

8 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



8.1 Εισαγωγή

Γεωθερμική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που περιέχεται στο εσωτερικό της Γης και προκαλεί τη δημιουργία των γεωλογικών φαινομένων στον πλανήτη μας. Στα πλαίσια των ΑΠΕ ο όρος *γεωθερμική ενέργεια* υποδηλώνει εκείνο το τμήμα της γήινης ενέργειας (θερμότητας) που μπορεί να αξιοποιηθεί από τον άνθρωπο.

Οι άνθρωποι από τα πρώιμα χρόνια της ιστορίας αντιλήφθηκαν ότι το εσωτερικό της Γης είναι θερμό από τις επιφανειακές εκδηλώσεις της εσωτερικής θερμότητας της Γης, π.χ., από την παρουσία ηφαιστειών, θερμών πηγών κ.λπ. Κατά τον 16^ο και 17^ο αιώνα με την κατασκευή ορυχείων που έφτασαν μερικά εκατοντάδες μέτρα κάτω από το έδαφος μπόρεσαν να διαπιστώσουν ότι η θερμοκρασία της Γης αυξάνεται με το βάθος. Οι πρώτες μετρήσεις με θερμόμετρο έγιναν πιθανώς στο Belfort της Γαλλίας το 1740¹. Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας (θερμότητας) για βιομηχανική χρήση έγινε για πρώτη φορά στις αρχές του 19^{ου} αιώνα στην Ιταλία στην περιοχή της Τοσκάνης, στο Larderello. Η βιομηχανία που λειτουργούσε εκεί για την παραγωγή βορικού οξέος αξιοποίησε τη θερμότητα στη διαδικασία της εξάτμισης. Ταυτόχρονα χρησιμοποιήθηκε η εκμετάλλευση του θερμού ατμού για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας, που κινούσε ανυψωτήρες, αντλίες και βαρούλκα². Μεταξύ του 1910 και του 1940 στην ίδια περιοχή χρησιμοποιήθηκε η γεωθερμική ενέργεια για τη θέρμανση βιομηχανικών κτιρίων, κατοικιών και θερμοκηπίων. Στην Ισλανδία επίσης το 1928 ξεκίνησε η θέρμανση κατοικιών με αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών. Σήμερα σε πάρα πολλές χώρες παγκοσμίως αξιοποιείται η γεωθερμική ενέργεια ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις τηλεθέρμανσης

¹ Dickson et al, 2004.

² ο.π.

[district heating] και στην αγροτική παραγωγή (θερμοκήπια, υδατοκαλλιέργειες κ.λπ.). Οι παρακάτω Πίνακες 8.1 και 8.2 δείχνουν την κατάσταση στην Ευρώπη³.

Πίνακας 8.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (σε GWh) με αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης το 2007, το 2008 και το 2010.

(Πηγή: Euroserver 2009, 2012)

Χώρα	2007	2008	2010
Ιταλία	5.569,1	5.520,3	5.375,9
Πορτογαλία	201,0	192,0	197,1
Γαλλία	95,0	89,0	15
Γερμανία	0,4	6,6	27,7
Αυστρία	2,4	1,6	1,4
Σύνολο	5.867,9	5.809,5	5.617,1

Πίνακας 8.2 Εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύς (για άμεση χρήση εκτός ηλεκτρικής ενέργειας και γεωθερμικών αντλιών θερμότητας) στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης το 2007, το 2008 και το 2010. (Πηγή: Euroserver 2009, 2012)

Χώρα	2007	2008	2010
	Θερμική ισχύς (MW _{th})	Θερμική ισχύς (MW _{th})	Θερμική ισχύς (MW _{th})
Ουγγαρία	694,2	694,2	654,0
Ιταλία	500,0	500,0	418,0
Γαλλία	307,0	312,0	345,0
Γερμανία	240,0	280	115,6
Ρουμανία	145,1	145,1	153,2
Σλοβακία	131,0	142,8	130,6
Πολωνία	110,0	110,0	66,3
Αυστρία	97,0	97,0	97,0
Βουλγαρία	109,6	77,7	77,7
Ελλάδα	69,8	69,8	84,6
Σλοβενία	44,7	44,7	66,8
Πορτογαλία	30,4	30,4	27,8
Ισπανία	22,3	22,3	20,6
Λιθουανία	17,0	17,0	13,6
Βέλγιο	9,0	9,0	3,9
Τσεχία	4,5	4,5	4,5
Μ. Βρετανία	3,0	3,0	2,0
Ιρλανδία	0,4	0,4	1,5
Σύνολο ΕΕ	2.535,1	2.559,9	2.283,6

³ Για περισσότερα βλ. Dickson et al, 2004.

Οι πρώτες προσπάθειες για την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας άρχισαν το 1904 επίσης στην περιοχή του Larderello. Η εμπορική επιτυχία αυτής της προσπάθειας συντέλεσε στο να ανέλθει ήδη το 1942 η εγκαταστημένη γεωθερμική ηλεκτρική ισχύς στην περιοχή στα 128 MW_e, ενώ το 2003 ήταν εγκατεστημένα 790 MW_e⁴. Η επόμενη αξιόλογη εγκατάσταση γεωθερμικού ηλεκτρισμού για εμπορική χρήση δημιουργήθηκε στο Wairakei στη Ν. Ζηλανδία στα τέλη της δεκαετίας του 1950⁵. Το 1960 στο Geisers Field στη Βόρεια Καλιφόρνια άρχισε η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με αξιοποίηση του γεωθερμικού πεδίου της περιοχής. Η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς έφτασε στις αρχές του 1990 τα 2.800 MW_e και παρ' όλο που στη συνέχεια λόγω της υπερεκμετάλλευσης η ισχύς του πεδίου μειώθηκε, παρέμενε μέχρι το 2003 το μεγαλύτερο πεδίο παγκοσμίως⁶. Σήμερα σε τουλάχιστον 25 χώρες όλου του κόσμου υπάρχουν εγκατεστημένες μονάδες αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή. Το 2004 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ήταν 8.930 MW_e⁷. Ένας από τους βασικότερους λόγους για την εξάπλωση αυτού του τύπου αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας είναι το γεγονός ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη ηλεκτρικού φορτίου βάσης κι όχι αιχμής που είναι το συνηθέστερο για την πλειοψηφία των μορφών ΑΠΕ. Ο Πίνακας 8.3 δείχνει την κατάσταση σ' όλο τον κόσμο με φθίνουσα σειρά κατάταξης.

⁴ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 470.

⁵ Boyle et al, 2004, σελ. 348.

⁶ Ο.π.

⁷ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 470.

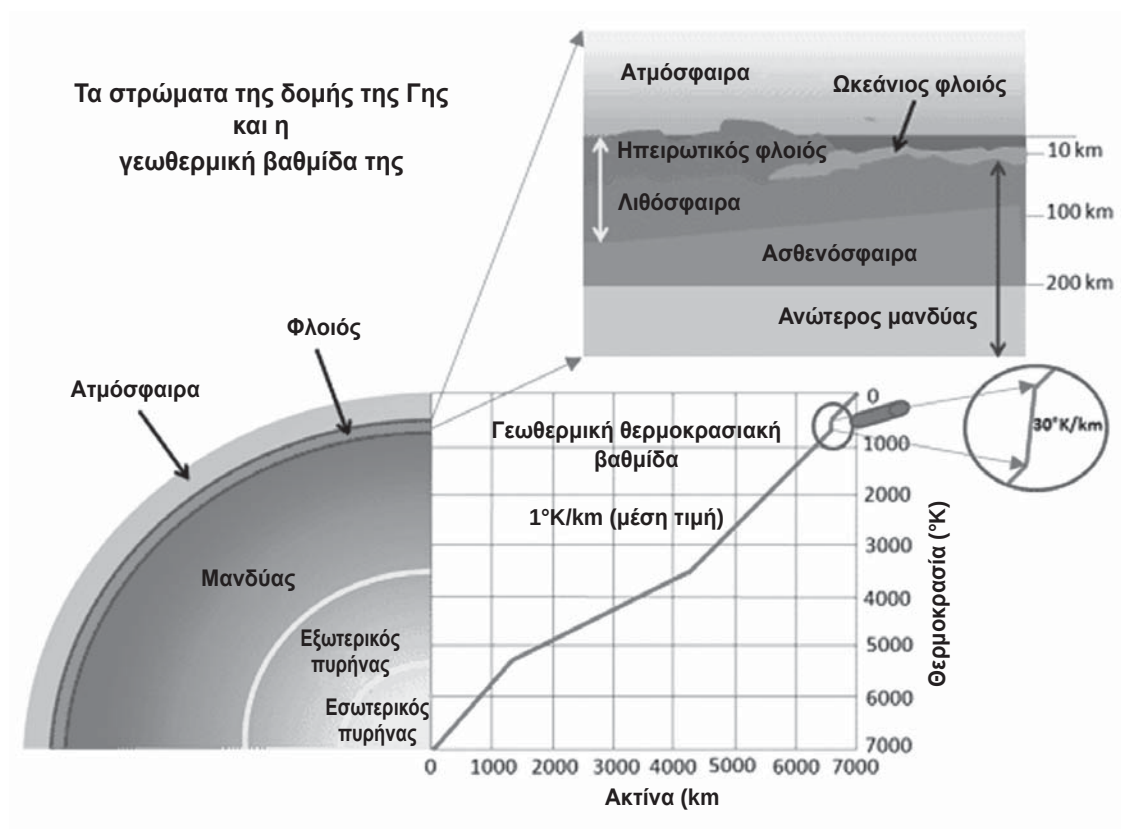
Πίνακας 8.3 Συνολική εγκατεστημένη γεωθερμική (ηλεκτρική) ισχύς σε όλο τον κόσμο το 2010.
(Πηγή: *Geothermal Energy International Market Update* Geothermal Energy Association - May 2010/ http://www.geo-energy.org/pdf/reports/GEA_International_Market_Report_Final_May_2010.pdf)

Χώρες που παρήγαγαν γεωθερμική ηλεκτρική ισχύ	Εγκατεστημένη ισχύς (MW _e)	Κατάταξη
ΗΠΑ	3.086	1
Φιλιππίνες	1.904	2
Ινδονησία	1.197	3
Μεξικό	958	4
Ιταλία	843	5
Νέα Ζηλανδία	628	6
Ισλανδία	575	7
Ιαπωνία	536	8
Ελ Σαλβαδόρ	204	9
Κένια	167	10
Κόστα Ρίκα	166	11
Νικαράγουα	88	12
Ρωσία	82	13
Τουρκία	82	14
Παπούα Νέα Γουινέα	56	15
Γουατεμάλα	52	16
Πορτογαλία	29	17
Κίνα	24	18
Γαλλία	16	19
Αιθιοπία	7,3	20
Γερμανία	6,6	21
Αυστρία	1,4	22
Αυστραλία	1,1	23
Ταϊλάνδη	0,3	24

8.2 Βασικές αρχές

8.2.1 Η πηγή της γεωθερμικής ενέργειας (θερμότητας)

Τα τρία βασικά στρώματα της Γης είναι ο *φλοιός* [crust] (που αντιπροσωπεύει το 2% του συνολικού όγκου της Γης και εκτείνεται σε βάθος 5-70 km), ο *μανδύας* [mantle] (που αντιπροσωπεύει το 82% του συνολικού όγκου της Γης και εκτείνεται σε βάθος ~2.900 km) και ο *πυρήνας* [core] (που χωρίζεται σε εσωτερικό [inner] και εξωτερικό [outer] φλοιό (το υπόλοιπο 16%, που φτάνει μέχρι το κέντρο της Γης, στα 6.370 km). Στο Σχήμα 8.1 φαίνεται αυτή η δομή.



Σχήμα 8.1 Τα στρώματα της δομής της Γης και η γεωθερμική βαθμίδα της. Ενώ η μέση τιμή της γεωθερμικής θερμοκρασιακής βαθμίδας σε όλη την έκταση του βάθους της Γης είναι μόνο 1 K/km, στις περιοχές μέχρι τα 10 km είναι ~3 K/100m ή 30 K/km.

(Πηγή: mpoweruk.com)

Η θερμοκρασία της Γης αυξάνεται με το βάθος (από το φλοιό προς τον πυρήνα). Στο εσωτερικό του πυρήνα υπάρχει η υψηλότερη θερμοκρασία (7.000°C). Ο ρυθ-

μός με τον οποίο αυξάνεται η θερμοκρασία σε συνάρτηση με το βάθος ονομάζεται *γεωθερμική βαθμίδα* [*geothermal gradient*]. Η γεωθερμική βαθμίδα (Σχήμα 8.1) δεν είναι σταθερή σε όλη την έκταση του βάθους της Γης ούτε ίδια σε όλες τις περιοχές της Γης. Η μέση *γεωθερμική βαθμίδα* μέχρι τα 10 km (που αποτελεί το προσβάσιμο βάθος με τις σύγχρονες γεωτρητικές μεθόδους) είναι $\sim 2,5\text{-}3^\circ\text{C}/100\text{ m}$ ($\sim 25\text{-}30\text{ K/km}$)⁸. Υπάρχουν όμως περιοχές της Γης που η γεωθερμική βαθμίδα αποκλίνει πολύ από τη μέση τιμή. Σε περιοχές της Γης που διαθέτουν πολύ καλό γεωθερμικό δυναμικό η γεωθερμική βαθμίδα είναι και δέκα (10) φορές μεγαλύτερη από τη μέση τιμή της.

Η παραγωγή θερμότητας στο εσωτερικό της Γης οφείλεται σε δύο κύριους παράγοντες: αφενός μεν στη θερμική ενέργεια που έχει αποταμιευτεί κυρίως στον πυρήνα της Γης κατά την πρωταρχική περίοδο της δημιουργίας της και αφετέρου στη θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη διάσπαση των ραδιενεργών ισोटόπων (κυρίως Θόριου ^{232}Th , ουρανίου ^{238}U) και καλίου ^{40}K) που βασικά βρίσκονται στο ανώτερο στρώμα της Γης (το φλοιό).

Θερμότητα μεταφέρεται από τα στρώματα του εσωτερικού της Γης με τις υψηλότερες θερμοκρασίες προς την επιφάνεια. Η θερμότητα μεταφέρεται με δύο βασικούς τρόπους: με **ρεύματα μεταφοράς (συμμεταφορά)** [*convection*] και με **αγωγή** [*conduction*]. Στο κύριο μέρος του εσωτερικού της Γης, όπου οι θερμοκρασίες είναι τόσο μεγάλες που η φυσική κατάσταση των υλικών είναι υγρή-αέρια, η μεταφορά θερμότητας γίνεται με συμμεταφορά (δηλαδή το θερμότερο ρευστό υλικό κινείται ανοδικά, ενώ το ψυχρότερο καθοδικά). Στα ανώτερα στρώματα της Γης (περίπου 100 km κοντά στην επιφάνεια), όπου οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες και τα υλικά βρίσκονται περισσότερο στη στερεά φάση, η μεταφορά θερμότητας γίνεται κυρίως με αγωγή.

Ανάλογα με τη φυσική κατάσταση των υλικών το εσωτερικό της Γης χωρίζεται σε μερικά τμήματα. Το ανώτερο (προς την επιφάνεια) τμήμα που εκτείνεται περίπου κατά 80 km κάτω από τους ωκεανούς και κατά 200 km κάτω από τις ηπειρωτικές περιοχές ονομάζεται *λιθόσφαιρα* [*lithosphere*] και είναι ένα σχετικά στέρεο και συμπαγές στρώμα. Το τμήμα κάτω από τη λιθόσφαιρα που εκτείνεται σε πάχος $\sim 200\text{-}300\text{ km}$ ονομάζεται *ασθενόσφαιρα* [*asthenosphere*] και είναι ένα πολύ λιγότερο σταθερό στρώμα με μια συμπεριφορά που προσομοιάζει με αυτή ενός ρευστού. Οι κινήσεις του υλικού της ασθενόσφαιρας σε προηγούμενες περιόδους της γεωλογικής ιστορίας της Γης δημιούργησαν στη λιθόσφαιρα τις λεγόμενες τεκτονικές-λιθοσφαιρικές πλάκες. Οι μικρές και αργές μετατοπίσεις (μερικά cm ανά έτος) αυτών των πλακών (που συμβαίνουν συνεχώς) αποτελούν το αίτιο

⁸ Dickson et al, 2004.

που τεράστιες ποσότητες θερμότερων ρευστών υλικών (μάγμα) ανεβαίνουν από το βάθος της Γης προς την επιφάνεια, ενώ ψυχρότερες μάζες ρευστών ακολουθούν καθοδική πορεία. Αυτή η κυκλοφορία των θερμικών ρευστών της Γης συνήθως δε γίνεται αντιληπτή στην επιφάνειά της. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι τέτοιοι που αυτά τα ρευστά φτάνουν στην επιφάνεια και έτσι δημιουργούνται τα ηφαίστεια ή άλλες επιφανειακές εκδηλώσεις μεγάλης ροής θερμότητας από το εσωτερικό της Γης (π.χ., γκάζερ [geyser]⁹). Οι περιοχές της Γης στις οποίες έχουμε παρουσία των γεωθερμικών ρευστών στην επιφάνεια βρίσκονται κυρίως κοντά στις διαρρήξεις των λιθοσφαιρικών πλακών (π.χ., περιοχές Ειρηνικού Ωκεανού) που δημιουργούν μεσωκεάνιες ράχες, ρήγματα μετασχηματισμού και ζώνες καταβύθισης¹⁰.



Σχήμα 8.2 Ο δακτύλιος της φωτιάς [ring of fire] είναι τόξο που εκτείνεται από τη Νέα Ζηλανδία, κατά μήκος της ανατολικής άκρης της Ασίας, βόρεια σε όλα τα Αλεούτια νησιά της Αλάσκας, και νότια κατά μήκος των ακτών της Βόρειας και της Νότιας Αμερικής. Στο Δακτυλίδι της Φωτιάς βρίσκεται πάνω από το 75% των ενεργών και αδρανών ηφαιστείων του κόσμου και αποτελεί την περιοχή στην οποία εντοπίζονται μεγάλες ποσότητες γεωθερμικών ρευστών στην επιφάνεια της Γης.

(Πηγή: National Energy Education Development Project)

⁹ Για περισσότερα για τα γκάζερ βλ. <http://www.uweb.ucsb.edu/~glennon/geysers/>, <http://geology.com/articles/geyser.shtml>, <http://en.wikipedia.org/wiki/Geyser> (22/1/2011).

¹⁰ Περισσότερα και αναλυτικότερα μπορούν να βρεθούν στο Dickson et al, 2004, Boyle et al, 2004, σελ. 344-345 και σελ. 350-355.

8.2.2 Γεωθερμικά συστήματα

Τα **γεωθερμικά συστήματα** [*geothermal systems*] μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με την τιμή που έχει η **γεωθερμική βαθμίδα**¹¹ σε εκείνα τα σημεία. Όταν η απόκλιση της **γεωθερμικής βαθμίδας** είναι λίγο μεγαλύτερη από τη μέση τιμή της (που είναι περίπου 2,5-3°C/100 m), τότε η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού σε αξιοποιήσιμα βάθη (από οικονομικο-τεχνική σκοπιά) δεν ξεπερνά τους 100°C. Τα γεωθερμικά συστήματα τότε αξιοποιούνται κυρίως για τη θέρμανση κατοικιών ή σε αγροτικές εφαρμογές. Όταν όμως η απόκλιση της γεωθερμικής βαθμίδας είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μέση τιμή, τότε η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού που φτάνει στην επιφάνεια μπορεί και να ξεπεράσει τους 400°C. Σε αυτή την περίπτωση τα γεωθερμικά πεδία¹² είναι κατάλληλα για τη λειτουργία εγκαταστάσεων που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.

Ως **γεωθερμικό σύστημα** μπορεί να χαρακτηριστεί ένα περιορισμένο τμήμα του ανώτερου φλοιού της Γης, το οποίο αποτελείται από κινούμενο νερό που μεταφέρει θερμότητα από μια **θερμή πηγή** [heat source] σε μια **δεξαμενή θερμότητας** [heat sink] που συνήθως είναι η ελεύθερη επιφάνεια¹³. Συνεπώς, μπορεί να ειπωθεί ότι ένα **γεωθερμικό σύστημα** αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία: την **εστία θερμότητας** (θερμή πηγή), τον **ταμιευτήρα** [*reservoir*] και το **γεωθερμικό ρευστό** που μεταφέρει τη θερμότητα.

Η **εστία θερμότητας** στα γεωθερμικά συστήματα υψηλής θερμοκρασίας είναι συνήθως μια μαγματική διείσδυση πολύ υψηλής θερμοκρασίας (>600°C) που έχει ανέλθει σε σχετικά μικρά βάθη (της τάξης των 5-10 km). Στα γεωθερμικά πεδία χαμηλής θερμοκρασίας (της τάξης των 100°C) η εστία θερμότητας είναι συνήθως ένα τμήμα του φλοιού της Γης στο οποίο η γεωθερμική βαθμίδα είναι μεγαλύτερη από τη μέση.

Ο **ταμιευτήρας** είναι ένας σχηματισμός από υδατοπερατά πετρώματα που (προφανώς) επιτρέπουν την κυκλοφορία των ρευστών από μέσα τους και έτσι μπορεί να μεταφέρεται η θερμότητα προς την επιφάνεια. Οι ταμιευτήρες τροφοδοτούνται με θερμότητα από την εστία θερμότητας κυρίως μέσω αγωγής [conduction], καθώς συνήθως μεταξύ αυτών και της εστίας μεσολαβούν στεγανά (μη υδατοπερατά πετρώματα).

Το **γεωθερμικό ρευστό** που κυκλοφορεί στον ταμιευτήρα είναι συνήθως νερό (στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μετεωρικής προέλευσης) που βρίσκεται σε

¹¹ Παρακάτω θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στην ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων (resources) και πεδίων.

¹² Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, βρίσκονται κυρίως σε περιοχές γύρω από τα όρια των τεκτονικών πλακών.

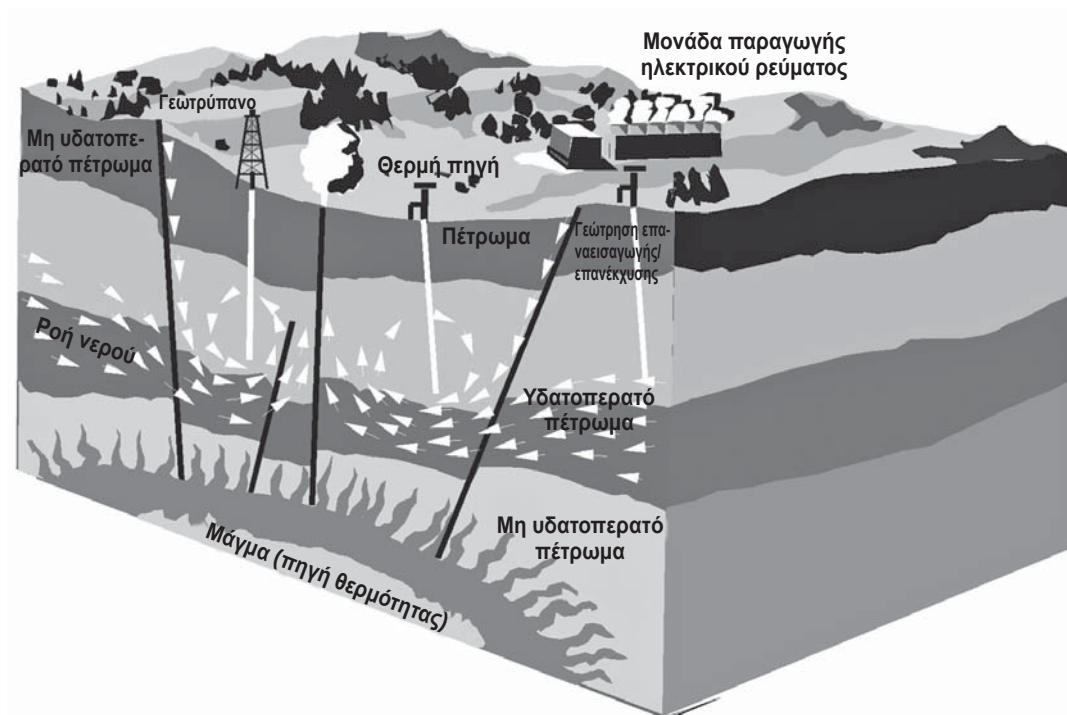
¹³ Dickson et al, 2004.

υγρή ή αέρια μορφή (ή μείξη αυτών) ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Σε πολλές περιπτώσεις στο ρευστό συνυπάρχουν διαλυμένες και άλλες στερεές χημικές ουσίες και αέρια (CO_2 , H_2S κ.λπ.).

Στο Σχήμα 8.3 αποτυπώνεται σε απλουστευμένη μορφή ένα πρότυπο γεωθερμικό σύστημα. Παρ' όλο που τα πραγματικά γεωθερμικά συστήματα είναι πολυπλοκότερα και με πολλές ιδιαιτερότητες και ιδιομορφίες (λόγω συνδυασμού διαφορετικών πετρωμάτων με διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες), είναι χρήσιμη η περιγραφή ενός τέτοιου πρότυπου γεωθερμικού συστήματος. Η εστία του συγκεκριμένου συστήματος είναι μια *μαγματική διείσδυση* [magmatic intrusion] ή *μάγμα* [magma]. Ανάμεσα στην εστία και τον ταμιευτήρα μεσολαβεί *μη υδατοπερατό πέτρωμα* [Impermeable bedrock], κι έτσι η μεταφορά θερμότητας από την εστία προς τον ταμιευτήρα γίνεται μέσω αγωγής. Ανάμεσα στον ταμιευτήρα και στην επιφάνεια μεσολαβεί (στη μεγαλύτερη έκταση) *μη υδατοπερατό πέτρωμα*. Σε ορισμένα σημεία όμως ο ταμιευτήρας μπορεί να συνδέεται με την επιφάνεια με *υδατοπερατό πέτρωμα* [permeable rock] που επιτρέπει την κυκλοφορία του γεωθερμικού ρευστού. Για παράδειγμα, ψυχρό νερό μετεωρικής προέλευσης μπορεί να διεισδύει από την επιφάνεια και να φτάνει στον ταμιευτήρα. Εκεί θερμαίνεται, η πυκνότητά του μειώνεται και στη συνέχεια ανέρχεται προς την επιφάνεια (σε υγρή ή αέρια φάση). Εκεί μπορεί να εξέρχεται είτε με φυσικό τρόπο είτε μέσω γεωθερμικών διατρήσεων. Το θερμό ρευστό αναπληρώνεται από το ψυχρό ρευστό που διεισδύει συνεχώς από την επιφάνεια. Αυτή η αναπλήρωση και η τροφοδοσία του ταμιευτήρα με καινούριο γεωθερμικό ρευστό μπορεί να γίνεται με το φυσικό τρόπο που περιγράφηκε αλλά μπορεί να συνοδευτεί και να συμπληρωθεί και με τεχνική επανατροφοδοσία μέσω *γεωτρήσεων επαναεισαγωγής/επανέκχυσης* [injection wells] του γεωθερμικού ρευστού. Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται σήμερα σε πολλές γεωθερμικές εγκαταστάσεις σε όλο τον κόσμο. Σκοπός της είναι αφενός η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την ανεξέλεγκτη απόρριψη του γεωθερμικού ρευστού στο περιβάλλον¹⁴ και αφετέρου η ανανέωση και η συντήρηση των γεωθερμικών πεδίων. Η εμπειρία από το γεωθερμικό πεδίο Geisers Field της Καλιφόρνια είναι χαρακτηριστική. Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 η παραγωγή ενέργειας έπεσε δραστικά εξαιτίας της έλλειψης γεωθερμικών ρευστών στο πεδίο. Ταυτόχρονα διαπιστώθηκαν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο γύρω περιβάλλον λόγω της ανεξέλεγκτης εναπόθεσης των χρησιμοποιημένων γεωθερμικών ρευστών. Η εισαγωγή επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων στην θέση του χρη-

¹⁴ Τα γεωθερμικά ρευστά (ατμός ή ζεστό νερό), ιδιαίτερα όταν είναι σε υψηλές θερμοκρασίες, περιέχουν αέρια (όπως CO_2 , H_2S , NH_3 , CH_4 κ.λπ.), καθώς και διαλυμένες χημικές ενώσεις και στοιχεία (όπως NaCl , B , As , Hg κ.λπ.) που μπορούν να αποτελέσουν πηγές ρύπανσης αν διατεθούν ανεξέλεγκτα στο επιφανειακό περιβάλλον.

σιμοποιημένου θερμικού ρευστού επέτρεψε στο τέλος της δεκαετίας του 1990 την επαναλειτουργία αρκετών εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα οποία είχε διακοπεί η λειτουργία λόγω έλλειψης γεωθερμικών ρευστών¹⁵.



Σχήμα 8.3 Σχηματική αναπαράσταση ενός πρότυπου γεωθερμικού συστήματος.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

Στο υπόδειγμα του γεωθερμικού συστήματος που περιγράφηκε παραπάνω τα τρία βασικά του στοιχεία έχουν φυσική προέλευση. Υπάρχει όμως και η δυνατότητα τα δύο από τα τρία στοιχεία (δηλαδή το γεωθερμικό ρευστό και ο ταμιευτήρας) να είναι τεχνητά. Ήδη περιγράφηκε η περίπτωση του γεωθερμικού πεδίου Geisers Field στην Καλιφόρνια όπου χρησιμοποιείται τεχνητό γεωθερμικό ρευστό. Σήμερα αυτή η μέθοδος δεν περιορίζεται μόνο στο συγκεκριμένο γεωθερμικό πεδίο αλλά και σε άλλα πεδία ανά τον κόσμο. Όμως εκτός από το γεωθερμικό ρευστό, και ο ταμιευτήρας μπορεί να είναι τεχνητός (μόνο η εστία θερμότητας είναι οπωσδήποτε φυσικής προέλευσης). Κάτι τέτοιο ισχύει στα προγράμματα γεωθερμίας των αποκαλούμενων *Θερμών Ξηρών Βράχων* [Hot Dry Rocks, HDR]. Τέτοια προγράμματα έχουν αναπτυχθεί (ιδιαίτερα από τη δεκαετία του 1990) σε πολλές περιοχές του πλανήτη και το 2010 λειτουργούσαν κυρίως σε πειραματική κι όχι (ακόμα) σε εμπο-

¹⁵ Dickson et al, 2004, σελ. 15.

ρική βάση¹⁶. Το πιο πετυχημένο πρόγραμμα στην Ευρώπη είναι το λεγόμενο Soultz HDR Project που πραγματοποιείται στην περιοχή Soultz-sous-Forêts της Γαλλίας και ήδη έχει εγκατεστημένη γεωθερμική εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 1,5 MW¹⁷. Στην Αυστραλία επίσης αναπτύσσονται έντονα εγκαταστάσεις HDR, καθώς και το μεγαλύτερο πρόγραμμα στο Cooper Basin με σχεδιασμό παραγωγής αρχικά 50 MW έως το 2011 και 500 MW έως το 2015¹⁸.

Η τεχνολογία των HDR έχει ως κεντρική ιδέα την αξιοποίηση της τεράστιας θερμικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη σε συμπαγή πετρώματα που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη (μεταξύ 3-7 km)¹⁹. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τεχνητή εισαγωγή νερού υψηλής πίεσης σ' αυτό το πέτρωμα μέσω ειδικών γεωτρήσεων (γεώτρηση έκχυσης) που θα κυκλοφορήσει μέσα στο πέτρωμα (έτσι ώστε να απάγει τη θερμότητα) και στη συνέχεια μέσω δεύτερης γεώτρησης (γεώτρηση παραγωγής) την άντλησή του στην επιφάνεια. Το συμπαγές θερμό πέτρωμα λειτουργεί έτσι ως τεχνητός ταμιευτήρας, ενώ το νερό που εισάγεται και εξάγεται (μέσω των γεωτρήσεων) είναι το γεωθερμικό ρευστό. Το Σχήμα 8.4 δείχνει σε απλή μορφή ένα τέτοιο σύστημα μαζί με τις εγκαταστάσεις επιφάνειας.

Ο υπολογισμός της θερμότητας που μπορεί να μεταφερθεί από τους ταμιευτήρες προς την επιφάνεια είναι μια δύσκολη διαδικασία για όλα τα γεωθερμικά συστήματα, αλλά σε μια πρώτη απλουστευτική προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση αγωγής της θερμότητας:

$$Q = K \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta Z} \right) \quad (8.1)$$

όπου

Q = η ροή της πυκνότητας της θερμότητας που μεταφέρεται προς την επιφάνεια (αν θεωρηθεί ότι η μεταφορά της είναι μονοδιάστατη) σε W/m²

$\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta Z} \right)$ = η θερμοβαθμίδα των πετρωμάτων της περιοχής σε °C/m

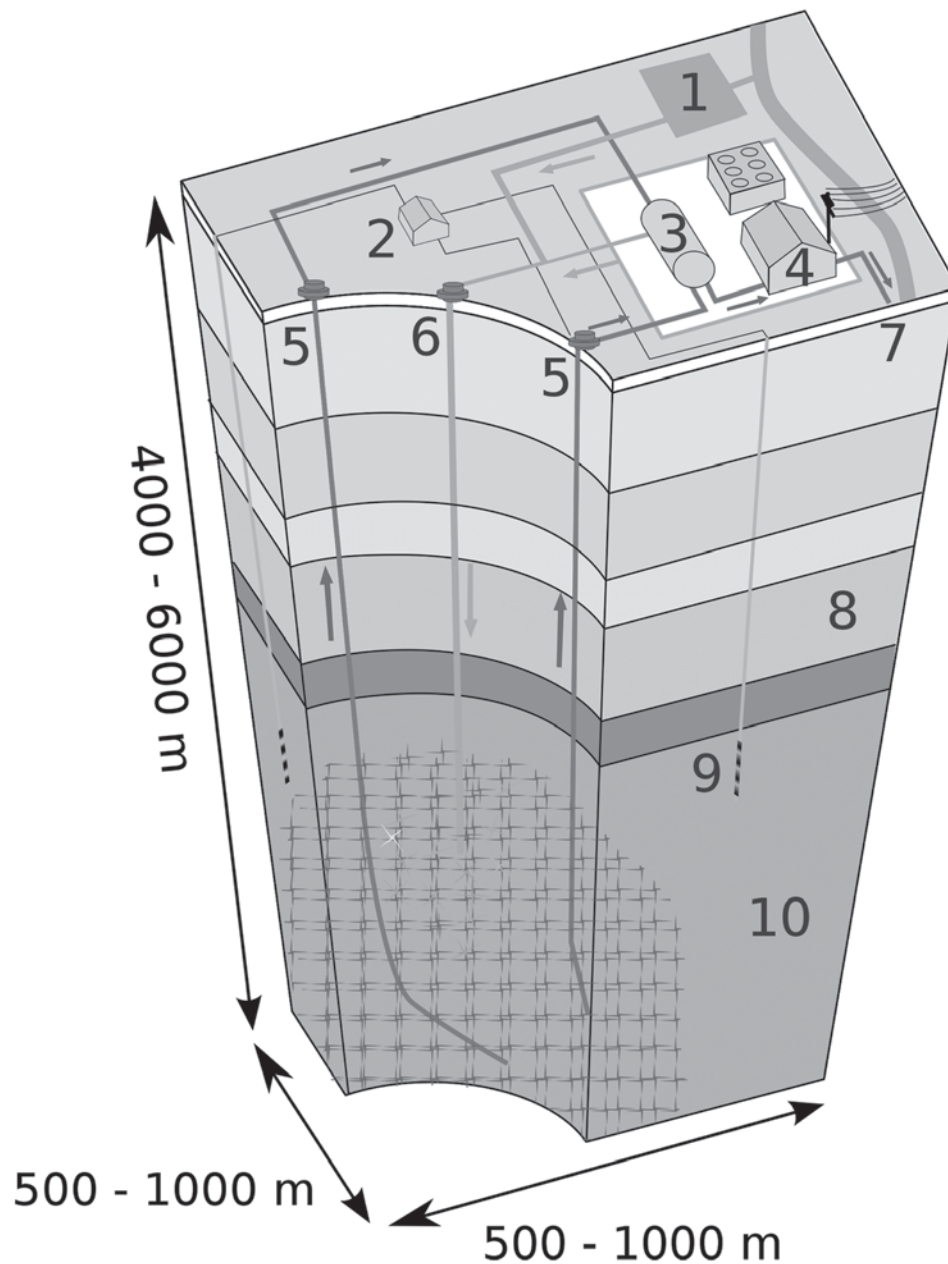
K = η θερμική αγωγιμότητα των πετρωμάτων της περιοχής σε W/m °C

¹⁶ Οι πρώτες δοκιμές τέτοιου προγράμματος έγιναν το 1970 στο Los Alamos (ΗΠΑ). Η εμπειρία που αποκτήθηκε ήταν σημαντική και αξιοποιήθηκε στη συνέχεια από μεταγενέστερα προγράμματα παγκοσμίως.

¹⁷ http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/hdr_pres_en.pdf (13/12/2011).

¹⁸ <http://www.miningaustralia.com.au/news/copper-basin-milestone> (14/12/2011).

¹⁹ Έχει υπολογιστεί ότι η ενέργεια που μπορεί να «απαχθεί» από ένα κυβικό χιλιόμετρο τέτοιου πετρώματος, εάν μειωθεί η θερμοκρασία του κατά 1°C, ισοδυναμεί με την ενέργεια που μπορεί να δώσουν 70.000 τ γαϊάνθρακα.



Σχήμα 8.4 Σχηματική αναπαράσταση μιας εγκατάστασης Θερμών Ξηρών Βράχων. [Hot Dry Rocks, HDR]. 1. Δεξαμενή νερού έκχυσης, 2. Μηχανοστάσιο αντλιών, 3. Εναλλάκτης, 4. Μηχανοστάσιο ηλεκτροστροβίλων, 5. Γεώτρηση παραγωγής, 6. Γεώτρηση έκχυσης, 7. Θερμό νερό προς την εγκατάσταση τηλεθέρμανσης, 8. Πορώδης (υδατοπερατός) βράχος (πέτρωμα), 9. Μη υδατοπερατός βράχος (πέτρωμα), 10. Κρυσταλλικός βράχος (πέτρωμα). (Πηγή: commons.wikimedia.org)

8.2.3 Ταξινόμηση γεωθερμικών πόρων

Η ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων [resources] μπορεί να γίνει με βάση τα διαφορετικά χαρακτηριστικά τους. Πριν γίνει όμως αναφορά στις διαφορετικές αυτές ταξινομήσεις, χρειάζεται να ξεκαθαριστούν ορισμένες βασικές έννοιες και όροι που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία. Το πρόβλημα είναι ότι χρειάζεται κάποιος να είναι προσεκτικός όταν προσφεύγει σε διαφορετικές πηγές της διεθνούς βιβλιογραφίας για το περιεχόμενο της ορολογίας που συναντά.

α) Ορολογία

Ο πιο γενικός όρος είναι αυτός που αναφέρεται στην έννοια *γεωθερμικός πόρος* [geothermal resource]. Συνήθως όταν στη βιβλιογραφία αναφέρεται αυτός ο όρος, ουσιαστικά εννοείται η *προσβάσιμη βασική πηγή* [accessible resource base]²⁰, δηλαδή αφορά στη συνολική θερμική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε μια συγκεκριμένη περιοχή μεταξύ του εδάφους και του γήινου φλοιού. Η προσβάσιμη βασική πηγή (ή ο προσβάσιμος γεωθερμικός πόρος) δεν είναι πάντα ταυτόσημη με την *ωφέλιμη προσβάσιμη πηγή* (ή *ωφέλιμο προσβάσιμο πόρο*) [useful accessible resource base], δηλαδή τη γεωθερμική ενέργεια που μπορεί να ανακτηθεί με νόμιμο και οικονομικά επωφελή τρόπο κάποια στιγμή στο κοντινό μέλλον (σε λιγότερο από 100 χρόνια). Ένα τμήμα των ωφέλιμων προσβάσιμων γεωθερμικών πόρων που έχουν ταυτοποιηθεί²¹ και μπορούν να αξιοποιηθούν με κόστος ανταγωνιστικό προς άλλες ενεργειακές πηγές ονομάζονται *αποθέματα* [reserves]²².

Ένας άλλος όρος που εμφανίζεται συχνά στη βιβλιογραφία είναι ο όρος *γεωθερμικό πεδίο* [geothermal field]. Χαρακτηρίζει ουσιαστικά μια περιοχή της Γης στην οποία υπάρχει επιφανειακή γεωθερμική δραστηριότητα. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει τέτοια επιφανειακή δραστηριότητα, τότε υποδηλώνει τη γεωγραφική περιοχή κάτω από την οποία υπάρχει κάποιος γεωθερμικός ταμιευτήρας.

β) Ταξινόμηση με βάση την ενθαλπία

Το πιο συνηθισμένο χαρακτηριστικό με βάση το οποίο γίνεται η ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων είναι η *ενθαλπία* των γεωθερμικών ρευστών. Θεωρώντας ότι

²⁰ Εδώ (όπως και σε μερικά άλλα σημεία) χρησιμοποιείται η ορολογία όπως εμφανίζεται στην ελληνική μετάφραση του άρθρου (Dickson et al, 2004) που έγινε από τον καθηγητή Μ. Φυτίκα και Μ. Παπαχρήστου (<http://www.certh.gr/A7B08497.el.aspx>) (8/2/2011).

²¹ Είτε με διάνοιξη γεωτρήσεων ή (και) με γεωφυσικές, γεωχημικές και γεωλογικές μεθόδους.

²² Μερικές φορές στη βιβλιογραφία αλλά κυρίως σε ευρύτερη συζήτηση συγχέονται οι έννοιες των resources και reserves. Όπως έγινε κατανοητό, υπάρχει πολύ σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο εννοιών.

η ενθαλπία είναι (γενικά) ανάλογη με τη θερμοκρασία των ρευστών, μπορεί να γίνει διαχωρισμός των γεωθερμικών πόρων ανάλογα με τη θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών τους σε πόρους υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας (ή θερμοκρασίας). Οι κλίμακες της θερμοκρασίας που δίνουν τον παραπάνω διαχωρισμό δεν είναι κοινώς αποδεκτές απ' όλη την επιστημονική κοινότητα, με αποτέλεσμα οι όροι υψηλή, μέση και χαμηλή ενθαλπία στη βιβλιογραφία να μην αντιστοιχούν στην ίδια κλίμακα θερμοκρασιών. Ο Πίνακας 8.4 δίνει την ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων με βάση την ενθαλπία (που μεταφράζεται σε θερμοκρασία) όπως τη δίνουν διαφορετικοί συγγραφείς στη βιβλιογραφία²³.

Πίνακας 8.4 Ταξινόμηση γεωθερμικών πόρων.

Πηγή: (α) Muffler and Cataldi (1978) (β) Benderitter and Cormy (1990) (γ) Benderitter and Cormy (1990) (δ) Nicholson (1993) (ε) Axelsson and Gunnlaugsson (2000)²⁴

	Θερμοκρασία (°C)	Θερμοκρασία (°C)	Θερμοκρασία (°C)	Θερμοκρασία (°C)	Θερμοκρασία (°C)
Πόροι χαμηλής ενθαλπίας	<90(α)	<125(β)	<100(γ)	≤150(δ)	≤190(ε)
Πόροι μεσαίας ενθαλπίας	90-150(α)	125-225(β)	100-200(γ)	- (δ)	- (ε)
Πόροι υψηλής ενθαλπίας	>150(α)	>225(β)	>200(γ)	>150(δ)	>190(ε)

Πέρα όμως από τις διαφοροποιήσεις στα συγκεκριμένα όρια θερμοκρασιών, το κοινό χαρακτηριστικό που βρίσκεται παντού στη βιβλιογραφία είναι ότι οι γεωθερμικοί πόροι χαμηλής ενθαλπίας χρησιμοποιούνται κυρίως σε θερμικές εφαρμογές, ενώ οι γεωθερμικοί πόροι υψηλής ενθαλπίας χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας²⁵. Το είδος της αξιοποίησης των γεωθερμικών πόρων μεσαίας ενθαλπίας (θερμική ή ηλεκτρική) εξαρτάται από το είδος της τεχνολογίας

²³ Dickson et al, 2004, σελ. 19.

²⁴ Όπως αναφέρονται στο παραπάνω άρθρο.

²⁵ Παρακάτω θα εξεταστούν αναλυτικά οι διαφοροποιήσεις στις εφαρμογές αξιοποίησης των γεωθερμικών πόρων.

που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς και από πάρα πολλούς άλλους οικονομοτεχνικούς παράγοντες.

γ) Ταξινόμηση με βάση τη φυσική φάση του γεωθερμικού ρευστού

Κάποιες φορές στη βιβλιογραφία γίνεται διαχωρισμός ανάμεσα σε γεωθερμικά συστήματα όπου η κυρίαρχη φάση του γεωθερμικού ρευστού/νερού (που ελέγχει και την πίεση του συστήματος) είναι η *υγρή* [*water-dominated systems*] και σε συστήματα όπου, ενώ συνυπάρχουν νερό (υγρή φάση) και ατμός (αέρια φάση), η κυρίαρχη φάση είναι ο *ατμός* [*vapour-dominated systems*]. Στα πρώτα οι θερμοκρασίες βρίσκονται μεταξύ 125 και 225°C και απαντώνται συχνότερα παγκοσμίως. Στα δεύτερα, που είναι και σπανιότερα, οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες (υψηλής ενθαλπίας) και χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πιο γνωστά τέτοια πεδία είναι το Geisers Field στην Καλιφόρνια και του Larderello στην Ιταλία.

δ) Ταξινόμηση με βάση την κατάσταση ισορροπίας στον ταμιευτήρα

Αυτή η κατηγοριοποίηση παίρνει υπόψη της την κυκλοφορία του γεωθερμικού ρευστού στον ταμιευτήρα, καθώς και το μηχανισμό μέσω του οποίου μεταφέρεται η θερμότητα. Στα λεγόμενα *δυναμικά συστήματα* [*dynamic systems*] το γεωθερμικό ρευστό κυκλοφορεί συνεχώς μέσα στον ταμιευτήρα, απάγει τη θερμότητα και τη μεταφέρει είτε απευθείας στην επιφάνεια είτε σε υδατοπερατά υπόγεια πετρώματα. Συνεπώς, η μεταφορά θερμότητας σ' αυτά τα συστήματα γίνεται κυρίως μέσω *συμμεταφοράς* [*convection*] δηλαδή μέσω της κυκλοφορίας της μάζας του γεωθερμικού ρευστού. Τα *δυναμικά συστήματα* μπορεί να είναι υψηλής ενθαλπίας (>150°C) είτε μεσαίας και χαμηλής (<150°C). Αντίθετα με τα *δυναμικά συστήματα* στα λεγόμενα *στατικά συστήματα* [*static systems*]²⁶ δεν υπάρχει σχεδόν καμιά κυκλοφορία του γεωθερμικού ρευστού από τον ταμιευτήρα προς υδατοπερατά πετρώματα ή έξοδος προς την επιφάνεια και έτσι η μεταφορά θερμότητας γίνεται μόνο μέσω *αγωγής* [*conduction*]. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν γεωθερμικά συστήματα χαμηλής ενθαλπίας ή τα λεγόμενα *γεωπεπιεσμένα συστήματα* [*geopressured systems*]²⁷.

²⁶ Στη βιβλιογραφία μπορούν να αναφέρονται και ως στάσιμα [*stagnant*] συστήματα ή συστήματα αποθήκευσης [*storage systems*].

²⁷ Τα γεωπεπιεσμένα συστήματα βρίσκονται κυρίως σε μεγάλες ιζηματογενείς λεκάνες (π.χ., Κόλπος Μεξικού-ΗΠΑ) σε βάθη 3-7 km. Οι ταμιευτήρες σ' αυτά τα συστήματα αποτελούνται από υδατοπερατά πετρώματα και περιέχουν ζεστό νερό υπό υψηλή πίεση το οποίο είναι παγιδευμένο εκεί από την περίοδο δημιουργίας των πετρωμάτων. Οι ταμιευτήρες περικλείονται από στεγανά πετρώματα χαμηλής αγωγιμότητας που πε-

8.2.4 Γεωθερμική έρευνα

Ο εντοπισμός ενός γεωθερμικού πεδίου, ο χαρακτηρισμός του και ο καθορισμός του (πιθανού) πλαισίου εκμετάλλευσής του είναι δύσκολη και πολύπλοκη διαδικασία που είναι παρόμοια μ' αυτή που ακολουθείται στη μεταλλευτική βιομηχανία και εμπεριέχει πάντα επιχειρηματικό κίνδυνο, ο οποίος θα πρέπει να εκτιμηθεί επακριβώς. Για να μειωθεί αυτός ο κίνδυνος σε αποδεκτά επίπεδα χρειάζεται να καταστρωθεί μια *γεωθερμική έρευνα* που έχει συγκεκριμένους στόχους και στάδια. Ο πρώτος στόχος είναι να προσδιοριστούν οι περιοχές στις οποίες υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να υπάρχουν γεωθερμικοί πόροι. Αυτό το στάδιο, το οποίο είναι σχετικά μικρού χρηματικού κόστους, περιλαμβάνει κυρίως τη χρησιμοποίηση υδρογεωλογικών και γεωχημικών μεθόδων. Στη συνέχεια (δεύτερο στάδιο) στις περισσότερες ελπιδοφόρες περιοχές γίνονται λεπτομερειακές *υδρογεωλογικές* και *γεωχημικές έρευνες*, αλλά κυρίως *γεωφυσικές έρευνες* που είναι και οι πιο περίπλοκες τεχνολογικά και για αυτό είναι και οι πιο δαπανηρές²⁸. Σκοπός είναι να προσδιοριστούν τα γενικά φυσικά χαρακτηριστικά του γεωθερμικού ταμιευτήρα, να προσδιοριστεί η πιθανότητα ύπαρξης γεωθερμικών ρευστών και να γίνει μια πρώτη εκτίμηση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων τους έτσι ώστε να κατασκευαστεί ένα αρχικό (όσο το δυνατόν ακριβέστερο) γεωθερμικό μοντέλο της περιοχής. Αυτά τα δύο πρώτα στάδια αποτελούν ουσιαστικά τη *φάση της προ-επένδυσης [preinvestment phase]* με την οποία θα γίνει και μια εκτίμηση κόστους της επένδυσης μέσω μιας αρχικής συνολικής οικονομοτεχνικής μελέτης. Αυτή η μελέτη θα προσδιορίσει ουσιαστικά αν η γεωθερμική έρευνα θα προχωρήσει και στο τρίτο και τελευταίο στάδιο, που είναι η *φάση της αρχικής επένδυσης ή η φάση της σκοπιμότητας [initial investment phase or feasibility phase]*. Σ' αυτή την τρίτη φάση περιλαμβάνονται οι γεωτρήσεις που πρέπει να γίνουν (το ελάχιστο 2-3 και το μέγιστο 6-7)²⁹ με σκοπό να επαληθευτούν *in situ* οι προβλέψεις της προηγούμενης φάσης και να προσδιοριστούν με ακρίβεια όλα τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου γεωθερμικού πόρου. Το κόστος αυτής της φάσης είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερο απ' αυτό της προηγούμενης αλλά

ριορίζουν την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας προς την επιφάνεια. Μέσα στους ταμιευτήρες, εκτός από νερό ή ατμό, μπορεί να είναι εγκλωβισμένες και ποσότητες CH₄. Τέτοιου είδους γεωθερμικά συστήματα έχουν ερευνηθεί εκτεταμένα αλλά μέχρι τώρα δεν έχουν αξιοποιηθεί σε εμπορική βάση.

²⁸ Αυτές περιλαμβάνουν μετρήσεις θερμοκρασίας, ηλεκτρικής αγωγιμότητας, πυκνότητας, μαγνητικής επιδεκτικότητας κ.λπ. και σκοπό έχουν να προσδιορίσουν τα χαρακτηριστικά του πιθανού γεωθερμικού ταμιευτήρα. Δεν μπορούν όμως να δώσουν πληροφορίες για την ύπαρξη γεωθερμικών ρευστών σε μεγάλα βάθη. Για αυτόν το σκοπό χρησιμοποιούνται εξειδικευμένες γεωηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές. Για περισσότερα βλ. Dickson et al, 2004, σελ. 23-24.

²⁹ Johansson et al, 1993, σελ. 556-557.

θεωρείται απαραίτητο για την ασφάλεια της επένδυσης. Επιπλέον σε περίπτωση υλοποίησης του έργου μέρος αυτού του κόστους θα απαλειφθεί, καθώς οι κατασκευασμένες γεωτρήσεις (οι περισσότερες στην καλύτερη περίπτωση) θα χρησιμοποιηθούν για την επαναισαγωγή του θερμικού ρευστού στον ταμιευτήρα.

8.2.5 Εντάσσεται η γεωθερμική ενέργεια στις ΑΠΕ;

Ολοκληρώνοντας το τμήμα του κεφαλαίου με τα βασικά στοιχεία της γεωθερμικής ενέργειας, χρειάζεται να διευκρινιστεί ένα ερώτημα που εμφανίζεται συχνά στη βιβλιογραφία: *ανήκει η γεωθερμική ενέργεια στις ΑΠΕ;*. Σύμφωνα με έναν γενικά αποδεκτό ορισμό ως ΑΠΕ ορίζεται η ενέργεια που αναπληρώνεται με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο καταναλώνεται (Sorensen, 2004, Boyle et al 2004). Συνεπώς, και για τη γεωθερμική ενέργεια το βασικό κριτήριο για να ενταχθεί στις ΑΠΕ είναι ο ρυθμός με τον οποίο αναπληρώνεται η ενέργεια του γεωθερμικού πόρου που αξιοποιείται (δηλαδή με ποιο ρυθμό γίνεται η επαναφόρτιση του ενεργειακού συστήματος)³⁰. Σήμερα υπάρχουν αμφιβολίες αν (τουλάχιστον σε ορισμένες περιπτώσεις) οι **γεωθερμικοί πόροι** [geothermal resources] είναι ανανεώσιμοι στην κλίμακα της ανθρώπινης ζωής³¹. Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία (π.χ., Boyle et al, 2004, σελ. 343 και 347), ο ρυθμός με τον οποίο εξάγεται η γεωθερμική ενέργεια (με τη μορφή θερμότητας) από κάποιους γεωθερμικούς πόρους είναι μεγαλύτερος από το *ρυθμό αναπλήρωσης* [thermal recharge] του γεωθερμικού δυναμικού των συγκεκριμένων πόρων από το εσωτερικό της Γης. Έτσι, αυτό που αξιοποιείται δεν είναι η *ενεργειακή ροή* [energy flow] του γεωθερμικού πόρου³² αλλά η *ενεργειακή δεξαμενή* που κάποια στιγμή θα υποβαθμιστεί ή θα στερέψει, αφού οι ρυθμοί εξαγωγής ενέργειας (θερμότητας) και αναπλήρωσής της είναι διαφορετικοί. Βέβαια, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και ιδιαίτερα της τεχνικής στις περιπτώσεις των λεγόμενων *θερμών ξηρών πετρωμάτων* [hot dry rocks] μπορεί να επιτευχθεί αναζωογόνηση των γεωθερμικών πόρων μετά από την 20-30χρονη εκμετάλλευσή τους με τη δημιουργία παράπλευρων γεωτρήσεων. Έτσι, ένας γεωθερμικός πόρος μπορεί (θεωρητικά) να μην εξαντλείται στη χρονική διάρκεια μιας ανθρώπινης ζωής όταν οι ρυθμοί εξαγωγής και αναπλήρωσης της ενέργειας είναι ισοδύναμοι (Boyle et al, 2004, σελ. 343-344).

³⁰ Προφανώς για άλλες μορφές ΑΠΕ, όπως αυτές που εκμεταλλεύονται τον Ήλιο ή τον αέρα, τέτοιο θέμα δεν υφίσταται.

³¹ Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι πηγές που είναι ανεξάντλητες [inexhaustible] σε χρονικούς όρους της ανθρώπινης ζωής (Kaltschmitt et al, 2007).

³² Όπως γίνεται με την ηλιακή ροή, τη ροή του ανέμου, του νερού κ.λπ. στις υπόλοιπες ΑΠΕ.

ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΟΤΗΤΑ [RENEWABILITY] VS ΑΕΙΦΟΡΙΑ [SUSTAINABILITY]

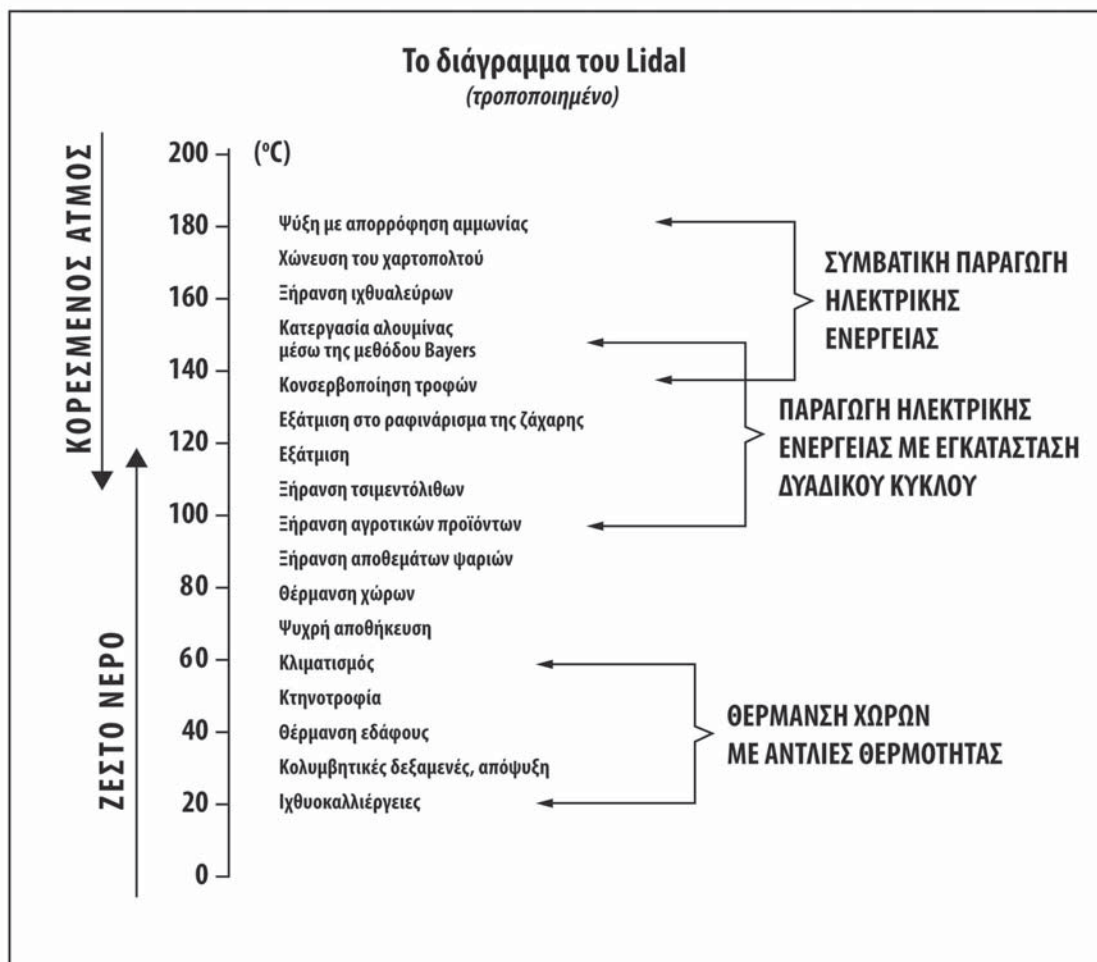
Συχνά επίσης στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η γεωθερμική ενέργεια αποτελεί *ανανεώσιμη [renewable]* και *αειφορική [sustainable]* μορφή ενέργειας. Οι δύο έννοιες δεν είναι ταυτόσημες και χρειάζεται να γίνεται διαχωρισμός ανάμεσά τους. Η έννοια *ανανεώσιμος* αναφέρεται σε μια *ιδιότητα* του ενεργειακού πόρου στον οποίο αναφερόμαστε (εδώ του γεωθερμικού), ενώ η έννοια *αειφορικός* περιγράφει τον *τρόπο* με τον οποίο αυτός ο πόρος αξιοποιείται-εκμεταλλεύεται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις ή γενικά. Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, για να μπορούν (τουλάχιστον ορισμένοι) γεωθερμικοί πόροι να ενταχθούν στις ΑΠΕ θα πρέπει η αξιοποίησή τους να γίνεται με τρόπο *αειφορικό*³³. Αυτό συνεπάγεται ότι οι ρυθμοί κατανάλωσης και επαναφόρτισης των γεωθερμικών πόρων πρέπει να είναι τέτοιοι που σε μια μακρά χρονική περίοδο (π.χ., 300 έτη) να εξασφαλίζεται η σταθερότητα στην παροχή ενέργειας και να υπάρχει η δυνατότητα τα εξαντλημένα γεωθερμικά πεδία να αντικαθίστανται από καινούρια³⁴.

³³ Ο όρος αειφορία χρησιμοποιείται από την Παγκόσμια Επιτροπή για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη [World Commission on Environment and Development] για να περιγράψει μια ανάπτυξη η οποία «...ανταποκρίνεται στις ανάγκες της σημερινής γενιάς, χωρίς όμως να θέτει σε κίνδυνο την κάλυψη των αναγκών των μελλοντικών γενεών».

³⁴ Σε κάθε περίπτωση η συζήτηση αυτή δεν μπορεί να εξαντληθεί στα περιορισμένα πλαίσια του συγκεκριμένου βιβλίου. Για περισσότερα στο συγκεκριμένο θέμα βλ. Wright, P.M., 1998. *The sustainability of production from geothermal resources*, Bull. Geo-Heat Center, 19, 2, 9-12.

8.3 Τεχνική περιγραφή

Η ενέργεια που περιέχουν οι γεωθερμικοί πόροι μπορεί να αξιοποιηθεί για μια σειρά από χρήσεις. Το κλασικό διάγραμμα του Lindal³⁵ (παρά την παλαιότητά του) δίνει μια συνολική εικόνα των εφαρμογών αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας ανάλογα με τη θερμοκρασία που έχει το γεωθερμικό ρευστό του ταμιευτήρα.



Σχήμα 8.5 Το διάγραμμα του Lindal για τις εφαρμογές αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας ανάλογα με τη θερμοκρασία που έχει το γεωθερμικό ρευστό του ταμιευτήρα.

(Πηγή: Fridleifsson I., *Direct use of geothermal energy around the world*, *GHC BULLETIN*, DECEMBER 1998)

³⁵ Lindal, B., 1973, *Industrial and other applications of geothermal energy*. In: Armstead, H.C.H., ed., *Geothermal Energy*, UNESCO, Paris, σελ. 135-148.

Όπως φαίνεται κι από το διάγραμμα, οι χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- α) την αξιοποίησή της για την παραγωγή *ηλεκτρικής ενέργειας* σε εργοστάσια ισχύος [power plants] και
- β) την άμεση αξιοποίησή της ως *θερμότητα* είτε για τη θέρμανση χώρων (οικιακών ή βιομηχανικών) είτε για την εκμετάλλευσή της σε γεωργικές και άλλες εφαρμογές.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το κύριο χαρακτηριστικό των γεωθερμικών πόρων που διακρίνει τις πιθανές εφαρμογές τους είναι η θερμοκρασία τους. Έτσι, *πόροι* [resources] υψηλής θερμοκρασίας (ενθαλπίας) ($> 150^{\circ}\text{C}$) είναι καταλληλότεροι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ οι μεσαίας και χαμηλής θερμοκρασίας πόροι ($< 150^{\circ}\text{C}$) συνιστώνται για θερμικές, κυρίως, εφαρμογές. Το εύρος των θερμοκρασιών είναι μεν ο καθοριστικός παράγοντας για το είδος της χρήσης, αλλά δεν είναι ο μοναδικός. Τοπικές ιδιομορφίες, οικονομοτεχνικοί και κοινωνικοί παράγοντες αλλά και το είδος της τεχνολογίας που θα επιλεγεί δίνουν τη δυνατότητα για διαφοροποίηση της επιλογής. Για παράδειγμα, σήμερα είναι δυνατόν με την *τεχνολογία του δυαδικού κύκλου* [binary cycle]³⁶ να αξιοποιηθούν θερμικοί πόροι μεσαίων θερμοκρασιών (ακόμα και 100°C) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας³⁷.

Υπάρχουν πολλοί *τύποι* γεωθερμικών εγκαταστάσεων ανάλογα με τη χρήση και την τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Σήμερα στην πλειοψηφία των εγκαταστάσεων χρησιμοποιείται το λεγόμενο *κλειστό κύκλωμα* [closed cycle] τόσο για περιβαλλοντικούς λόγους όσο και για τεχνοοικονομικούς. Σ' αυτό τον τύπο των εγκαταστάσεων υπάρχουν δύο βασικές γεωτρήσεις (πηγάδια) μέσα στα οποία κυκλοφορεί το γεωθερμικό ρευστό. Η μια γεώτρηση που ονομάζεται *γεώτρηση άντλησης ή παραγωγής* [production well] είναι εκείνη η οποία αντλεί το γεωθερμικό ρευστό από τον ταμιευτήρα και το οδηγεί στην επιφάνεια³⁸. Εκεί η θερμότητα που μεταφέρει το ρευστό «απάγεται» από εναλλάκτες θερμότητας ή χρησιμοποιείται απευθείας και στη συνέχεια μέσω μιας δεύτερης *γεώτρησης επανέκχυσης* [injection well] επανεισάγεται στο έδαφος και καταλήγει στον ταμιευτήρα³⁹. Εκεί επαναφορτίζεται

³⁶ Βλ. παρακάτω.

³⁷ Johansson et al, 1993, σελ. 567-568.

³⁸ Η διάμετρος της γεώτρησης στο βάθος του ταμιευτήρα είναι της τάξεως των 200-300 mm (Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 442).

³⁹ Η απόσταση που χωρίζει τις δύο γεωτρήσεις είναι συνήθως της τάξης του ενός (1) km, έτσι ώστε να υπάρχει μια απόσταση αρκετή για την επανακυκλοφορία του γεωθερμικού ρευστού μέσα στον ταμιευτήρα (Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 475).

(Πηγή: commons.wikimedia.org)

08_ANANEOSIMES PHGES ENERGEIAS.indd 329

8.3.1 Γεωθερμικές εγκαταστάσεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Οι τεχνολογίες και οι τύποι των εγκαταστάσεων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα γεωθερμικά πεδία εξαρτώνται αποφασιστικά από τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου γεωθερμικού πόρου. Πέρα από τη θερμοκρασία (το βασικότερο) και την πίεση του γεωθερμικού ρευστού στον ταμιευτήρα παίζουν ρόλο το είδος και το ποσοστό των διαλυμένων αλάτων, καθώς και τα άλλα αέρια που πιθανώς περιέχονται. Όλοι αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την απόδοση της σχεδιαζόμενης εγκατάστασης και συνεπώς καθορίζουν (μαζί με κοινωνικο-οικονομικούς παράγοντες) το είδος της τεχνολογίας που επιλέγεται. Το μέγεθος της ισχύος μιας τυπικής γεωθερμικής εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι 30-50 MW_e. Επειδή το αρχικό κόστος της επένδυσης είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με τα λειτουργικά έξοδα της εγκατάστασης κατά την περίοδο λειτουργίας της, δίνεται πολύ μεγάλο βάρος από τους κατασκευαστές στη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του εργοστασίου με στόχο τη συντομότερη αποπληρωμή.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν κάποιες μικρές διαφοροποιήσεις στην ταξινόμηση των εκατοντάδων εγκαταστάσεων που υπάρχουν παγκοσμίως⁴⁰. Στο παρόν βιβλίο θα ακολουθηθεί η ταξινόμηση που παρουσιάζεται στο [Boyle et al, 2004, σελ. 360-363]. Σύμφωνα μ' αυτήν μπορούν να διακριθούν τέσσερις βασικοί τύποι εγκαταστάσεων:

- εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ξηρού ατμού,
- εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τύπου μονής ατμοποίησης [single flash],
- εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δυαδικού κύκλου [binary cycle] και
- εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τύπου διπλής ατμοποίησης [double flash].

α) Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ξηρού ατμού [Dry steam power plant]

Σ' αυτές τις γεωθερμικές εγκαταστάσεις [*vapour-dominated systems*] η κυρίαρχη φάση του γεωθερμικού ρευστού είναι ο ατμός. Ο γεωθερμικός ταμιευτήρας προ-

⁴⁰ Βλ. για παράδειγμα Johansson et al, 1993, σελ. 559-569, Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 436-496, Dickson et al, 2004, σελ. 26-29, κ.λπ.

μηθεύει υπέρθερμο ατμό⁴¹ στους 180-225°C και σε πίεση 4-8 MPa. Φτάνοντας ο ατμός στην επιφάνεια εκτονώνεται κινώντας ατμοστρόβιλο και παράγοντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια. Σε περίπτωση που οι θερμοκρασίες του ατμού φτάνουν στους 300-350°C η απόδοση της εγκατάστασης σε ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται.

Η πιο απλή μορφή ατμοστροβίλου σ' αυτές τις εγκαταστάσεις είναι ο *ατμοστρόβιλος ατμοσφαιρικής εκτόνωσης [back-pressure unit]*. Στους στροβίλους αυτού του τύπου ο ατμός, αφού δώσει την ενέργειά του, διαφεύγει σε χαμηλή πίεση από την έξοδο του στροβίλου στην ατμόσφαιρα. Τέτοιοι ατμοστρόβιλοι είναι συνήθως μικρής ισχύος (2,5-5 MW_e) και χρησιμοποιούνται σε γεωθερμικές μονάδες που είναι πιλοτικές ή στη φάση δοκιμών των γεωτρήσεων κατά την περίοδο ανάπτυξης μεγαλύτερων γεωθερμικών πεδίων. Το πλεονέκτημά τους είναι η απλότητα και η αξιοπιστία τους, ενώ το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους είναι η χαμηλή απόδοσή τους.

Αποδοτικότεροι είναι οι *ατμοστρόβιλοι συμπίκνωσης [condensing units]* στους οποίους ο ατμός συμπυκνώνεται πριν την έξοδό του. Έτσι, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη πτώση της πίεσης του ατμού από την είσοδο προς την έξοδο του στροβίλου και αυξάνεται η απόδοση της εγκατάστασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τέτοιου είδους ατμοστρόβιλοι να χρειάζονται το μισό όγκο ατμού σε σχέση με αυτούς της ατμοσφαιρικής εκτόνωσης⁴². Όμως παρά την αυξημένη απόδοσή τους, αυτή δεν ξεπερνά το 20% για τις τυπικές τιμές θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού (180-225°C). Βέβαια, η τεχνολογική πρόοδος στο σχεδιασμό και στην κατασκευή των ατμοστροβίλων, καθώς κι οι υψηλότερες θερμοκρασίες ορισμένων γεωθερμικών πεδίων έχουν οδηγήσει σε υψηλότερες αποδόσεις σήμερα απ' ό,τι π.χ., στη δεκαετία του 1960. Στη δεκαετία του 2000 για κάθε παραγόμενη kWh ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιούνται μόνο 6,5 kg υπέρθερμου ατμού σε σχέση με τα 15 kg ανά kWh που χρειάζονταν στη δεκαετία του 1960⁴³.

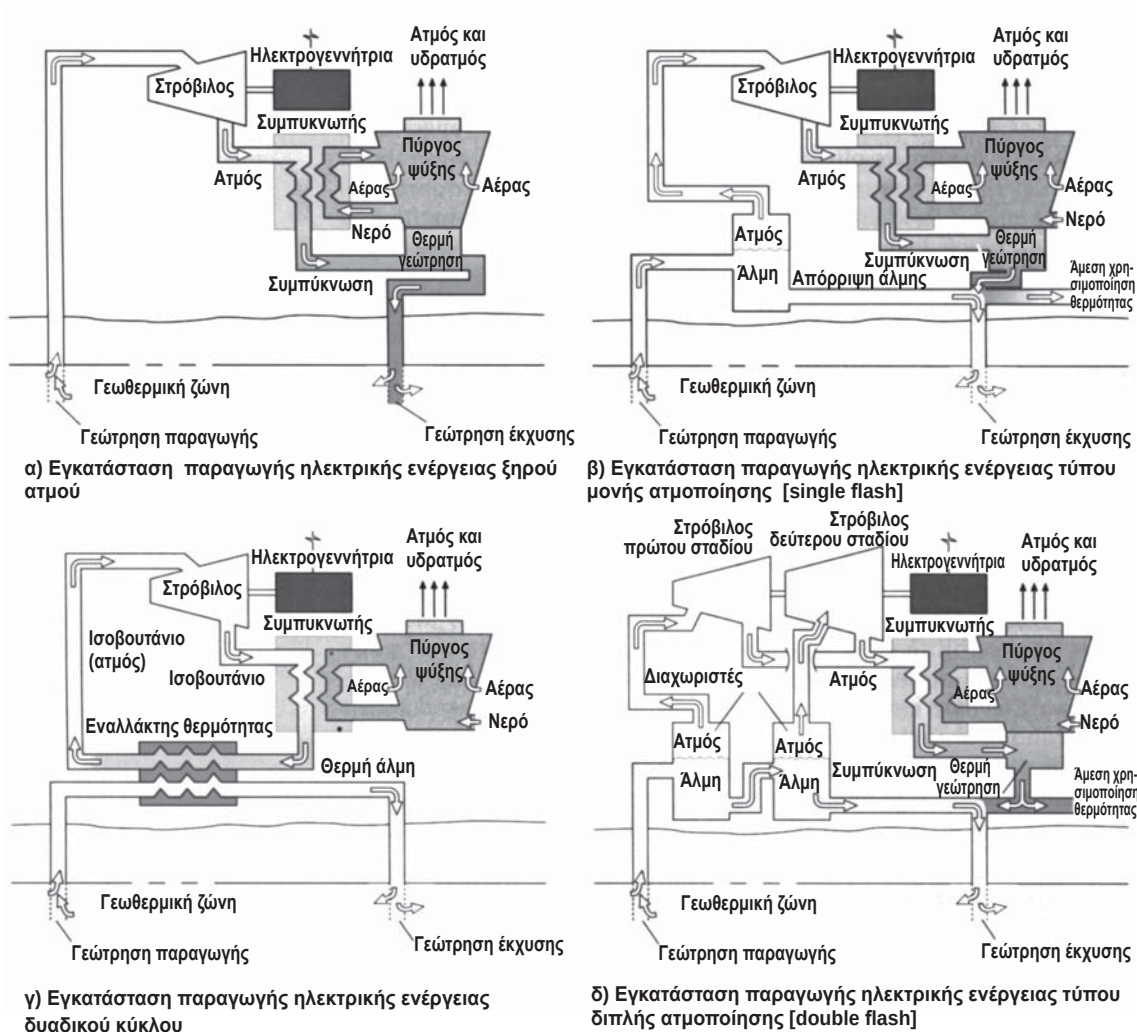
Η αποδοτικότητα αυτού του τύπου των γεωθερμικών εγκαταστάσεων (και συνεπώς και η κερδοφορία τους) εξαρτάται σημαντικά από την παρουσία στον ξηρό ή υπέρθερμο ατμό των λεγόμενων *μη συμπυκνούμενων αερίων [non-condensable gases]*, όπως είναι το CO₂ ή το H₂S. Κατά τη συμπύκνωση του ατμού στην έξοδο του ατμοστροβίλου (περίπου στους 100°C) τα αέρια αυτά παραμένουν στην αέρια φάση δημιουργώντας υψηλή παρασιτική πίεση. Εξαιτίας αυτού του λόγου πολλές μονά-

⁴¹ Ξηρός ατμός ονομάζεται ο ατμός που προκύπτει όταν όλη η υγρή φάση του νερού έχει «περάσει» στην αέρια φάση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία και πίεση (π.χ., στους 100°C με πίεση 1 Atm = 101.3 kPa). Αν η θέρμανση του ατμού συνεχιστεί διατηρώντας σταθερή την πίεση, τότε η θερμοκρασία του αυξάνεται και ο ατμός γίνεται υπέρθερμος στις δεδομένες συνθήκες.

⁴² Dickson et al, 2004, σελ. 27.

⁴³ Boyle et al, 2004, σελ. 361.

δες διαθέτουν συσκευές απομάκρυνσης αυτών των αερίων [gas ejectors]. Όμως κι αυτές οι συσκευές καταναλώνουν ενέργεια μειώνοντας την απόδοση της εγκατάστασης. Ταυτόχρονα για περιβαλλοντικούς λόγους στα περισσότερα μέρη που είναι εγκατεστημένες οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις δεν επιτρέπεται η απελευθέρωση αυτών των αερίων στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς, χρειάζεται να δεσμευτούν με χημικό τρόπο και να απομακρυνθούν ή να επανεκχυθούν στο γεωθερμικό ρευστό.



Σχήμα 8.7 Απλοποιημένα διαγράμματα ροής που δείχνουν τους τέσσερις βασικούς τύπους γεωθερμικών εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Α) Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ξηρού ατμού. Β) Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τύπου μονής ατμοποίησης [single flash]. Γ) Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δυαδικού κύκλου. Δ) Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τύπου διπλής ατμοποίησης [double flash]. (Πηγή: Oxford University Press)

Οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις ξηρού ατμού είναι οι απλούστερες και οι ελκυστικότερες εμπορικά. Εξαιτίας αυτού ήταν εκείνες που κυρίως αναπτύχθηκαν στα πρώτα αξιοποιήσιμα γεωθερμικά πεδία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε Ιταλία και ΗΠΑ. Στα περισσότερα γεωθερμικά πεδία η επανέκχυση του εξαντλημένου γεωθερμικού ρευστού στο γεωθερμικό ταμιευτήρα είναι σήμερα κοινή πρακτική. Αυτή η πρακτική δεν είχε υιοθετηθεί στο πεδίο Geisers Field στις ΗΠΑ, με αποτέλεσμα τη σοβαρή εξάντληση του γεωθερμικού πόρου. Σήμερα ακόμα και εκεί ακολουθείται η πρακτική της επανέκχυσης (βλ. σελ. 317-318 παρόντος βιβλίου).

β) Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τύπου μονής ατμοποίησης [single flash]

Σ' αυτού του τύπου τις εγκαταστάσεις το γεωθερμικό ρευστό που φτάνει στην επιφάνεια μπορεί να είναι είτε ατμός είτε θερμό νερό σε υψηλή πίεση ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής. Στην πρώτη περίπτωση χρειάζεται η εγκατάσταση διαχωριστή στην επιφάνεια, που απομακρύνει πιθανές ποσότητες νερού που εξάγονται μαζί με τον ατμό. Στη συνέχεια ο ατμός τροφοδοτεί ατμοστρόβιλο συμπίκνωσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε περίπτωση που το γεωθερμικό ρευστό που ανέρχεται στην επιφάνεια είναι θερμό νερό (θερμοκρασίας 155-165°C) σε υψηλή πίεση χρειάζεται μια βαθμίδα που θα κατεβάξει ελεγχόμενα την πίεση προκαλώντας έτσι τη μετατροπή (μέρους) του νερού σε ατμό (αυτό είναι το λεγόμενο flashing)⁴⁴ και στη συνέχεια θα διοχετεύει τον ατμό στον ατμοστρόβιλο συμπίκνωσης. Εξαιτίας της χαμηλότερης θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού (καθώς και του γεωθερμικού ρευστού-νερού που απομακρύνεται και δε χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας) αυτές οι εγκαταστάσεις καταναλώνουν περισσότερο γεωθερμικό ρευστό (συνεπώς, έχουν χαμηλότερη απόδοση) απ' ό,τι οι αντίστοιχες ξηρού ατμού για την παραγωγή κάθε ηλεκτρικής kWh. Συγκεκριμένα χρειάζονται περίπου 8 kg γεωθερμικού ρευστού για 1 kWh, ενώ του ξηρού ατμού το αντίστοιχο νούμερο είναι περίπου 6,5 kg. Το εξαντλημένο γεωθερμικό ρευστό συνήθως επανεκχύεται στο γεωθερμικό ταμιευτήρα.

⁴⁴ Σε ορισμένα γεωθερμικά πεδία η διαδικασία του λεγόμενου flashing αρχίζει κατά την άνοδο του γεωθερμικού ρευστού προς την επιφάνεια, καθώς οι πιέσεις γίνονται μικρότερες μέσα στη γεώτρηση παραγωγής. Αυτή η διαδικασία είναι γενικώς ανεπιθύμητη γιατί μπορεί να οδηγήσει σε μια μεγάλη εναπόθεση αλάτων στο γεωθερμικό ρευστό και στο γρήγορο φράξιμο της γεώτρησης. Για αυτόν το λόγο συνήθως το γεωθερμικό ρευστό με τη βοήθεια αντλιών διατηρείται σε υψηλή πίεση μέσα στη γεώτρηση.

γ) Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δυαδικού κύκλου [binary cycle]

Ο όρος δυαδικός κύκλος αναφέρεται στην παρουσία δύο ξεχωριστών κυκλωμάτων και συνεπώς δύο ξεχωριστών διαφορετικών ρευστών. Στο πρώτο κύκλωμα (κύκλο) κυκλοφορεί το γεωθερμικό ρευστό, ενώ στο δεύτερο κυκλοφορεί υγρό με χαμηλότερο σημείο βρασμού (όπως, π.χ., το πεντάνιο ή βουτάνιο). Η θερμότητα που μεταφέρει το γεωθερμικό ρευστό μεταφέρεται μέσω εναλλακτών στο δεύτερο ρευστό, το οποίο εξατμίζεται και κινεί τον ατμοστρόβιλο. Ο κύκλος λειτουργίας που ακολουθεί το δεύτερο (οργανικό) ρευστό μπορεί να είναι ένας κλασικός οργανικός κύκλος Rankine [Organic Rankine Cycle - ORC] ή η λεγόμενη διαδικασία Kalina [Kalina process] που χρησιμοποιεί ως ρευστό λειτουργίας μείγμα αμμωνίας και νερού⁴⁵.

Οι εγκαταστάσεις δυαδικού κύκλου χρησιμοποιούνται κυρίως όταν η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού είναι σχετικά χαμηλή (85-170°C) ή η πίεσή του είναι χαμηλή για την αποτελεσματική λειτουργία του ατμοστροβίλου. Επίσης συνιστώνται στις περιπτώσεις που το γεωθερμικό ρευστό έχει ανεπιθύμητες χημικές ιδιότητες (έχει πολλά διαλυμένα άλατα, περιέχει μεγάλες ποσότητες μη συμπεκνούμενων αερίων κ.λπ.).

Η απόδοση των εγκαταστάσεων δυαδικού κύκλου είναι γενικά μεγαλύτερη από απ' αυτήν του τύπου μονής ατμοποίησης σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ταυτόχρονα τέτοιες εγκαταστάσεις είναι πολύ ευέλικτες, καθώς μπορούν να κατασκευαστούν ως μικρές αρθρωτές μονάδες που η ισχύς τους κυμαίνεται από μερικά δεκάδες kW_e έως λίγα MW_e ή ακόμα και δεκάδες MW_e αν εγκατασταθούν σε συστοιχία. Το κόστος κάθε μονάδας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την ποιότητα του γεωθερμικού ρευστού, η οποία καθορίζει και το μέγεθος των ατμοστροβίλων, των εναλλακτών και των συστημάτων ψύξης.

Τα δύο βασικότερα *μειονεκτήματα* αυτών των μονάδων είναι καταρχάς ότι η ανάγκη για διατήρηση της πίεσης στο γεωθερμικό ρευστό αλλά και στο δεύτερο υγρό συνεπάγεται την κατανάλωση περίπου του 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία των μεγάλης ισχύος αντλιών που είναι αναγκαίες⁴⁶. Επίσης λόγω και των απωλειών θερμότητας στους εναλλάκτες χρειάζονται μεγάλες ποσότητες γεωθερμικού ρευστού.

⁴⁵ Περισσότερα για τους κύκλους του δεύτερου ρευστού βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 485-488.

⁴⁶ Boyle et al, 2004, σελ. 362.

δ) Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τύπου διπλής ατμοποίησης [double flash]

Αυτού του τύπου οι εγκαταστάσεις αναπτύχθηκαν στην προσπάθεια να αυξηθεί η απόδοση των αντίστοιχων εγκαταστάσεων μονής ατμοποίησης με την καλύτερη αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας που περιέχει το γεωθερμικό ρευστό. Το πρόβλημα που υπάρχει με τις εγκαταστάσεις μονής ατμοποίησης είναι ότι ένα ποσό της ενέργειας που περιέχεται στο γεωθερμικό ρευστό και εξάγεται σε υγρή φάση, αφού πρώτα μετατραπεί σε ατμό (με τη διαδικασία της ατμοποίησης [flashing]), παραμένει ανεκμετάλλευτο. Έτσι, στις εγκαταστάσεις διπλής ατμοποίησης το γεωθερμικό ρευστό, αφού υποστεί την πρώτη διαδικασία ατμοποίησης, οδηγείται σε μια δεύτερη χαμηλότερης πίεσης δεξαμενή, όπου με μια συμπληρωματική επέμβαση υποβιβασμού της πίεσης δημιουργεί ατμό (αυτό είναι η δεύτερη ατμοποίηση). Ο εξαγόμενος ατμός αναμειγνύεται με τα αέρια εξόδου του πρώτου ατμοστροβίλου προωθείται σε ένα δεύτερο ατμοστρόβιλο (ή επανέρχεται σε μια δεύτερη φάση λειτουργίας του αρχικού ατμοστροβίλου) αυξάνοντας (ιδανικά) περίπου 20% την ηλεκτρική ισχύ με μόνο 5% αύξηση του κόστους της εγκατάστασης⁴⁷. Συνεπώς, είναι φανερό ότι αυτές οι εγκαταστάσεις έχουν ένα μειωμένο κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής kWh. Για να το επιτύχουν όμως αυτό χρειάζεται το γεωθερμικό ρευστό να είναι ποιοτικά αναβαθμισμένο, δηλαδή να έχει χαμηλές περιεκτικότητες σε άλατα και σε μη συμπυκνούμενα αέρια.

8.3.2 Εγκαταστάσεις για την άμεση χρήση της γεωθερμίας

Οι άμεσες χρήσεις της θερμικής ενέργειας που περιέχουν τα γεωθερμικά ρευστά αποτελούν τις πιο παλιές και πολύπλευρες μορφές αξιοποίησης των γεωθερμικών πεδίων. Οι πιο συνηθισμένες άμεσες χρήσεις είναι η θέρμανση χώρων και η τηλεθέρμανση, η λουτροθεραπεία, οι αγροτικές εφαρμογές, οι υδατοκαλλιέργειες, οι βιομηχανικές χρήσεις και οι αντλίες θερμότητας (για τις οποίες θα γίνει αναφορά παρακάτω σε ξεχωριστό τμήμα). Τα γεωθερμικά πεδία που αξιοποιούνται για αυτές τις χρήσεις είναι κυρίως χαμηλής θερμοκρασίας (ενθαλπίας) και βρίσκονται σε πάρα πολλές χώρες παγκοσμίως⁴⁸.

⁴⁷ Boyle et al, 2004, σελ. 363.

⁴⁸ Περισσότερα για τις άμεσες χρήσεις μπορείτε να βρείτε στο Lund John, 2011, *Development of direct-use projects*, Proceedings, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 31 - February 2, καθώς και στο Dickson et al, 2004, σελ. 29-38.

α) Τηλεθέρμανση και θέρμανση χώρων

Η τηλεθέρμανση και η θέρμανση χώρων⁴⁹ εφαρμόζονται σε πολλές χώρες του κόσμου, όπως ΗΠΑ, Κίνα, Ιαπωνία, Γαλλία, Νέα Ζηλανδία, Ιταλία κ.λπ. Η χώρα όμως που έχει αξιοποιήσει περισσότερο τα πλούσια γεωθερμικά πεδία που διαθέτει για αυτές τις χρήσεις είναι η Ισλανδία. Μέσα από ένα εκτεταμένο δίκτυο εγκαταστάσεων, κυρίως τηλεθέρμανσης, το 87% των κατοικιών στην Ισλανδία καλύπτουν τις θερμικές ανάγκες τους από τη γεωθερμική ενέργεια⁵⁰. Η άμεση αξιοποίηση της γεωθερμίας για τη θέρμανση είναι πολύ αποδοτική, καθώς φτάνει σε ποσοστό απόδοσης περίπου 90%⁵¹. Σε μερικές περιπτώσεις (π.χ., Ισλανδία) όπου αυτό είναι δυνατόν λόγω των τοπικών συνθηκών, τα εξαντλημένα γεωθερμικά ρευστά που έχουν χρησιμοποιηθεί αρχικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παρέχουν το υπόλοιπο του θερμικού περιεχομένου τους για τη λειτουργία συστημάτων τηλεθέρμανσης.

β) Αγροτικές εφαρμογές

Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή της γεωθερμίας στον αγροτικό τομέα είναι η αξιοποίησή της για τη θέρμανση των θερμοκηπίων ιδιαίτερα σε χώρες με ψυχρό κλίμα. Η θέρμανση μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους, π.χ., με επιδαπέδια θέρμανση, με ανεμιστήρες [fan-coils] κ.λπ. Η θερμική ενέργεια του γεωθερμικού ρευστού μέσω εναλλακτών θερμότητας μεταφέρεται στην εγκατάσταση θέρμανσης των θερμοκηπίων. Τα οικονομικά οφέλη από την αξιοποίηση γεωθερμίας για τη θέρμανση των θερμοκηπίων μπορεί να είναι πολύ μεγάλα, καθώς είναι δυνατή η μείωση του λειτουργικού κόστους του θερμοκηπίου, που μπορεί να φτάσει το 35% του κόστους παραγωγής ανάλογα με το είδος των καλλιεργειών (άνθη, δενδρύλλια, λαχανικά κ.λπ.)⁵².

Άλλες αγροτικές εφαρμογές αποτελούν η άρδευση καλλιεργειών με χλιαρό νερό, η θέρμανση του εδάφους με υπεδάφειους σωλήνες, η θέρμανση αγρο-κτηνοτροφικών μονάδων, η ξήρανση αποβλήτων των κτηνοτροφικών μονάδων κ.λπ.

⁴⁹ Η διαφορά ανάμεσα στην τηλεθέρμανση και στα συστήματα θέρμανσης χώρων είναι η εξής: στην τηλεθέρμανση υπάρχει ένας κεντρικός σταθμός παραγωγής της θερμικής ενέργειας, που στη συνέχεια μέσω δικτύου διανομής μεταφέρεται στις ξεχωριστές κατοικίες ενός οικισμού για να καλύψει τις ανάγκες κάθε ξεχωριστής οικίας σε ζεστό νερό χρήσης και θέρμανσης χώρων. Τα συστήματα θέρμανσης χώρων είναι συστήματα που εγκαθίστανται σε κάθε ξεχωριστή οικία (δηλαδή για κάθε οικία υπάρχει μια ξεχωριστή γεώτρηση) για να καλύψουν τις ανάγκες θέρμανσης των χώρων του συγκεκριμένου οικήματος. Ιδιαίτερο ρόλο σ' αυτά τα συστήματα παίζουν οι αντλίες θερμότητας, στις οποίες θα γίνει ξεχωριστή αναφορά παρακάτω.

⁵⁰ Seifried et al, 2010, σελ. 122.

⁵¹ Ως απόδοση ορίζεται το κλάσμα μεταξύ της χρήσιμης θερμικής ενέργειας που αποδίδεται σε σχέση με τη θερμική ενέργεια που περιέχει το γεωθερμικό ρευστό όταν φτάνει σε συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης του περιβάλλοντος.

⁵² Dickson et al, 2004, σελ. 37.

γ) Υδατοκαλλιέργειες

Οι υδατοκαλλιέργειες συνίστανται στη δημιουργία των κατάλληλων συνθηκών στο νερό και ιδιαίτερα στη ρύθμιση της θερμοκρασίας του, έτσι ώστε να είναι δυνατή η αναπαραγωγή και η ανάπτυξη υδρόβιων οργανισμών. Τα κυριότερα είδη που εκτρέφονται στις υδατοκαλλιέργειες είναι σολομοί, λαβράκια, κέφαλοι, χέλια, γαρίδες, αστακοί, καραβίδες μύδια κ.λπ. Η θερμοκρασία του νερού ανάλογα με τα είδη που εκτρέφονται κυμαίνεται μεταξύ 13 και 30°C. Η ρύθμιση της θερμοκρασίας του νερού μπορεί να αυξήσει την παραγωγικότητα των υδατοκαλλιεργειών κατά 50% με 100%⁵³.

Μορφή υδατοκαλλιέργειας θεωρείται και η σπιρουλίνα [*Spirulina*]⁵⁴ η οποία καλλιεργείται σε αρκετές υποτροπικές και τροπικές χώρες σε λίμνες ή τεχνητές δεξαμενές μέσα σε ζεστό, αλκαλικό περιβάλλον πλούσιο σε CO₂. Η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται σε αρκετές χώρες άλλων κλιματικών ζωνών (π.χ., εύκρατου κλίματος) έτσι ώστε να τροφοδοτεί τις δεξαμενές καλλιέργειας της σπιρουλίνας δημιουργώντας την ιδανική θερμοκρασία για την ανάπτυξή της⁵⁵.

δ) Βιομηχανικές εφαρμογές

Οι βιομηχανικές εφαρμογές στις οποίες μπορεί να αξιοποιηθεί η γεωθερμική ενέργεια χρειάζονται στις περισσότερες περιπτώσεις υψηλότερης θερμοκρασίας γεωθερμικά ρευστά απ' ό,τι οι άλλες εφαρμογές άμεσης χρήσης (αγροτικές, υδατοκαλλιέργειες, θέρμανση χώρων και τηλεθέρμανση). Ορισμένα τέτοια υπαρκτά παραδείγματα με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες είναι τα παρακάτω: διαδικασίες έκπλυσης των μεταλλευμάτων για την εξαγωγή πολύτιμων μετάλλων (110°C), αφυδάτωση λαχανικών στις ΗΠΑ (130°C), αποξήρανση εδάφους [*diatomaceous earth drying*] στην Ισλανδία (180°C) και επεξεργασία χαρτοπολτού και χαρτιού στη Ν. Ζηλανδία 205°C)⁵⁶. Η ξήρανση και η αφυδάτωση μπορούν να θεωρηθούν οι κυριότερες βιομηχανικές διαδικασίες στις οποίες χρησιμοποιείται η γεωθερμική ενέργεια. Μια σειρά από φρούτα και λαχανικά (π.χ., φασόλια, σκόρδα, καρότα, μήλα, αχλάδια κ.λπ.) μπορούν να αποξηρανθούν και να αφυδατωθούν σε θερμοκρασίες που μπορεί να παράσχει η γεωθερμική ενέργεια.

⁵³ Lund, 2001, *World-wide direct uses of geothermal energy 2000*, Geothermics, Volume 30, Issue 1, February, σελ. 29-68.

⁵⁴ Η σπιρουλίνα είναι ένα μονοκυτταρικό, σπειροειδές, γαλαζοπράσινο φύκος, τόσο πλούσιο σε θρεπτικά χαρακτηριστικά που συχνά αποκαλείται «υπερτροφή».

⁵⁵ Dickson et al, 2004, σελ. 38. Μια τέτοια πετυχημένη εγκατάσταση υπάρχει και στο νομό Σερρών.

⁵⁶ Lund, 2001, *World-wide direct uses of geothermal energy 2000*, Geothermics, Volume 30, Issue 1, February, σελ. 29-68.

8.4 Αβαθής γεωθερμία – Αντλίες θερμότητας

Τα συστήματα που αξιοποιούν τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας [Ground Source Heat Pump – GSHP] αποτελούν ουσιαστικά ένα κεντρικό σύστημα θέρμανσης κατοικίας⁵⁷ (που μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και ως σύστημα δροσισμού-ψύξης των ιδίων χώρων). Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούν το έδαφος της Γης ως πηγή θερμότητας, όταν λειτουργούν ως θερμικές μηχανές κατά τη χειμερινή περίοδο, και ως δεξαμενή απόθεσης της θερμότητας όταν λειτουργούν ως ψυκτικές μηχανές κατά τη θερινή περίοδο.

Ο όρος γεωθερμικός στην ονομασία τους δημιουργεί αρκετές φορές σύγχυση σε σχέση με τον τρόπο λειτουργίας τους, που έχει ουσιαστικά μικρή έως ελάχιστη σχέση με τα γεωθερμικά συστήματα που εξετάστηκαν έως τώρα. Τα συστήματα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας στηρίζουν τη λειτουργία τους στο γεγονός ότι η θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος μεγαλύτερο από τα έξι μέτρα και μέχρι περίπου τα 100 m (που φτάνουν συνήθως οι γεωτρήσεις των αντλιών θερμότητας) είναι σταθερή (9-16°C) ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής) όλες τις εποχές του έτους.

Η ανάπτυξη των συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας είναι πολύ μεγάλη τα τελευταία χρόνια. Ο βασικότερος λόγος είναι η δυνατότητά τους να αξιοποιούν τη *θερμική πηγή χαμηλής θερμοκρασίας* που αποτελεί το έδαφος σε επιφανειακά μικρά βάθη. Η μεγαλύτερη ανάπτυξη έχει συντελεστεί στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη αλλά το ενδιαφέρον έχει μεγαλώσει και σε άλλες χώρες, όπως η Ιαπωνία, η Τουρκία κ.λπ. Εκτιμάται ότι περίπου 9.500 MW_{th} θερμικής ισχύος ήταν εγκατεστημένα παγκοσμίως (2003), τα οποία έδιναν ενέργεια της τάξεως των 52.000 TJ (14.000 GWh)⁵⁸. Ο αριθμός των εγκατεστημένων μονάδων το 2003 ήταν περίπου 800.00 (με μη πλήρη στοιχεία)⁵⁹ και η τάση ήταν συνεχώς ανοδική. Στην Ευρώπη (2010) η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ήταν 12.611 MW_{th} (1.014.436 εγκατεστημένες μονάδες) με τη μεγαλύτερη θερμική ισχύ να είναι εγκατεστημένη στη Σουηδία (4.005 MW_{th}), ακολουθούμενη από τη Γερμανία (2.570 MW_{th}) και τη Φινλανδία (1.113 MW_{th})⁶⁰.

⁵⁷ Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση νερού χρήσης.

⁵⁸ Τα στοιχεία βρίσκονται στο J. Lund, B. Sanner, L. Rybach, R. Curtis, G. Hellström, 2004, *Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview*, Geo-Heat Centre Quarterly Bulletin, Oregon,

⁵⁹ ο.π.

⁶⁰ http://www.eurobserv-er.org/pdf/heat_pump_2011.pdf (10/6/2011).

8.4.1 Κατηγοριοποίηση συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας

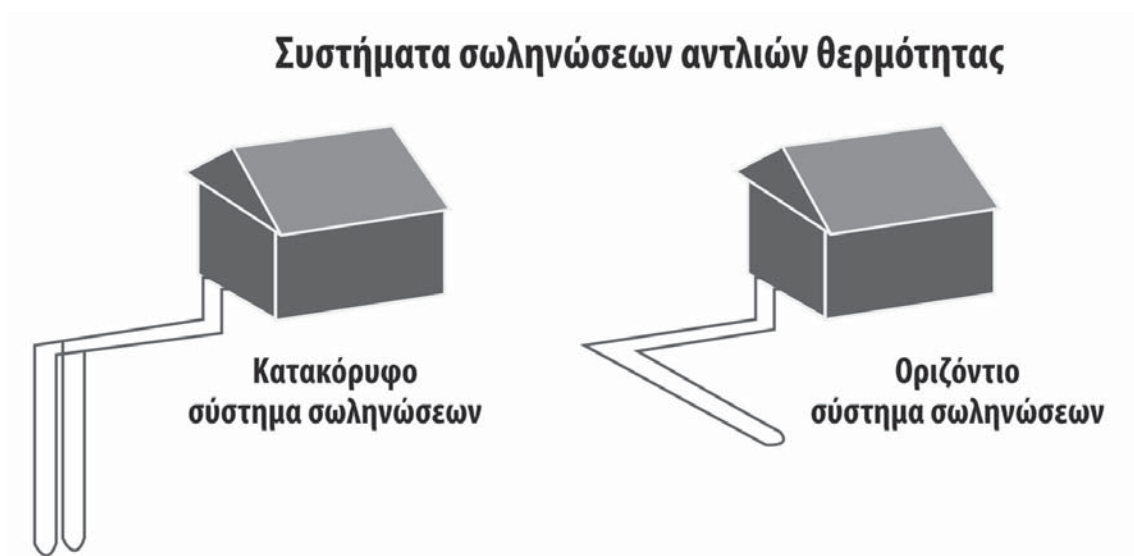
Όπως σε όλα τα εφαρμοσμένα συστήματα παραγωγής ενέργειας, και στα συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας μπορούν να γίνουν πολλοί διαχωρισμοί ανάλογα με το ποιο χαρακτηριστικό της κατασκευής ή της λειτουργίας τους λαμβάνεται υπόψη. Στο παρόν βιβλίο θα γίνει αναφορά σε δύο ειδών κατηγοριοποιήσεις. Ένας πρώτος διαχωρισμός των συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας αφορά το *βάθος* του υπεδάφιου συστήματός τους. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν εκείνα τα συστήματα στα οποία με μια γεώτρηση που μπορεί να φτάσει περίπου τα 100 m εξάγεται η θερμότητα του εδάφους η οποία σ' αυτό το βάθος προέρχεται από τη φυσική γεωθερμική βαθμίδα της Γης ($\sim 2,5-3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)⁶¹. Σ' αυτά τα συστήματα ένα **κατακόρυφο κλειστό κύκλωμα σωληνώσεων** [vertical closed loop] εγκαθίστανται μέσα στη γεώτρηση. Μέσα στις σωληνώσεις κυκλοφορεί υγρό (συνήθως μείγμα νερού με αντιψυκτικό), το οποίο απάγει τη θερμότητα με αγωγή (κι όχι με συμμεταφορά, όπως γίνεται στα κλασικά γεωθερμικά συστήματα) και τη μεταφέρει στην επιφάνεια. Μ' αυτή την τεχνική είναι δυνατόν να μεταφερθούν στην επιφάνεια μερικά κιλοβάτ θερμικής ισχύος (kW_{th}). Εκεί μέσω των αντλιών θερμότητας ανυψώνεται η θερμοκρασία της διαθέσιμης θερμικής ενέργειας για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση των χώρων ή (και) για θέρμανση νερού χρήσης.

Επίσης σε περιοχές που ο υδροφόρος ορίζοντας είναι σε μικρό σχετικά βάθος και το νερό έχει την κατάλληλη ποιότητα μπορεί να εγκατασταθεί σύστημα δύο γεωτρήσεων (παραγωγής και επανέκχυσης του νερού) σε μια απόσταση μεταξύ τους.

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα που αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια που διεισδύει λίγα μέτρα μέσα στο έδαφος (θερμαίνοντάς το) σε καθημερινή βάση και έχει (προφανώς) εποχική διακύμανση. Η θερμότητα συλλέγεται από **σύστημα οριζόντιου δικτύου σωληνώσεων** [horizontal closed loop] που είναι τοποθετημένο ακριβώς κάτω από το έδαφος και μέσα στο οποίο κυκλοφορεί ένα υγρό (μπορεί να είναι νερό ή κάποιο άλλο οργανικό αντιπαγωτικό μείγμα⁶²). Στη συνέχεια η θερμική ενέργεια μεταφέρεται στις αντλίες θερμότητας. Αυτά τα συστήματα είναι πολύ φτηνότερα από τα πρώτα, αλλά η απόδοσή τους εξαρτάται πολύ από την εποχιακή διακύμανση της ηλιακής θερμότητας.

⁶¹ Έτσι δικαιολογείται και ο όρος *αβαθής γεωθερμία* για τα συστήματα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας σε αντιδιαστολή με τα συστήματα βαθιάς γεωθερμίας που περιγράφηκαν στο αρχικό τμήμα του κεφαλαίου. Για μια πιο αναλυτική παρουσίαση και το ιστορικό υπόβαθρο αυτής της διάκρισης (αβαθούς και βαθιάς γεωθερμίας) βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 386-386.

⁶² Π.χ., μείγμα νερού με μονοπροπυλογλυκόλη ή (και) μονοαιθυλογλυκόλη.



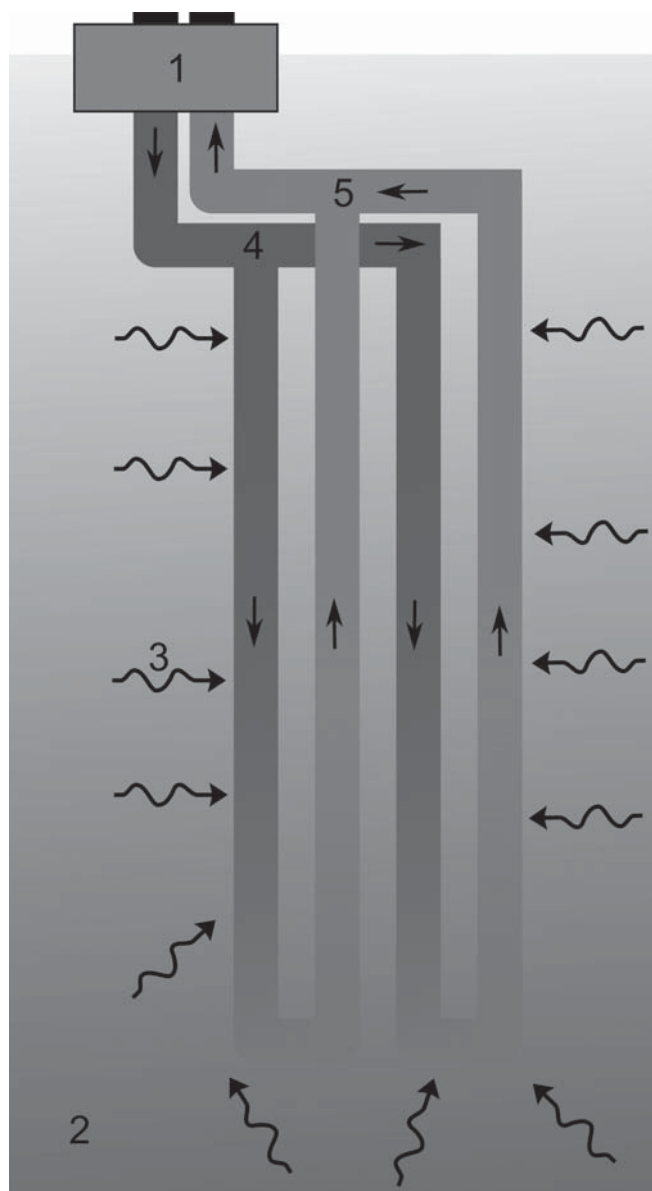
Σχήμα 8.8 Σχηματικό διάγραμμα κατακόρυφου και οριζόντιου κλειστού κυκλώματος σωληνώσεων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας.

Ένας άλλος διαχωρισμός που γίνεται στη βιβλιογραφία⁶³ κατατάσσει τα συστήματα γεωθερμικών αντλιών ανάλογα με το αν χρησιμοποιούν το γεωθερμικό ρευστό του εδάφους (που πρέπει να υπάρχει) ή ξεχωριστό τεχνητό μείγμα σε ανοικτό και κλειστό κύκλωμα αντίστοιχα. Σύμφωνα μ' αυτόν το διαχωρισμό τα συστήματα κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: σ' αυτά που ονομάζονται **ανοικτού κυκλώματος** [*groundwater open loop*] και σ' αυτά που ονομάζονται **κλειστού κυκλώματος** [*ground coupled-closed loop*].

Για την εγκατάσταση συστήματος ανοικτού κυκλώματος απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη ενός ρηχού υδροφορέα που θα παρέχει το απαραίτητο γεωθερμικό ρευστό. Με δύο γεωτρήσεις (παραγωγής και επανέκχυσης) το νερό από τον υδροφορέα ανέρχεται στον εναλλάκτη, που μεταφέρει τη θερμότητα στη γεωθερμική αντλία και στη συνέχεια διοχετεύεται ξανά στον υδροφορέα. Αντίθετα στα συστήματα κλειστού κυκλώματος δεν είναι απαραίτητες οι δύο γεωτρήσεις (ιδιαίτερα σε μερικές δεκάδες μέτρα βάθος), αλλά αρκεί μια (σχετικά ρηχή 50-100 m βάθος) γεώτρηση όταν το δίκτυο σωληνώσεων τοποθετείται κατακόρυφα ή δε χρειάζεται γεώτρηση όταν το δίκτυο σωληνώσεων τοποθετείται οριζόντια (σε βάθος 1-2 m). Στο κλειστό δίκτυο των σωληνώσεων κυκλοφορεί ένα μείγμα νερού

⁶³ J. Lund, B. Sanner, L. Rybach, R. Curtis, G. Hellström, 2004, *Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview*, Geo-Heat Centre Quarterly Bulletin, Oregon,

με αντιψυκτικό υγρό που απάγει τη θερμότητα και τη μεταφέρει στη γεωθερμική αντλία (μέσω εναλλάκτη).



Σχήμα 8.9 Σχηματικό διάγραμμα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας κατακόρυφου και κλειστού κυκλώματος σωληνώσεων. 1. Μηχανισμός αντλίας, 2. Έδαφος, 3. Μεταφορά θερμότητας από το έδαφος, 4. Σωλήνας μεταφοράς ψυχρού νερού, 5. Σωλήνας μεταφοράς θερμού νερού.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

8.4.2 Λειτουργία των συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας

Τα συστήματα που αξιοποιούν την αβαθή γεωθερμία αποτελούνται ουσιαστικά από δύο βασικά τμήματα. Το *υπεδάφιο τμήμα*, που συλλέγει τη θερμότητα από το έδαφος της Γης (είτε από γεωτρήσεις μικρού βάθους είτε απευθείας κάτω από το έδαφος) σε μια σχετικά χαμηλή θερμοκρασία (κατά κύριο λόγο κάτω από 20°C) και το *υπερδάφιο τμήμα*, που ανυψώνει τη θερμότητα σε μια θερμοκρασία (μεταξύ 20 και 30°C) που είναι απαραίτητη για την αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας στη θέρμανση των χώρων του οικήματος. Το πρώτο τμήμα είναι βασικά το δίκτυο των σωληνώσεων, ενώ το δεύτερο αποτελείται ουσιαστικά από μια αντλία θερμότητας.

Η αντλία θερμότητας είναι βασικά μια *θερμική μηχανή* που λαμβάνει θερμική ενέργεια σε μια συγκεκριμένη χαμηλή θερμοκρασία (ψυχρή πλευρά) και στη συνέχεια μέσω ενός θερμοδυναμικού κύκλου και με την προσθήκη εξωτερικού έργου, εξάγει τη θερμική ενέργεια σε υψηλότερη θερμοκρασία (θερμή πλευρά). Αυτή η θερμική ενέργεια που βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία μπορεί να διοχετευτεί για την κάλυψη των θερμικών αναγκών ενός οικήματος (θέρμανση χώρων-θέρμανση νερού χρήσης). Το πρόσθετο εξωτερικό έργο που λαμβάνει η αντλία θερμότητας είναι συνήθως σε μορφή ηλεκτρικής ενέργειας (μπορεί όμως να είναι και σε μορφή θερμότητας). Ένα κρίσιμο σημείο που πρέπει να τονιστεί είναι ότι οποιαδήποτε αντλία θερμότητας χρειάζεται *εξωτερικό έργο* για να λειτουργήσει.

Ανάλογα με το σχεδιασμό και τις φυσικές διαδικασίες τις οποίες αξιοποιούν, οι αντλίες θερμότητας μπορούν να διαχωριστούν σε *αντλίες θερμότητας συμπίεσης [compression heat pumps]* και *αντλίες θερμότητας ρόφησης [sorption heat pumps]*.

α) Αντλίες θερμότητας συμπίεσης

Σ' αυτές τις αντλίες θερμότητας ο θερμοδυναμικός κύκλος συντελείται σε κλειστό κύκλωμα και αποτελείται από τέσσερα στάδια: εξάτμιση, συμπίεση, συμπύκνωση και εκτόνωση. Το συνολικό σύστημα της αντλίας αποτελείται από τέσσερα μέρη: τον *εξατμιστή*, το *συμπιεστή*, το *συμπυκνωτή* και τη *βαλβίδα εκτόνωσης*.

Το ρευστό του θερμοδυναμικού κύκλου που κυκλοφορεί στην αντλία αρχικά εξατμίζεται στον εξατμιστή σε συνθήκες χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας λαμβάνοντας τη θερμότητα από το έδαφος. Συνήθως το κύκλωμα κυκλοφορίας του ρευστού που απάγει τη θερμότητα από το έδαφος (υπεδάφιο δίκτυο σωληνώσεων) είναι διαφορετικό απ' το κύκλωμα της αντλίας και η μεταφορά θερμότητας γίνε-

ται μέσω εναλλάκτη. Στη συνέχεια το ρευστό που τώρα έχει μετατραπεί σε αέριο συμπιέζεται στη μονάδα του συμπιεστή. Ο συμπιεστής λαμβάνει την απαραίτητη ενέργεια από εξωτερική πηγή συνήθως σε μορφή ηλεκτρικής ενέργειας (ή μηχανικής ενέργειας από μια μηχανή εσωτερικής καύσης). Στη διαδικασία της συμπίεσης η θερμοκρασία του αέριου ρευστού αυξάνεται σε επίπεδα μεγαλύτερα από την επιθυμητή θερμοκρασία που χρειάζεται να γίνει η μεταφορά θερμότητας στο οίκημα. Στην τελική φάση το αέριο σε συνθήκες υψηλής πίεσης υγροποιείται στο συμπυκνωτή (υγροποιητή) αποδίδοντας θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας στο οίκημα (μέσω του κατάλληλου δικτύου μεταφοράς της θερμότητας). Τέλος το ρευστό επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση μέσω της βαλβίδας εκτόνωσης. Κατά αυτό τον τρόπο ολοκληρώνεται η διαδικασία του θερμοδυναμικού κύκλου του ρευστού για να επαναληφθεί πάλι απ' την αρχή.

Β) Αντλίες θερμότητας ρόφησης

Σ' αυτές τις αντλίες θερμότητας το σύστημα αποτελείται από τον *εξατμιστή*, τον *απορροφητή*, τον *εκροφητή* και το *συμπυκνωτή*. Είναι απαραίτητες επίσης δύο βαλβίδες εκτόνωσης και μία αντλία διαλύτη. Στη θέση του μηχανικού συμπιεστή που υπάρχει στις αντλίες συμπίεσης ένας θερμικός συμπιεστής⁶⁴ υπάρχει στις αντλίες ρόφησης. Η απαραίτητη εξωτερική ενέργεια (έργο) για αυτόν το συμπιεστή είναι κυρίως θερμική και μπορεί να προέρχεται από καύση αερίου ή υγρού συμβατικού καυσίμου (πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.λπ.).

Το ρευστό που συμμετέχει στο θερμοδυναμικό κύκλο είναι μείγμα δύο υλικών (το οποίο ονομάζεται *ζευγάρι εργασίας* [working pair]). Το ένα συστατικό, που είναι το *υλικό εργασίας* [working medium], πρέπει να είναι υψηλά διαλυτό στο δεύτερο συστατικό, που είναι ο *διαλύτης* [solvent]. Συνηθισμένο τέτοιο ζευγάρι είναι νερό-βρωμίδιο του λιθίου (υλικό εργασίας) και αμμωνία-νερό (διαλύτης).

Η διαδικασία του θερμοδυναμικού κύκλου στα τμήματα του εξατμιστή, του συμπυκνωτή και της βαλβίδας εκτόνωσης είναι ταυτόσημη μ' αυτή που πραγματοποιείται στις αντλίες συμπίεσης. Εκείνο που διαφέρει είναι το στάδιο του συμπιεστή, που εδώ συντελείται από δύο αλληλοεπικαλυπτόμενα κυκλώματα (του απορροφητή και του εκροφητή) διαφορετικής πίεσης το καθένα. Στον *απορροφητή* [absorber] το αέριο μείγμα νερό-βρωμίδιο του λιθίου (υλικό εργασίας) και αμμωνία-νερό (διαλύτης) που έρχεται από τον εξατμιστή απορροφάται από το διαλύτη. Σ' αυτήν τη διαδικασία απελευθερώνεται θερμότητα. Στη συνέχεια το αραιωμένο διά-

⁶⁴ Αυτός ουσιαστικά είναι (όπως θα εξηγηθεί παρακάτω) μια βαθμίδα, που αποτελείται από τον απορροφητή, τον εκροφητή και την αντλία διαλύτη.

λυμα περνάει από τον *εκροφητή* [desorber] με τη βοήθεια της αντλίας διαλύτη (που αυξάνει την πίεση) και του προστίθεται θερμική ενέργεια. Αυτή η θερμική ενέργεια προέρχεται από μια εξωτερική πηγή που, όπως προαναφέρθηκε, μπορεί να προέρχεται από την καύση αερίου ή υγρού συμβατικού καυσίμου. Μετά τον εκροφητή το υλικό εργασίας καταλήγει στο συμπυκνωτή (υγροποιητή), όπου αποδίδει τη θερμότητά του. Με την ολοκλήρωση του κύκλου το υλικό εργασίας καταλήγει στον εξατμιστή για να επαναληφθεί ο κύκλος. Αντίθετα ο διαλύτης από τον εκροφητή καταλήγει στον απορροφητή έτσι ώστε να απορροφήσει το υλικό εργασίας όταν εκείνο καταλήξει εκεί μετά τον εξατμιστή.

Όπως έγινε φανερό από την παραπάνω περιγραφή, χρήσιμη θερμότητα παράγεται στις αντλίες θερμότητας ρόφησης σε δύο «θέσεις»: στη «θέση» του απορροφητή και στη «θέση» του συμπυκνωτή (με υψηλότερη θερμοκρασία απ' ό,τι στον απορροφητή). Όσον αφορά την εξωτερική ενέργεια (έργο) που χρειάζεται, η βαθμίδα του θερμικού συμπιεστή κατά κύριο λόγο είναι θερμική, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται η αντλία διαλύτη είναι συγκριτικά πολύ μικρή.

γ) Συντελεστές απόδοσης θερμικών αντλιών

Η απόδοση *e* [Coefficient of Performance – COP] μιας γεωθερμικής αντλίας που λαμβάνει το «εξωτερικό έργο-ενέργεια» από ηλεκτρική πηγή ορίζεται ως το πηλίκο της χρήσιμης θερμότητας που αποδίδει η αντλία στο στάδιο του συμπυκνωτή προς την «εξωτερική» ηλεκτρική ενέργεια που δίδεται στην αντλία στο στάδιο του συμπιεστή σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας και της «δεξαμενής» απόδοσης της θερμότητας:

$$e = \dot{Q}_{\text{cond}} / \dot{P}_{\text{drive}} = \frac{\dot{Q}_{\text{evap}} + \dot{P}_{\text{drive}}}{\dot{P}_{\text{drive}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{evap}}}{\dot{P}_{\text{drive}}} + 1$$

όπου

- e* : η απόδοση [efficiency] της γεωθερμικής αντλίας (Coefficient of Performance-COP)
- $\dot{Q}_{\text{cond}}$: ο ρυθμός με τον οποίο αποδίδεται η θερμότητα από την αντλία στο στάδιο του συμπυκνωτή
- $\dot{P}_{\text{drive}}$: ο ρυθμός με τον οποίο αποδίδεται η «εξωτερική» ηλεκτρική ενέργεια στην αντλία
- $\dot{Q}_{\text{evap}}$: ο ρυθμός με τον οποίο αποδίδεται θερμότητα από την πηγή θερμότητας στην αντλία στο στάδιο του εξατμιστή.

Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των θερμοκρασιών της πηγής θερμότητας (δηλαδή του εδάφους) και της δεξαμενής απόδοσης της θερμότητας (δηλαδή του δικτύου με το οποίο μεταφέρεται η θερμότητα στο οίκημα) έχει πολύ σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση της γεωθερμικής αντλίας. Για να πετύχει μεγάλη απόδοση μια γεωθερμική αντλία θερμότητας χρειάζεται να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας και όσο το δυνατόν μικρότερη η θερμοκρασία της δεξαμενής απόδοσης της θερμότητας.

Αν η απόδοση ϵ μιας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας είναι 3, τότε η χρήσιμη θερμότητα που αποδίδει η αντλία είναι τριπλάσια από την εξωτερική ηλεκτρική ενέργεια που της προσφέρεται. Όμως στην πραγματικότητα για να παραχθεί αυτή η εξωτερική ηλεκτρική ενέργεια στο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται τριπλάσια ενέργεια της πρωτογενούς πηγής (συμβατικό καύσιμο, π.χ., πετρέλαιο, αέριο, άνθρακας) που παράγει την ηλεκτρική ενέργεια. Συνεπώς, με μια απόδοση 3 το συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο της αντλίας θερμότητας (όσον αφορά το περιβάλλον) είναι ουδέτερο. Για να είναι συνολικά θετική (για το περιβάλλον) η ενεργειακή συνεισφορά των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας θα πρέπει η απόδοση να είναι 4 και παραπάνω⁶⁵.

Στη βιβλιογραφία, εκτός της απόδοσης [*Coefficient of Performance – COP*] μιας γεωθερμικής αντλίας, εμφανίζεται κι ένας άλλος αριθμός που ονομάζεται παράγοντας εποχικής απόδοσης [*Seasonal Performance Factor – SPF*]. Αυτός ορίζεται ως το πηλίκο της χρήσιμης θερμότητας που αποδίδει η αντλία στο στάδιο του συμπυκνωτή προς τη συνολική εξωτερική ενέργεια που δίδεται στην αντλία για μια ολόκληρη χρονική περίοδο (που μπορεί να είναι ολόκληρο το έτος ή η χρονική περίοδος λειτουργίας της αντλίας για μια θερμική περίοδο). Η βασική διαφορά του *SPF* από τον *COP* είναι ότι στον πρώτο στη συνολική εξωτερική ενέργεια που δίδεται στην αντλία εκτός της εξωτερικής ηλεκτρικής ενέργειας συνυπολογίζονται τόσο η ενέργεια που καταναλώνουν τα βοηθητικά συστήματα της αντλίας όσο και οι απώλειες που προκύπτουν από ασταθή λειτουργία του συνολικού συστήματος της γεωθερμικής αντλίας. Ενώ ο *COP* καθορίζεται από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας που καθορίζονται βασικά από τις δύο θερμοκρασίες (δηλαδή της πηγής θερμότητας και της «δεξαμενής» απόδοσης της θερμότητας), ο *SPF* υπολογίζεται από τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της αντλίας. Αυτός είναι και ο λόγος που ο *SPF* θεωρείται πιο αξιόπιστος δείκτης για την απόδοση μιας γεωθερμικής αντλίας από τον *COP*.

⁶⁵ Seifried et al, 2010, σελ. 130.

δ) Γεωθερμικές αντλίες για το δροσισμό-ψύξη χώρων

Ορισμένες γεωθερμικές αντλίες είναι σχεδιασμένες ώστε να μπορούν τους καλοκαιρινούς (κυρίως) μήνες να προσφέρουν δροσισμό στους χώρους του οικήματος στο οποίο είναι εγκατεστημένες. Καθώς η θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος ορισμένων μέτρων είναι σχεδόν σταθερή και αρκετά μικρότερη⁶⁶ από τη θερμοκρασία των χώρων του οικήματος, οι αντλίες μπορούν να λειτουργήσουν αντίστροφα απ' ό,τι λειτουργούν κατά τους χειμερινούς μήνες, δηλαδή να μεταφέρουν θερμότητα από το οίκημα προς το έδαφος. Η λειτουργία αυτή μπορεί να είναι πολύ αποδοτική, καθώς διευκολύνεται από τη φυσική ροή της θερμότητας που κατευθύνεται από τα σώματα με την υψηλότερη θερμοκρασία (χώροι οικήματος) προς τα σώματα με τη χαμηλότερη θερμοκρασία (έδαφος). Οι γεωθερμικές αντλίες ρόφησης μπορούν να λειτουργήσουν πολύ αποτελεσματικά και ως αντλίες δροσισμού-ψύξης.

⁶⁶ Ιδιαίτερα σε περιοχές με θερμό καλοκαίρι.