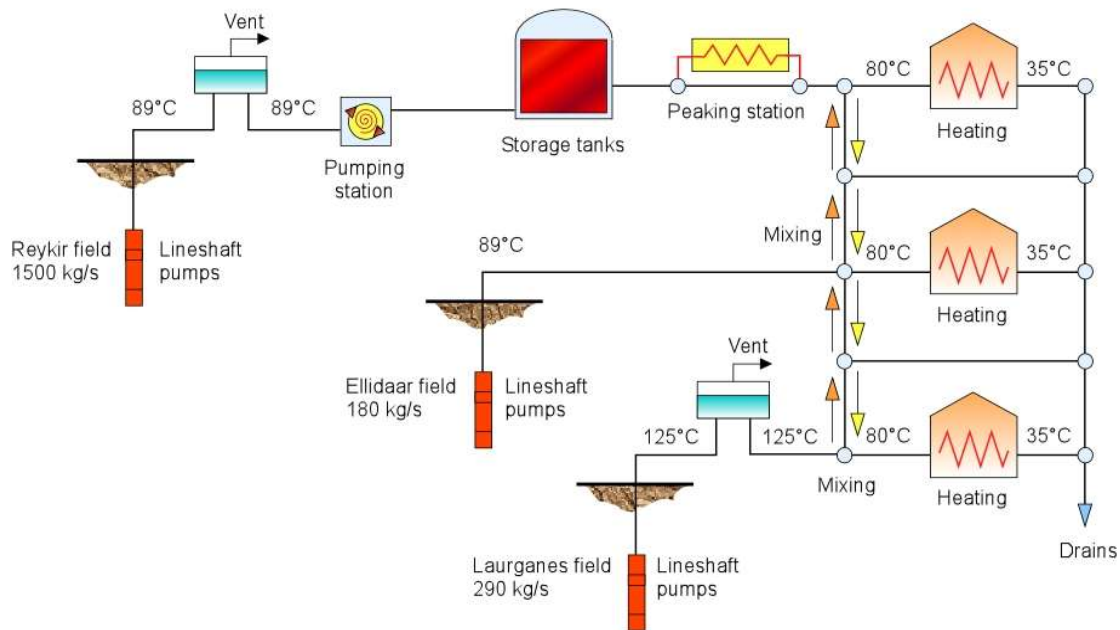
Η διευκόλυνση που παρέχουν οι «κινητές» μονάδες γίνεται περισσότερο εμφανής στις περιοχές που δεν έχουν άμεση πρόσβαση σε συμβατικά καύσιμα, και στις κοινότητες για τις οποίες το κόστος σύνδεσής τους με το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο είναι εξαιρετικά υψηλό, έστω και αν υπάρχουν γραμμές υψηλής τάσης σε κοντινές αποστάσεις. Τα έξοδα που απαιτούνται για την εξυπηρέτηση αυτών των μικρών κοινοτήτων είναι απαγορευτικά, καθώς οι μετασχηματιστές που χρειάζεται να εγκατασταθούν και να συνδεθούν με δίκτυα υψηλής τάσης κοστίζουν περισσότερο από 675.000 δολάρια ΗΠΑ ο καθένας, ενώ η πιο απλή μορφή τοπικής διανομής ηλεκτρισμού στα 11 kV, με τη χρήση ξύλινων στύλων, κοστίζει το λιγότερο 20.000 δολ.ΗΠΑ/χλμ. (τιμή δολλαρίου 1994). Για σύγκριση, το κόστος κεφαλαίου (δολ.ΗΠΑ 1998) ενός δυαδικού συστήματος είναι της τάξης των 1500-2500 δολ.ΗΠΑ/εγκατεστημένο kWe, μη συμπεριλαμβανομένων των γεωτρητικών δαπανών. Οι απαιτήσεις για ηλεκτρική ισχύ ανά άτομο στις περιοχές εκτός δικτύου θα κυμαίνεται μεταξύ 0,2 kWe στις λιγότερο ανεπτυγμένες και 1,0 kWe ή περισσότερο στις ανεπτυγμένες περιοχές. Μία μονάδα ισχύος 100 kWe θα μπορούσε να εξυπηρετήσει 100-500 άτομα, ενώ αντίστοιχα μια μονάδα 1 MWe 1000-5000 άτομα (Entingh et al., 1994).

Άμεσες χρήσεις της γεωθερμίας

Οι άμεσες χρήσεις της θερμότητας των γεωθερμικών ρευστών για θέρμανση είναι οι παλαιότερες, οι πιο πολύπλευρες και οι πλέον συνηθισμένες μορφές αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας (Πίνακας 2). Η λουτροθεραπεία, η θέρμανση χώρων και η τηλεθέρμανση, οι αγροτικές εφαρμογές, οι υδατοκαλλιέργειες και κάποιες βιομηχανικές χρήσεις είναι οι πιο γνωστές μορφές χρήσεις, όμως οι αντλίες θερμότητας αποτελούν την πιο διαδεδομένη μορφή αξιοποίησης (12,5 % της συνολικής χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας κατά το έτος 2000). Υπάρχουν φυσικά και κάποιοι άλλοι μικρότερης κλίμακας τρόποι εκμετάλλευσης της γεωθερμίας, οι οποίοι όμως δεν είναι τόσο συνηθισμένοι.

Η *θέρμανση χώρων* και η *τηλεθέρμανση* (space and district heating) παρουσίασαν μεγάλη ανάπτυξη στην Ισλανδία, όπου η συνολική ισχύς του γεωθερμικού συστήματος τηλεθέρμανσης ανέρχονταν στα τέλη του 1999 σε περίπου

1200 MWt (Σχήμα 14). Αποτελούν επίσης ιδιαίτερα διαδεδομένες εφαρμογές και στις χώρες της Ανατολικής Ευρώπης, καθώς και τις Η.Π.Α., Κίνα, Ιαπωνία, Γαλλία, κλπ.



Σχήμα 14

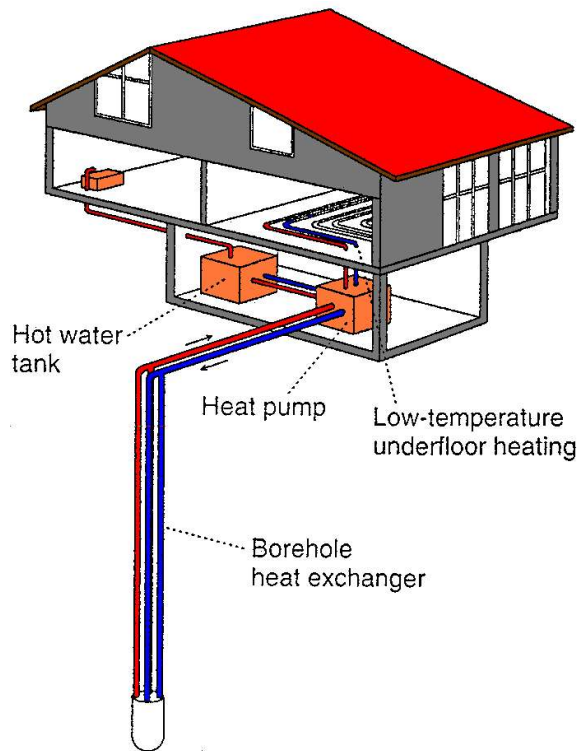
Απλοποιημένο διάγραμμα ροής του συστήματος τηλεθέρμανσης του Reykjavik (Από Gudmundsson, 1988)

Τα γεωθερμικά συστήματα τηλεθέρμανσης είναι έντασης κεφαλαίου, δηλαδή απαιτούν μεγάλα αρχικά κεφάλαια. Το κύριο κόστος αφορά την αρχική επένδυση για την κατασκευή των γεωτρήσεων παραγωγής και επανεισαγωγής, την αγορά των συστημάτων άντλησης και μεταφοράς των ρευστών, την κατασκευή των δικτύων και των σωληνώσεων, την προμήθεια του εξοπλισμού ελέγχου και παρακολούθησης των εγκαταστάσεων, την κατασκευή των σταθμών διανομής και των δεξαμενών αποθήκευσης. Παρόλα αυτά, τα λειτουργικά έξοδα, τα οποία αφορούν στην ενέργεια που καταναλώνεται για την άντληση των ρευστών, τη συντήρηση του συστήματος και τη διαχείριση της εγκατάστασης, είναι σημαντικά μικρότερα σε σύγκριση με αυτά μιας συμβατικής μονάδας. Ένας κρίσιμος παράγοντας για τον υπολογισμό του αρχικού κόστους του συστήματος είναι η πυκνότητα του θερμικού φορτίου ή, αλλιώς, οι απαιτήσεις σε θέρμανση δια την επιφάνεια που καλύπτει η περιοχή που πρόκειται να θερμανθεί. Η υψηλή θερμική πυκνότητα καθορίζει την οικονομική βιωσιμότητα-σκοπιμότητα του έργου τηλεθέρμανσης, αφού το δίκτυο διανομής απορροφά μεγάλα κεφάλαια. Κάποια οικονομικά οφέλη θα μπορούσαν να προκύψουν από το συνδυασμό θέρμανσης και ψύξης σε περιοχές όπου οι κλιματικές συνθήκες

επιτρέπουν τέτοιες εφαρμογές. Ο συντελεστής φορτίου σε ένα τέτοιο σύστημα ψύξης-θέρμανσης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από αυτόν που αντιστοιχεί μόνο στη θέρμανση, και η τιμή της ενεργειακής μονάδας πρέπει να είναι κατά συνέπεια χαμηλότερη (Gudmundsson, 1988).

Η ψύξη χώρων αποτελεί μια αρκετά εφικτή και βιώσιμη επιλογή, στην περίπτωση όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν μηχανές απορρόφησης, οι οποίες βρίσκονται εύκολα στο εμπόριο και η τεχνολογία τους είναι ευρέως γνωστή. Ο κύκλος της απορρόφησης είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιεί ως πηγή ενέργειας τη θερμότητα έναντι του ηλεκτρισμού. Η ψύξη επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο υγρών: ενός ψυκτικού, το οποίο κυκλοφορεί, εξατμίζεται και συμπυκνώνεται, και ενός δευτερεύοντος ρευστού ή απορροφητικού (absorbent). Για εφαρμογές πάνω από 0°C, ο κύκλος χρησιμοποιεί βρωμίδιο του λιθίου ως απορροφητικό και νερό ως ψυκτικό υγρό. Για εφαρμογές κάτω από τους 0°C χρησιμοποιείται ο κύκλος αμμωνίας/νερού, με την αμμωνία στο ρόλο του ψυκτικού και του νερού στο ρόλο του απορροφητικού μέσου. Τα γεωθερμικά ρευστά παρέχουν την απαιτούμενη ενέργεια για την κίνηση αυτών των μηχανών, όμως η αποτελεσματικότητά τους μειώνεται όταν οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες των 105°C.

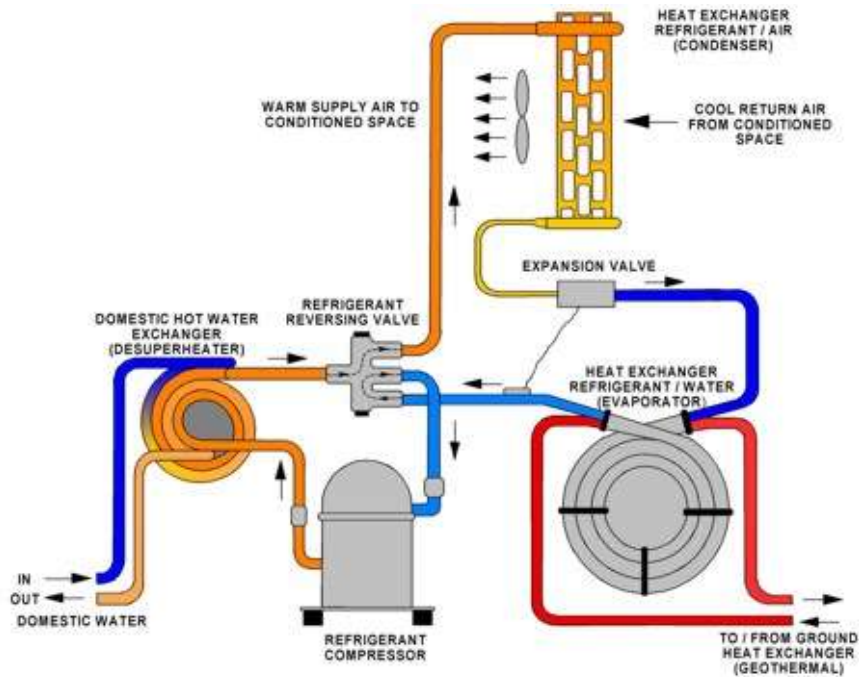
Ο γεωθερμικός κλιματισμός (θέρμανση και ψύξη) χώρων άρχισε να αναπτύσσεται σημαντικά από τη δεκαετία του 1980, ακολουθώντας την εμφάνιση και την ευρεία διάδοση των αντλιών θερμότητας (*heat pumps*). Οι πολλοί διαθέσιμοι τύποι αντλιών θερμότητας επιτρέπουν την απόληψη και χρήση με οικονομικό τρόπο του θερμικού περιεχομένου των σωμάτων χαμηλής θερμοκρασίας, όπως είναι το έδαφος ή οι ρηχοί υδροφόροι, τεχνητές ή φυσικές συγκεντρώσεις νερού (ponds), κλπ. (Sanner, 2001) (Σχήμα 15).



Σχήμα 15

Τυπική εφαρμογή συστήματος αντλιών θερμότητας που είναι συνδεδεμένες με το υπέδαφος (από Sanner et al., 2003)

Όπως είναι γνωστό, οι αντλίες θερμότητας είναι μηχανές που κατευθύνουν τη θερμότητα αντίθετα από τη διεύθυνση που θα ακολουθούσε με φυσικό τρόπο, δηλαδή την εξαναγκάζουν να κατευθυνθεί από ένα ψυχρό μέσο σε ένα άλλο θερμότερο. Οι αντλίες θερμότητας δεν είναι τίποτε περισσότερο από συσκευές που λειτουργούν όπως τα κοινά ψυγεία (Rafferty, 1997). Κάθε ψυκτική συσκευή (air-condition, ψυγείο, καταψύκτης κλπ.) παίρνει θερμότητα από ένα χώρο που πρέπει να παραμείνει σε χαμηλή θερμοκρασία και την απελευθερώνει σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η μόνη διαφορά της αντλίας θερμότητας από μια ψυκτική μονάδα είναι το τελικό αποτέλεσμα, δηλαδή η θέρμανση στην πρώτη περίπτωση και η ψύξη στη δεύτερη. Μια άλλη διαφορά εντοπίζεται στην αντιστρέψιμη λειτουργία πολλών αντλιών θερμότητας, δηλαδή στην ικανότητά τους να παρέχουν τόσο ψύξη όσο και θέρμανση στο χώρο. Βέβαια, για τη λειτουργία των αντλιών θερμότητας απαιτείται δαπάνη ενέργειας, ενώ η χρήση τους ενδείκνυται κατά κύριο λόγο σε περιοχές κατάλληλων κλιματικών συνθηκών, οπότε για να είναι θετική η ενεργειακή ισορροπία πρέπει να προηγηθεί ένας σωστός σχεδιασμός (Σχήμα 16).



Σχήμα 16

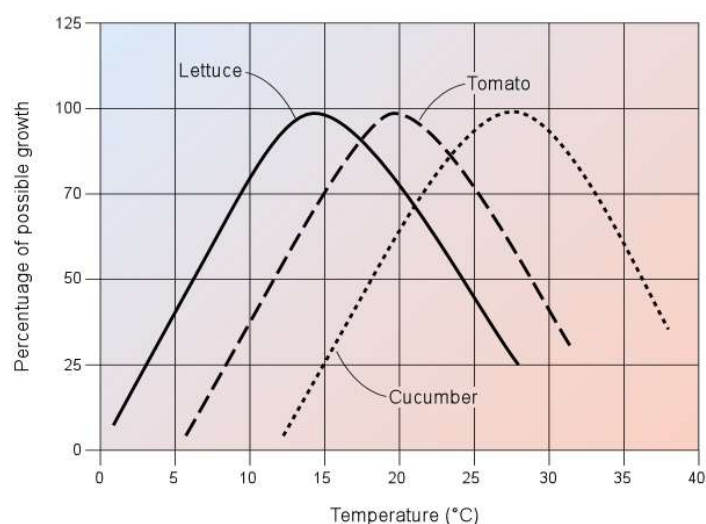
Σχηματικό διάγραμμα μιας αντλίας θερμότητας που χρησιμοποιείται για θέρμανση (ευγενική χορηγία του Geo-Heat Center, Klamath Falls, Όρεγκον, ΗΠΑ)

Συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας κλειστού κυκλώματος που είναι συνδεδεμένες με το υπέδαφος (ground-coupled) και αντλιών επιφανειακού ή επεδάφιου νερού (ground-water) βρίσκονται σήμερα εγκατεστημένα σε 27 χώρες, με συνολική θερμική ισχύ που ανήλθε σε 6.875 MWt κατά το έτος 2000. Η πλειοψηφία των εγκαταστάσεων βρίσκεται στις ΗΠΑ (4.800 MWt), την Ελβετία (500 MWt), τη Σουηδία (377 MWt), τον Καναδά (360 MWt), τη Γερμανία (344 MWt) και την Αυστρία (228 MWt) (Lund, 2001). Για τη λειτουργία των συστημάτων αυτών χρησιμοποιούνται ρηχοί υδροφόροι ορίζοντες ή εδάφη και υπόγεια πετρώματα, με θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 5-30°C.

Οι αγροτικές εφαρμογές της γεωθερμίας συνίστανται κυρίως στις ανοικτές καλλιέργειες και τη θέρμανση θερμοκηπίων. Το θερμό νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις ανοικτές καλλιέργειες για την άρδυσή τους και/ή τη θέρμανση του εδάφους. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της άρδευσης με χλιαρό νερό εντοπίζεται στο γεγονός ότι, για να επιτευχθεί κάποια αξιόλογη μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους θα πρέπει οι μεγάλες ποσότητες νερού να έχουν θερμοκρασία τόσο χαμηλή ώστε να μην προκαλούν ζημιές στις αρδευόμενες καλλιέργειες. Πιθανή λύση αυτού του προβλήματος θα ήταν η χρήση υπεδάφιων αρδευτικών συστημάτων σε συνδυασμό με ένα υπόγειο σύστημα σωλήνωσης, το οποίο θα λειτουργεί ως το μέσο

θέρμανσης του εδάφους. Η θέρμανση του εδάφους με υπεδάφιους σωλήνες χωρίς την ύπαρξη του αρδευτικού συστήματος θα προκαλούσε μείωση της θερμικής αγωγιμότητάς του, εξαιτίας της μείωσης της υγρασίας γύρω από τους σωλήνες, και κατ' επέκταση θα οδηγούσε σε θερμική μόνωση. Η βέλτιστη λύση φαίνεται λοιπόν ότι θα ήταν ο συνδυασμός θέρμανσης εδάφους και άρδευσης. Η χημική σύσταση των γεωθερμικών νερών που χρησιμοποιούνται για άρδευση θα πρέπει να εξετάζεται και να παρακολουθείται προσεκτικά, ώστε να αποφεύγονται τυχόν βλαβερές συνέπειες στα φυτά. Ο θερμοκρασιακός έλεγχος στις ανοικτές καλλιέργειες έχει τα εξής πλεονεκτήματα: (α) αποτρέπει τις ζημιές λόγω χαμηλών θερμοκρασιών, παγετού, κλπ., (β) επεκτείνει την περίοδο ανάπτυξης των φυτών και δίνει σημαντική ώθηση στην παραγωγή, και (γ) αποστειρώνει το έδαφος (Barbier and Fanelli, 1977).

Η πιο συνηθισμένη γεωθερμική εφαρμογή στον αγροτικό τομέα είναι η *θέρμανση θερμοκηπίων*, η οποία αναπτύχθηκε ιδιαίτερα σε πολλές χώρες. Η εκτός εποχής καλλιέργεια κηπουρικών, οπωρικών και ανθοκομικών προϊόντων ή η ανάπτυξή τους σε περιοχές με μη ευνοϊκές κλιματολογικές συνθήκες, μπορεί σήμερα να βασιστεί σε μια ευρέως εφαρμοσμένη τεχνολογία. Υπάρχουν ποικίλες λύσεις για την επίτευξη των βέλτιστων συνθηκών ανάπτυξης των φυτών, οι οποίες βασίζονται στη χρήση της καλύτερης θερμοκρασίας για το κάθε είδος (Σχήμα 17), στη σωστή ένταση του φωτός, στην ιδανική συγκέντρωση CO₂ μέσα στο θερμοκήπιο, στην κατάλληλη υγρασία του εδάφους και του αέρα και στην κίνηση του αέρα μέσα στα θερμοκήπια.

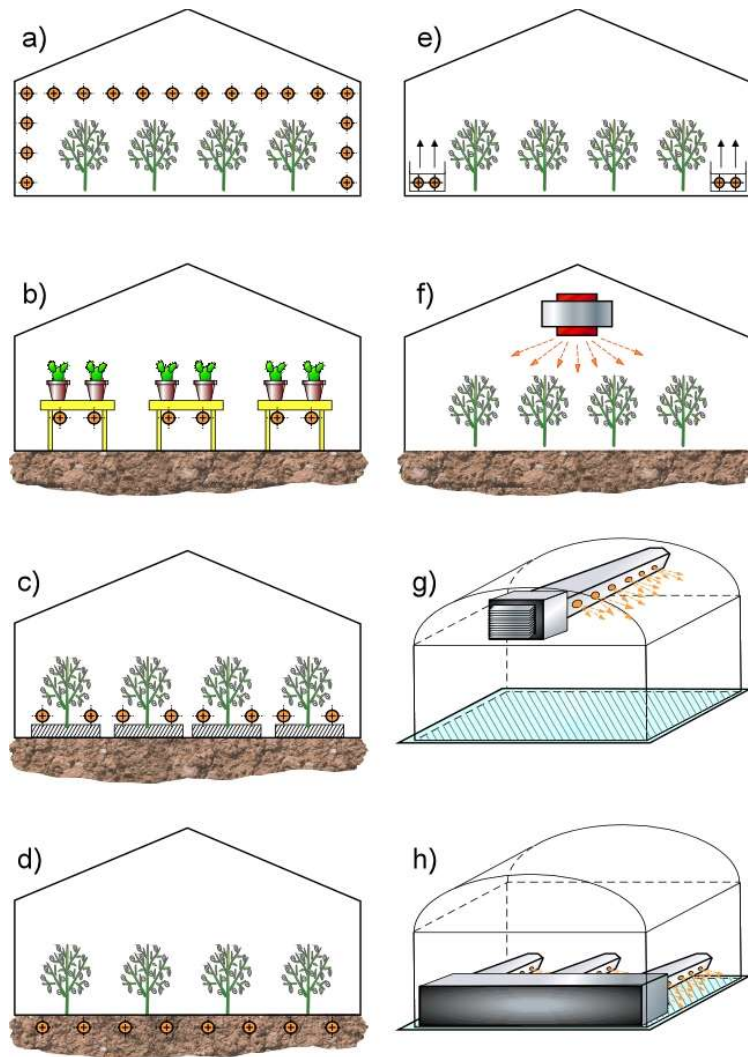


Σχήμα 17

Επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη κάποιων φυτών (Beall and Samuels, 1971)

Το υλικό κάλυψης των τοιχωμάτων ενός θερμοκηπίου μπορεί να αποτελείται από γυαλί, fiberglass, πλάκες σκληρού πλαστικού ή πλαστικά φύλλα. Το γυαλί είναι το πλέον διαφανές υλικό και, σε σχέση με το πλαστικό, επιτρέπει σε μεγαλύτερο βαθμό τη διέλευση φωτός. Από την άλλη, το γυαλί προσφέρει μικρότερη θερμική μόνωση, είναι λιγότερο ανθεκτικό στην κρούση, είναι βαρύτερο και πολύ πιο ακριβό. Τα πιο απλά θερμοκήπια κατασκευάζονται από μονά φύλλα πλαστικού, όμως τελευταίως χρησιμοποιούνται και διπλά στρώματα πλαστικών, μεταξύ των οποίων υπάρχει ένα κενό αέρος. Με το σύστημα αυτό μειώνονται οι θερμικές απώλειες από τα τοιχώματα σε ποσοστό μέχρι και 30-40%, οπότε αυξάνεται σημαντικά η απόδοση του θερμοκηπίου. Η θέρμανση ενός θερμοκηπίου μπορεί επίσης να επιτευχθεί με εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα στους εναλλάκτες θερμότητας, στους σωλήνες ή τους αγωγούς θερμού νερού που βρίσκονται τοποθετημένοι μέσα ή πάνω στο έδαφος, στα θερμοτικά σώματα κατά μήκος των πλευρικών τοιχωμάτων και κάτω από τους πάγκους ή με συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων (Σχήμα 18). Η χρήση των γεωθερμικών ρευστών για τη θέρμανση ενός θερμοκηπίου μειώνει σημαντικά τα λειτουργικά του έξοδα, τα οποία σε κάποιες περιπτώσεις φτάνουν το 35% του κόστους παραγωγής (οπωρικά, άνθη, διακοσμητικά φυτά και δενδρύλλια).

Η εκτροφή κτηνοτροφικών ειδών και οι υδρόβιοι οργανισμοί, όπως ακριβώς και τα φυτά, επωφελούνται σημαντικά από τις άριστες συνθήκες της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου, τόσο ως προς την ποιότητα όσο και ως προς την ποσότητα παραγωγής τους (Σχήμα 19). Σε πολλές περιπτώσεις τα γεωθερμικά νερά θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν ακόμη επικερδέστερα, μέσα από τη συνδυασμένη χρήση τους σε κτηνοτροφικές μονάδες και γεωθερμικά θερμοκήπια. Η ενέργεια που χρειάζεται για τη θέρμανση μιας μονάδας εκτροφής ζώων είναι περίπου το 50% αυτής που απαιτείται για ένα θερμοκήπιο ίδιας επιφάνειας, οπότε η κλιμακωτή χρήση των γεωθερμικών ρευστών θεωρείται ενδεδειγμένη. Η εκτροφή ζώων σε ένα περιβάλλον ελεγχόμενης θερμοκρασίας συνεισφέρει στη βελτίωση της υγείας τους, ενώ η χρήση των θερμών ρευστών θα μπορούσε να επεκταθεί στον καθαρισμό και την εξυγίανση των χώρων τους, αλλά και στην ξήρανση των αποβλήτων τους (Barbier and Fanelli, 1977).



Σχήμα 18

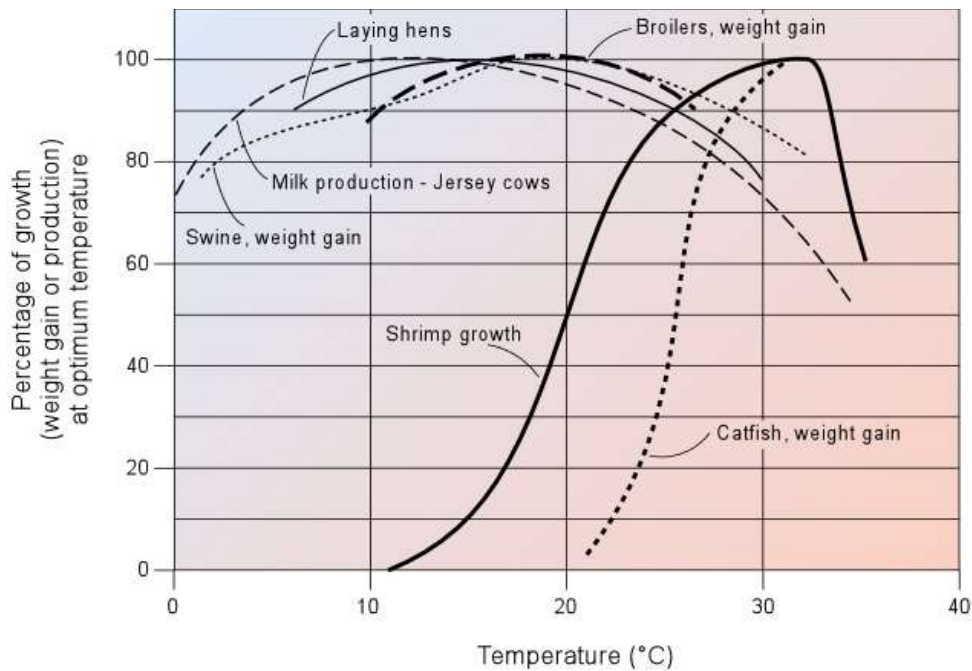
Συστήματα θέρμανσης σε γεωθερμικά θερμοκήπια.

Εγκαταστάσεις θέρμανσης με φυσική κίνηση του αέρα (φυσική συναγωγή): (α) εναέριοι σωλήνες θέρμανσης (β) θέρμανση πάγκων (γ) σωλήνες θέρμανσης που είναι τοποθετημένοι χαμηλά (δ) θέρμανση εδάφους

Εγκαταστάσεις θέρμανσης με εξαναγκασμένη κίνηση του αέρα (εξαναγκασμένη συναγωγή)

(ε) πλευρική τοποθέτηση σωλήνων (στ) εναέριο αερόθερμα (ζ) αγωγοί τοποθετημένοι ψηλά (η) αγωγοί τοποθετημένοι χαμηλά

(von Zabeltitz, 1986)



Σχήμα 19

Επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη ή παραγωγή ζώων που εκτρέφονται για κατανάλωση (Beall and Samuels, 1971)

Οι υδατοκαλλιέργειες, οι οποίες στην ουσία αποτελούν την ελεγχόμενη εκτροφή υδρόβιων οργανισμών, αποκτούν σήμερα ολοένα και μεγαλύτερη σπουδαιότητα σε παγκόσμιο επίπεδο, λόγω της αυξημένης ζήτησής τους στην αγορά. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας εκτροφής των ειδών αυτών είναι πολύ πιο σημαντικός σε σχέση με τα είδη που αναπτύσσονται στην ξηρά (θηλαστικά και πτηνά), όπως άλλωστε φαίνεται και στο Σχήμα 19, το οποίο δείχνει πόσο πιο διαφορετική είναι η τάση της καμπύλης ανάπτυξης των υδρόβιων ειδών. Διατηρώντας με τεχνητά μέσα τη θερμοκρασία σε βέλτιστα επίπεδα, καθίσταται δυνατή και η εκτροφή εξωτικών ειδών, η βελτίωση της παραγωγής ή ακόμη και ο διπλασιασμός του αναπαραγωγικού κύκλου σε μερικά είδη (Barbier and Fanelli, 1977). Τα είδη που κατά παράδοση εκτρέφονται σε τέτοιες μονάδες είναι: κυπρίνος, γατόψαρο, λαβράκια, κέφαλοι, χέλια, σολωμοί, μουρούνες, γαρίδες, αστακοί, караβίδες, κάβουρες, στρείδια, μύδια, χτένια κλπ.

Οι υδατοκαλλιέργειες περιλαμβάνουν επίσης την εκτροφή κροκοδείλων και αλιγατών, που αξιοποιούνται συνήθως ως τουριστικό αξιοθέατο αλλά και για την εκμετάλλευση του δέρματός τους, η οποία μπορεί να αποτελέσει μια πολύ επικερδή δραστηριότητα. Με βάση την εμπειρία από τις Η.Π.Α., φαίνεται ότι, διατηρώντας τη θερμοκρασία ανάπτυξής του σταθερή στους 30°C, ένας αλιγάτορας μπορεί να μεγαλώσει σε μήκος περίπου 2 μέτρα μέσα σε 3 χρόνια, ενώ εάν ζούσε σε φυσικές

συνθήκες η αύξηση του μήκους του δεν θα ξεπερνούσε τα 1,20 μέτρα κατά την ίδια χρονική περίοδο. Τέτοια ερπετά εκτρέφονται εδώ και χρόνια σε ειδικές εγκαταστάσεις στο Κολοράντο και το Άινταχο των Η.Π.Α., ενώ παρόμοιες εφαρμογές σχεδιάζονται και στην Ισλανδία.

Οι θερμοκρασίες που απαιτούνται για τα υδρόβια είδη κυμαίνονται κατά βάση μεταξύ 20 και 30°C. Το μέγεθος των εγκαταστάσεων εξαρτάται από την αρχική θερμοκρασία των ρευστών, τη θερμοκρασία που απαιτείται στις δεξαμενές εκτροφής και από τις θερμικές απώλειες των τελευταίων.

Η καλλιέργεια της σπιρουλίνας (*Spirulina*) θεωρείται επίσης μια μορφή υδατοκαλλιέργειας. Λόγω της υψηλής διατροφικής του αξίας, αυτό το μονοκυτταρικό, σπειροειδές και γαλάζιο-πράσινο φύκος, συχνά αποκαλείται «υπερτροφία». Επίσης, έχει προταθεί ως λύση στο πρόβλημα της ασιτίας στις φτωχότερες περιοχές του πλανήτη, όμως για την ώρα χαρακτηρίζεται στο εμπόριο απλά ως «συμπλήρωμα διατροφής». Η σπιρουλίνα καλλιεργείται σήμερα σε αρκετές τροπικές και υπο-τροπικές χώρες, σε λίμνες ή τεχνητές δεξαμενές, όπου επικρατούν ιδανικές συνθήκες για τη γρήγορη ανάπτυξή της (μέσα σε ένα ζεστό, αλκαλικό περιβάλλον, πλούσιο σε CO₂). Παρόλα αυτά, σε αρκετές χώρες των εύκρατων ζωνών η γεωθερμική ενέργεια έχει ήδη αξιοποιηθεί επιτυχώς σε τέτοιες υδατοκαλλιέργειες, για την ανάπτυξη της *spirulina* σε ετήσια βάση, παρέχοντας την απαραίτητη θερμότητα αλλά και το CO₂.

Τα γεωθερμικά ρευστά, σε ολόκληρο το θερμοκρασιακό τους εύρος, είτε πρόκειται για ατμό είτε για νερό, μπορούν να αξιοποιηθούν και σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως άλλωστε φαίνεται από το διάγραμμα του Lindal (Σχήμα 10). Οι διάφορες δυνατές μορφές αξιοποίησης περιλαμβάνουν θέρμανση κατά τη διεργασία, εξάτμιση, ξήρανση, απόσταξη, αποστείρωση, πλύσιμο, λιώσιμο πάγων και ανάκτηση αλάτων. Η χρήση της γεωθερμικής θερμότητας κατά τη βιομηχανική επεξεργασία διάφορων προϊόντων εφαρμόζεται σε 19 χώρες (Lund and Freeston, 2001), όπου οι εγκαταστάσεις είναι γενικά πολύ μεγάλες και η κατανάλωση ενέργειας υψηλή. Άλλα συγκεκριμένα παραδείγματα βιομηχανικών εφαρμογών είναι η εμφιάλωση νερού και ανθρακούχων ποτών, η παραγωγή χαρτιού, τμημάτων αυτοκινήτων, η ανάκτηση λαδιού, η παστερίωση γάλακτος, η χρήση στη βυρσοδεψία, η χημική ανάκτηση προϊόντων, η παραγωγή με διαχωρισμό του CO₂, η χρήση σε πλυντήρια, η ξήρανση γης διατόμων, η επεξεργασία πολτού και χαρτιού και η παραγωγή βορικών αλάτων και βορικού οξέος. Υπάρχουν επίσης εφαρμογές για χρήση των γεωθερμικών ρευστών χαμηλής θερμοκρασίας για λιώσιμο πάγου και αντιπαγετική προστασία

πεζοδρομίων, δρόμων και πλατειών, ως και σχέδια για τη διάλυση της ομίχλης σε κάποια αεροδρόμια. Στην Ιαπωνία λειτουργεί μια μικρή βιομηχανία που χρησιμοποιεί τις λευκαντικές ιδιότητες του υδρόθειου (H_2S) των γεωθερμικών νερών για την παραγωγή πρωτοποριακών και εξαιρετικής ποιότητας υφασμάτων για γυναικεία ρούχα. Στην ίδια χώρα, εφαρμόζεται σε πειραματικό στάδιο μια τεχνική για τη βιοτεχνική-βιομηχανική παρασκευή ενός ελαφρού «γεωθερμικού ξύλου», το οποίο θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλο για ειδικές κατασκευές. Κατά την επεξεργασία του κανονικού ξύλου με το νερό μιας γεωθερμικής πηγής, τα πολυσακχαρίδιά του υφίστανται υδρόλυση, οπότε το υλικό γίνεται πιο πορώδες και συνεπώς ελαφρύτερο.

Οικονομική προσέγγιση

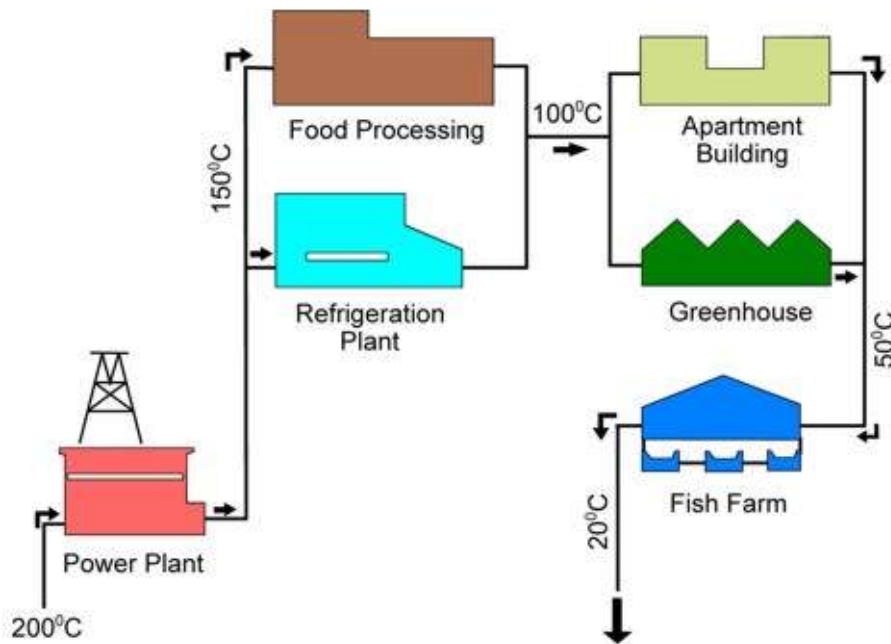
Τα στοιχεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κάθε φορά που γίνεται εκτίμηση του κόστους της εγκατάστασης ή της λειτουργίας μιας γεωθερμικής μονάδας, και της αξίας των «προϊόντων» της γεωθερμικής ενέργειας, είναι πολύ περισσότερα και πιο σύνθετα σε σχέση με τις άλλες μορφές ενέργειας. Συνεπώς, θα πρέπει όλα αυτά τα στοιχεία να αξιολογούνται πολύ προσεκτικά πριν την εκπόνηση ενός γεωθερμικού προγράμματος.

Στο σημείο αυτό, μόνο κάποιες γενικές ενδείξεις μπορούν να αναφερθούν, οι οποίες σε συνδυασμό με τις πληροφορίες για τις τοπικές συνθήκες και την αξία των διαθέσιμων ρευστών, θα βοηθούσαν ίσως το μελλοντικό επενδυτή στη λήψη των σημαντικών αποφάσεων.

- Ένα σύστημα γεωθερμικού πόρου - εγκαταστάσεων (μονάδα εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας) αποτελείται από τις γεωθερμικές γεωτρήσεις, το δίκτυο μεταφοράς των ρευστών, τη μονάδα παραγωγής ή χρήσης και συχνά το σύστημα επανεισαγωγής. Η αλληλεπίδραση όλων αυτών των στοιχείων θα πρέπει να αναλύεται προσεκτικά διότι βαρύνουν σε μεγάλο βαθμό το κόστος της αρχικής επένδυσης. Για παράδειγμα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μια μονάδα ατμοσφαιρικής διάθεσης του ατμού αποτελεί την απλούστερη και φθηνότερη επιλογή συγκριτικά με μια μονάδα ίσης ισχύος που λειτουργεί με συμπύκνωση. Παρόλα αυτά, απαιτούνται σχεδόν διπλάσιες ποσότητες ατμού και συνεπώς διπλάσιος αριθμός γεωτρήσεων παραγωγής, κάτι που αυξάνει πολύ το αρχικό κόστος. Έτσι λοιπόν, παρόλο που οι γεωτρήσεις είναι ακριβές, η γεωθερμική μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού που λειτουργεί με συμπύκνωση αποδεικνύεται τελικά πιο φτηνή επιλογή, παρόλο

που τελικά τις περισσότερες φορές η επιλογή της γίνεται για λόγους ανεξάρτητους του κόστους.

- Τα γεωθερμικά ρευστά μπορούν να μεταφερθούν σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις μέσα σε θερμικά μονωμένους σωλήνες. Υπό ιδανικές συνθήκες το μήκος των σωληνώσεων μπορεί να φτάσει ακόμη και τα 60 km. Όμως, το κόστος των σωληνώσεων, του απαιτούμενου βοηθητικού εξοπλισμού (αντλίες, βαλβίδες, κλπ) και της συντήρησής τους, επιβαρύνουν πολύ τον προϋπολογισμό και μπορεί να ανεβάσουν σημαντικά το συνολικό λειτουργικό κόστος επένδυσης και λειτουργίας της εγκατάστασης. Οπότε, η απόσταση μεταξύ του πόρου (γεωτρήσεις) και της εφαρμογής (εγκαταστάσεις) θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.
- Το αρχικό κόστος επένδυσης μιας γεωθερμικής μονάδας εφαρμογής είναι συνήθως μεγαλύτερο, και σε κάποιες περιπτώσεις πολύ ανώτερο, από αυτό που απαιτείται για τη λειτουργία μιας αντίστοιχης μονάδας συμβατικών καυσίμων. Αντίθετα, η ενέργεια που καταναλώνεται σε μια γεωθερμική εγκατάσταση κοστίζει πολύ λιγότερο από τα συμβατικά καύσιμα και αντιστοιχεί συνήθως στο κόστος συντήρησης των διαφόρων επιμέρους τμημάτων της (σωληνώσεις, βαλβίδες, αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας κλπ.). Έτσι λοιπόν, οι υψηλότερες αρχικές δαπάνες λογικά αντισταθμίζονται από την εξοικονόμηση που γίνεται στην κατανάλωση ενέργειας. Ως εκ τούτου, το συνολικό σύστημα γεωθερμικού πόρου και εγκαταστάσεων θα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να βρίσκεται σε λειτουργία για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, ικανό για να γίνει απόσβεση της αρχικής επένδυσης, και, αν είναι δυνατό, ακόμη μεγαλύτερο.
- Αξιοσημείωτα οικονομικά οφέλη μπορούν να προκύψουν από τη χρήση συνδυαστικών και ολοκληρωμένων συστημάτων που παρέχουν μεγαλύτερους συντελεστές απόδοσης (για παράδειγμα, συστήματα που συνδυάζουν ψύξη **και** θέρμανση χώρων) ή συστήματα διαδοχικής (κλιμακωτής) εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας, στα οποία οι εφαρμογές είναι συνδεδεμένες σε σειρά και η κάθε μια χρησιμοποιεί τα ρευστά που απορρίπτονται από την προηγούμενη (για παράδειγμα, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας -> θέρμανση θερμοκηπίων -> κτηνοτροφία) (Σχήμα 20).



Σχήμα 20

Διαδοχική (κλιμακωτή) χρήση της γεωθερμικής ενέργειας (ευγενική χορήγηση του Geo-Heat Center, Klamath Falls, Ορεγκον, ΗΠΑ)

- Για τη μείωση του κόστους συντήρησης και της πιθανότητας διακοπής της λειτουργίας της, η τεχνική πολυπλοκότητα μιας γεωθερμικής μονάδας δε θα πρέπει να ξεπερνά το βαθμό που αυτή θα είναι προσβάσιμη από το τοπικό τεχνικό προσωπικό και τους εύκολα διαθέσιμους ειδικούς. Οι πολύ εξειδικευμένοι τεχνικοί ή οι κατασκευαστές θα πρέπει να είναι απαραίτητοι μόνο για τις μεγάλης κλίμακας εργασίες συντήρησης ή στην περίπτωση εκτεταμένων ζημιών της μονάδας.
- Τέλος, εάν η γεωθερμική εφαρμογή αφορά στην παραγωγή καταναλωτικών αγαθών, θα πρέπει να προηγηθεί μια προσεκτική και εμπειριστατωμένη έρευνα αγοράς, ώστε να εξασφαλιστεί η διάθεση αυτών των προϊόντων. Επίσης, θα πρέπει υποχρεωτικά να προϋπάρχουν ή να συμπεριληφθούν στον αρχικό προϋπολογισμό οι απαραίτητες υποδομές για την οικονομικά συμφέρουσα μεταφορά των προϊόντων από το σημείο παραγωγής στον καταναλωτή.

Το πεδίο εφαρμογής των παραπάνω παρατηρήσεων καλύπτει όλες τις μορφές αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας και οποιεσδήποτε τοπικές συνθήκες, και για αυτό έχουν έναν καθαρά ποιοτικό χαρακτήρα. Όσον αφορά στον αντικειμενικό υπολογισμό του ύψους της επένδυσης και του κόστους, προτείνεται το World Energy

Assessment Report, που συντάχθηκε από το UNDP, το UN-DESA και το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας (World Energy Council) και το οποίο δημοσιεύτηκε το 2000. Τα στοιχεία του WEA παρατίθενται στους Πίνακες 4 και 5, στους οποίους γίνεται επίσης η σύγκριση ανάμεσα στη γεωθερμική ενέργεια και άλλες ανανεώσιμες πηγές (Friedleifsson, 2001).

Πίνακας 4. Ενεργειακό και επενδυτικό κόστος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (Friedleifsson, 2001)

	Current energy cost US¢/kWh	Potential future energy cost US¢/kWh	Turnkey investment cost US\$/kW
Biomass	5 - 15	4 - 10	900 - 3000
Geothermal	2 - 10	1 - 8	800 - 3000
Wind	5 - 13	3 - 10	1100 - 1700
Solar (photovoltaic)	25 - 125	5 - 25	5000 - 10 000
Solar (thermal electricity)	12 - 18	4 - 10	3000 - 4000
Tidal	8 - 15	8 - 15	1700 - 2500

Πίνακας 5

Ενεργειακό και επενδυτικό κόστος για απευθείας χρήση θερμότητας από ανανεώσιμες πηγές (Friedleifsson, 2001)

	Current energy cost US¢/kWh	Potential future energy cost US¢/kWh	Turnkey investment cost US\$/kW
Biomass (including ethanol)	1 - 5	1 - 5	250 - 750
Geothermal	0.5 - 5	0.5 - 5	200 - 2000
Wind	5 - 13	3 - 10	1100 - 1700
Solar heat low temperature	3 - 20	2 - 10	500 - 1700

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960, όταν το περιβάλλον ήταν περισσότερο «υγιές» και καθαρό σε σχέση με σήμερα και ο άνθρωπος είχε σαφώς λιγότερες γνώσεις σχετικά με οποιαδήποτε περιβαλλοντική απειλή, η γεωθερμική ενέργεια θεωρούνταν ακόμη ως μια «καθαρή ενέργεια». Στην πραγματικότητα όμως, δεν υπάρχει τρόπος παραγωγής ενέργειας ή μετατροπής της από μια μορφή σε άλλη για να χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο, που να μην προκαλεί κάποιες άμεσες ή έμμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ακόμη και η παλαιότερη και πιο απλούστερη μορφή παραγωγής θερμικής ενέργειας, δηλαδή η καύση του ξύλου, έχει καταστρεπτικές συνέπειες, ενώ η αποψίλωση των δασών, ένα από τα μεγαλύτερα

προβλήματα τα τελευταία χρόνια, ξεκίνησε όταν οι πρόγονοί μας έκοψαν τα πρώτα δέντρα για να μαγειρέψουν την τροφή τους και να ζεστάνουν τα σπίτια τους. Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας έχει όντως κάποιο αντίκτυπο στο περιβάλλον, όμως δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι πρόκειται για μια από τις πλέον καθαρές και ελάχιστα έως καθόλου ρυπαντικές μορφές ενέργειας.

Πηγές ρύπανσης

Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο βαθμός που μια γεωθερμική εκμετάλλευση επηρεάζει το περιβάλλον είναι ανάλογος με το μέγεθος και την κλίμακα της εκμετάλλευσης (Lunis and Breckenridge, 1991). Ο Πίνακας 6 δίνει συνοπτικά την πιθανότητα και τη σχετική σοβαρότητα των επιπτώσεων στο περιβάλλον από τη δημιουργία και λειτουργία μιας εγκατάστασης για άμεση χρήση της γεωθερμίας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με δυαδικά συστήματα επηρεάζει το περιβάλλον με τον ίδιο τρόπο όπως οι άμεσες χρήσεις. Οι επιπτώσεις είναι δυνητικά περισσότερες στην περίπτωση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με μια συμβατική γεωθερμική μονάδα (χωρίς συμπυκνωτές) ή μονάδα με συμπυκνωτές, ειδικά όσον αφορά την ποιότητα του αέρα, όμως μπορεί να διατηρηθεί μέσα σε αποδεκτά όρια.

Πίνακας 6. Πιθανότητα εμφάνισης και σοβαρότητα των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων από εγκαταστάσεις άμεσης χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας

Impact	Probability of occurring	Severity of consequences
Air quality pollution	L	M
Surface water pollution	M	M
Underground pollution	L	M
Land subsidence	L	L to M
High noise levels	H	L to M
Well blow-outs	L	L to M
Conflicts with cultural and archaeological features	L to M	M to H
Social-economic problems	L	L
Chemical or thermal pollution	L	M to H
Solid waste disposal	M	M to H

*L = Low; M = Moderate; H= High
Source: Lunis and Breckenridge (1991)*

Κάθε μεταβολή στο περιβάλλον θα πρέπει να αξιολογείται προσεκτικά, λαμβάνοντας υπόψη τους σχετικούς νόμους και κανονισμούς (οι οποίοι σε κάποιες χώρες είναι πολύ αυστηροί), αλλά και επειδή κάθε φαινομενικά ασήμαντη αλλαγή θα μπορούσε να προκαλέσει αλυσιδωτά φαινόμενα, των οποίων οι επιπτώσεις είναι

δύσκολο να προβλεφθούν πλήρως και να αναλυθούν εκ των προτέρων. Για παράδειγμα, μια αύξηση της τάξης των 2-3°C στη θερμοκρασία ενός υδάτινου αποδέκτη, ως αποτέλεσμα της απόρριψης αποβλήτων από μια γεωθερμική εφαρμογή, θα μπορούσε να είναι επιβλαβές στο οικοσύστημά του. Οι φυτικοί και ζωικοί οργανισμοί που είναι ευαίσθητοι στις θερμοκρασιακές μεταβολές σταδιακά θα εξαφανιζόταν, αφήνοντας τα μεγαλύτερα ψάρια χωρίς την πηγή τροφής τους. Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά την ανάπτυξη των αυγών άλλων τύπων ψαριών. Αν τα ψάρια αυτά αποτελούν βρώσιμο είδος και οικονομικό πόρο μιας κοινότητας ψαράδων, τότε η εξαφάνισή τους θα ήταν κρίσιμη για την επιβίωσή της.

Η πρώτη περιβαλλοντική επίπτωση που γίνεται αντιληπτή από τα πρώτα κίονες στάδια εφαρμογής ενός γεωθερμικού έργου, είναι οι *γεωτρήσεις*, ανεξάρτητα αν αυτές φτάνουν σε μικρά βάθη και αποσκοπούν στη μέτρηση της γεωθερμικής βαθμίδας κατά το στάδιο έρευνας, ή αν είναι γεωτρήσεις έρευνας-παραγωγής. Η εγκατάσταση ενός γεωτρητικού συγκροτήματος, που περιλαμβάνει και όλο το βοηθητικό εξοπλισμό του, πολλές φορές απαιτεί τη διάνοιξη-επισκευή δρόμων για την πρόσβαση στο σημείο των γεωτρήσεων και την κατασκευή μιας γεωτρητικής εξέδρας και πλατείας. Η τελευταία καλύπτει μια επιφάνεια από 300-500 m², όταν το γεωτρύπανο είναι μικρό και αυτοκινούμενο (μέγιστο βάθος γεωτρήσεων 300-700 m), και μέχρι 1200-1500 m² όταν είναι μέτριο έως μεγάλο (μέγιστο βάθος 2000 m). Οι εργασίες για την εγκατάσταση των γεωτρυπάνων και την κατασκευή των γεωτρήσεων τροποποιούν ελαφρά την επιφανειακή μορφολογία της περιοχής ενώ δεν αποκλείεται η πιθανότητα πρόκλησης μικρών ζημιών στη χλωρίδα και την πανίδα της περιοχής. Οι απότομες εξοδοί ρευστών μπορεί να προκαλέσουν ρύπανση των επιφανειακών υδάτων, γι' αυτό, εάν αναμένονται υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, θα πρέπει να προβλεφθεί η εγκατάσταση συστήματος «αντιεκρηκτικού» μηχανισμού ασφάλειας ρευστών (blow-up preventers) (Lunis and Breckenridge, 1991). Επίσης, κατά τη διάρκεια κατασκευής των γεωτρήσεων ή των δοκιμών παραγωγής, υπάρχει κίνδυνος διαφυγής στην ατμόσφαιρα κάποιων ανεπιθύμητων αερίων. Σε κάθε περίπτωση, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται από τις γεωτρητικές εργασίες σταματούν με το πέρας αυτών.

Κατά το επόμενο στάδιο, η εγκατάσταση του δικτύου μεταφοράς των γεωθερμικών ρευστών και η κατασκευή των *εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης*, επηρεάζει επίσης την πανίδα, τη χλωρίδα και την επιφανειακή μορφολογία της περιοχής. Το τοπίο της περιοχής μπορεί να αλλάξει ελαφρώς, παρόλο που σε κάποιες περιπτώσεις,

όπως στο Larderello, το δίκτυο των σωληνώσεων που διαπερνά την περιοχή και οι πύργοι ψύξης των εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν γίνει αναπόσπαστα τμήματα του τοπίου και αποτελούν πια ένα διάσημο τουριστικό αξιοθέατο της περιοχής.

Περιβαλλοντικά προβλήματα είναι δυνατόν να προκύψουν και στη φάση λειτουργίας μιας γεωθερμικής εγκατάστασης. Τα γεωθερμικά ρευστά (ατμός ή ζεστό νερό) συνήθως περιέχουν *αέρια*, όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), υδρόθειο (H_2S), αμμωνία (NH_3), μεθάνιο (CH_4) και ίχνη από άλλα αέρια, καθώς και *διαλυμένες χημικές ενώσεις*, των οποίων η συγκέντρωση συνήθως αυξάνει με τη θερμοκρασία. Για παράδειγμα, το χλωριούχο νάτριο (NaCl), το βόριο (B), το αρσενικό (As) και ο υδράργυρος (Hg) αποτελούν πηγές ρύπανσης αν διατεθούν στο επιφανειακό περιβάλλον. Κάποια γεωθερμικά ρευστά, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση οικισμών στην Ισλανδία, μπορεί να είναι καθαρά νερά, όμως κάτι τέτοιο αποτελεί μια σπάνια περίπτωση. Επίσης, όταν τα νερά απορρίπτονται από τις γεωθερμικές εγκαταστάσεις έχοντας υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με το περιβάλλον, τότε συνιστούν μια πιθανή πηγή θερμικής ρύπανσης.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να αποδειχθεί ένα σχετικά σημαντικό πρόβλημα κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικές γεωθερμικές εγκαταστάσεις. Η εκπομπή υδρόθειου αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή μόλυνσης. Το όριο οσμής για την παρουσία υδρόθειου στον αέρα είναι περίπου 5 p.p.b/κ.ό., ενώ κάποιες φυσικές επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου παρατηρούνται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις (Weres, 1984). Παρόλα αυτά, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μείωση των εκπομπών του αερίου αυτού, οπότε οι επιπτώσεις του συγκεκριμένου προβλήματος μπορούν να ελεγχθούν σχετικά εύκολα. Στα ρευστά που χρησιμοποιούνται σε ένα εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί επίσης να βρεθεί διοξείδιο του άνθρακα, όμως, συγκριτικά με τις εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικά καύσιμα, η απελευθέρωση CO_2 είναι κατά πολύ μικρότερη: 13 έως 380 gr για κάθε kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από μια γεωθερμική εγκατάσταση αντιστοιχεί σε 1.042 gr/kWh που εκπέμπεται από τις εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν λιγνίτη, 906 gr/kWh από αυτές που χρησιμοποιούν πετρέλαιο και 453 gr/kWh από τις μονάδες φυσικού αερίου (Friedleifsson, 2001). Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με δυαδικά συστήματα και οι εγκαταστάσεις τηλεθέρμανσης οικισμών μπορούν πιθανώς να δημιουργήσουν κάποια μικρότερα προβλήματα, τα οποία όμως μπορούν

να ξεπεραστούν με απλό τρόπο, χρησιμοποιώντας κλειστά συστήματα που προλαμβάνουν οποιαδήποτε εκπομπή αερίων.

Η διάθεση των χρησιμοποιηθέντων γεωθερμικών νερών (αλμολοίπων) αποτελεί μια πιθανή πηγή χημικής ρύπανσης. Για το λόγο αυτό, τα γεωθερμικά ρευστά με σχετικά μεγάλη περιεκτικότητα σε χημικά στοιχεία όπως βόριο, φθόριο, αρσενικό, θα πρέπει να υφίστανται κάποιου είδους επεξεργασία ή να επανεισάγονται στον ταμιευτήρα ή και τα δύο. Τα γεωθερμικά ρευστά μέσης έως χαμηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες εφαρμογές άμεσων χρήσεων περιέχουν γενικά πολύ χαμηλές ποσότητες χημικών στοιχείων, οπότε η διάθεσή τους πολύ σπάνια συνιστά κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα. Κάποια από αυτά μάλιστα, μπορούν συχνά, αφού υποστούν μια σχετική ψύξη, να διατεθούν ακόμη και σε κάποιον επιφανειακό υδάτινο αποδέκτη (Lunis and Breckenridge, 1991). Η ψύξη των ρευστών μπορεί να γίνει μέσα σε ειδικές δεξαμενές ή τεχνητές λίμνες, ώστε να αποφεύγονται οι τυχόν μεταβολές στο οικοσύστημα των υδάτινων αποδεκτών (ποτάμια, λίμνες, ή και θάλασσα).

Υπάρχει η πιθανότητα η άντληση μεγάλων ποσοτήτων ρευστών από τους γεωθερμικούς ταμιευτήρες να προκαλέσει φαινόμενα *καθίζησης*, δηλαδή σταδιακής βύθισης της επιφάνειας του εδάφους. Αυτό αποτελεί ένα μη αναστρέψιμο φαινόμενο, αλλά σε καμία περίπτωση δεν είναι καταστροφικό, καθώς πρόκειται για μια αργή διαδικασία που συνήθως επηρεάζει και «κατανέμεται» σε μεγάλες επιφάνειες. Με το πέρασμα των χρόνων, η καθίζηση μπορεί να φτάσει σε μετρήσιμα επίπεδα, σε κάποιες περιπτώσεις ακόμη και σε κάποιες δεκάδες εκατοστών ή και μέτρων, οπότε θα πρέπει να παρακολουθείται συστηματικά, καθώς τότε υπάρχει η πιθανότητα να επηρεάσει τη σταθερότητα όχι μόνο των κτιριακών εγκαταστάσεων των γεωθερμικών μονάδων αλλά και όλων των άλλων κτιρίων στην περιοχή. Σε πολλές περιπτώσεις η καθίζηση μπορεί να αποτραπεί, ή να μειωθεί σημαντικά, με την επανεισαγωγή των χρησιμοποιηθέντων γεωθερμικών ρευστών στον ταμιευτήρα από τον οποίο προέρχονται.

Η απόληψη και/ή η επανεισαγωγή των γεωθερμικών ρευστών μπορεί να προκαλέσει ή να αυξήσει τη συχνότητα των *σεισμικών φαινομένων* σε κάποιες περιοχές. Όμως, πρόκειται για μικροσεισμικά γεγονότα, που μπορούν να γίνουν αντιληπτά μόνο από λεπτομερή καταγραφικά όργανα. Η εκμετάλλευση των γεωθερμικών πόρων είναι απίθανο να προκαλέσει μεγάλα σεισμικά συμβάντα, και μέχρι στιγμής τίποτε τέτοιο δεν έχει γίνει γνωστό σε κάποιο γεωθερμικό πεδίο.

Ο θόρυβος που συνδέεται με τη λειτουργία των γεωθερμικών εγκαταστάσεων, θα μπορούσε να αποτελέσει πρόβλημα μόνο στις εγκαταστάσεις που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Κατά τη φάση παραγωγής, πρόκειται για το θόρυβο που προκαλείται από τη μεταφορά του ατμού μέσα από τους σωλήνες και στην περιστασιακή απόρριψή του στο περιβάλλον. Όμως τα συγκεκριμένα επίπεδα θορύβου είναι συνήθως αποδεκτά. Στην εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής, η κύρια πηγή θορύβου προέρχεται από τους ανεμιστήρες του πύργου ψύξης, τον εκτοξευτή ατμού και το βόμβο των αμοστροβίλων (Brown, 2000). Ο θόρυβος που προκαλείται από τις εφαρμογές άμεσης χρήσης της γεωθερμίας είναι συνήθως αμελητέος.

ΠΑΡΟΝ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

Οι ποσότητες θερμικής ενέργειας που υπάρχουν στο υπέδαφος είναι τεράστιες. Μια ομάδα ειδικών υπολόγισε το γεωθερμικό δυναμικό κάθε ηπείρου (Πίνακας 7), όσον αφορά τους πόρους υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας (International Geothermal Association, 2001).

Εάν αξιοποιηθεί σωστά, η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στο ενεργειακό ισοζύγιο αρκετών χωρών. Σε κάποιες περιπτώσεις, ακόμη και μικρής κλίμακας γεωθερμικοί πόροι είναι αρκετοί για την επίλυση πολλών τοπικών προβλημάτων και ικανοί για την άνοδο του βιοτικού επιπέδου μικρών και απομονωμένων κοινοτήτων.

Τα δεδομένα που προέρχονται από τον Friedleifsson (2003) δίνουν μια γενική ιδέα για το ρόλο που κατέχει η γεωθερμία σε σχέση με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 2.826 TWh από ΑΠΕ το 1998, το ποσοστό 92% προέρχεται από υδροηλεκτρική ενέργεια, 5,5% από βιομάζα, 1,6% από γεωθερμική ενέργεια, 0,6% από αιολική ενέργεια, 0,05% από ηλιακή ενέργεια και 0,02 από παλιρροϊκή ενέργεια. Όσον αφορά τη θερμότητα, η βιομάζα κατέχει το 92% της συνολικής παραγωγής από ΑΠΕ, η γεωθερμική ενέργεια το 5% και η ηλιακή ενέργεια των 2%.

Πίνακας 7. Γεωθερμικό δυναμικό στον πλανήτη (International Geothermal Association, 2001)

	High-temperature resources suitable for electricity generation		Low-temperature resources suitable for direct use in million TJ/yr of heat (lower limit)
	Conventional technology in TWh/yr of electricity	Conventional and binary technology in TWh/yr of electricity	
Europe	1830	3700	> 370
Asia	2970	5900	> 320
Africa	1220	2400	> 240
North America	1330	2700	> 120
Latin America	2800	5600	> 240
Oceania	1050	2100	> 110
World potential	11 200	22 400	> 1400

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ARMSTEAD, H.C.H., 1983. *Geothermal Energy*. E. & F. N. Spon, London, 404 pp.

AXELSSON, G. and GUNNLAUGSSON, E., 2000. Background: Geothermal utilization, management and monitoring. In: *Long-term monitoring of high- and low-enthalpy fields under exploitation*, WGC 2000 Short Courses, Japan, 3-10.

BARBIER, E. and FANELLI, M., 1977. Non-electrical uses of geothermal energy. *Prog. Energy Combustion Sci.*, **3**, 73-103.

BEALL, S. E, and SAMUELS, G., 1971. The use of warm water for heating and cooling plant and animal enclosures. *Oak Ridge National Laboratory*, ORNL-TM-3381, 56 pp.

BENDERITTER, Y. and CORMY, G., 1990. Possible approach to geothermal research and relative costs. In: Dickson, M.H. and Fanelli, M., eds., *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization*, UNITAR, New York, pp. 59—69.

- BROWN, K. L., 2000. Impacts on the physical environment. In: Brown, K.L., *ed.*, *Environmental Safety and Health Issues in Geothermal Development*, WGC 2000 Short Courses, Japan, 43—56.
- BULLARD, E.C., 1965. Historical introduction to terrestrial heat flow. In : Lee, W.H.K., *ed.* *Terrestrial Heat Flow*, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., **8**, pp.1-6.
- COMBS, J. and MUFFLER, L.P.J., 1973. Exploration for geothermal resources. In : Kruger, P. and Otte, C., *eds.*, *Geothermal Energy*, Stanford University Press, Stanford, pp.95—128.
- ENTINGH, D. J., EASWARAN, E. and McLARTY, L., 1994. Small geothermal electric systems for remote powering. *U.S. DoE, Geothermal Division, Washington, D.C.*, 12 pp.
- FRIDLEIFSSON, I.B., 2001. Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **5**, 299-312.
- FRIDLEIFSSON, I. B., 2003. Status of geothermal energy amongst the world's energy sources. *IGA News*, No.52, 13-14.
- GARNISH, J.D., *ed.*, 1987. Proceedings of the First EEC/US Workshop on Geothermal Hot-Dry Rock Technology, *Geothermics* **16**, 323—461.
- GUDMUNDSSON, J.S., 1988. The elements of direct uses. *Geothermics*, **17**, 119—136.
- HOCHSTEIN, M.P., 1990. Classification and assessment of geothermal resources. In: Dickson, M.H. and Fanelli, M., *eds.*, *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization*, UNITAR, New York, pp. 31—57.
- HUTTRER, G.W., 2001. The status of world geothermal power generation 1995-2000. *Geothermics*, **30**, 7-27.

- INTERNATIONAL GEOTHERMAL ASSOCIATION, 2001. Report of the IGA to the UN Commission on Sustainable Development, Session 9 (CSD-9), New York, April.
- LINDAL, B., 1973. Industrial and other applications of geothermal energy. In: Armstead, H.C.H., *ed.*, *Geothermal Energy*, UNESCO, Paris, pp.135—148.
- LUBIMOVA, E.A., 1968. Thermal history of the Earth. In: *The Earth's Crust and Upper Mantle*, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., **13**, pp.63—77.
- LUMB, J. T., 1981. Prospecting for geothermal resources. In: Rybach, L. and Muffler, L.J.P., *eds.*, *Geothermal Systems, Principles and Case Histories*, J. Wiley & Sons, New York, pp. 77—108.
- LUND, J. W., 2001. Geothermal heat pumps- an overview. *Bulletin Geo-Heat Center*, **22**, 1,1-2.
- LUND, J. W., 2003. The USA country update. *IGA News*, No. 53, 6-9.
- LUND, J. W., and BOYD, T. L., 2001. Direct use of geothermal energy in the U.S. – 2001. *Geothermal Resources Council Transactions*, **25**, 57-60.
- LUND, J. W., and FREESTON, D., 2001. World-wide direct uses of geothermal energy 2000. *Geothermics* **30**, 29- 68.
- LUNIS, B. and BRECKENRIDGE, R., 1991. Environmental considerations. In: Lienau, P.J. and Lunis, B.C.,*eds.*, *Geothermal Direct Use, Engineering and Design Guidebook*, Geo-Heat Center, Klamath Falls, Oregon, pp.437—445.
- MEIDAV,T.,1998. Progress in geothermal exploration technology. *Bulletin Geothermal Resources Council*, **27**, 6,178-181.
- MUFFLER, P. and CATALDI, R., 1978. Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics* , **7**, 53—89.
- NICHOLSON, K., 1993. *Geothermal Fluids*. Springer Verlag, Berlin, XVIII—264 pp.

- POLLACK, H.N., HURTER, S.J. and JOHNSON, J.R.,1993. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev. Geophys.* **31**, 267—280.
- RAFFERTY, K., 1997. An information survival kit for the prospective residential geothermal heat pump owner. *Bull. Geo-Heat Center* , **18**, 2, 1—11.
- SANNER, B., KARYTSAS, C., MENDRINOS, D. and RYBACH, L., 2003. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage. *Geothermics*, Vol.32, 579-588.
- STACEY, F.D. and LOPER, D.E., 1988. Thermal history of the Earth: a corollary concerning non-linear mantle rheology. *Phys. Earth. Planet. Inter.* **53**, 167 - 174.
- STEFANSSON,V., 2000. The renewability of geothermal energy. *Proc. World Geothermal Energy, Japan*. On CD-ROM
- TENZER, H., 2001. Development of hot dry rock technology. *Bulletin Geo-Heat Center*, **32**, 4, 14-22.
- WERES, O., 1984. Environmental protection and the chemistry of geothermal fluids. *Lawrence Berkeley Laboratory, Calif.* , LBL 14403, 44 pp.
- WHITE, D. E., 1973. Characteristics of geothermal resources. In: Kruger, P. and Otte, C.,eds., *Geothermal Energy*, Stanford University Press, Stanford, pp. 69-94.
- WRIGHT, P.M., 1998. The sustainability of production from geothermal resources. *Bull. Geo-Heat Center*, **19**, 2, 9-12.