



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΕΡΓ. ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ & ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ

ΠΕΤΡΙΔΗΣ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2010



hollur í þolinmæði



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους τους ανθρώπους που με μύησαν στον θαυμαστό κόσμο της γεωλογίας. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή, κ. Βουδούρη Κωνσταντίνο, καθώς επίσης και όλους τους καθηγητές μου.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Φυτίκα Μιχάλη, τον κ. Curd Bems και όλους τους εργαζόμενους στην εταιρία Exorka GmbH για τη δυνατότητα που μου έδωσαν να γνωρίσω από κοντά τα μυστικά της γεωθερμικής ενέργειας, τις πολύτιμες εμπειρίες και πληροφορίες που μου προσέφεραν, το χρόνο που μου αφιέρωσαν και συνέβαλαν στο να φέρω εις πέρας τη παρούσα διπλωματική εργασία.

Ευχαριστώ θερμά όλα τα μέλη της οικογένειας μου για την αμέριστη συμπαράσταση, υπομονή, κατανόηση και αγάπη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια, καθώς η συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας σηματοδοτεί την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους φίλους και συμφοιτητές μου για την άμεση βοήθεια και ανιδιοτελή υποστήριξή τους καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου σε ακαδημαϊκά και όχι μόνο προβλήματα που είχα καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Για την συγγραφή αυτής της διπλωματικής εργασίας έχουν χρησιμοποιηθεί εκτός των άλλων και αποσπάσματα από βιβλιογραφία, η οποία αναφέρεται εκτενώς στο βιβλιογραφικό παράρτημα.



ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Βατ (Watt) ονομάζεται η μονάδα μέτρησης της ισχύος στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (S.I.) προς τιμή του Τζέιμς Βαττ (James Watt, 1736-1819) που ήταν ένας από τους μεγαλύτερους Βρετανούς μηχανικούς.

Το *Βατ* σημειώνεται διεθνώς με το σύμβολο **W**. Ισχύς ενός Βατ (1W) ισοδυναμεί με μεταφορά ενέργειας ενός τζάουλ (1J) σε χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου (1s).

$$1W = 1 \frac{J}{s}$$

Δηλαδή,

- 1 **κιλοβάτ (kW)** = 1000W και 1 **μεγαβάτ (MW)** = 1.000.000 W
- 1 **κιλοβάτ (kW)** = 1,36 ίπποι (**hp** - μετρικό ή **PS**).

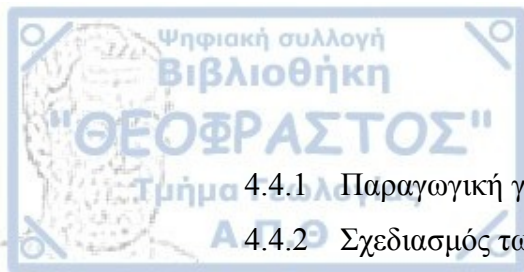
Ηλεκτρική και θερμική βατ

Στην ηλεκτρική βιομηχανία παραγωγής ισχύος, megawatt ηλεκτρική (MWe) είναι ένας όρος που αναφέρεται σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ megawatt θερμικής ή θερμική μεγαβάτ (MWt ή MWth) αναφέρεται σε θερμική ενέργεια που παράγεται.

Για παράδειγμα, δυαδικός κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (binary cycle) με απόδοση 13%, παράγει από 100 MWth γεωθερμικού ρευστού, 13 MWe καθαρή ηλεκτρική ενέργεια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1	Γενικά	7
1.2	Σύγχρονη ενεργειακή ιστορία	7
1.3	Το ενεργειακό μέλλον και η γεωθερμία	9
2.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	11
2.1	Βασικές αρχές της γεωθερμίας	11
2.2	Γεωθερμικές πηγές	12
2.2.1	Υδροθερμικές πηγές	12
2.2.2	Γεω-πεπιεσμένες πηγές	14
2.2.3	Θερμά ξηρά πετρώματα	15
2.2.4	Μάγμα	15
2.3	Γεωθερμικό δυναμικό	16
2.4	Χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας	17
2.4.1	Παραγωγή ηλεκτρισμού	18
2.4.2	Άμεση χρήση	19
3.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	21
3.1	Βασικές αρχές	21
3.2	Διαδικασία ξηρού (ή άμεσου) ατμού	22
3.3	Διαδικασία ατμού αστραπιαίας ατμοποίησης	23
3.4	Δυναμικός κύκλος	25
3.5	Συνδυασμένες ή υβριδικές εγκαταστάσεις	26
3.6	Απόδοση των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής	27
3.7	Γεωθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής για μικρά και μίνι δίκτυα	28
3.8	Διασυνδεδεμένοι γεωθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής	31
3.9	Άλλα πρόσφατα παραδείγματα εφαρμογών ανά χώρα	33
4.	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ	51
4.1	Αναγνώριση και διερεύνηση	52
4.2	Διερευνητική γεώτρηση	53
4.3	Μελέτη σκοπιμότητας	54
4.4	Ανάπτυξη	57



4.4.1	Παραγωγική γεώτρηση	57
4.4.2	Σχεδιασμός των σωληνώσεων, των συστημάτων συλλογής ατμού και του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής	58
4.4.3	Κατασκευή και εκκίνηση λειτουργίας	59
5.	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	60
5.1	Παγκόσμια κατανομή της γεωθερμικής ενέργειας	67
5.2	Ανταγωνιστικότητα της γεωθερμικής ενέργειας	71
5.3	Προβλήματα παραγωγής και ρύπανσης	71
5.3.1	Αποθέσεις μετάλλων	71
5.3.2	Υδρολογικές αλλαγές	72
5.3.3	Διάβρωση	72
5.3.4	Ρύπανση	72
5.3.5	Επανεγχυση	74
6.	ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	75
6.1	Προβλέψεις	75
	Appendix I, Φωτογραφικό λεύκωμα	77
	Βιβλιογραφία	90



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η ενέργεια είναι άμεσα συνδεδεμένη με κάθε πτυχή της ζωής του ανθρώπου. Είναι απαραίτητη για τη θέρμανση, το δροσισμό, το φωτισμό των χώρων διαβίωσης, καθώς επίσης και για το μαγείρεμα και την αποθήκευση της τροφής. Η ενέργεια τροφοδοτεί ακόμα, τα μέσα μετακίνησης, τις βιομηχανίες, τους χώρους εργασίας και γενικά όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Στη σημερινή εποχή, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας προέρχεται από την εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων, όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, τα οποία αποτελούν άφθονες, άμεσα διαθέσιμες και συνεπώς φθηνές ενεργειακές πηγές.

Η εκμετάλλευση όμως, ενεργειακών πηγών χαρακτηρίζει τους ανθρώπινους πολιτισμούς πολύ πριν τη βιομηχανική επανάσταση και την ανακάλυψη των ορυκτών καυσίμων. Για εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια, οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν τη φωτιά του ξύλου για θέρμανση, φωτισμό και μαγείρεμα της τροφής τους. Αργότερα, η φωτιά χρησιμοποιήθηκε για την εξόρυξη και κατεργασία μετάλλων, καθώς και για την κατασκευή πήλινων αγγείων και οικοδομικών υλικών. Άλλες ενεργειακές πηγές, όπως ο αέρας και το τρεχούμενο νερό των ποταμών, χρησιμοποιήθηκαν για τη ναυσιπλοΐα και την επεξεργασία των σιτηρών αντίστοιχα.

1.2 Σύγχρονη ενεργειακή ιστορία

Το τέλος του 19ου αιώνα και η αρχή του 20ου χαρακτηρίζονται από την ανάπτυξη του ηλεκτρισμού, της μηχανής εσωτερικής καύσης και τη χρήση του πετρελαίου. Τη περίοδο εκείνη ο άνθρωπος αξιοποιούσε την ενέργεια είτε άμεσα, με τη καύση πετρελαίου σε μηχανές, είτε έμμεσα, με την ηλεκτρική ενέργεια που παραγόταν από την καύση των ορυκτών καυσίμων. Στα μέσα του

20ου αιώνα αναπτύσσονται τα ηλεκτρικά δίκτυα, τα οποία καθιστούν εφικτή τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας ακόμα και σε απομακρυσμένες περιοχές.

Επίσης, με την ανακάλυψη των μεγάλων πετρελαϊκών πεδίων στη Μέση Ανατολή και τη Βόρειο Αφρική οι βιομηχανικές χώρες αρχίζουν να εξαρτώνται πλήρως από τη χρήση ορυκτών καυσίμων για τη κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. Μια νέα ενεργειακή πηγή, η πυρηνική, αναπτύσσεται μετά το 2^ο παγκόσμιο πόλεμο συμβάλλοντας στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τη περίοδο αυτή τα ορυκτά καύσιμα ήταν άφθονα και φθηνά, ενώ ο άνθρωπος αγνοούσε παντελώς τις επιπτώσεις που είχε η καύση τους στο περιβάλλον.

Από το τέλος της δεκαετίας του 1960 άρχισαν να αναγνωρίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της βιομηχανικής ανάπτυξης και ιδιαίτερα της καύσης των ορυκτών καυσίμων και ο άνθρωπος άρχισε να ευαισθητοποιείται στο θέμα της προστασίας του περιβάλλοντος. Η ευαισθητοποίηση αυτή σε συνδυασμό με τις ενεργειακές κρίσεις της δεκαετίας του 1970 οδήγησαν στην ανάπτυξη τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρισμού μέσω της εκμετάλλευσης ενεργειακά ανανεώσιμων πηγών. Η πτώση όμως των τιμών του πετρελαίου τη δεκαετία του 1980 και του μεγαλύτερου μέρους της δεκαετίας του 1990 λειτούργησε ανασταλτικά στην ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών, καθώς συνέχισε να προωθείται για οικονομικούς λόγους η εκμετάλλευση των συμβατικών πηγών ενέργειας.

Στη σημερινή εποχή, τα ορυκτά καύσιμα καλύπτουν περίπου το 81% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης. Μεταξύ αυτών το πετρέλαιο κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό (35%) και ακολουθεί ο άνθρακας (25%) με το φυσικό αέριο (21%). Το υπόλοιπο μερίδιο αντιστοιχεί στις ανανεώσιμες πηγές και τη πυρηνική ενέργεια με 13% και 6% αντίστοιχα.

Η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση εικοσαπλασιάστηκε από το 1850 μέχρι σήμερα, δεκαπλασιάστηκε από το 1900 και τετραπλασιάστηκε από το 1950. Να σημειώσουμε βέβαια, ότι το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης, κατά τη τελευταία εκατονταετία, έγινε στις

ανεπτυγμένες βιομηχανικά χώρες, οι οποίες αποτελούν το 20% του παγκόσμιου πληθυσμού. Η ενεργειακή ζήτηση συνεχίζει ακόμα να αυξάνεται με υψηλούς ρυθμούς, καθώς όλο και περισσότερες χώρες εισέρχονται σε αναπτυξιακή τροχιά, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα όλο και μεγαλύτερο τμήμα του πληθυσμού της γης να βελτιώνει το βιοτικό του επίπεδο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το γεγονός ότι το 2008, 1,5 δισεκατομμύριο άνθρωποι δεν είχαν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια, ενώ ο αντίστοιχος αριθμός για το 2030 υπολογίζεται σε 1,3 δισεκατομμύρια.

1.3 Το ενεργειακό μέλλον και η γεωθερμία

Έχοντας ως δεδομένο λοιπόν, τους υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης των χωρών και την ολοένα και αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση, ένα ενεργειακό μέλλον, το οποίο θα συνεχίσει να στηρίζεται στην εντατική εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων, θα παρουσιάσει μια σειρά από προκλήσεις και προβλήματα για την ανθρωπότητα. Τα κυριότερα από αυτά, τα οποία ήδη διαφαίνονται στον ορίζοντα, είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η ατμοσφαιρική ρύπανση, οι κίνδυνοι ασφαλείας, τα υψηλά κόστη, η μείωση των αποθεμάτων και η άνιση κατανομή των ορυκτών καυσίμων. Η λύση στα παραπάνω προβλήματα είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, η αποκέντρωση της παραγωγής και το σημαντικότερο, η εισαγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη με όσο το δυνατόν υψηλότερο ποσοστό. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούνται από την ηλιακή, την αιολική και την υδροδυναμική ενέργεια, τη βιομάζα και τη γεωθερμία.

Η αξιοποίηση της γεωθερμίας για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αντικείμενο με το οποίο θα ασχοληθούμε εκτενέστερα στο παρόν κείμενο, παρουσιάζει ορισμένες ενδιαφέρουσες ιδιαιτερότητες και πλεονεκτήματα. Αρχικά, να σημειώσουμε ότι ως γεωθερμική ενέργεια ορίζεται η ενέργεια, υπό μορφή θερμότητας, που περιέχεται στο εσωτερικό της γης και είναι υπεύθυνη για την γένεση 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. Με αυτή την έννοια λοιπόν, θα χρησιμοποιηθεί ο όρος αυτός από τώρα και στο εξής.

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1. Βασικές αρχές της γεωθερμίας

Γεωθερμική ισχύς είναι η θερμική (αρχικά) και η ηλεκτρική (σε δεύτερο στάδιο) ισχύς που παράγεται από την περιεχόμενη στη Γη θερμική ενέργεια (γεωθερμική ενέργεια). Η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας από θερμοδυναμικής πλευράς βασίζεται στη διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ μιας μάζας υπόγειου πετρώματος και νερού και μιας μάζας νερού ή αέρα στην επιφάνεια της γης. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας επιτρέπει την παραγωγή θερμικής ενέργειας που μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί άμεσα είτε να μετατραπεί σε μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια.

Γενικά, οι θερμοκρασίες στη Γη αυξάνονται αυξανόμενου του βάθους, σε 200-1000°C στη βάση του φλοιού και πιθανώς μέχρι 3500-4500°C στο κέντρο της. Η θερμότητα που παράγει γεωθερμικές βαθμίδες προέρχεται από δύο πηγές, τη ροή θερμότητας από τον κατώτερο φλοιό και το μανδύα, και τη θερμική ενέργεια που παράγεται στον άνω φλοιό από τη ραδιενεργό διάσπαση ισοτόπων του ουράνιου, θορίου και καλίου. Εντούτοις, μερικά γρανιτικά πετρώματα στον άνω φλοιό έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε ουράνιο και θόριο, παράγοντας έτσι αφύσικα μεγάλα ποσά θερμικής ενέργειας και αυξημένη ροή θερμότητας προς την επιφάνεια της γης.

Οι θερμικές βαθμίδες υπολογίζονται θεωρώντας ότι η θερμότητα κινείται προς την επιφάνεια της Γης μόνο με τη θερμική αγωγή μέσω στερεών πετρωμάτων. Εντούτοις, η θερμική ενέργεια μεταδίδεται επίσης προς την επιφάνεια με μετακίνηση τετηγμένων πετρωμάτων (μάγμα) και με την κυκλοφορία νερού μέσω επικοινωνούντων πόρων και ρωγμών. Αυτές οι διαδικασίες υπερθετώνται στις περιφερειακές βαθμίδες όπου επικρατεί η αγωγή και προκαλούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες κοντά στην επιφάνεια της Γης. Οι περιοχές που χαρακτηρίζονται από τέτοιες υψηλές θερμοκρασίες είναι οι βασικοί υποψήφιοι για γεωθερμική διερεύνηση και ανάπτυξη.

Η εμπορική διερεύνηση και ανάπτυξη της γεωθερμικής ενέργειας μέχρι σήμερα έχει εστιάσει σε φυσικούς γεωθερμικούς ταμιευτήρες - όγκους πετρωμάτων με υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 350°C), αλλά και με υψηλό πορώδες (διάκενο πόρων, συνήθως γεμάτοι με νερό) και υψηλή περατότητα (δυνατότητα μεταφοράς ρευστού). Η θερμική ενέργεια αντλείται με γεωτρήσεις στους ταμιευτήρες. Η θερμότητα του πετρώματος μεταφέρεται με αγωγή στο ρευστό, το οποίο στη συνέχεια ρέει προς το φρέαρ και έπειτα προς την επιφάνεια της Γης.

Εντούτοις, οι φυσικοί γεωθερμικοί ταμιευτήρες αποτελούν ένα μικρό μόνο μέρος των άνω 10 km του γήινου φλοιού. Το υπόλοιπο αφορά πετρώματα με σχετικά χαμηλή περατότητα, η θερμική ενέργεια των οποίων δεν μπορεί να αντληθεί χωρίς την τεχνητή θραύση τους με εκρηκτικές ύλες ή υδροβολή. Έχουν γίνει πειράματα που περιλαμβάνουν την τεχνητή θραύση θερμών πετρωμάτων και μπορεί κάποτε να αποδειχθεί οικονομικά εφικτή η εξαγωγή ενέργειας με την κυκλοφορία νερού μέσα από ένα δίκτυο τέτοιων τεχνητών καταγμάτων.

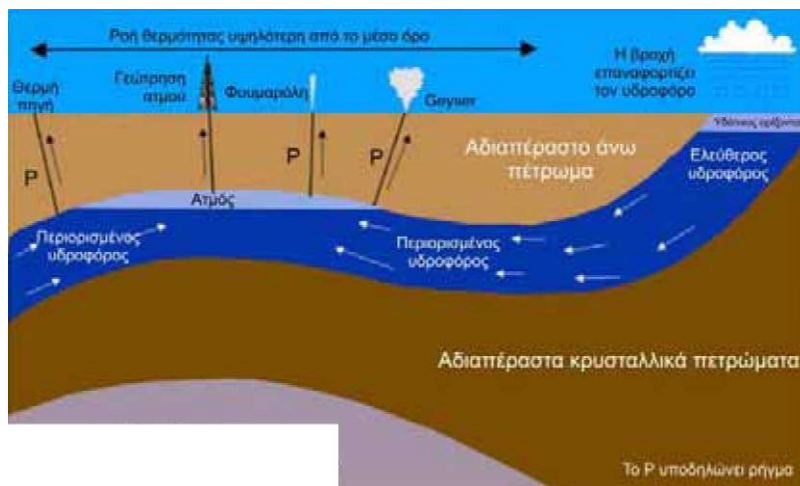
2.2. Γεωθερμικές πηγές

Υπάρχουν τέσσερις τύποι γεωθερμικών πηγών, πιο συγκεκριμένα οι υδροθερμικές, οι γεω-πεπιεσμένες, τα θερμά ξηρά πετρώματα και το μάγμα. Από αυτές μόνο οι υδροθερμικές πηγές αξιοποιούνται εμπορικά προς το παρόν.

2.2.1. Υδροθερμικές πηγές

Όλοι οι ταμιευτήρες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα για παραγωγή ηλεκτρισμού ονομάζονται υδροθερμικά συστήματα συναγωγής και τα χαρακτηρίζει η κυκλοφορία επιφανειακού νερού σε μικρά έως μέσα βάθη (100m έως 4,5km). Η κινητήρια δύναμη των συστημάτων αυτών είναι η βαρύτητα, δρούσα λόγω της διαφοράς πυκνότητας μεταξύ του κρύου νερού αναπλήρωσης που κινείται προς τα κάτω, και του ζεστού θερμικού νερού που κινείται προς τα πάνω. Τα υδροθερμικά συστήματα μπορεί να οδηγούνται είτε από ένα υποκείμενο νέο πυριγενές έγκλεισμα, είτε απλά από την κυκλοφορία του νερού σε βάθος μέσω ρωγμών και καταγμάτων.

Οι υδροθερμικές πηγές απαιτούν τρία βασικά συστατικά, ειδικότερα μια θερμική πηγή (π.χ. κρυσταλλωμένο μάγμα), έναν υδροφόρο ορίζοντα που περιέχει προσπελάσιμο νερό, και ένα στεγανό πέτρωμα που να σφραγίζει τον υδροφόρο ορίζοντα (σχήμα 1). Η γεωθερμική ενέργεια αντλείται με τη διάτρηση του υδροφόρου ορίζοντα και την εξαγωγή του θερμού νερού ή ατμού. Οι υψηλής θερμοκρασίας υδροθερμικές πηγές (με θερμοκρασίες από 180°C έως πάνω από 350°C) συνήθως θερμαίνονται από θερμό τηγμένο πέτρωμα, ενώ οι χαμηλής θερμοκρασίας πηγές (από 100 έως 180°C) μπορούν να δημιουργηθούν με οποιαδήποτε διαδικασία.



Σχήμα 1. Αναπαράσταση των κύριων χαρακτηριστικών μιας γεωθερμικής περιοχής

[Πηγή: Boyle, 1998]

Ανάλογα με τη φυσική κατάσταση του ρευστού των πόρων, δύο είδη υδροθερμικών συστημάτων συναγωγής μπορούν να διακριθούν, συγκεκριμένα τα:

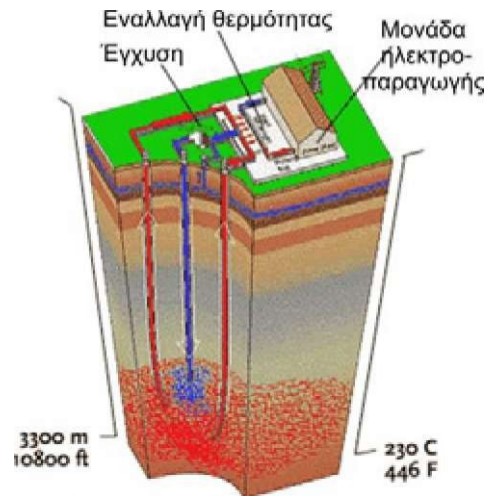
- α) υπερίσχυσης υγρού, στα οποία όλοι οι πόροι και οι ρωγμές γεμίζουν με υγρό νερό που βρίσκεται σε θερμοκρασίες αρκετά υψηλότερες από αυτή του βρασμού υπό ατμοσφαιρική πίεση, εξαιτίας της πίεσης του υπερκείμενου νερού, και
- β) υπερίσχυσης ατμού, όπου οι μεγαλύτεροι πόροι και ρωγμές είναι πλήρεις ατμού. Οι ταμειυτήρες υπερίσχυσης υγρού παράγουν είτε νερό είτε μίγμα νερού

και ατμού, ενώ οι ταμιευτήρες υπερίσχυσης ατμού παράγουν μόνο ατμό, ως επί το πλείστον υπέρθερμο. Οι φυσικοί γεωθερμικοί ταμιευτήρες εμφανίζονται και ως περιφερειακοί υδροφόροι ορίζοντες, όπως ο ασβεστόλιθος Dogger της λεκάνης του Παρισιού στη Γαλλία και οι ψαμμίτες της οροσειράς Pannonian της κεντρικής Ουγγαρίας.

2.2.2 Γεωπεπιεσμένες πηγές

Σε μερικές ταχέως καθιζάνουσες νέες ιζηματογενείς λεκάνες, όπως η βόρεια λεκάνη του Κόλπου του Μεξικού, οι πορώδεις ψαμμίτες των ταμιευτήρων διαιρούνται από επεκτάσεις ρηγμάτων σε μεμονωμένους ταμιευτήρες σε βάθος περίπου 3-6 km, όπου μπορεί η πίεση του ρευστού να υπερβαίνει αυτήν της στήλης ύδατος, πλησιάζοντας αυτήν του υπερκείμενου πετρώματος. Ο στεγανός σχιστόλιθος που περιβάλλει τον διαιρεμένο ψαμμίτη εμποδίζει τη διαφυγή του νερού των πόρων και η θερμοκρασία του κυμαίνεται μεταξύ 90 και 200°C. Στους πεπιεσμένους ταμιευτήρες η ενέργεια δεν είναι μόνο θερμική, αλλά περιλαμβάνει ένα ίσο ποσό ενέργειας λόγω του διαλυμένου στο νερό μεθανίου (χημική ενέργεια), συν ένα μικρό ποσό μηχανικής/υδραυλικής ενέργειας λόγω των υψηλών πιέσεων των ρευστών.

2.2.3 Θερμά ξηρά πετρώματα



Σχήμα 2. Η τεχνολογία των θερμών ξηρών πετρωμάτων

Τα θερμά ξηρά πετρώματα (HDR) είναι ένας θερμαινόμενος γεωλογικός σχηματισμός που δημιουργείται με τον ίδιο τρόπο όπως οι υδροθερμικές πηγές, αλλά δεν περιέχει νερό αφού δεν υπάρχουν οι υδροφόροι ορίζοντες ή οι ρωγμές που απαιτούνται για να οδηγήσουν το νερό στην επιφάνεια (σχήμα 2). Το νερό αντλείται προς τα κάτω με μια γεώτρηση για να προκληθεί υδραυλική ρωγμή και να σχηματισθεί ταμιευτήρας. Έπειτα, το νερό κυκλοφορεί υπό πίεση μέσα στις ρωγμές απορροφώντας θερμότητα, πριν επανέλθει στην επιφάνεια μέσω ενός ή περισσότερων φρεατίων παραγωγής. Η πηγή αυτή είναι πρακτικά απεριόριστη και πιο προσιτή από τις υδροθερμικές πηγές.

2.2.4. Μάγμα

Το μάγμα, η μεγαλύτερη γεωθερμική πηγή, είναι τηγμένο πέτρωμα που βρίσκεται σε βάθη 3 - 10km και παραπάνω, και άρα δεν είναι προσπελάσιμο. Η θερμοκρασία του κυμαίνεται από 700 έως 1200 °C. Η πηγή αυτή δεν έχει ερευνηθεί καλά μέχρι σήμερα.

2.3. Γεωθερμικό δυναμικό

Η γεωθερμική ενέργεια, υπό την ευρύτερη έννοια, είναι η φυσική θερμότητα της γης. Η θεωρητικά κατάλληλη για άμεση εφαρμογή ανακτήσιμη θερμική ενέργεια εκτιμάται σε $2,9 \times 10^{24}$ Joule, δηλαδή 10000 φορές περίπου την υφιστάμενη ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας παγκοσμίως. Πάντως, το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας αυτής βρίσκεται πολύ πιο κάτω από το βάθος των γεωτρήσεων, ακόμη και με τις πιο αισιόδοξες προβλέψεις τεχνολογικής ανάπτυξης. Η γεωθερμική ενέργεια έχει προς το παρόν ιδιαίτερο οικονομικό δυναμικό μόνο σε περιοχές όπου συγκεντρώνεται θερμό νερό ή ατμός σε βάθη μικρότερα των 3 km σε περιορισμένους όγκους, κατ' αναλογία με το πετρέλαιο στους εμπορικούς ταμιευτήρες πετρελαίου.

Η τεχνολογία των γεωτρήσεων για τα γεωθερμικά ρευστά είναι παρόμοια με αυτή του πετρελαίου. Εντούτοις, καθώς το ενεργειακό περιεχόμενο ενός βαρελιού πετρελαίου είναι πολύ μεγαλύτερο από μία ισοδύναμη ποσότητα θερμού νερού, οι οικονομικές απαιτήσεις για διαπερατότητα των διατάξεων και παραγωγικότητα των γεωθερμικών γεωτρήσεων είναι πολύ υψηλότερες απ' ό,τι για τις πετρελαιοπηγές. Τα γεωθερμικά φρέατα παραγωγής προς το παρόν έχουν βάθη συνήθως 2km, και σπάνια πάνω από 3km. Εκμεταλλεύσιμα γεωθερμικά συστήματα υφίστανται σε διάφορα γεωλογικά περιβάλλοντα.

Τα υψηλής θερμοκρασίας πεδία που χρησιμοποιούνται για συμβατική παραγωγή ισχύος (με θερμοκρασία πάνω από 150 °C) κατά ένα μεγάλο μέρος περιορίζονται σε περιοχές με νέα ηφαιστειακή, σεισμική και μαγματική δραστηριότητα. Από την άλλη, χαμηλής θερμοκρασίας πηγές βρίσκονται στις περισσότερες χώρες, διαμορφούμενες από τη βαθιά κυκλοφορία του επιφανειακού νερού κατά μήκος των ρηγμάτων και των ρωγμών, και από νερό που βρίσκεται σε πετρώματα υψηλού πορώδους, όπως είναι ο ψαμμίτης και ο ασβεστόλιθος, σε ικανοποιητικά βάθη ώστε να θερμαίνεται από τη γήινη γεωθερμική βαθμίδα. Πηγές θερμότητας σε θερμούς αλλά ξηρούς (χαμηλού πορώδους) σχηματισμούς πετρωμάτων βρίσκονται στις περισσότερες χώρες, αλλά δεν είναι ακόμα οικονομικά εκμεταλλεύσιμες.

2.4. Χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας

Αν και η γεωθερμική ενέργεια βρίσκεται παντού κάτω από την επιφάνεια της Γης, η χρήση της είναι δυνατή μόνο όταν ικανοποιούνται συγκεκριμένες συνθήκες:

- (1) Η ενέργεια πρέπει να είναι προσπελάσιμη μέσω γεωτρήσεων, συνήθως σε βάθη μικρότερα των 3 km αλλά ενδεχομένως και σε βάθη 6-7 km, σε ιδιαίτερα ευνοϊκά περιβάλλοντα (όπως στη βόρεια λεκάνη του Κόλπου του Μεξικού).
- (2) Εν αναμονή επίδειξης της τεχνολογίας και των οικονομικών για τη διάρρηξη και την παραγωγή ενέργειας από πετρώματα χαμηλής περατότητας, το πορώδες των ταμιευτήρων και η διαπερατότητα πρέπει να είναι αρκετά υψηλά ώστε να επιτρέπουν την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων θερμού νερού.
- (3) Δεδομένου ότι σημαντικό μέρος του κόστους μιας γεωθερμικής εγκατάστασης αφορά τη γεώτρηση και καθώς το κόστος ανά μέτρο αυξάνεται με το βάθος, όσο πιο ρηχά βρίσκεται συσσωρευμένη η γεωθερμική ενέργεια τόσο το καλύτερο.
- (4) Τα γεωθερμικά ρευστά μπορούν να μεταφερθούν οικονομικά με σωληνώσεις στην επιφάνεια της Γης μόνο για μερικές δεκάδες χιλιόμετρα, οπότε οιαδήποτε εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής ή άμεσης χρήσης πρέπει να βρίσκεται στη (ή κοντά στη) γεωθερμική ανωμαλία.

Στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται οι βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται συνήθως ανάλογα με τη θερμοκρασία της πηγής.

Πίνακας 1. Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση της γεωθερμίας

<i>Θερμοκρασία ταμιευτήρα</i>	<i>Ρευστό ταμιευτήρα</i>	<i>Συνήθης χρήση</i>	<i>Τεχνολογία που συνήθως επιλέγεται</i>
Υψηλή θερμοκρασία (> 220°C)	Νερό ή ατμός	Ηλεκτροπαραγωγή	• Ακαριαίος ατμός • Συνδυασμένος κύκλος (ακαριαία ατμοποίηση & δυαδικός)
		Άμεση χρήση	• Άμεση χρήση ρευστού • Εναλλάκτες θερμότητας • Αντλίες θερμότητας
Ενδιάμεση θερμοκρασία (100-220°C)	Νερό	Ηλεκτροπαραγωγή	• Δυαδικός κύκλος
		Άμεση χρήση	• Άμεση χρήση ρευστού • Εναλλάκτες θερμότητας • Αντλίες θερμότητας
Χαμηλή θερμοκρασία (50-150°C)	Νερό	Άμεση χρήση	• Άμεση χρήση ρευστού • Εναλλάκτες θερμότητας • Αντλίες θερμότητας

2.4.1. Παραγωγή ηλεκτρισμού

Η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού έχει διαδοθεί λόγω διάφορων παραγόντων. Οι χώρες όπου επικρατούν οι γεωθερμικές πηγές επιθυμούν να αναπτύξουν τους ιδίους πόρους τους αντί του να εισάγουν καύσιμα για παραγωγή ηλεκτρισμού. Σε χώρες όπου διατίθενται πολλές εναλλακτικές πηγές για παραγωγή ηλεκτρισμού, περιλαμβανομένης της γεωθερμίας, αυτή προτιμάται καθώς δεν μπορεί να μεταφερθεί προς πώληση, ενώ μέσω αυτής επιτρέπεται η χρήση των συμβατικών καυσίμων για ανώτερους και καλύτερους σκοπούς από την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Επίσης, ο γεωθερμικός ατμός αποτελεί μια ελκυστική εναλλακτική λύση παραγωγής ηλεκτρισμού λόγω των περιβαλλοντικών οφελών και επειδή τα μεγέθη των μονάδων είναι μικρά (συνήθως κάτω των 100MW). Επιπλέον, οι γεωθερμικοί σταθμοί μπορούν να ανεγερθούν ταχύτερα από αυτούς που

χρησιμοποιούν συμβατικά και πυρηνικά καύσιμα, οι οποίοι, για οικονομικούς λόγους, πρέπει να έχουν πολύ μεγάλο μέγεθος. Εξάλλου, τα ηλεκτρικά συστήματα είναι πιο αξιόπιστα εάν οι πηγές τροφοδοσίας τους δεν συγκεντρώνονται σε ένα μικρό αριθμό από μεγάλες μονάδες.

Η διεργασία που χρησιμοποιείται για την ηλεκτροπαραγωγή ποικίλλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της γεωθερμικής πηγής. Σχεδόν όλες οι πηγές που έχουν ήδη εξερευνηθεί είναι του υδροθερμικού τύπου (ζεστό νερό υπό πίεση), η εκμετάλλευση των οποίων μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Εάν η θερμοκρασία της πηγής είναι κάτω από 204°C, το γεωθερμικό φρέαρ εξοπλίζεται με αντλία που δημιουργεί ικανή πίεση στη γεωθερμική άλμη ώστε να διατηρείται ως ζεστό νερό υπό πίεση. Για τις άνω των 204°C πηγές η καταλληλότερη μέθοδος παραγωγής είναι η φυσική ροή από το φρέαρ, η οποία αποφέρει ένα ακαριαία ατμοποιούμενο μίγμα άλμης και ατμού.

2.4.2. Άμεση χρήση

Εξίσου σημαντική παγκοσμίως είναι και η άμεση χρήση της γεωθερμικής ενέργειας, συχνά σε θερμοκρασίες ταμειωτήρων μικρότερες των 100°C. Η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται άμεσα για θέρμανση κτιρίων (ανεξάρτητες κατοικίες, συγκροτήματα διαμερισμάτων, μέχρι ολόκληρες κοινότητες), δροσισμό κτιρίων (με χρήση μονάδων απορρόφησης βρωμιούχου λιθίου), θέρμανση θερμοκηπίων και εδάφους, και για την παροχή ζεστού ή χλιαρού νερού για οικιακή χρήση, επεξεργασία προϊόντων (π.χ. την παραγωγή χαρτιού), καλλιέργεια οστρακοειδών και ψαριών, θέρμανση κολυμβητικών δεξαμενών, και για θεραπευτικούς σκοπούς.

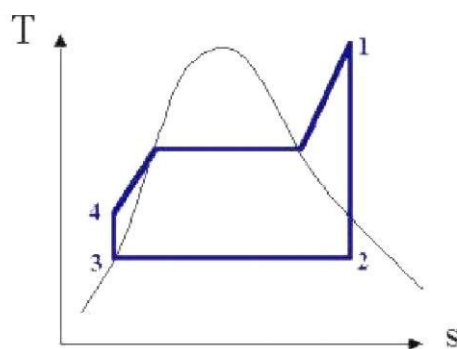
Οι γεωθερμικές πηγές παρέχουν σήμερα άμεσα αξιοποιήσιμη θερμική ισχύ πάνω από 12.000 MW σε περισσότερες από 30 χώρες παγκοσμίως. Οι κύριες θέσεις όπου γίνεται άμεση χρήση της γεωθερμικής ενέργειας στην Ευρώπη είναι η Ισλανδία (30% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας, κυρίως για θέρμανση χώρων), η λεκάνη του Παρισιού (νερό ~70°C χρησιμοποιείται για την τηλεθέρμανση των κοινοτήτων Melun, Creil και Villeneuve la Garenne), και η λεκάνη Pannonian στην Ουγγαρία.

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

3.1. Βασικές αρχές

Τρεις είναι οι κύριοι τύποι των γεωθερμικών σταθμών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Ο τύπος του σταθμού καθορίζεται κυρίως από τη φύση της γεωθερμικής πηγής της εν λόγω θέσης. Η διαδικασία ηλεκτροπαραγωγής από μία γεωθερμική πηγή (ή από ατμό σε μία συμβατική εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής) περιλαμβάνει μια διεργασία γνωστή ως κύκλο Rankine. Ο κύκλος αυτός, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3, περιλαμβάνει ένα λέβητα, στρόβιλο, γεννήτρια, συμπυκνωτή, υδραντλία τροφοδοσίας, πύργο ψύξης και υδραντλία ψύξης.

Κορεσμένος ή υπέρθερμος ατμός εισάγεται στο στρόβιλο (στάδιο 1) και εκτονώνεται ισεντροπικά μέχρι την πίεση εξόδου στο στάδιο 2. Έπειτα, ο ατμός συμπυκνώνεται υπό σταθερή πίεση και θερμοκρασία σε κεκορεσμένο υγρό (στάδιο 3). Η θερμότητα που απάγεται από τον ατμό στο συμπυκνωτή συνήθως μεταφέρεται στο νερό ψύξης. Έπειτα, το κεκορεσμένο υγρό ρέει μέσω της αντλίας, η οποία αυξάνει την πίεση στην πίεση του λέβητα (στάδιο 4), όπου το νερό θερμαίνεται κατ' αρχήν στη θερμοκρασία κορεσμού, βράζει και υπερθερμαίνεται, μέχρι το στάδιο 1. Κατόπιν επαναλαμβάνεται ολόκληρος ο κύκλος.

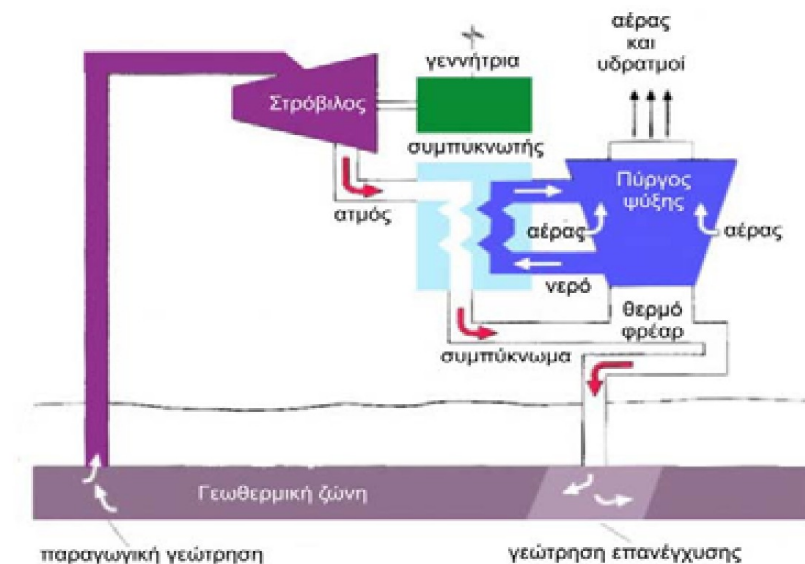


Σχήμα 3. Το διάγραμμα T-s κύκλου Rankine

Συνοψίζοντας, ένας σταθμός παραγωγής είναι απλά ένας κύκλος που διευκολύνει τη μετατροπή της ενέργειας από μία μορφή σε άλλη. Αν και το ενεργειακό περιεχόμενο του τελικού προϊόντος (ηλεκτρισμός) εκφράζεται συνήθως σε kWh, ο υπολογισμός της απόδοσης του σταθμού συχνά γίνεται σε μονάδες Btu (1 kWh είναι ενεργειακά ισοδύναμη με 3413 Btu). Ο σημαντικότερος υπολογισμός για ένα σταθμό παραγωγής αφορά το πόση από την τροφοδοτούμενη ενέργεια (καύσιμο) απαιτείται για να παραχθεί μια δεδομένη ποσότητα ηλεκτρισμού, και για να γίνει αυτός πρέπει να είναι γνωστή η αποδοτικότητα της μονάδας.

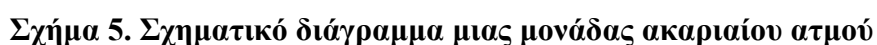
3.2. Διαδικασία ξηρού (ή άμεσου) ατμού

Αυτός ήταν ο πρώτος τύπος γεωθερμικής εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής (Ιταλία, 1904). Οι σταθμοί αυτοί χρησιμοποιούν τον ατμό όπως φθάνει από τις υδροθερμικές γεωτρήσεις παραγωγής (χωρίς την ανάγκη οποιουδήποτε εξοπλισμού διαχωρισμού και έγχυσης της άλμης), τον οποίο κατευθύνουν στη μονάδα στροβίλου / γεννήτριας για να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς. Ο ατμός έπειτα συμπυκνώνεται και επιστρέφει στο γεωθερμικό ταμιευτήρα μέσω μιας γεώτρησης επανέγχυσης (σχήμα 4).



Σχήμα 4. Σχηματικό διάγραμμα μιας μονάδας ξηρού ατμού

Η συνηθέστερη διαδικασία είναι αυτή του ακαριαίου ατμού, η οποία χρησιμοποιεί διαχωριστές για την απόληψη του ατμού από ένα αναβλύζον γεωθερμικό φρέαρ. Ειδικότερα, μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής ακαριαίου ατμού (σχήμα 5) διοχετεύει το ζεστό νερό από ένα υδροθερμικό παραγωγικό φρέαρ σε μία δεξαμενή ακαριαίας ατμοποίησης, όπου μια πτώση στην πίεση μετατρέπει το νερό σε ατμό. Ο ατμός περιστρέφει τη στροβιλογεννήτρια που παράγει ηλεκτρισμό, κατόπιν συμπυκνώνεται και, με όσο ζεστό νερό δεν μετατράπηκε σε ατμό, επιστρέφει στον ταμιευτήρα μέσω μιας γεώτρησης επανέγχυσης.



Ανάλογα με τη θερμοκρασία της πηγής, μπορεί να είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν δύο στάδια δεξαμενών ακαριαίας ατμοποίησης. Στην περίπτωση αυτή, το νερό που διαχωρίζεται στη δεξαμενή του πρώτου σταδίου οδηγείται στη δεξαμενή ακαριαίας ατμοποίησης δεύτερου σταδίου όπου διαχωρίζεται περισσότερος (αλλά χαμηλότερης πίεσης) ατμός. Το νερό που απομένει στη δεξαμενή αυτή οδηγείται εν συνεχεία προς απόρριψη. Η επονομαζόμενη εγκατάσταση διπλής ακαριαίας ατμοποίησης παρέχει ατμό υπό δύο διαφορετικές πιέσεις στο στρόβιλο.

Για τη μέγιστη αποδοτικότητα της διαδικασίας αυτής χρησιμοποιείται ένας στρόβιλος διπλής εισόδου, ο οποίος παρέχει τη δυνατότητα μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια του μεγαλύτερου μέρους του ατμού που διατίθεται για παραγωγή από το γεωθερμικό φρέαρ. Εάν η πηγή έχει υψηλό επίπεδο αιωρούμενων και διαλελυμένων στερεών, μπορεί να είναι αναγκαία η ενσωμάτωση εξοπλισμού ελέγχου των επικαθήσεων στο δοχείο ακαριαίας ατμοποίησης του ατμού στην είσοδο της μονάδας και εξοπλισμού αποκατάστασης των στερεών στην έξοδο αυτής. Αυτό προφυλάσσει τον εξοπλισμό της μονάδας από απόφραξη και επιτρέπει τη διατήρηση ενός καθαρού υπόλοιπου άλμης για επανέγχυση στον ταμιευτήρα.

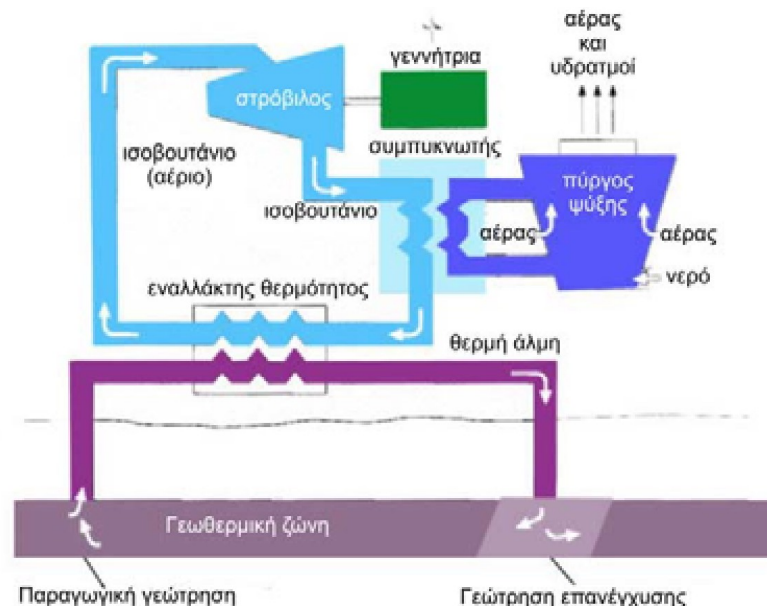
Εάν υφίστανται σημαντικές ποσότητες μη συμπυκνώσιμων αερίων, μπορεί να είναι αναγκαία η εγκατάσταση εξοπλισμού αποβολής των αερίων από το συμπυκνωτή για να μην αυξηθεί η αντίθλιψη στο σύστημα και, εξ αιτίας αυτού, να μειωθεί η απόδοση της διαδικασίας. Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής ακαριαίου ατμού συμπύκνωσης υφίστανται σε μεγέθη από 5 έως πάνω από 100 MWe. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ατμού, την περιεκτικότητα σε αέρια, τις πιέσεις, και το σχεδιασμό της μονάδας, απαιτούνται 6 έως 9 τόνοι ατμού ανά ώρα για να παραχθεί 1 MW ηλεκτρικής ισχύος.

Οι μικρές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής (κάτω των 10 MW) συνήθως καλούνται μονάδες κεφαλής της πηγής, καθώς χρειάζονται τον ατμό από ένα μόνο φρέαρ και εγκαθίστανται πλησίον αυτού στην εξέδρα της γεώτρησης για τη μείωση του κόστους των σωληνώσεων. Οι μονάδες αυτές συχνά δεν έχουν

συμπυκνωτή και ονομάζονται μονάδες αντίθλιψης. Είναι φθηνές και απλές στην εγκατάσταση, αλλά μη αποδοτικές (συνήθως απαιτούνται 10-20 τόνοι ατμού ανά ώρα για κάθε MW ηλεκτρισμού) και μπορεί να έχουν μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

3.4. Δυναμικός κύκλος

Μια πιο αποδοτική αξιοποίηση της πηγής μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση της δυναμικής διαδικασίας σε πηγές με θερμοκρασία μικρότερη από 180°C. Η διαδικασία αυτή κανονικά χρησιμοποιείται όταν γίνεται άντληση των φρεάτων, και παρουσιάζεται στο σχήμα 6. Η υπό πίεση γεωθερμική άλμη αποδίδει τη θερμική της ενέργεια σε ένα δεύτερο ρευστό σε εναλλάκτες θερμότητας (καλούμενοι λέβητες ή εξατμιστές) και επανεισάγεται μέσω ενός φρέατος εισαγωγής στον ταμιευτήρα. Σε μερικές μονάδες χρησιμοποιούνται δύο εναλλάκτες θερμότητας εν σειρά, ο πρώτος για προθέρμανση και ο δεύτερος για την εξάτμιση (εξατμιστής).



Σχήμα 6. Σχηματικό διάγραμμα μιας μονάδας δυναμικού κύκλου

Το δεύτερο ρευστό (γνωστό και ως "ρευστό ισχύος") έχει χαμηλότερη θερμοκρασία βρασμού από τη γεωθερμική άλμη και έτσι μετατρέπεται σε ατμό

στην έξοδο των εναλλακτών θερμότητας, ενώ ως υγρό αντλείται χωριστά πριν διέλθει από αυτούς. Το ατμοποιημένο, υψηλής πίεσης ρευστό περνά στη συνέχεια μέσα από ένα στρόβιλο που οδηγεί μια ηλεκτρογεννήτρια, και όταν εξέρχεται από αυτόν συμπυκνώνεται σε συμβατικούς συμπυκνωτές και αντλείται πίσω στους εναλλάκτες. Αυτή η διαδικασία έχει ένα σαφές περιβαλλοντικό πλεονέκτημα, αφού και τα δύο ρευστά (γεωθερμικό και ισχύος) είναι απομονωμένα από το περιβάλλον.

Παλαιότερα, τα ρευστά ισχύος στους δυαδικούς σταθμούς χαμηλής θερμοκρασίας ήταν ψυκτικά ρευστά CFC (τύπου Freon). Στις σύγχρονες μονάδες χρησιμοποιούνται ψυκτικά ρευστά τύπου HFC (υδρογονάνθρακες - ισοβουτάνιο, πεντάνιο, κλπ.), όπου το συγκεκριμένο ρευστό επιλέγεται ώστε να είναι συμβατό με τη θερμοκρασία της γεωθερμικής πηγής. Οι σταθμοί δυαδικού κύκλου είναι οι πλέον κατάλληλοι για τις γεωθερμικές εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας. Τελευταία, διατίθεται στο εμπόριο ετοιμοπαράδοτος εξοπλισμός δυαδικού κύκλου σε μονάδες από 200 έως 1.000 kW.

3.5 Συνδυασμένες ή υβριδικές εγκαταστάσεις

Οι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου συνήθως συνδυάζουν τις τεχνολογίες συμβατικού ατμοστρόβιλου και δυαδικού κύκλου. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται υψηλότερες συνολικές αποδοτικότητες αξιοποίησης, καθώς ο συμβατικός ατμοστρόβιλος είναι πιο αποδοτικός στην παραγωγή από υψηλής θερμοκρασίας ατμό και ο δυαδικός κύκλος από το μικρότερης θερμοκρασίας διαχωρισμένο νερό. Επίσης, αντικαθιστώντας το σύστημα συμπυκνωτή - πύργου ψύξης ενός συμβατικού σταθμού με μία δυαδική μονάδα, η διαθέσιμη θερμότητα από τη συμπύκνωση του εξερχόμενου από τον ατμοστρόβιλο ατμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω παραγωγή ισχύος.

Έτσι, μπορούν να σχεδιαστούν οι ακόλουθες υβριδικές ή συνδυασμένες μονάδες:

- Εγκαταστάσεις άμεσου ατμού / δυαδικού κύκλου.

- Εγκαταστάσεις απλής ακαριαίας ατμοποίησης / δυαδικού κύκλου.
- Ολοκληρωμένες εγκαταστάσεις απλής και διπλής ακαριαίας ατμοποίησης.
- Υβριδικά συμβατικά-γεωθερμικά συστήματα.

Τέτοιες μονάδες έχουν κατασκευαστεί στις ΗΠΑ, τις Φιλιππίνες και τη Νέα Ζηλανδία, με μεγέθη από 10 έως πάνω από 100 MWe. Οι αποδοτικότητες των μονάδων αυτών, από την άποψη της παραγόμενης ισχύος για τη συνολική ροή ρευστού (ατμού και νερού) των φρεάτων, είναι αρκετά υψηλότερες από των συμβατικών, λόγω κυρίως της πρόσθετης ισχύος που παράγεται με την αξιοποίηση της θερμότητας της άλμης.

3.6 Απόδοση των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής

Η σύγχρονη προσέγγιση στη μέτρηση της απόδοσης των ενεργειακών συστημάτων είναι η εφαρμογή του 2^{ου} θερμοδυναμικού νόμου ως βάση αξιολόγησης. Για το σκοπό αυτό έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως η έννοια του διαθέσιμου έργου ή ενέργειας. Οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής αποτελούν ένα άριστο παράδειγμα εφαρμογής της αποδοτικότητας αξιοποίησης η_o του 2^{ου} νόμου. Δεδομένου ότι οι γεωθερμικοί σταθμοί δεν λειτουργούν υπό έναν κύκλο αλλά ως μια σειρά διεργασιών, δεν εφαρμόζεται η θερμική απόδοση του κύκλου η_{th} των συμβατικών εγκαταστάσεων.

Η μόνη περίπτωση όπου έχει νόημα η εφαρμογή της θερμικής απόδοσης του κύκλου η_{th} στις γεωθερμικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής είναι οι δυαδικοί σταθμοί. Όμως, και τότε η θερμική απόδοση πρέπει να χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την αξιολόγηση του κλειστού κύκλου που περιλαμβάνει το δευτερεύων ρευστό, και όχι της συνολικής λειτουργίας που περιλαμβάνει τη ροή του γεωθερμικού ρευστού από τα φρέατα παραγωγής μέσα από την εγκατάσταση και τελικά, πίσω στο σύστημα απόρριψης. Η αποδοτικότητα αξιοποίησης η_o μετρά το πόσο καλά μία μονάδα μετατρέπει την εξέργεια (ή το διαθέσιμο έργο) της πηγής σε ωφέλιμη παραγωγή.

Η αποδοτικότητα αξιοποίησης ενός γεωθερμικού σταθμού είναι:

όπου W είναι η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, m η απαιτούμενη συνολική παροχή μάζας του γεωθερμικού ρευστού, και e η ειδική ενέργεια του ρευστού στις συνθήκες του ταμιευτήρα, η οποία ορίζεται ως εξής:

$$e = h(P_I, T_I) - h(P_O, T_O) - T_O [s(P_I, T_I) - s(P_O, T_O)]$$

Η ειδική ενθαλπία h και εντροπία s εκτιμώνται στις συνθήκες του ταμιευτήρα (P_I, T_I) και στην "αδρανή κατάσταση" (P_O, T_O). Αυτή αντιστοιχεί στις συνθήκες περιβάλλοντος στη θέση εγκατάστασης. Ως T_O (σε βαθμούς Kelvin) μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πράξη η θερμοκρασία σχεδιασμού υγρού βολβού, όταν εφαρμόζεται σύστημα υγρής ψύξης, ή η θερμοκρασία σχεδιασμού ξηρού βολβού, για αερόψυκτο συμπυκνωτή.

Οι σταθμοί άμεσου ατμού λειτουργούν με εντυπωσιακές εξεργειακές αποδοτικότητες, συνήθως 50-70%, ενώ οι σταθμοί δυαδικού κύκλου παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος αποδόσεων (15-50%). Όλα αυτά αναφέρονται στη "μικτή" απόδοση μιας μονάδας, αλλά σε κάθε μονάδα υφίστανται ηλεκτρικά φορτία απαραίτητα για τη λειτουργία της (π.χ. για τους ανεμιστήρες, τις αντλίες και τα συστήματα ελέγχου), τα "παρασιτικά φορτία". Η "καθαρή" απόδοση του σταθμού περιλαμβάνει την κατανάλωση και αυτών των συσκευών για την εκτίμηση της απόδοσης του σταθμού από την άποψη της καθαρής παραγωγής ισχύος που διατίθεται στον ιδιοκτήτη προς χρήση ή πώληση.

3.7. Γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή για μικρά και mini δίκτυα

Μικροί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής έως 100 kW, και συνήθως 1-5 MW, μπορούν να παρέχουν κατανεμημένη παραγωγή σε μεγάλα δίκτυα ή να αποτελούν μια σημαντική πηγή παραγωγής για μικρότερα δίκτυα ισχύος. Αν και επικρατεί η αντίληψη ότι οι γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής είναι σταθμοί βάσης που λειτουργούν 24 ώρες την ημέρα για 365 ημέρες το έτος, αυτό δεν ισχύει πάντα. Πράγματι, οι σταθμοί αυτοί μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να ακολουθούν τη ζήτηση του φορτίου, όπως μπορεί να απαιτείται σε εφαρμογές μίνι δικτύων.

Οι μικρές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής κατασκευάζονται συνήθως με τη χρήση μιας πολυσυναρτησιακής προσέγγισης που μειώνει τις δαπάνες κατασκευής της μονάδας, και μπορούν να εγκατασταθούν δίπλα στις γεωτρήσεις, οπότε συνολικά το έργο έχει ελάχιστη περιβαλλοντική επίπτωση. Οι μονάδες αυτές έχουν διαδραματίσει ιδιαίτερο ρόλο στην ανάπτυξη και αποδοχή της γεωθερμίας. Ευκαιρίες για μικρά γεωθερμικά έργα υπάρχουν σε πολλές περιοχές του αναπτυσσόμενου κόσμου. Οι αγροτικές περιοχές έχουν πιεστικές ενεργειακές ανάγκες και ο ηλεκτρισμός που παράγεται από μικρούς, τοπικούς γεωθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής (με δυναμικό κάτω από 5MW) θα μπορούσε να καλύψει πολλές από αυτές.

Αυτού του είδους οι σταθμοί θα μπορούσαν να καλύψουν τις αγορές αυτές σχεδόν εξ ολοκλήρου σε χώρες όπου ισχυρές εθνικές ή περιφερειακές πολιτικές προωθούν την εφαρμογή τους. Πάντως, για τα έργα αυτά συχνά απαιτείται κάποια κυβερνητική παρέμβαση, καθώς αντιμετωπίζουν ειδικές οικονομικές και λειτουργικές προκλήσεις που σχετίζονται με το μικρό τους μέγεθος. Το κλειδί για την επιτυχία ενός μικρής κλίμακας γεωθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής είναι το να μην κατασκευάζεται μία υπερμεγέθους σε σχέση με τη ζήτηση μονάδα, και να διερευνάται πάντοτε η δυνατότητα ενσωμάτωσης ενός συστήματος άμεσης χρήσης του ζεστού νερού για τη βελτίωση των οικονομικών της μονάδας.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: Mini-δίκτυο (< 5MWe)

Θέση: Fang, Ταϊλάνδη (σχήμα 7)

Από το Δεκέμβριο του 1989, η Electricity Generating Authority (EGAT) της Ταϊλάνδης παράγει θερμικά ρευστά από τρεις αβαθείς γεωτρήσεις (βάθους 150 m) στη γεωθερμική περιοχή Fang, με παροχή περίπου 60 τόνους/ώρα (θερμοκρασία εισόδου 120°C). Αυτά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρισμού σε μία μονάδα ORMAT 0,3 MWe (με 85-90% συντελεστή διαθεσιμότητας). Η προκαταρκτική οικονομική μελέτη έδειξε ότι το κόστος παραγωγής του ηλεκτρισμού είναι

6,3-8,6 c/kWh (τιμές 1995), θεωρώντας επιτόκιο 5% και συντελεστή δυναμικού 90%.

Επίσης, η EGAT εγκατέστησε μία παγολεκάνη κλιματισμού και ένα ξηραντήριο προϊόντων που χρησιμοποιούν το απορριπτόμενο από τη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής ζεστό νερό (80°C) για να επιδείξει την κάθετη αξιοποίηση στον τοπικό πληθυσμό. Το τμήμα επεξεργασίας τροφίμων του Royal Recommended Project κατασκευάζει τελευταία ένα νέο μεγαλύτερο ξηραντήριο που θα χρησιμοποιεί τη γεωθερμική πηγή για τη συντήρηση προϊόντων. Παράλληλα, το εθνικό πάρκο Mae Fang κατασκεύασε ένα δημόσιο λουτρό και μία σάουνα για την εξυπηρέτηση των επισκεπτών. Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας στη περιοχή Fang είναι επιτυχής, έστω και σε πολύ μικρή κλίμακα, και το έργο αυτό - γνωστό ως το πρώτο «πολυδύναμο έργο» στην Ταϊλάνδη - μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλες γεωθερμικές πηγές.

Η μονάδα ORMAT 300 kW είναι δυαδικού κύκλου. Ρευστό 120°C περνά από εναλλάκτη θερμότητας όπου θερμαίνει ένα ρευστό λειτουργίας με σημείο βρασμού μικρότερο από 100°C. Αυτό είναι ένα οργανικό ρευστό, π.χ. ισοπεντάνιο, που ατμοποιείται και χρησιμοποιείται για την οδήγηση του στροβίλου, ενώ στη συνέχεια συμπυκνώνεται σε ένα συμπυκνωτή κελύφους με σωληνώσεις. Τέλος, το ρευστό επιστρέφει στον εναλλάκτη και σχηματίζει κλειστό βρόχο. Το ψυγμένο ρευστό του ταμιευτήρα (80°C) χρησιμοποιείται για την παγολεκάνη κλιματισμού και το ξηραντήριο.



Σχήμα 7. Ο μικρός (300 kW) πολυσυναρτησιακός δυαδικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής στο Fang (Ταϊλάνδη)

3.8. Γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή με σύνδεση στο δίκτυο

Οι γεωθερμικοί ταμειευτήρες υψηλής θερμοκρασίας μπορούν να παράσχουν ατμό για την άμεση οδήγηση ατμοστροβίλων σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Οι πρόσφατα αναπτυγμένες τεχνολογίες δυαδικού κύκλου παρέχουν τη δυνατότητα χρήσης του μεγαλύτερου μέρους της θερμότητας της πηγής για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ενώ κερδίζει έδαφος και ο συνδυασμός της συμβατικής ακαριαίας ατμοποίησης με την τεχνολογία δυαδικού κύκλου (συνδυασμένος κύκλος). Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μεγέθους έως 100 MW συνδέονται στα εθνικά δίκτυα και χρησιμοποιούνται συνήθως ως μονάδες βάσης, λειτουργώντας υπό πλήρη ισχύ 365 ημέρες το χρόνο. Αυτός ο τύπος παραγωγής είναι διαδεδομένος στην Ινδονησία και τις Φιλιππίνες.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: Διασυνδεδεμένη ηλεκτροπαραγωγή

Θέση: Γεωθερμικό πεδίο Kamojang, Ιάβα, Ινδονησία (σχήμα 8)

Το γεωθερμικό πεδίο Kamojang βρίσκεται στη δυτική Ιάβα της Ινδονησίας και ανακαλύφθηκε από τους Ολλανδούς το 1920, κατά την περίοδο του αποικισμού. Η αρχική διερεύνηση έγινε το 1973 με τη συνεργασία των κυβερνήσεων της Ινδονησίας και της Νέας Ζηλανδίας. Ήταν το πρώτο επιχειρησιακό

γεωθερμικό πεδίο της Ινδονησίας και λειτουργεί εμπορικά παράγοντας ηλεκτρισμό από το 1983 (την περίοδο αυτή παράγονται 140 MW_e). Το πεδίο βρίσκεται σε προστατευόμενο και παραγωγικό δάσος και σε δάσος-βιότοπο. Περιβαλλοντικές μελέτες δείχνουν ότι οι γεωθερμικές δραστηριότητες δεν είχαν καμία επίπτωση στο φυσικό οικοσύστημα.

Τρεις μονάδες στροβίλων συμπυκνώματος της Mitsubishi (1x30 MW_e και 2x55 MW_e) είναι σε χρήση. Αυτές τροφοδοτούνται με ατμό από 26 φρέατα με μέση βέλτιστη πίεση στην κεφαλή του φρέατος περίπου 15 bar (πίεση εισόδου στους στροβίλους 6,5 bar). Ο στρόβιλος των 30 MW λειτουργεί από το 1983 και οι μονάδες των 55 MW από το 1987. Η παραγωγή συνδέεται με μια γραμμή μεταφοράς 150 kV και αποδίδεται στο δίκτυο του Bandung. Οι στρόβιλοι εμφανίζουν υψηλή αξιοπιστία με μέσους συντελεστές ισχύος, διαθεσιμότητας και φορτίου 85%, 90% και 97,5% αντίστοιχα, παρότι κάθε στρόβιλος απαιτεί εκτεταμένη επισκευή κάθε χρόνο για την αφαίρεση από τα πτερύγια των επικαθίσεων πυριτίου. Μελέτες προσομοίωσης του ταμιευτήρα δείχνουν ότι το υφιστάμενο βεβαιωμένο δυναμικό έχει δυνατότητα παραγωγής 140 MW_e μέχρι το έτος 2021, που αντιστοιχεί σε ζωή 38 ετών για τη μονάδα I (30 MW) και 34 ετών για τις μονάδες II & III (50 MW κάθε μια).



**Σχήμα 8. Η εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής του γεωθερμικού πεδίου
Kamojang στην Ιάβα (Ινδονησία)**

3.9 Άλλα πρόσφατα παραδείγματα εφαρμογών ανά χώρα

Αυστρία

Στη χώρα υπάρχουν δύο μικρές εγκαταστάσεις δυαδικού κύκλου στο Altheim και το Bad Blumau. Στο Altheim ένα ρευστό 106°C χρησιμοποιείται τόσο για τηλεθέρμανση όσο και για παραγωγή ηλεκτρισμού χρησιμοποιώντας μια μονάδα δυαδικού κύκλου. Το αποτέλεσμα είναι 500 kW καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά το 2006 το σύνολο της παραγόμενης ενέργειας έφτασε τα $1,1\text{ GWh}$. Στο Bad Blumau έργο με ρευστό 110°C αξιοποιείται για τη θέρμανση ενός Spa και παραγωγή ηλεκτρισμού με μια δυαδική μονάδα των 180 kW .

Ο στόχος RES-E που πρέπει να επιτευχθεί στην Αυστρία μέχρι το 2010 είναι 78% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενη από ανανεώσιμες. Το 2004, το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανήλθε στο 62% (ήταν 70% το 1994). Η γεωθερμική εγκατεστημένη ισχύ $1,1\text{ MW}$ ($0,7\text{ MW}$ καθαρό) διαδραματίζει περιθωριακό ρόλο.



Altheim Binary Plant.

Κόστα Ρίκα

Δεν υπάρχουν νέες μονάδες παραγωγής ενέργειας που να έχουν προστεθεί στη χώρα πρόσφατα από γεωθερμική δυναμικότητα, η οποία είναι 163 MW στο Miravalles. Μια μονάδα 35 MW έχει προγραμματιστεί σε μια άλλη περιοχή, στο Rincon de la Vieja.

Ελ Σαλβαδόρ

Υπάρχουν δύο σημαντικά γεωθερμικά πεδία σε αυτή τη χώρα: Ahuachapan και Berlin.

Στον τομέα Ahuachapan δύο 30 MW μονού ακαριαίου ατμού (flash) και ένα 35 MW διπλού ακαριαίου ατμού (double flash) βρίσκονται σε απευθείας σύνδεση με το δίκτυο. Εξαιτίας της μείωσης του ρευστού στον γεωθερμικό ταμιευτήρα, μόνο 78 MW ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκονται σήμερα σε λειτουργία. Ένα έργο για την επίτευξη της πλήρους απόδοσης των μονάδων είναι υπό μελέτη. Η δυνατότητα περαιτέρω αύξησης μέσω 3,5 MW με χρήση δυαδικής μονάδας είναι επίσης υπό εξέταση.

Στο Berlin, οι δύο 28 MW μεμονωμένες μονάδες ακαριαίου ατμού έχουν εγκατασταθεί πριν από το 2005. Δύο σημαντικές προσθήκες έχουν τοποθετηθεί

στο δίκτυο μέχρι και σήμερα: Μια μονάδα δυαδικού κύκλου 9,2 MW (βλέπε σχήμα 4) και μια μονάδα μονού ακαριαίου ατμού 44 MW, που κατασκευάστηκε από την εταιρία Enel (Ιταλία), στο πλαίσιο μιας συμφωνίας μετόχων με το LaGeo (Έχει την ιδιοκτησία και την ευθύνη ανάπτυξης του γεωθερμικού δυναμικού της χώρας).

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της χώρας έχει αυξηθεί στα 204 MW (189 MW σε λειτουργία), με αύξηση κατά 35% από το 2005 και μετά.



Berlin Binary Plant

Γαλλία

Η χρησιμοποίηση γεωθερμίας υψηλής ενθαλπίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη Γαλλία υπάρχει μόνο στο γαλλικό υπερπόντιο διαμέρισμα, στο Bouillante στο νησί της Γουαδελούπης. Η συνολική παραγωγή ενέργειας 15 MW, δεν αυξήθηκε από το 2005, παράγει 95,3 GWh, που αντιστοιχούν στο 8% της τοπικής κατανάλωσης (βλέπε σχήμα 5). Η δραστηριότητα για την τρίτη μονάδα 20 MW βρίσκεται σε εξέλιξη.



Bouillante Binary Plant.

Στα νησιά της Μαρτινίκα και τη Reunion, προγράμματα εξερεύνησης και ανάπτυξης γεωθερμικών πεδίων έχουν προγραμματιστεί στο εγγύς μέλλον.

Ο στόχος RES-E από την οδηγία της ΕΕ για τη Γαλλία είναι μερίδιο 21% παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές στην συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας το 2010. Το μερίδιο της Γαλλίας ήταν 13% το 2004 (ήταν 15% το 1997). Γεωθερμική ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη στην ηπειρωτική χώρα, αλλά σε νησιά της Καραϊβικής μπορεί να φτάσει έως το 20% των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια.

Γερμανία

Η πρώτη γεωθερμική μονάδα με σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Γερμανία βρίσκεται στο Neustadt-Glewe (Φώτο), με εγκατεστημένη ισχύ περίπου 230 kW, με ένα δυαδικό κύκλο με 98 ° C γεωθερμικό ρευστό. Επιπλέον, 10,7 MWth χρησιμοποιούνται στην περιοχή για θέρμανση χώρων. Η παραγωγή ενέργειας είναι περίπου 1,5 GWh ανά έτος.



Neustadt Binary Plant.

Σήμερα υπάρχουν πάνω από 150 άδειες για την αναζήτηση γεωθερμικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που έχουν δοθεί σε εταιρείες από τις γερμανικές αρχές. Τρία νέα εργοστάσια ξεκίνησαν τη λειτουργία τους το 2007: Landau / Pfalz (3,8 MW), Bruchsal (1 MW), Unterhaching (3,2 MW). Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς προβλέπεται περίπου 8 MW. Τουλάχιστον τρία έργα βαθιών γεωτρήσεων (στο Hagenbach και δύο στην περιοχή Μονάχου) έχουν προγραμματιστεί.

Οι στόχοι RES-E, που έχουν τεθεί για τη Γερμανία είναι 12,5% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας το 2010, και 20% το 2020. Σημαντική πρόοδος έχει ήδη συντελεσθεί προς την κατεύθυνση του στόχου. Το μερίδιο της Γερμανίας το 2004 ήταν 9%, ενώ το 1997 ήταν 4% μόνο. Ο στόχος του 2010 έχει υπολογιστεί ότι θα υπερκαλυφθεί.

Γουατεμάλα

Στη χώρα αυτή οι γεωθερμικοί πόροι είναι σήμερα σε δύο τομείς, στο Zunil και το Amatitlan. Το Zunil, που βρίσκεται στα δυτικά της Πόλης της Γουατεμάλας, χωρίζεται σε δύο περιοχές. Η πρώτη και πιο ανεπτυγμένη μέχρι σήμερα, με θερμοκρασίες μέχρι 300 °C, υπολογίζεται ότι έχει δυναμικότητα 50 MW, ενώ η δεύτερη, με 240 °C, έχει κατ' εκτίμηση 50 MW (28 MW σήμερα εγκατεστημένη).

Το Amatitlan βρίσκεται περίπου 25 χιλιόμετρα νότια της πόλης της Γουατεμάλα στο ενεργό ηφαιστειακό σύμπλεγμα. Το πεδίο αυτό, με 285 ° C θερμοκρασία, έχει μια εκτίμηση συνολικής δυναμικότητας 200 MW. Μετά από την παλαιά μονάδα 5 MW, ένας νέος 20 MW δυαδικός κύκλος στο Amatitlan έχει τεθεί σε λειτουργία, ώστε η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της χώρας ανέρχεται στο 53 MW, με αύξηση 61% από το 2005. Η εξερεύνηση της περιοχής Tecuamburro, που αποσκοπεί σε ένα έργο 40 MW, βρίσκεται στο στάδιο της αδειοδότησης.

Ισλανδία

Η γεωθερμική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ισλανδία έχει αυξηθεί σημαντικά από το 2005 με την εγκατάσταση νέων μονάδων σε Nesjavellir, Hellisheidi και Reykjanes. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς έχει ως εξής:

- Bjarnarflag, με μια μικρή μονάδα 3,2 MW (το πρώτο εργοστάσιο στην Ισλανδία), καθώς και 40 επιπλέον MW υπό κατασκευή, σε συνδυασμό με μια εξωτερική πισίνα, σάουνα και τουριστικό κέντρο, όπως και στο "Blue Lagoon".
- Hellisheidi: 90 MW είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, και 120 MW είναι υπό κατασκευή, για μια παραγωγή συνολικά 210 MW και 400 MWth θερμικής ενέργειας για αστική θέρμανση. Η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται κατά κύριο λόγο στα τοπικά χυτήρια αλουμινίου.
- Husavik, με το πρώτο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τύπου Kalina (δυαδικού κύκλου) απόδοσης 2 MW (Φώτο), με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας του νερού σε 124 ° C. Το νερό που εξέρχεται από τη μονάδα παραγωγής στους 80 ° C χρησιμοποιείται για την τηλεθέρμανση της πόλης, ικανοποιώντας το 75% της ζήτησης για θερμότητα.
- Krafla: δύο των 30 MW διπλού ακαριαίου ατμού. Παραγωγή ενέργειας 60 MW συνολικά.
- Nesjavellir: τέσσερις μονάδες των 30 MW (συνολικά 120 MW), που συνδυάζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με 300 MWth για τηλεθέρμανση.



Nesjavellir, Ισλανδία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμού νερού, συνολική εγκατεστημένη ισχύς 120 MWe, 24 φρεάτια παραγωγής, διάταξη στιγμιαίας ατμοποίησης

- Reykjanes: δύο μονάδες των 50 MW. Συνολική ισχύ 100 MW.
- Svarstenegi: δύο μονάδες flash (30 και 8 MW) και ένα 8 MW δυαδικού κύκλου, συνολικά 46 MW, καθώς και την παραγωγή ζεστού νερού 150 MWth για τηλεθέρμανση και τη διάσημη υπαίθρια πισίνα με εγκαταστάσεις σπα του Blue Lagoon.



Husavik Kalina Binary Plant.

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της χώρας είναι 422 MW και επιπλέον 160 MW υπό κατασκευή. Το ισλανδικό πρόγραμμα Deep Drilling Project (IDDP) στοχεύει την αξιοποίηση της γεωθερμικής περιοχής του ηφαιστείου Krafla, στο βόρειο τμήμα της χώρας. Ο στόχος του έργου είναι η αξιοποίηση της σε βάθος 4-5 χιλιομέτρων υπερκρίσιμης θερμοκρασίας 400 έως 600 ° C.

Μια συμφωνία που έχει υπογραφεί μεταξύ της εταιρίας Aluminum Co και δύο μεγάλες ισλανδικές εταιρίες γεωθερμικής ενέργειας (Hitaveita Sudurnesja και Orkuveita Reykjavíkur) για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή ενός αρχικού ποσού των 150.000 τόνων αλουμινίου ετησίως, με τη χρήση 250 MW της γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας. Η αρχική φάση του έργου θα ανατεθεί το 2010. Η συμφωνία είναι επεκτάσιμη έως 435 MW, για παραγωγή 250.000 τόνους αλουμινίου. Αυτό θα είναι ένα πολύ αποτελεσματικός τρόπος για την εξαγωγή των πλεονασμάτων άφθονης και φθηνής γεωθερμικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την Ισλανδία.

Η ισλανδική Εθνική Ενεργειακή Αρχή έχει συνάψει συμφωνία με τη γερμανική εταιρεία Energie Baden-Württemberg (EnBW) να εξετάσει εάν το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να μεταφερθεί από την Ισλανδία προς τη Γερμανία μέσω υποθαλάσσιου καλωδίου.

Η χώρα με 300.000 κατοίκους παράγει το 100% της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, με 17% της ηλεκτρικής της ενέργειας και το 87% των αναγκών θέρμανσης να παρέχονται από τη γεωθερμική ενέργεια.

Ινδονησία

Μετά την οικονομική κρίση του πρόσφατου παρελθόντος, η χώρα αυτή έχει αρχίσει μια πολύ σημαντική γεωθερμική δραστηριότητα με σημαντική κατασκευή σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και εξερεύνησης. Σε όλα τα γεωθερμικά πεδία επιχειρήσεις (τοπικές και διεθνής) επενδύουν και υπάρχουν καλές προοπτικές και θετικά μηνύματα από την αγορά.

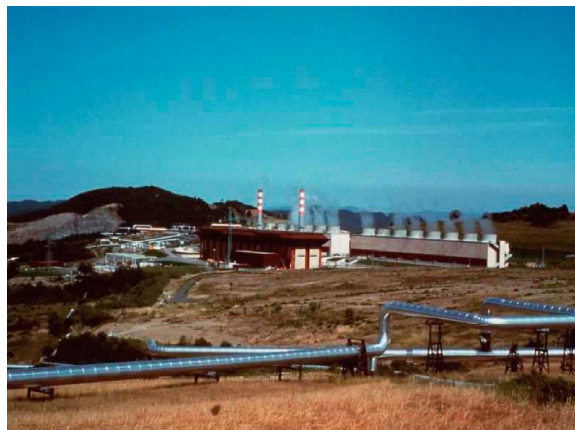
Τα νέα εργοστάσια που σχεδιάζονται ή βρίσκονται σε πολύ προχωρημένο στάδιο κατασκευής είναι 110 MW στην Darajat, 20 MW στο Lahendong και 10 MW στο Sibayak, φθάνοντας τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ σε 992 MW, με αύξηση

24% από το 2005 ως εξής:

- Darajat: δύο παλιές μονάδες 55 και 90 MW ενώ σχεδιάζεται νέα μονάδα απόδοσης 110 MW. Συνολικά 255 MW.
- Dieng: μια μονάδα των 60 MW.
- Kamojang: μια μονάδα 30 MW και δύο μονάδες 55 MW, συνολικά 140 MW. 60 επιπλέον MW είναι υπό κατασκευή.
- Lahendong: δύο παλιές μονάδες των 20 MW, συνολικά 40 MW και επιπλέον 20 MW υπό κατασκευή.
- Salak: έξι παρόμοιες μονάδες, συνολικά 375 MW.
- Sibayak: μια μονάδα 2 MW και δύο μονάδες 5 MW, για 12 MW συνολικά.
- Wayang Windu: μια μονάδα 110 MW εγκατεστημένη, μια δεύτερη μονάδα 110 MW στο πλαίσιο της προετοιμασίας για την κατασκευή.

Ιταλία

Υπάρχουν δύο σημαντικές γεωθερμικές περιοχές της Ιταλίας: Larderello-Travale / Radicondoli και το Όρος Amiata, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ από 810 MW. Larderello και Travale / Radicondoli είναι δύο κοντινά τμήματα που καλύπτουν μια τεράστια έκταση 400 Km² περίπου. Στην πλευρά Larderello τη σχετική περιοχή είναι 250 km², με 21 μονάδες για 562 MW εγκατεστημένη δυναμικότητα. Στη νοτιοανατολική πλευρά του Travale / Radicondoli, που καλύπτει μια επιφάνεια των 50 Km², υπάρχουν 160 MW (6 μονάδες) εγκατεστημένης ισχύος. Το νερό από το Travale επανεγγχέεται στον πυρήνα του πεδίου Larderello μέσω αγωγών ύδρευσης μήκους 20 Km.



Valle Secolo, Ιταλία

Εγκατεστημένη ισχύς 2 X 60 MWe

Στην περιοχή Amiata περιλαμβάνονται δύο γεωθερμικά πεδία: Piancastagnaio και Bagnore. Σοβαρά προβλήματα αποδοχής με τις τοπικές κοινωνίες επιβραδύνουν το έργο για την πλήρη εκμετάλλευση αυτού του υψηλού δυναμικού. Επί του παρόντος, υπάρχουν 5 μονάδες με 88 MW εγκατεστημένης ισχύος: ένας στους Bagnore και τέσσερις το Piancastagnaio. Τα σχέδια για ακόμη 100 MW έχουν εγκριθεί και θα υλοποιηθούν στα επόμενα χρόνια.

Η Ιταλία έχει θέσει ως στόχο ένα μερίδιο στο 25% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το 2010. Δεν έχει σημειωθεί πρόοδος προς την κατεύθυνση αυτή. Το μερίδιο της Ιταλίας ανέρχονταν σε 16% το 1997, μειώθηκε στο 15% το 2004.



AMIS Plant.

Κένυα

Δεν υπάρχουν νέες επενδύσεις από το 2005. Ωστόσο, ένα έργο 35 MW στο Olkaria έχει εγκριθεί και αναμένεται να ολοκληρωθεί εντός δύο ετών.

Μεξικό

Δεν υπάρχουν νέες επενδύσεις από το 2005. Ωστόσο, τα σχέδια Cerro Prieto V (100 MW) και το Los Humeros II (46 MW), έχουν εγκριθεί και αναμένεται ότι και οι δύο θα έχουν ολοκληρωθεί το 2010. Το έργο Cerritos Colorados (75 MW), παλαιότερα γνωστό ως La Primavera, δεν έχει εξελιχθεί σήμερα, δεδομένου ότι πρέπει να εγκριθεί από τις περιβαλλοντικές αρχές πρώτα.

Νέα Ζηλανδία

Όλα τα γεωθερμικά έργα σε αυτή τη χώρα είναι στο North Island ή στην περιοχή Northland (Ngawha). Από το 2005 δύο νέες μονάδες έχουν πραγματοποιηθεί: μια δυαδική μονάδα 14 MW στο Wairakei και ένα δεύτερο έργο στο Mokai ισχύος 39 MW, με αποτέλεσμα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της χώρας να ανέρχεται σε 472 MW, με αύξηση 12%. Η γεωθερμικές περιοχές είναι οι εξής:

- Kawerau: 8 MW flash και 6 MW δυαδικό, για συνολικά 14 MW. Μια νέα διπλή μονάδα flash είναι υπό κατασκευή για 90 MW.
- Mokai: δύο μονάδες flash για 30 και 39 MW και τέσσερις 4,5 MW δυαδικά, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 96 MW. Μια περαιτέρω διμερή επέκταση των εγκαταστάσεων είναι υπό κατασκευή.
- Ngawha: δύο 4,8 MW δυαδικά συστήματα παραγωγής για 9,6 MW σύνολο. Μια νέα μονάδα 15 MW είναι υπό κατασκευή.
- Ohaaki: τέσσερις μονάδες flash, δύο εκ των οποίων 11 MW και δύο των 43 MW, συνολικής ισχύος 86 MW, αλλά με μόνο 45 MW σε λειτουργία.
- Poihipi: μια μονάδα παραγωγής ξηρού ατμού των 55 MW, αλλά σε λειτουργία κατά μέσο όρο 25 MW λόγω κάποιων περιορισμών.
- Rotokawa: μία μονάδα flash των 15 MW και τρεις 4,5 MW και 6 MW δυαδικές μονάδες για συνολικά 35 MW. Ένα πρόγραμμα εξερεύνησης στο El Hoyo-Mόντε Galan και Chiltepe, για δύο έργα ισχύος 44 MW το καθένα έχει ήδη ξεκινήσει.
- Wairakei: πολλά flash και δυαδικά για ένα σύνολο 176 MW.



Wairakei Binary Plant.

Νικαράγουα

Δεν υπάρχουν νέες επενδύσεις από το 2005. Ωστόσο, ένα έργο για επιπλέον 46 MW στο San Jacinto βρίσκεται σε εξέλιξη, με αποτέλεσμα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς να ανέρχεται στα 66 MW. Άλλες δραστηριότητες δεν είναι προγραμματισμένες για την άλλη γεωθερμική περιοχή Momotombo.

Παπούα - Νέα Γουινέα

Η γεωθερμική ενέργεια εστιάζεται σε ένα σημαντικό ορυχείο χρυσού στο μικροσκοπικό νησί Lihir, που βρίσκεται περίπου 900 χιλιόμετρα βορειοανατολικά της πρωτεύουσας. Μετά από μια αρχική μονάδα 6 MW που κατασκευάστηκε το 2003, κατασκευάζεται ένας νέος σταθμός παραγωγής ενέργειας 50 MW, ένα 30 MW και δύο 10 MW). Συνολική δυναμικότητα 56 MW, με αύξηση στην ισχύ 833%.



Lihir Power Station.

Περίπου το 75% των τρεχουσών αναγκών ενέργειας κατά τις εργασίες εξόρυξης μεταλλευμάτων καλύπτονται από γεωθερμική ηλεκτρική ενέργεια, με σημαντική εξοικονόμηση που εκτιμάται σε περίπου 40 εκατομμύρια δολάρια το 2007, σε αντικατάσταση του μαζούτ για ηλεκτροπαραγωγή. Θα δημιουργήσει επίσης έσοδα

ύψους 3 εκατ. δολαρίων ετησίως από την πώληση των πιστωτικών δικαιωμάτων διοξειδίου του άνθρακα στην παγκόσμια αγορά.

Φιλιππίνες

Οι Φιλιππίνες είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος παραγωγός στον κόσμο της γεωθερμικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με εγκατεστημένη ισχύ των 1904 MW.

Υπήρξε μια μικρή αύξηση από το 2005, με το 49 MW εργοστάσιο παραγωγής στο Negros που θα λειτουργεί με συμβάσεις προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ PNOC-EDC και συνεταιρισμούς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η γεωθερμική περιοχή είναι οι εξής:

- Che-Man: ένα μικρό 1,5 MW, δύο μονάδες για 55 MW και δύο για 20 MW, για συνολικά 151,5 MW.
- Leyte: πέντε flash (661,5 MW), και 3 δυαδικά συστήματα παραγωγής συνολικής δυναμικότητας 61 MW, με τη συνολική ανάκτηση ενέργειας από το γεωθερμικό πεδίο και τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ στα 723 MW.
- Mak-Ban: 10 μονάδες flash και μια 15,7 MW δυαδική μονάδα, για συνολικά 458 MW.
- Mintanao: δύο μονάδες flash με ισχύ 104 MW συνολικά.
- Negros: πέντε μονάδες flash για 192,5 MW. Ένα έργο αύξησης ισχύος με 20 MW δυαδικού κύκλου είναι υπό ανάπτυξη.



Leyte Binary Plant

Πορτογαλία

Στην Πορτογαλία, η εκμετάλλευση των γεωθερμικών πηγών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει αναπτυχθεί με επιτυχία για το μεγαλύτερο και πολυπληθέστερο νησί των Αζορών, Sao Miguel.

Τίβι: πέντε μονάδες flash για 289 MW.

Μια δεύτερη μονάδα δυαδικού συστήματος στο Pico Vermelho των 10 MW έχει εγκατασταθεί, με αποτέλεσμα η συνολική δυναμικότητα στο νησί αυτή τη στιγμή να είναι 23 MW, με αύξηση 44%.



Ribeira Grande, Αζόρες, Πορτογαλία Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εγκατεστημένη ισχύς 14 MWe

Το μερίδιο της ανανεώσιμης ενέργειας στο Sao Miguel είναι σήμερα 43%. Στο νησί Terceira ένα σχέδιο για την εγκατάσταση 12 MW βρίσκεται σε εξέλιξη.



Ribeira Grande Binary Plant

Ο στόχος RES-E για την Πορτογαλία το 2010 ανέρχεται σε 39% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Υπήρξε μια απότομη μείωση μεταξύ του 1997 (38%) και 2004 (24%).

Ρωσία

Οι γεωθερμικές πηγές της χώρας βρίσκονται στην χερσόνησο Καμπσάτκα και ορισμένες μικρές εγκαταστάσεις στα νησιά Kurili. Ωστόσο, τα σχέδια για την κατασκευή δυαδικού κύκλου στο Verkhne-Mutnovsky 6,5 MW, και 100 MW στο Mutnovsky είναι υπό ανάπτυξη. Μια νέα μονάδα 45 MW είναι επίσης σε πρώιμο στάδιο κατασκευής στο Germencik, με δυνατότητα επιπλέον επέκτασης 45 MW.



Salavatli Binary Plant



Verkhne-Mutnovsky Binary Plant

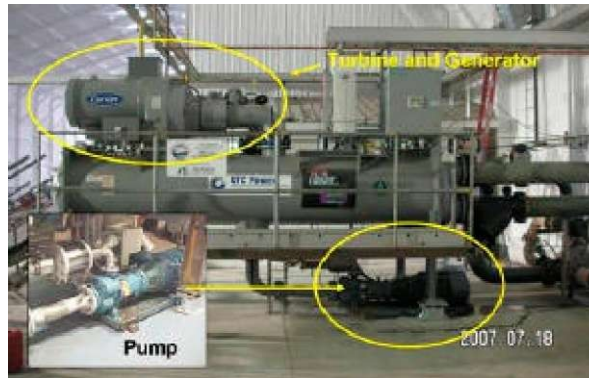
ΗΠΑ

Οι γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής βρίσκονται σε Αλάσκα, Καλιφόρνια, Νεβάδα, Γιούτα και τη Χαβάη. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της χώρας είναι 3.903 MW, αλλά με μόνο 1.935 MW στην πραγματικότητα να λειτουργούν. Συνολικά 130 MW είναι υπό κατασκευή.

- **Αλάσκα**

Το πρώτο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην κατάσταση αυτή είχε εγκατασταθεί το 2006, στο Chena Hot Springs. Είναι δυαδικού

κύκλου, που παράγει 200 kW από τα πιο κρύα γεωθερμικά ρευστά σε όλο τον κόσμο: μόνο 74 ° C.



Chena Binary Plant.

- Καλιφόρνια
Οι γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής αναγράφονται ως εξής:
 - Στο Geyser: 22 μονάδες ξηρού ατμού, συνολικά 1531 MW εγκατεστημένη ισχύς (αλλά μόνο 932 MW λειτουργούν).
 - Imperial Valley-East Mesa, με 70 μονάδες για 100 MW εγκατεστημένης ισχύος.
 - Imperial Valley - Heber, 94 MW εγκατεστημένης ισχύος με 14 μονάδες.
 - Imperial Valley-Salton, με 10 μονάδες για 327 MW.
 - Coso, 9 μονάδες για εγκατεστημένη ισχύ 270 MW.
 - Άλλοι, με 29 επιπλέον MW.



Long Valley Caldera, Sierra Nevada Καλιφόρνια, Η.Π.Α.

4 μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συνολική εγκατεστημένη ισχύς

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της πολιτείας είναι 2351 MW (1715 MW λειτουργούν). Η γεωθερμική ενέργεια παράγει το 5% της ηλεκτρικής παραγωγής της Καλιφόρνια, συνολικά 14.000 GWh / έτος.

Οι μελλοντικές επενδύσεις έχουν προγραμματιστεί στη Βόρεια Καλιφόρνια, στο Γυάλινο Βουνό: 50 MW στο Fourmile Hill, και 18 επιπλέον MW δυαδικό στο Ever.

Μια νέα μονάδα στο Salton για 185 MW, έχει ανακοινωθεί. Ένα πρόγραμμα εξερεύνησης στη Surprise Valley, που αποσκοπεί σε μια δυαδική παραγωγή των 45 MW έχει ξεκινήσει από την Enel.

- Χαβάη

Δεν υπάρχουν νέες προσθήκες στο υπάρχον δυναμικό των 10 μονάδων flash και δυαδικών, των 35 MW (30 MW σε λειτουργία) που έχουν κατασκευαστεί μέχρι το 2005. Αυτή η μονάδα παραγωγής ενέργειας παρέχει περίπου το 20% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζεται το μεγάλο νησί (160.000 κάτοικοι). Επιπλέον 8 MW με επεκτάσεις έχει επίσης προγραμματιστεί.

- Νεβάδα

Ένα νέο 30 MW δυαδικό εργοστάσιο στο Galena έχει ανατεθεί, με δύο ακόμη μονάδες που σχεδιάζονται από την Ormat, για επιπλέον 25 MW. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς για την πολιτεία είναι 275 MW (240 MW σε λειτουργία). Στο Stillwater και στο Salt Wells, παραγωγή επιπλέον 40 MW έχουν προγραμματιστεί. Στο Steamboat Hills ένα 12 MW δυαδικού κύκλου έχει επίσης προγραμματιστεί. Περαιτέρω επεκτάσεις προβλέπονται για το Desert Peak (30 MW).

- Γιούτα

Το εργοστάσιο παραγωγής του Fort Cove έχει κλείσει. Η μόνη υπάρχουσα μονάδα στην πολιτεία είναι στο Ρούζβελτ, με 26 MW εγκατεστημένης ισχύος. Επιπλέον 11 MW έχουν δρομολογηθεί. Η Enel εγκαινίασε την εγκατάσταση δυαδικού συστήματος στο Fort Cove, με 25 MW το 2009 και

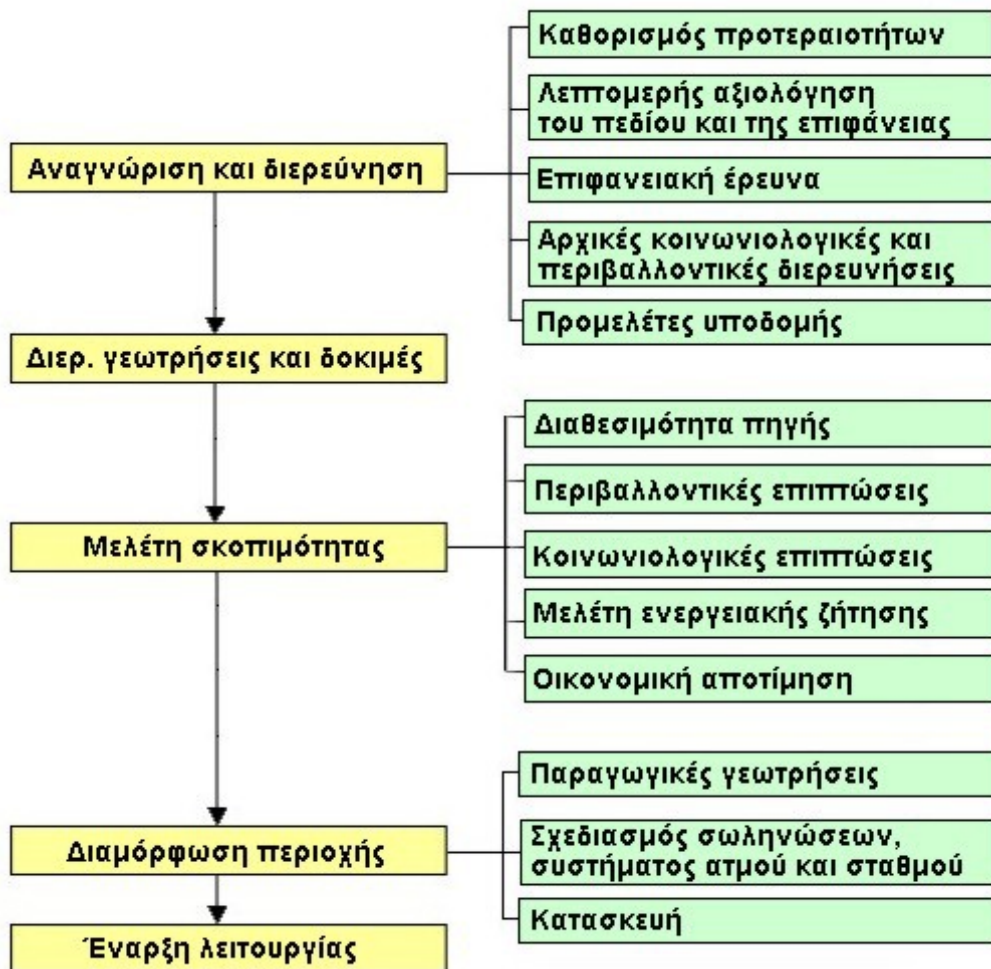
επιπλέον 40 MW το 2011. 30 MW δυαδικού συστήματος είναι υπό κατασκευή σε Fallon (Naval Air Station).

Τουρκία

Από το 2005 πολλές κατασκευαστικές δραστηριότητες έχουν διεξαχθεί. Τρία νέα δυαδικού συστήματος των 8 MW το καθένα έχουν υλοποιηθεί, δύο για την εκμετάλλευση μέσης ενθαλπίας ταμιευτήρα και μία δυαδικού κύκλου χρησιμοποιώντας τα διαχωρισμένα ρευστά από το εργοστάσιο παραγωγής του Kizildere, πριν από τη χρήση του για τηλεθέρμανση. Μια δεύτερη μονάδα έχει προστεθεί, φθάνοντας τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ των 400 kW. Στο τέλος της κατασκευαστικής δραστηριότητας, συνολικά 1 MW θα εγκατασταθούν.

4. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Όπως συμβαίνει με όλα τα μεγάλου μεγέθους έργα, τα σχετικά με τη γεωθερμία έργα αναπτύσσονται ακολουθώντας μία σειρά λογικών σταδίων, τα οποία συνοψίζονται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 9. Κανονικά, οι αποφάσεις για τη μετάβαση στα επόμενα στάδια λαμβάνονται σταδιακά καθ' όλη την πορεία του έργου.



Σχήμα 9. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας ανάπτυξης των γεωθερμικών έργων

4.1. Αναγνώριση και διερεύνηση

Οι γεωθερμικές πηγές συνήθως εντοπίζονται και καθορίζονται από ένα κλιμακούμενο πρόγραμμα εντατικότερης (και πιο δαπανηρής) διερεύνησης που οδηγεί τελικά σε μία σειρά γεωτρήσεων για να περιγραφεί με βεβαιότητα η πηγή. Από τις αναγνωριστικές έρευνες θα προσδιοριστούν οι καταλληλότερες πιθανές περιοχές με την αναγνώριση του ευνοϊκού γεωλογικού τοπίου και τον εντοπισμό οιονδήποτε θερμών πηγών ή άλλης θερμικής επιφανειακής εκδήλωσης. Οι αναγνωριστικές μελέτες περιλαμβάνουν τη χαρτογράφηση κάθε θερμής πηγής ή άλλων επιφανειακών θερμικών ιδιομορφιών και τον προσδιορισμό των ευνοϊκών γεωλογικών δομών.

Η χημική σύσταση των εκβαλλόμενων ρευστών αποκαλύπτει πληροφορίες για τον βαθύτερο ταμιευτήρα, π.χ. για τη θερμοκρασία και τα χαρακτηριστικά του ρευστού. Οι γεωλογικές μελέτες παρέχουν πληροφορίες για την πιθανή κατανομή και έκταση των υδροφόρων οριζόντων, καθώς και για το πιθανό καθεστώς της θερμικής πηγής και της ροής θερμότητας. Οι περιοχές που προσδιορίζονται ως έχουσες υψηλό δυναμικό ή ευνοούνται λόγω της εγγυτητάς τους σε κάποιο κέντρο χρήσης της ενέργειας θα διερευνηθούν με πιο αναλυτικές επιστημονικές μεθόδους.

Πέρα από τις λεπτομερείς γεωλογικές και γεωχημικές μελέτες, μπορεί να εφαρμοσθεί μία σειρά γεωφυσικών τεχνικών περιλαμβανομένων των ερευνών ειδικής αντίστασης, βαρύτητας και μαγνητισμού. Η διερεύνηση της ειδικής αντίστασης, ειδικότερα, μπορεί να εντοπίσει ανωμαλίες άμεσα συνδεδεμένες με την παρουσία γεωθερμικών ρευστών. Η ερμηνεία όλων αυτών των μελετών οδηγεί στον καθορισμό προτεραιοτήτων για τους στόχους των προγραμμάτων ερευνητικών γεωτρήσεων. Με την εφαρμογή της ενδεδειγμένης επιστημονικής μεθόδου και ανάλυσης κατά τις αρχικές αυτές φάσεις αυξάνεται η πιθανότητα επιτυχίας των επακόλουθων γεωτρήσεων και αναπτύξεων.

Εάν από τη διερεύνηση προκύψουν πολύ καλές ενδείξεις για την παρουσία χρήσιμου θερμικού ταμιευτήρα, η πηγή εξετάζεται με τη διάνοιξη ερευνητικών γεωτρήσεων έτσι ώστε να μπορέσουν να μετρηθούν οι πραγματικές υπεδάφειες θερμοκρασίες και να δοκιμαστεί η παραγωγικότητα του ταμιευτήρα. Συνεπώς, το πρόγραμμα διερεύνησης πρέπει να σχεδιάζεται ώστε να αναδειχθεί τελικά ο αναμενόμενος τύπος

της πηγής, η ποσότητα της ενέργειας που αναμένεται να παραχθεί από το έργο και το χρονικό πλαίσιο της ανάπτυξης.

Εξάλλου, πολλά γεωθερμικά πεδία με προοπτικές βρίσκονται σε μακρινές θέσεις και συχνά σε ενεργές ηφαιστειακές περιοχές των αναπτυσσόμενων χωρών. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι απαιτήσεις για υποδομές μπορεί να είναι μεγάλες και, πιθανότατα, δαπανηρές. Σ' αυτές μπορεί να περιλαμβάνονται έργα οδοποιίας, γέφυρες, λιμενικές εγκαταστάσεις και επικοινωνίες, ενώ, εάν υλοποιηθεί το έργο, εν συνεχεία οι δαπάνες δικτύωσης για τη διανομή της ισχύος μπορεί να είναι πολύ υψηλές.

4.2 Διερευνητική γεώτρηση

Τα αποτελέσματα των διάφορων διερευνητικών γεωλογικών δραστηριοτήτων που περιγράφονται παραπάνω, στην πλειοψηφία των έργων ανάπτυξης της γεωθερμίας οδηγούν σε μια φάση διερευνητικών γεωτρήσεων. Τα γεωθερμικά φρέατα, είτε είναι διερευνητικά είτε παραγωγικά, διανοίγονται με τη χρήση τεχνολογιών περιστροφικής γεώτρησης που έχουν υιοθετηθεί κατά μεγάλο μέρος από τη βιομηχανία πετρελαίου, και σε μικρότερη κλίμακα από τις έρευνες για νερό και ορυκτά. Οι τεχνολογίες αυτές τροποποιούνται ώστε να αντεπεξέρχονται στις σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες και τα χαρακτηριστικά των σχηματισμών πετρωμάτων που απαντώνται.

Συνήθως, τα γεωθερμικά φρέατα διανοίγονται σε βάθη που κυμαίνονται από 200 έως 1500m για τα πεδία χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας, και από 700 έως 3000m περίπου βάθος για τα πεδία υψηλής θερμοκρασίας. Οι γεωτρήσεις διανοίγονται με γεωτρύπανο σε μία σειρά από στάδια, όπου το κάθε στάδιο έχει μικρότερη διάμετρο από το προηγούμενο, και καθένα από αυτά κλείνεται με χαλύβδινα πλαίσια, τα οποία τσιμεντάρονται επί τόπου πριν τη διάνοιξη του επόμενου σταδίου. Το τελικό τμήμα/τα της γεώτρησης κλείνεται με ένα μη τσιμενταρισμένο διάτρητο χιτώνιο. Η διάταξη μιας τυπικής γεωθερμικής γεώτρησης μπορεί να είναι κατακόρυφη (ευθεία) ή κεκλιμένη.

Στόχος αυτής της φάσης είναι να αποδειχθεί η ύπαρξη μιας εκμεταλλεύσιμης πηγής και να προδιαγραφούν η έκταση και τα χαρακτηριστικά της. Ένα πρόγραμμα διερευνητικών γεωτρήσεων μπορεί να περιλάβει φρέατα αβαθούς θερμοκρασιακής κλίσης, φρέατα διερεύνησης "λεπτής οπής", και παραγωγικού μεγέθους φρέατα

διερεύνησης. Ο αριθμός και ο τύπος των γεωτρήσεων που θα περιληφθούν σε ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα καθορίζονται από το μέγεθος και το στόχο του έργου.

Τα φρέατα θερμοκρασιακής κλίσης διανοίγονται με τρυπάνια συχνά σε βάθη που κυμαίνονται από 2 έως 200m (σε σπάνιες περιπτώσεις μέχρι 500m βάθος) και με διάμετρο από 50 έως 150mm. Τα φρέατα διερεύνησης κυμαίνονται από 200 έως 3000m βάθος, με διάμετρο τελικής οπής από 100 έως 220mm. Τα φρέατα αυτά πρέπει να διανοίγονται με μια εξέδρα γεώτρησης πλήρως εξοπλισμένη ώστε να λειτουργεί υπό τις συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης της πηγής.

Η στρατηγική των διερευνητικών γεωτρήσεων περιλαμβάνει τη διάνοιξη τριών έως πέντε φρεάτων, ανάλογα με το μέγεθος του προγραμματισμένου έργου. Τα συνήθη κόστη των φρεάτων "λεπτής οπής" κυμαίνονται από \$250 έως \$1000 ανά μέτρο βάθους, δηλαδή απαιτείται ποσό \$450.000 έως \$1.000.000 για ένα φρέαρ με βάθος 1500m. Στα μεγαλύτερα έργα τα φρέατα διανοίγονται κάθετα ή με εκτροπή της κατεύθυνσης από επιμέρους εξέδρες γεώτρησης, ενώ τα μικρότερα έργα μπορεί να χρησιμοποιούν μία εξέδρα γεώτρησης και φρέατα με εκτροπή της κατεύθυνσης.

4.3 Μελέτη σκοπιμότητας (Feasibility study)

Οι λεπτομερείς αποτιμήσεις της πηγής και οι μελέτες σκοπιμότητας ενοποιούν τις πληροφορίες από τις έρευνες επιφανείας και τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων ώστε να εκτιμηθεί η βιώσιμη παραγωγική ικανότητα ενός ταμιευτήρα με τη χρήση της υφιστάμενης τεχνολογίας ανάπτυξης. Άλλες μελέτες περιλαμβάνουν εκτιμήσεις:

- των δαπανών για υποδομές,
- της ζήτησης ισχύος,
- του κόστους των σχετικών με την προετοιμασία της θέσης, την εγκατάσταση και την εκκίνηση της λειτουργίας εργασιών μηχανικού,
- των σχετικών περιβαλλοντικών και κοινωνιολογικών προγραμμάτων και δαπανών,
- των απαιτούμενων οδών, κτηρίων και υπηρεσιών,
- της διαδικτύωσης και σύνδεσης με τα δίκτυα.

Εξάλλου, στη φάση αυτή πρέπει να λάβει χώρα ο προκαταρκτικός σχεδιασμός των συστημάτων και των σωληνώσεων συλλογής του ατμού, αλλά και να γίνει η επιλογή της τεχνολογίας, του μεγέθους και της σχεδίασης του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής.

Το κόστος των γεωθερμικών εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής βαρύνεται πολύ με τις αρχικές δαπάνες. Η διάνοιξη των φρεάτων και η κατασκευή των σωληνώσεων αρχίζουν πριν από την κατασκευή της μονάδας, ενώ για το σχεδιασμό του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής είναι αναγκαία η πληροφορία για την πηγή από τη γεώτρηση.

Η τελική ανάπτυξη του πεδίου ολοκληρώνεται μαζί με τη μονάδα. Οι σχετικές με την κατασκευή και λειτουργία ενός γεωθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής δαπάνες ποικίλλουν ευρέως και εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι:

- ο τύπος της πηγής (ατμός ή ζεστό νερό),
- η θερμοκρασία της πηγής,
- η παραγωγικότητα του ταμιευτήρα,
- το μέγεθος της εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής (διαβάθμιση),
- ο τύπος της μονάδας ηλεκτροπαραγωγής (μονοβάθμιας ακαριαίας ατμοποίησης, δυαδικού κύκλου, κλπ.),
- οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί,
- το κόστος του κεφαλαίου,
- το κόστος των εργατικών.

Οι τρεις πρώτοι παράγοντες επηρεάζουν τον αριθμό των γεωτρήσεων που πρέπει να διανοιχτούν για μια δεδομένη ισχύ της εγκατάστασης. Με βάση τις συνήθεις δαπάνες και το δυναμικό ισχύος των παραγωγικών γεωτρήσεων, μία μόνο γεώτρηση μπορεί να κοστίσει \$100-400/kW. Οι επόμενοι τρεις παράγοντες καθορίζουν το κόστος του συστήματος μετατροπής της ενέργειας, και οι δύο τελευταίοι το κόστος λειτουργίας της μονάδας, δηλ. την εξόφληση των οφειλών και τη λειτουργία και συντήρηση (Λ&Σ). Ο πίνακας 2 συνοψίζει την επίδραση της ονομαστικής ισχύος και της θερμοκρασίας της πηγής στο κόστος του σταθμού για τις μικρού μεγέθους δυαδικές μονάδες.

**Πίνακας 2. Κόστη κεφαλαίου και Λ&Σ για μικρές γεωθερμικές μονάδες
δυαδικού κύκλου**

Καθαρή ισχύς (kW)	Θερμοκρασία πηγής (oC)			Συνολικό κόστος Λ&Σ (\$/έτος)
	100	120	140	
	Κύριο κόστος (\$/kW)			
100	2.535	2.210	2.015	19.100
200	2.340	2.040	1.860	24.650
500	2.145	1.870	1.705	30.405
1.000	1.950	1.700	1.550	44.000

Οι δαπάνες κεφαλαίου ανά kW μεταβάλλονται αντιστρόφως προς τη θερμοκρασία και την ονομαστική ισχύ, ενώ οι ετήσιες δαπάνες Λ&Σ (οι οποίες κυμαίνονται από 1,5 έως 4,5 cents ανά παραγόμενη kWh) αυξάνονται με την ονομαστική ισχύ αλλά δεν εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του ρευστού (στο παρουσιαζόμενο εύρος). Αυτές οι δαπάνες είναι ευμενείς όταν συγκρίνονται με αυτές των άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και είναι απολύτως ευμενείς για τις απομακρυσμένες τοποθεσίες όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται συνήθως από ντιζελομηχανές.

Οι δαπάνες Λ&Σ για τις γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής εξαρτώνται επίσης από τη συμβατική τιμή του ηλεκτρισμού. Δηλαδή, η υψηλότερη τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας καθιστά σημαντικό το να παραμένει εν λειτουργία ο σταθμός όσο το δυνατό πλησιέστερα στο 100% του χρόνου, και τότε δικαιολογούνται οι υψηλότερες δαπάνες συντήρησης. Οι περισσότερες γεωθερμικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής έχουν συντελεστή διαθεσιμότητας άνω του 90% (δηλ. μπορούν να παράγουν ηλεκτρισμό πάνω από το 90% του χρόνου), αλλά όταν οι συντελεστές διαθεσιμότητας ανέρχονται στο 97 ή 98% μπορεί αυτές να είναι πολύ πιο δαπανηρές.

Οι τρεις πιο βασικές παράμετροι όσον αφορά το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι το μέγεθος της εγκατάστασης, η θερμοκρασία της πηγής και το βάθος του παραγωγικού φρέατος. Προφανώς, το κόστος αυτό μειώνεται με την αύξηση των τιμών των πρώτων δύο από τις ανωτέρω παραμέτρους, ενώ αυξάνεται (σχεδόν γραμμικά) με την αύξηση του βάθους του παραγωγικού φρέατος. Στον πίνακα 3 παρουσιάζεται το σύνηθες κόστος της μονάδας ισχύος από γεωθερμικούς σταθμούς,

βάσει ενός προεξοφλητικού επιτοκίου 10% και για συντελεστή δυναμικού 90% (για έργα που κατασκευάζονται σε αναπτυσσόμενες χώρες).

Πίνακας 3. Κόστος της μονάδας ισχύος (σε cents/kWh) από τρεις κύριους τύπους γεωθερμικών μονάδων

	<i>Πηγή Υψηλής Ποιότητας</i>	<i>Πηγή Μέτριας Ποιότητας</i>	<i>Πηγή Χαμηλής Ποιότητας</i>
Μικρές μονάδες (<5 MW)	5,0 - 7,0	5,5 - 8,5	6,0 - 10,5
Μέσες μονάδες (5-30 MW)	4,0 - 6,0	4,5 - 7,0	Μη κατάλληλη
Μεγάλες μονάδες (>30 MW)	2,5 - 5,0	4,0 - 6,0	Μη κατάλληλη

Με το μοναδιαίο κόστος παραγωγής από ντίζελ να κυμαίνεται από 10 μέχρι και 20 cents/kWh, η γεωθερμική ενέργεια αποτελεί πολύ ελκυστική επιλογή, ειδικά για τις απομακρυσμένες εκτός δικτύου περιοχές και τα μικρά νησιά, όπου η παραγωγή από ντίζελ είναι συχνά η μόνη λύση. Εξάλλου, μπορεί να είναι ελκυστική η άμεση χρήση του απορριπτόμενου από την ηλεκτροπαραγωγή νερού χαμηλής θερμοκρασίας και είναι προς όφελος της ανάπτυξης ολόκληρης της μονάδας η δυνατότητα αυτή να εκτιμηθεί σε αρχικό στάδιο, ώστε η όποια ρύθμιση να μπορέσει να ενσωματωθεί στα σχέδια των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας-ατμού του πεδίου.

4.4. Ανάπτυξη

4.4.1. Παραγωγική γεώτρηση

Ως απόληξη μιας επιτυχούς φάσης διερεύνησης, μπορεί να αναληφθεί άμεσα ή μετά από την ολοκλήρωση μιας πιο μακροπρόθεσμης περιόδου δοκιμών της πηγής και μελετών σκοπιμότητας η δέσμευση ανάπτυξης μιας αρχικής φάσης παραγωγής ενός έργου. Θα αναπτυχθεί μία στρατηγική παραγωγικών γεωτρήσεων με βάση το φρέαρ διερεύνησης και δεδομένα της πηγής, από την οποία θα προκύψουν οι θέσεις των γεωτρήσεων, οι κατατομές των οπών και των πλαισίων, και μια αλληλουχία για τις γεωτρήσεις. Οι θέσεις των γεωτρήσεων διατάσσονται έτσι ώστε να αποφεύγονται οι

παρεμβολές μεταξύ των φρεάτων και συνήθως είναι τέτοιες ώστε οι παραγωγικές ζώνες κάθε φρέατος να διαχωρίζονται από μία απόσταση 300 έως 500m.

Προφανώς απαιτούνται πλήρως εξοπλισμένες για γεωθερμική παραγωγή εξέδρες γεώτρησης διαστασιολογημένες στο μέγεθος του παραγωγικού φρέατος. Η σχεδίαση των παραγωγικών φρεάτων και η διαδικασία γεώτρησης είναι παρόμοιες με αυτές που υλοποιούνται κατά τη διερευνητική φάση του έργου, όπως περιγράφηκε ήδη. Εντούτοις, στην περίπτωση όπου αντιμετωπίζονται πολύ υψηλές διαπερατότητες του ταμιευτήρα, μπορεί να απαιτούνται φρέατα μεγάλης διαμέτρου. Η διάνοιξη τέτοιων φρεάτων είναι συνήθης σε ταμιευτήρες όπου υπερισχύει ο ατμός, όπως είναι το γεωθερμικό πεδίο Darajat στην Ινδονησία.

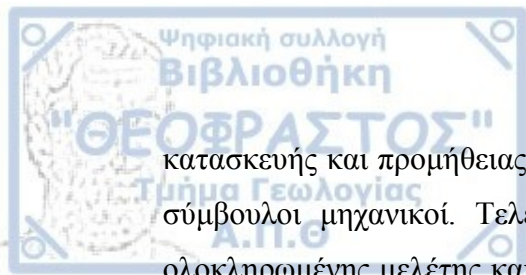
Το κόστος των παραγωγικών γεωτρήσεων είναι σε γενικές γραμμές το ίδιο με αυτό που αναφέρθηκε παραπάνω για τα φρέατα διερεύνησης/παραγωγής, εντούτοις είναι σύνηθες να υπεισέρχεται κάποια μείωση σ' αυτά τα κόστη καθώς αποκτάται εμπειρία σε κάθε πεδίο. Η διάνοιξη ενός παραγωγικού φρέατος μεγάλης διαμέτρου συνήθως είναι περίπου 20% πιο ακριβή από ενός φρέατος τυποποιημένου μεγέθους. Ανάλογα με τη φύση της πηγής, θα απαιτηθεί επίσης ένας αριθμός φρεάτων επανέγχυσης.

4.4.2. Σχεδίαση του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής

Από μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των μελετών των πηγών, των περιβαλλοντικών και κοινωνιολογικών επιπτώσεων, του δυναμικού παραγωγής και της ζήτησης ισχύος σχεδιάζεται μια κατάλληλα διαστασιολογημένη εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής. Στη σχεδίαση, η οποία πέραν του σταθμού περιλαμβάνει ακόμη τις σωληνώσεις και τα συστήματα συλλογής του ατμού, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ένα ευρύ φάσμα παραγόντων, όπως η θερμοκρασία της πηγής, η χημεία και η περιεκτικότητα σε αέρια του ρευστού, και το κατάλληλο μέγεθος της μονάδας. Οι μεταβλητές σχεδίασης βελτιστοποιούνται για να εξασφαλιστεί ότι οι σχεδιαστικές λύσεις που επιλέγονται είναι οι πιο οικονομικά αποτελεσματικές και ενεργειακά αποδοτικές.

4.4.3. Κατασκευή και εκκίνηση λειτουργίας

Ένα γεωθερμικό έργο μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Παραδοσιακά, τα γεωθερμικά έργα αναπτύσσονταν μέσω ενός αριθμού ξεχωριστών συμβάσεων



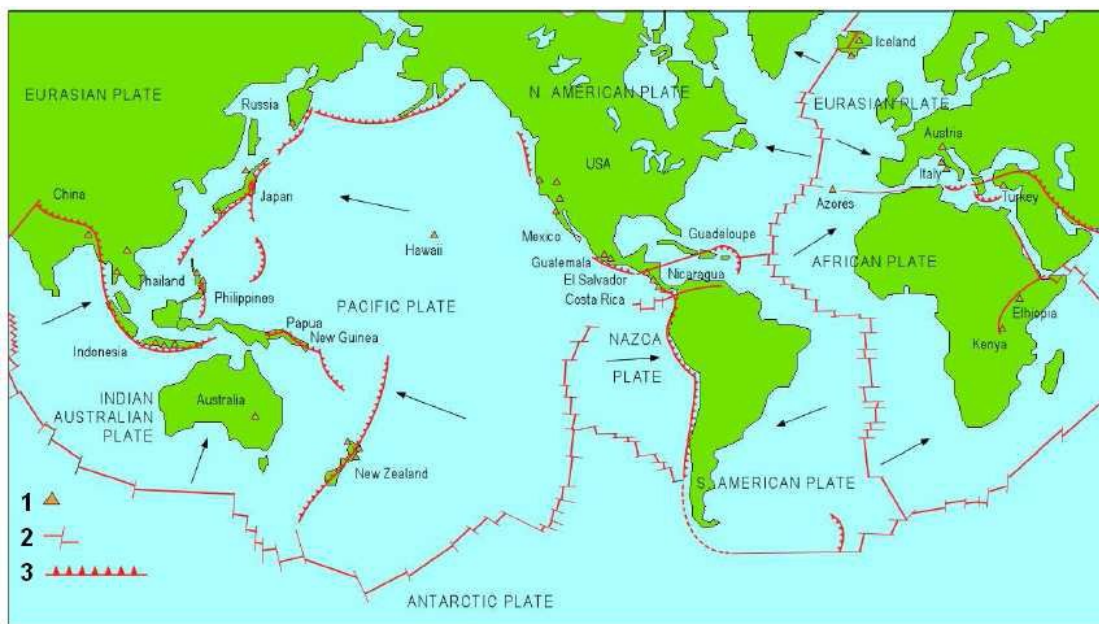
κατασκευής και προμήθειας, ενώ το σχεδιασμό και τη διαχείριση τους αναλάμβαναν σύμβουλοι μηχανικοί. Τελευταία, η τάση είναι να εφαρμόζεται η μέθοδος της ολοκληρωμένης μελέτης και εκτέλεσης ("με το κλειδί στο χέρι"). Τα πλεονεκτήματά της είναι ότι παρέχει μεγαλύτερο περιθώριο για καινοτομία στους προμηθευτές, μειώνει τους κινδύνους υπέρβασης του κόστους και, το πιο σημαντικό, αποδίδει την ευθύνη και την υπαιτιότητα για την απόδοση της μονάδας σε μία οντότητα.

Συχνά, αυτός ο τύπος μεθόδου υλοποίησης είναι επωφελής, καθώς δύναται να προσελκύσει χρηματοδότηση για το έργο. Ένα παράδειγμα χρηματοδοτούμενου γεωθερμικού έργου που κατασκευάστηκε με τη μέθοδο υλοποίησης με πολλαπλές συμβάσεις είναι ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής στο Kamojang της δυτικής Ιάβας (βλ. περίπτωση εφαρμογής). Πάντως, οι πιο πρόσφατες γεωθερμικές αξιοποιήσεις στην Ινδονησία, όπως στο Salak και το Wayang Windu, έχουν κατασκευαστεί με χρήση της μεθόδου ολοκληρωμένης μελέτης και εκτέλεσης.

5. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1. Παγκόσμια κατανομή της γεωθερμικής ενέργειας

Οι άνθρωποι έχουν χρησιμοποιήσει τη γεωθερμική ενέργεια για πολλούς αιώνες σε εφαρμογές όπως είναι η θέρμανση χώρων και νερού, το μαγείρεμα, και τα ιαματικά λουτρά. Ο πρώτος γεωθερμικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής κατασκευάστηκε το 1904 στο Larderello της Ιταλίας, είχε ονομαστική ισχύ 250 kW και χρησιμοποιούσε γεωθερμικό ατμό για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Ο δεύτερος γεωθερμικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής κατασκευάστηκε τη δεκαετία του '50 στο Wairakei της Νέας Ζηλανδίας, και ακολούθησαν τα Geysers της Καλιφόρνιας στη δεκαετία του '60. Σήμερα υπάρχει ένα τεράστιο δυναμικό από γεωθερμικές πηγές παγκοσμίως.



Σχήμα 10. Γεωθερμικά πεδία, τεκτονικές πλάκες, μεσοωκεάνιες ράχες, ωκεάνιες τάφροι και ζώνες καταβύθισης. Γεωθερμικά πεδία όπου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.

Για να γίνει αντιληπτή η συμμετοχή της γεωθερμικής ενέργειας, αναφέρεται ότι αυτό το δυναμικό αντιστοιχεί στο 0,4% περίπου του συνολικά εγκατεστημένου δυναμικού παραγωγής παγκοσμίως. Οι κυριότεροι χρήστες της γεωθερμίας (άμεσα και έμμεσα)

είναι οι ΗΠΑ, οι Φιλιππίνες, η Ιταλία, το Μεξικό, η Ισλανδία, η Ινδονησία, η Ιαπωνία και η Νέα Ζηλανδία. Στο πίνακα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ισχύς εφαρμογών άμεσης αξιοποίησης της γεωθερμίας και η αντίστοιχη ενεργειακή παραγωγή και χρήση σε παγκόσμια κλίμακα για το έτος 2000 και 2010. Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι όλα τα δεδομένα που αφορούν το 2010 και παρατίθενται πιο κάτω αναφέρονται σε στοιχεία που έχουν προκύψει από το πρώτο τρίμηνο του έτους.

Στον πίνακα 5 αναφέρονται οι χώρες που χρησιμοποιούν τη γεωθερμική ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρισμού, η εγκατεστημένη γεωθερμική-ηλεκτρική ισχύς κάθε μίας για το 1990, 1995, 2000, 2005 και 2010 καθώς και η συνολική παγκόσμια ισχύς για τα έτη αυτά. Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι η εγκατεστημένη γεωθερμική-ηλεκτρική ισχύς στις αναπτυσσόμενες χώρες το 1995 και το 2000 αντιπροσώπευε αντίστοιχα το 38% και το 47% αντίστοιχα της συνολικής εγκατεστημένης γεωθερμικής ισχύος παγκοσμίως.

Πίνακας 4. Παγκοσμίως εγκατεστημένο γεωθερμικό δυναμικό από άμεσες χρήσεις ανά χώρα [Ισχύς (σε MW) και ενεργειακή χρήση (σε TJ/έτος)]

	2000		2010	
ΧΩΡΑ	ΙΣΧΥΣ (MW)	ΠΑΡΑΓΩΓΗ (TJ / ΕΤΟΣ)	ΙΣΧΥΣ (MW)	ΠΑΡΑΓΩΓΗ (TJ / ΕΤΟΣ)
Αίγυπτος	1	15	1	15
Αιθιοπία	-	-	2,2	42
Αλβανία	-	-	11	40
Αλγερία	100	1.586	56	1.723
Αργεντινή	25,7	449	307	3.907
Αρμενία	1	15	1	15
Αυστραλία	34,4	351	33	235
Αυστρία	255,3	1.609	663	3.728
Βιετνάμ	-	-	31	92
Βέλγιο	3,9	107	118	547
Βενεζουέλα	0,7	14	0,7	14
Βοσνία-Ερζεγοβίνη	-	-	22	255
Βουλγαρία	107,2	1.637	98	1.370
Βραζιλία	-	-	360	6.622
Γαλλία	326	4.895	1.345	12.929
Γερμανία	397	1.568	2.485	12.765
Γεωργία	250	6.307	25	659
Γουατεμάλα	4,2	117	2,3	56
Δανία	7,4	75	200	2.500

Εκουαδór	-	-	5,2	102
Ελβετία	547,3	2.386	1.061	7.715
Ελλάδα	57,1	385	135	938
Ελ Σαλβαδór	-	-	2	40
Εσθονία	-	-	63	356
Ηνωμένο Βασίλειο	2,9	21	187	850
Η.Π.Α.	3.766	20.302	12.611	56.552
Ιαπωνία	1.167	26.933	2.100	25.698
Ινδία	80	2.517	265	2.545
Ινδονησία	2,3	43	2,3	43
Ιορδανία	153,3	1.540	153	1.540
Ισλανδία	1.469	20.170	1.826	24.361
Ισπανία	-	-	141	684
Ισραήλ	63,3	1.713	82	2.193
Ιράν	-	-	42	1.064
Ιρλανδία	-	-	153	765
Ιταλία	325,8	3.774	867	9.941
Καναδάς	377,6	1.023	1.126	8.873
Κένυα	1,3	10	16	127
Κίνα	2.282	37.908	8.898	75.348
Κολομβία	13,3	266	14	287
Κόστα Ρίκα	-	-	1	21
Ν.Κορέα	35,8	753	229	1.955
Κροατία	113,9	555	67	469
Λετονία	-	-	1,6	32
Λευκορωσία	-	-	3,4	34
Λιθουανία	21	599	48	412
Μαρόκο	-	-	5	79
Μεξικό	164,2	3.919	156	4.023
Μογγολία	-	-	6,8	213
Νέα Ζηλανδία	307,9	7.081	393	9.552
Νεπάλ	1,1	22	2,7	74
Νορβηγία	6	32	3.300	25.200
Νότιος Αφρική	-	-	6	115
Νησιά Καραϊβικής	0,1	1	0,1	2,8
Ολλανδία	10,8	57	1.410	10.699
Ονδούρα	0,7	17	1,9	45
Ουγγαρία	472,7	4.086	655	9.767

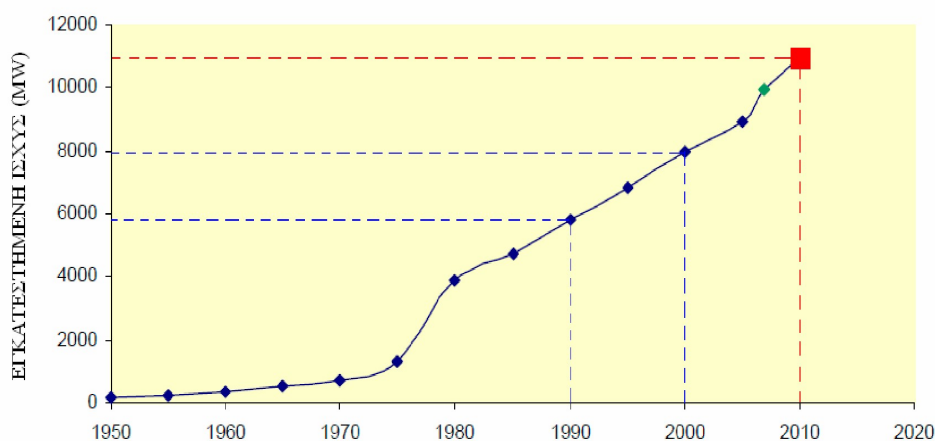
Ουκρανία	-	-	11	119
Παπούα-Ν.Γουϊνέα	-	-	0,1	1
Π.Γ.Δ.Μ.	81,2	510	47	601
Περσική	2,4	49	2,4	49
Πολωνία	68,5	275	281	1.501
Πορτογαλία	5,5	35	28	386
Ρουμανία	152,4	2.871	153	1.265
Ρωσία	308,2	6.144	308	6.144
Σερβία	80	2.375	101	1.410
Σλοβακία	132,3	2.118	132	3.067
Σλοβενία	42	705	105	1.153
Σουηδία	377	4.128	4.460	45.301
Ταϊλάνδη	0,7	15	2,5	79
Τατζικιστάν	-	-	2,9	55
Τουρκία	820	15.756	2.084	36.886
Τσεχία	12,5	128	152	922
Τυνησία	23,1	201	44	364
Υεμένη	1	15	1	15
Φιλανδία	80,5	484	858	8.370
Φιλιππίνες	1	25	3,3	40
Χιλή	0,4	7	9,1	132
Σύνολο	15.145	190.699	50.584	438.087

Πίνακας 5. Εγκατεστημένη γεωθερμική-ηλεκτρική ισχύς (MW) σε παγκόσμια κλίμακα, από το 1990 έως το 2010

ΧΩΡΑ	1990 (MW)	1995 (MW)	2000 (MW)	2005 (MW)	2010 (MW)
Αργεντινή	0,67	0,67	---	---	---
Αυστραλία	---	0,17	0,17	0,2	1,1
Αυστρία	---	---	---	1,2	1,4
Αιθιοπία	---	---	8,52	7	7,3
Γαλλία	4,2	4,2	4,2	14,7	16
Γερμανία	---	---	---	0,2	6,6
Γουατεμάλα	---	33,4	33,4	33	52
Ελ Σαλβαδόρ	95	105	161	151	204
Η.Π.Α.	2.774,6	2.816,7	2.228	2.544	3.903
Ιαπωνία	214,6	413,7	546,9	536	536
Ινδονησία	144,75	309,75	589,5	797	1.197
Ιταλία	545	631,7	785	790	843
Ισλανδία	44,6	50	170	322	575
Κένυα	45	45	45	127	167
Κόστα Ρίκα	---	55	142,5	163	166
Κίνα	19,2	28,78	29,17	28	24
Μεξικό	700	753	755	953	958
Νέα Ζηλανδία	283,2	286	437	435	628
Νικαράγουα	35	70	70	77	88
Παπούα-Ν.Γουινέα	---	---	---	39	56
Πορτογαλία	3	5	16	16	29
Ρωσία	11	11	23	79	82
Ταϊλάνδη	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Τουρκία	20,6	20,4	20,4	20,4	82
Φιλιππίνες	891	1.227	1.909	1.931	1.904
Σύνολο	5.831,52	6.866,77	7.974,06	9.064	10.715

Οι πρώτοι γεωθερμικοί σταθμοί χρηματοδοτήθηκαν και λειτουργήθηκαν κυρίως από εθνικές υπηρεσίες ηλεκτρισμού σε όλο τον κόσμο, με εξαίρεση την Καλιφόρνια όπου η ανάπτυξη του πεδίου των Geysers υλοποιήθηκε από ιδιωτικές ηλεκτρικές εταιρείες. Με τη σημερινή διεθνή τάση για απελευθέρωση της ενεργειακής βιομηχανίας, ιδιώτες εγκαταστάτες έχουν αναμιχθεί αμεσότερα τόσο στην αξιολόγηση όσο και στην ανάπτυξη των πηγών.

Η εκμετάλλευση της γεωθερμίας για ηλεκτροπαραγωγή στις αναπτυσσόμενες χώρες παρουσιάζει ενδιαφέρουσες τάσεις με το χρόνο. Μεταξύ των ετών 1975 και 1979 η εγκατεστημένη γεωθερμική ηλεκτρική ισχύς σε αυτές τις χώρες αυξήθηκε από 75 σε 462 MW. Στο τέλος της επόμενης πενταετίας (1984) έφτασε στα 1.495 MW παρουσιάζοντας ένα ρυθμό αύξησης κατά τη διάρκεια των δύο αυτών περιόδων 610% και 323% αντίστοιχα. Στα επόμενα 16 χρόνια, από το 1984 μέχρι το 2000, σημειώθηκε μια περαιτέρω αύξηση της τάξης του 150%. Η αυξητική πορεία της παγκόσμιας εγκατεστημένης γεωθερμικής-ηλεκτρικής ισχύος διαμέσου των ετών φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα (σχήμα 11).



Σχήμα 11. Παγκόσμια εγκατεστημένη γεωθερμική-ηλεκτρική ισχύς από το 1950 έως το 2010

Αξίζει να σημειώσουμε ότι 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.

Η αγορά κυριαρχείται από τις μονάδες ακαριαίου ατμού, αλλά κατά τα τελευταία χρόνια έχουν εγκατασταθεί πολλές μικρότερης κλίμακας μονάδες δυαδικού κύκλου, αλλά και αρκετές συνδυασμένες μονάδες (ακαριαίας ατμοποίησης/δυαδικού κύκλου). Η πλειοψηφία των γεωθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής διεθνώς αποτελούν μονάδες βάσης, δηλαδή λειτουργούν 24 ώρες την ημέρα για 365 ημέρες το έτος. θεωρώντας ένα συντελεστή φορτίου 80% και ένα μέσο κόστος του ατμού 5 cent ανά kWh, η γεωθερμική ισχύς κοστολογείται σε περίπου 3 δισεκατομμύρια US\$ ετησίως.

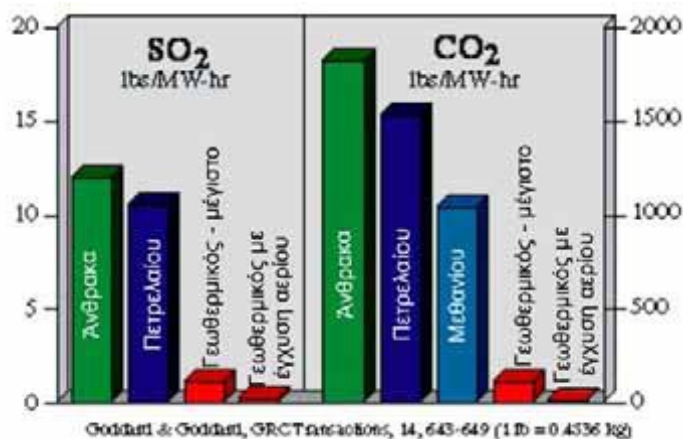
5.2. Ανταγωνιστικότητα της γεωθερμικής ενέργειας

Η γεωθερμική ενέργεια παράγεται εμπορικά σε μία κλίμακα εκατοντάδων MW για περισσότερο από τρεις δεκαετίες δεδομένου ότι διαθέτει διάφορα θετικά γνωρίσματα που την καθιστούν ανταγωνιστική προς τις συμβατικές πηγές ενέργειας και μερικές άλλες ΑΠΕ. Ειδικότερα:

- Αποτελεί έναν τοπικό ενεργειακό πόρο που μπορεί να μειώσει τη ζήτηση για εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα.
- Έχει σημαντική θετική επίδραση στο περιβάλλον με την αντικατάσταση της καύσης των ορυκτών καυσίμων.
- Είναι αποδοτική και ανταγωνιστική με τις συμβατικές πηγές ενέργειας.
- Οι γεωθερμικοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν συνεχώς, χωρίς εμπόδια που επιβάλλονται από τις καιρικές συνθήκες, αντίθετα από άλλες ΑΠΕ.
- Διαθέτει εγγενή ικανότητα αποθήκευσης και είναι καταλληλότερη για την κάλυψη της ζήτησης του φορτίου βάσης.
- Είναι μία αξιόπιστη και ασφαλής ενεργειακή πηγή που δεν απαιτεί αποθήκευση ή μεταφορά των καυσίμων.

Επιπλέον, η νεώτερη γενιά των γεωθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής εκπέμπει μόνο 136 gr διοξειδίου του άνθρακα ανά kWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατά μέσο όρο, έναντι των 453 gr/kWh CO₂ μιας μονάδας με καύσιμο φυσικό αέριο ή των 1042 gr/kWh CO₂ από ένα θερμικό σταθμό άνθρακα. Στο σχήμα 12 παρέχεται

μια σύγκριση των εκπομπών SO₂ (κύριο αίτιο της όξινης βροχής) και CO₂ (ένα αέριο του θερμοκηπίου και της παγκόσμιας κλιματικής μεταβολής) μεταξύ εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής με καύσιμο άνθρακα και πετρέλαιο, και γεωθερμικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με ή χωρίς έγχυση των αερίων αποβλήτων πίσω στο έδαφος.



Σχήμα 12. Συγκρίσεις εκπομπών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής διαφόρων καυσίμων

Αυτή τη στιγμή, οι ΑΠΕ με το μέγιστο δυναμικό και τις χαμηλότερες εκπομπές στην Ευρώπη, βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα, είναι η υδραυλική και η γεωθερμική ενέργεια. Σημειώνεται επίσης ότι οι συντελεστές δυναμικού των υδροηλεκτρικών και των γεωθερμικών σταθμών στην Ευρώπη είναι τη στιγμή αυτή πάνω από 70%, ενώ οι τυπικές τιμές για τα ηλιακά και τα αιολικά συστήματα είναι 20-35%. Ο συντελεστής διαθεσιμότητας της γεωθερμικής ενέργειας, δηλαδή το ποσοστό του χρόνου που μπορεί να παράγεται η ονομαστική ενέργεια, εξαρτάται κυρίως από τη φύση της πηγής και κατά δεύτερο λόγο από τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού.

Η εμπειρία δείχνει ότι η διαθεσιμότητα των γεωθερμο-ηλεκτρικών μονάδων συχνά είναι άνω του 90%. Το ιστόγραμμα του σχήματος 13 παρουσιάζει μία σύγκριση των ποσοστών του χρόνου, κατά μέσο όρο, που οι εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής γεωθερμίας, άνθρακα και πυρηνικών είναι διαθέσιμες για να παράγουν ηλεκτρισμό (δηλ. το συντελεστή διαθεσιμότητας). Υπό αυτές τις περιστάσεις, ο συντελεστής της

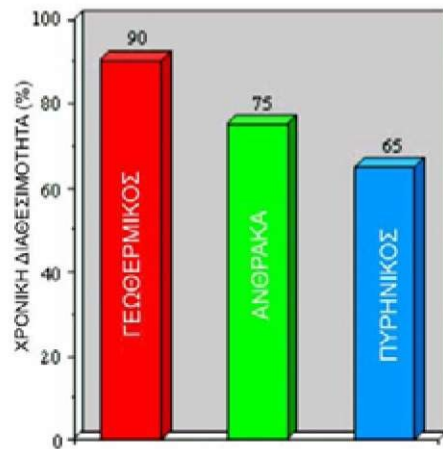
εγκατάστασης, που ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου που η μονάδα πραγματικά παράγει ενέργεια, είναι σχεδόν ίσος με το συντελεστή διαθεσιμότητας.

Τόσο οι υψηλής όσο και οι χαμηλής ενθαλπίας γεωθερμικοί σταθμοί ισχύος μπορούν να κατασκευαστούν ως πολυσυναρτησιακές μονάδες. Αυτή η προσέγγιση μειώνει την δαπάνη αρχικού κεφαλαίου και κατανέμει την επένδυση, ενώ καθιστά εφικτή την αξιολόγηση της διαθεσιμότητας της πηγής πριν αρχίσει η πλήρης λειτουργία και επιτρέπει την απολαβή εσόδων στην πρώτη δυνατή ευκαιρία, βελτιώνοντας με τον τρόπο αυτό την οικονομική απόδοση ολόκληρου του σχήματος και μειώνοντας την έκθεση σε γεωλογικούς κινδύνους ή ρίσκα εξόρυξης.

Τα κόστη, συνεπώς και η οικονομική βιωσιμότητα των έργων γεωθερμικής ενέργειας, εξαρτώνται αυστηρά από τις ειδικές συνθήκες της θέσης και τον τύπο της εφαρμογής. Σημειώνεται ότι, το κόστος παραγωγής του ηλεκτρισμού είναι πιο ευαίσθητο στο ειδικό κόστος διάνοιξης των φρεάτων και στην παραγωγικότητα κάθε φρέατος, που κυμαίνεται σημαντικά μεταξύ διαφορετικών χωρών. Η διακύμανση των τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων που ενέχονται στην υλοποίηση των γεωθερμικών έργων (το ειδικό κόστος του πεδίου συν το κόστος εγκατάστασης) σημαίνει ότι κάθε ένα από αυτά έχει ένα μοναδικό κόστος παραγωγής και δεν είναι δυνατή μια ευρεία γενίκευση.

Η συνολική ανταγωνιστικότητα της γεωθερμικής ενέργειας καθορίζεται επίσης με τη σύγκρισή της τόσο με τις συμβατικές όσο και με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Συνήθως το κόστος της ενέργειας στηρίζεται σε τυποποιημένες χρηματοοικονομικές αναλύσεις. Η χρηματοδότηση των γεωθερμικών έργων από τις υπηρεσίες διεθνούς χρηματοδότησης τελευταία βασίζεται στη διεξαγωγή μιας ανάλυσης ελαχίστου κόστους, ως μέρος της διαδικασίας τους για δανειοδότηση των ενεργειακών έργων.

εγκατάστασης, που ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου που η μονάδα πραγματικά παράγει ενέργεια, είναι σχεδόν ίσος με το συντελεστή διαθεσιμότητας.



Σχήμα 13. Συντελεστές διαθεσιμότητας τριών τύπων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής

Πρέπει να σημειωθεί ότι, αυτή τη στιγμή στην Ευρώπη το χαμηλότερο κόστος των συμβατικών καυσίμων, ειδικά του φυσικού αερίου, με αυστηρά οικονομικά κριτήρια καθιστά ανταγωνιστικές μόνο τις καλύτερες από τις γεωθερμικές πηγές. Εντούτοις, η γεωθερμική ενέργεια θα μπορούσε να γίνει πιο ανταγωνιστική προς τις συμβατικές πηγές ενέργειας εάν η σύγκριση δεν περιοριζόταν αυστηρά στα οικονομικά κριτήρια αλλά λαμβάνονταν υπόψη και άλλοι παράγοντες, όπως τα σκιάδη κόστη και οι οικονομικές συνέπειές τους (γνωστά ως "εξωτερικά κόστη").

Τα σχετικά *εξωτερικά κόστη* της συμβατικής παραγωγής γίνονται *εξωτερικά οφέλη* στην περίπτωση της γεωθερμίας (όπως και για τις άλλες ΑΠΕ), και αποτελούν μία παράμετρο που αλλάζει ουσιαστικά το επίπεδο ανταγωνιστικότητας προς όφελος της γεωθερμικής ενέργειας. Αυτά μπορούν να ποσοτικοποιηθούν σε χρηματικούς όρους και θα πρέπει να αποτελούν έναν αναγνωρισμένο παράγοντα για λόγους σύγκρισης. Εάν μεταξύ των παραμέτρων της επένδυσης περιληφθούν οι εξωτερικοί παράγοντες, τότε μπορούν να πραγματωθούν τα πλήρη κοινωνικά και οικονομικά οφέλη.

Η απαλλαγή του επενδυτή από αυτή την "προστιθέμενη αξία" δεν πρέπει να ληφθεί ως επιδότηση αλλά ως αναδιάταξη των οικονομικών οφελών που απορρέουν από το έργο. Έχει υπολογιστεί ότι το εξωτερικό κόστος των συμβατικών καυσίμων είναι 10 φορές σχεδόν μεγαλύτερο από το αντίστοιχο κόστος των ανανεώσιμων και το 50% σχεδόν του συνολικού οικονομικού κόστους (έναντι 1% στην περίπτωση των ΑΠΕ).

Η ποσοτικοποίηση των εξωτερικοτήτων αποτελεί κρίσιμη πτυχή για τη δίκαιη εκτίμηση της γεωθερμικής ενέργειας, με την οποία επίσης αποφεύγεται η επιβολή προστίμων σε έργα που αξιολογούνται καθαρά στη βάση μιας ανάλυσης ταμειακών ροών.

5.3. Προβλήματα παραγωγής και ρύπανσης

Στα κύρια προβλήματα κατά την παραγωγή γεωθερμικής ισχύος περιλαμβάνονται οι αποθέσεις μετάλλων, οι μεταβολές στις υδρολογικές συνθήκες και η διάβρωση του εξοπλισμού. Προβλήματα ρύπανσης προκύπτουν κατά το χειρισμό των γεωθερμικών αποβλήτων, τόσο του νερού όσο και του ατμού.

5.3.1. Αποθέσεις μετάλλων

Σε μερικά πεδία όπου επικρατεί το νερό μπορεί να υπάρξουν αποθέσεις μετάλλων από το ζέων γεωθερμικό ρευστό. Για παράδειγμα, η απόθεση πυριτίου στα φρέατα προκάλεσε προβλήματα στο πεδίο του Salton Sea (Καλιφόρνια). Συχνότερα, μπορεί να περιοριστεί η ανάπτυξη ενός πεδίου από το σχηματισμό αποθέσεων ανθρακικών αλάτων ασβεστίου στα φρέατα ή στα πετρώματα της περιοχής, όπως για παράδειγμα συνέβη στην Τουρκία και τις Φιλιππίνες. Τα πεδία με ζεστά νερά και υψηλά ολικά ανθρακικά άλατα τελευταία αντιμετωπίζονται με καχυποψία. Κατά την απόρριψη των θερμών υγρών αποβλήτων στην επιφάνεια, η απόθεση πυριτίου στους αγωγούς και τους διαύλους του νερού μπορεί να προκαλέσει προβλήματα.

5.3.2. Υδρολογικές αλλαγές

Η εκτεταμένη παραγωγή από τα φρέατα αλλάζει τις τοπικές υδρολογικές συνθήκες. Η ελάττωση της πίεσης του υδροφόρου ορίζοντα μπορεί να προκαλέσει βρασμό στο νερό των πετρωμάτων (που οδηγεί σε μεταβολές των χαρακτηριστικών του ρευστού της γεώτρησης), τη διείσδυση κρύου νερού από τις παρυφές του πεδίου, ή μεταβολές στη χημεία του νερού λόγω των μειωμένων θερμοκρασιών και συγκεντρώσεων των αερίων. Μετά από την παρατεταμένη άντληση ζεστού νερού από πετρώματα μικρής αντοχής μπορεί να συμβεί τοπική γαιόχωση (μέχρι μερικά μέτρα) και να μειωθεί σε ένταση η αρχική φυσική θερμική δραστηριότητα. Κάποιες μεταβολές συμβαίνουν σε όλους τους τομείς και απαιτείται η καλή κατανόηση της γεωλογίας και της

υδρολογίας ενός συστήματος προκειμένου να μπορέσει να συνταιριαστεί ο ρυθμός άντλησης της γεώτρησης με τη μακροπρόθεσμη δυνατότητα αυτής να παρέχει ρευστό.

5.3.3. Διάβρωση

Τα γεωθερμικά νερά προκαλούν την ταχεία διάβρωση των περισσότερων κραμάτων μετάλλων, αλλά αυτό δεν αποτελεί σοβαρό πρόβλημα κατά τη χρήση τους εκτός από τις περιοχές όπου αντλούνται υψηλής θερμοκρασίας όξινα ύδατα (πολύ σπάνια), για παράδειγμα σε ενεργές ηφαιστειακές ζώνες. Το σύννηθες βαθύ γεωθερμικό νερό έχει σχεδόν ουδέτερο pH. Οι κυριότερες επιπτώσεις διάβρωσης μετάλλων που πρέπει να αποφεύγονται είναι η διάβρωση με στίγματα σουλφιδίου και χλωριδίου ορισμένων ανοξείδωτων και υψηλής αντοχής χαλύβων και η ταχεία διάβρωση των κραμάτων χαλκού. Το υδρόθειο, ή τα προϊόντα οξείδωσής του, προκαλεί επίσης την πιο ταχεία από την κανονική υποβάθμιση των οικοδομικών υλικών, π.χ. του σκυροδέματος, των πλαστικών, και των βαφών.

5.3.4. Ρύπανση

Από τις μη ηχομονωμένες γεωτρήσεις εκροής μπορεί να προκύψει υψηλό επίπεδο θορύβου (μέχρι 120 dB), ενώ οι εκτονώσεις των φρεάτων μπορεί να ψεκάσουν αλατούχα και πυριτιούχα ρευστά στα φυτά και τα κτίρια. Με την εφαρμογή ορθών πρακτικών μπορούν να μειωθούν οι επιδράσεις αυτές σε αποδεκτά επίπεδα. Οι γεωθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, λόγω της χαμηλότερης αποδοτικότητάς τους, εκπέμπουν περισσότερους υδρατμούς ανά μονάδα ισχύος από τους σταθμούς με ορυκτά καύσιμα. Ο ατμός από τους σιγαστήρες των κεφαλών των φρεάτων και τους πύργους ψύξης των σταθμών μπορεί να προκαλέσει τοπικά μια αυξημένη τάση για σχηματισμό ομίχλης και χειμερινού πάγου.

Τα απόβλητα γεωθερμικά νερά που ελευθερώνονται σε υδάτινους διαύλους μπορεί να προκαλέσουν πρόβλημα θερμικής ρύπανσης, εκτός εάν αραιώνονται κατά 100:1 τουλάχιστο. Οι γεωθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να έχουν τέσσερα κύρια ρεύματα αποβλήτων. Μεγάλοι όγκοι απορριπτόμενου ζεστού αλατούχου νερού παράγονται στα υδροθερμικά πεδία. Μη καθαρός υδρατμός αναδύεται από τους πύργους ψύξης των σταθμών, οι οποίοι παράγουν επίσης μια ροή συμπυκνώματος

που περιέχει ποικίλες συγκεντρώσεις αμμωνίας, σουλφιδίων, ανθρακικών αλάτων, και βορίου. Απόβλητα αέρια διαφεύγουν από τις εξόδους απαερίωσης των αντλιών.

Οι γεωθερμικοί ατμοί ποικίλουν ευρέως ως προς τα περιεχόμενα αέρια (συνήθως 0,1-5%), τα οποία είναι κυρίως διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο, μεθάνιο και αμμωνία. Η απαγωγή του υδρόθειου μπορεί να προκαλέσει αντιδράσεις εάν δεν διασκορπίζεται επαρκώς, και σ' ένα μεγάλο γεωθερμικό σταθμό κοντά σε κοινότητες με χαμηλή ανοχή στις οσμές χρειάζεται μία μονάδα παγίδευσης του θείου (διεργασίας Stretford). Η επίπτωση της διασποράς των σουλφιδίων στα δέντρα και τα φυτά φαίνεται να είναι μικρή. Η χαμηλή συγκέντρωση ραδονίου στον ατμό (3-200 nanocuries/kg ή 0,1-7,4 kilobecquerels/kg), όταν διασκορπίζεται είναι απίθανο να έχει επιπτώσεις στην υγεία. Ο υδράργυρος των γεωθερμικών ρευστών (1-10 μg/kg) τελικά απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, αλλά οι δημιουργούμενες συγκεντρώσεις δεν είναι επικίνδυνες.

Η σύσταση των γεωθερμικών νερών ποικίλλει ευρέως. Στις πρόσφατες ηφαιστειακές περιοχές αυτά είναι συνήθως αραιά (< 0,5%) αλατούχα διαλύματα, αλλά τα νερά στις ιζηματογενείς λεκάνες ή τις ενεργές ηφαιστειακές περιοχές έχουν ιδιαίτερα μεγάλη συγκέντρωση σε άλμες. Σε σύγκριση με τα επιφανειακά, τα περισσότερα γεωθερμικά νερά περιέχουν υπερβολικές συγκεντρώσεις βορίου, φθοριδίων, αμμωνίας, πυριτίου, υδρόθειου και αρσενικού. Στα συνήθη αραιά γεωθερμικά νερά, οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων, π.χ. σιδήρου, μαγγανίου, μολύβδου, ψευδαργύρου, καδμίου και θαλλίου, σπάνια υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα για το πόσιμο νερό επίπεδα. Πάντως, οι συμπυκνωμένες άλμες μπορεί να περιέχουν ικανά επίπεδα βαρέων μετάλλων.

Λόγω της σύνθεσής τους, τα απόβλητα γεωθερμικά νερά ή συμπυκνώματα μπορούν να επιδράσουν αρνητικά στις παροχές πόσιμου ή αρδευτικού νερού και την υδρόβια ζωή. Η αμμωνία μπορεί να αυξήσει την ανάπτυξη φυκιών στους υδάτινους διαύλους και να ευνοήσει τον ευτροφισμό τους, ενώ η εισχώρηση του βορίου στα αρδευτικά ύδατα μπορεί να έχει επιπτώσεις σε ευαίσθητα φυτά, όπως τα εσπεριδοειδή. Μικρές ποσότητες ιζήματος μεταλλικού σουλφιδίου, που περιέχουν αρσενικό, αντιμόνιο και υδράργυρο, μπορεί να συσσωρευτούν στα ιζήματα των ρυακιών και να προκαλέσουν ανεπιθύμητα υψηλές (πάνω από 0,5 ppm) συγκεντρώσεις υδραργύρου στα ψάρια.

5.3.5. Επανάγκυση

Το πρόβλημα της επιφανειακής διάθεσης μπορεί να αποφευχθεί με την επανάγκυση των απορριπτόμενων νερών ή συμπυκνωμάτων πίσω στα έγκατα μέσω φρεάτων απόρριψης. Η επανάγκυση του συμπυκνώματος ατμού εμφανίζει λίγα προβλήματα και εφαρμόζεται στην Ιταλία και τις ΗΠΑ. Μια πιο δύσκολη περίπτωση επανάγκυσης συνιστούν οι πολύ μεγαλύτεροι όγκοι του διαχωριζόμενου απόβλητου ζεστού νερού (περίπου 50 μετρικοί τόνοι ανά MW_e) στα πεδία υπερίσχυσης νερού.

Η απόθεση πυριτίου και ανθρακικών αλάτων μπορεί να προκαλέσει αποφράξεις στις σχισμές των πετρωμάτων, εάν δεν ικανοποιούνται οι κατάλληλες θερμοκρασιακές, χημικές και υδρολογικές συνθήκες στο βάθος απόρριψης. Σε μερικές περιπτώσεις, μπορεί να είναι απαραίτητη πριν την επανάγκυση η χημική επεξεργασία της άλμης. Η επιλεκτική επανάγκυση του νερού στο θερμικό σύστημα μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση των πιέσεων του υδροφόρου ορίζοντα και στην απόληψη περισσότερης θερμότητας από το πέτρωμα. Ένα επιτυχές σύστημα επανάγκυσης νερού λειτουργεί για αρκετά χρόνια στο Ahuachapan του Ελ Σαλβαδόρ.

6. ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

6.1. Προβλέψεις

Οι προβλέψεις σχετικά με την ανάπτυξη της γεωθερμικής ενέργειας συνδέονται στενά με τις εξελίξεις στην τιμή του πετρελαίου. Παρότι έχει αποδειχθεί ότι ο τομέας μπορεί να επεκταθεί και σ' ένα πλαίσιο χαμηλών τιμών βαρελιού, η επίδραση του παράγοντα αυτού παραμένει καθοριστική. Η πρόβλεψη των διακυμάνσεων του πετρελαίου πάντως είναι αρκετά δύσκολη, γι' αυτό και έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικά σενάρια για το μέλλον. Στο πρώτο θεωρείται μια σχετικά χαμηλή τιμή του πετρελαίου για το μέλλον. Το δεύτερο σενάριο βασίζεται σε μια αύξηση της τιμής του βαρελιού που θα ευνοούσε την ανάπτυξη των ΑΠΕ, συνεπώς και των γεωθερμικών εγκαταστάσεων. Στην περίπτωση αυτή, το εγκατεστημένο δυναμικό θα μπορούσε να φθάσει τα 30.000 MWe για ηλεκτροπαραγωγή και τα 100.000 MWth για άμεση χρήση.

Με βάση τα τωρινά μεγέθη, η πρόβλεψη αυτή αντιστοιχεί σε τριπλασιασμό των δύο τομέων. Πάντως, τα μεγέθη αυτά αποτελούν χονδρικές εκτιμήσεις και δεν πρέπει να ληφθούν σε καμία περίπτωση ως ακριβή στοιχεία. Αυτό συμβαίνει επειδή, πέρα από την επίπτωση της τιμής των ορυκτών καυσίμων, ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας είναι το επίπεδο των βεβαιωμένων γεωθερμικών αποθεμάτων. Η γνώση του πλανήτη Γη είναι ακόμα, κυριολεκτικά αλλά και μεταφορικά, "επιφανειακή". Θα μπορούσαν να εμφανιστούν νέα κοιτάσματα και νέες τεχνολογίες και να μεταβληθούν εντελώς οι τάσεις που θα έχουν παρατηρηθεί μέχρι τότε.

Οι μόνες εμπορικά βιώσιμες γεωθερμικές πηγές βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα φαίνεται ότι θα συνεχίσουν να είναι οι υδροθερμικές. Μόνες αυτές αντιπροσωπεύουν μια τεράστια πηγή ενέργειας, αφού υπολογίζεται ότι θα μπορούσαν να παραχθούν βραχυπρόθεσμα ή μεσοπρόθεσμα από τις γνωστές υδροθερμικές πηγές 80 GW γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Μακροπρόθεσμα, οι τεχνολογικές εξελίξεις θα διευκολύνουν την αξιοποίηση της ενέργειας στα θερμά ξηρά πετρώματα και τους γεωπεπιεσμένους ταμιευτήρες, που αντιπροσωπεύουν μια πηγή ενέργειας ουσιαστικά απεριόριστη και αποτελούν το μέλλον της αειφόρου γεωθερμίας.

Σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρισμού, υπάρχει μια ομάδα χωρών που φαίνεται ότι μελλοντικά θα κυριαρχήσουν στον τομέα, μεταξύ των οποίων είναι οι Φιλιππίνες, η Ινδονησία και το Μεξικό. Από την άλλη, οι ΗΠΑ μάλλον δεν θα επαναλάβουν τους ρυθμούς ανάπτυξης της δεκαετίας του '80 και θα χάσουν την ηγετική τους θέση από τις Φιλιππίνες. Όσον αφορά την Ευρωπαϊκή Ένωση, οι ενεργές χώρες στο πεδίο της ηλεκτροπαραγωγής παραμένουν η Ιταλία, η Πορτογαλία και η Γαλλία, που όμως φιλοδοξούν να αυξήσουν την εγκατεστημένη ισχύ τους. Με τον τρόπο αυτό, το εν λειτουργία στην Ε.Ε. δυναμικό θα ανέλθει σε 1.200 MWe μέχρι το 2010. Τα μεγέθη αυτά υπερβαίνουν τους στόχους της Λευκής Βίβλου, που είναι τα 1.000 MWe έως το 2010.

Appendix

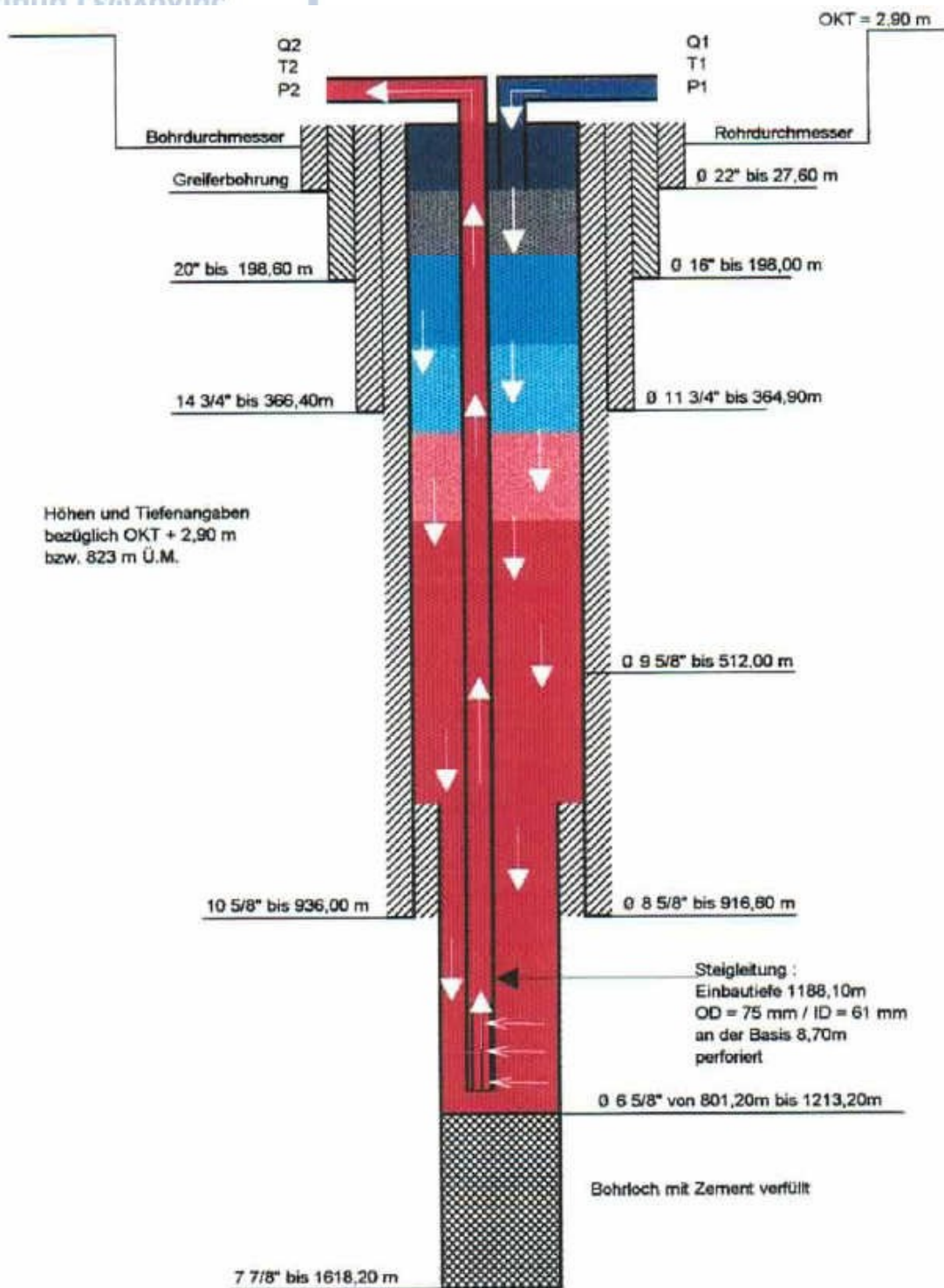
(Φωτογραφικό υλικό από την διαδικασία ανάπτυξης γεωθερμικών έργων)

Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δυαδικού κύκλου στο Simbach am Inn, Bayern, Germany. Λειτουργεί με γεωθερμικό ρευστό χαμηλής ενθαλπίας 90° C.





Κεφαλή γεωτρυπάνου (Drilling bit)



Σωλήνωση γεώτρησης (Casing)



Γεώτρηση στο Mauerstetten, Bayern, Germany



Καμπίνα ελέγχου γεωτρύπανου.



Σωλήνες γεώτρησης, έτοιμες προς χρήση



Γεωτρύπανο (drilling rig) στο Mauerstetten, Bayern, Germany



Μηχανικός εξοπλισμός γεωτρύπανου



Γεωτρύπανο (drilling rig GT-1)



Γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής



Γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής (Exorka GmbH team)



**Μακέτα του εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρισμού
(Kalina binary plant)**













Βιβλιογραφία

"Guide for the Training of Engineers in the Electricity Production Technologies from Renewable Energy Sources" Πρόγραμμα: LEONARDO DA VINCI 1999

Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών - Τομέας Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος - Διεύθυνση Γεωθερμίας και Θερμομεταλλικών Υδάτων, Τα γεωθερμικά πεδία της χώρας (χαρακτηρισμός σύμφωνα με ν. 3175/2003), Αθήνα 2007

Αρθούρος Ζερβός, 2007. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

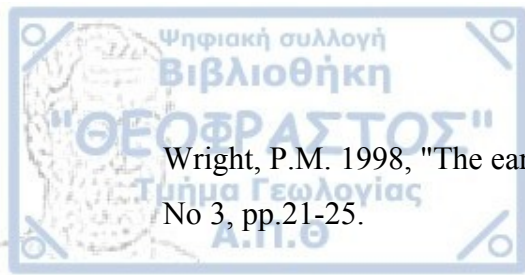
International Energy Agency, 2009. World energy outlook 2009

Brown, G. 1996, "Geothermal energy", in *Renewable energy- power for a sustainable future*, Ed. G. Boyle, Oxford University Press, Oxford.

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

R. Haenel and E. Staroste (Eds.), Atlas of geothermal resources in the European Community, Austria and Switzerland, Verlag Th Schäfer, Hannover, Germany, 1988

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 earth gives up its heat", *Renewable Energy World*, Vol.1, No 3, pp.21-25.

Fridleifsson, I., 1996, "The role of Geothermal Energy in the World", *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, Vol. 17, No 3.

DiPippo, R., 1999, "Small Geothermal Power Plants: Design, Performance and Economics", *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, Vol. 20, No 2.

G. H. Hutterer, The Status of World Geothermal Power Generation 1995-2000, in: E. Iglesias, D. Blackwell, T. Hunt, J. Lund and S. Tamanyu (Eds.), *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan*, 23-37

J. W. Lund and D. H. Freeston, World-Wide Direct Uses of Geothermal Energy 2000, in: E. Iglesias, D. Blackwell, T. Hunt, J. Lund and S. Tamanyu (Eds.), *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan*, 1-21

S. Hurter and R. Haenel (Eds.), *Atlas of Geothermal Resources in Europe*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, 2002

P. Muffler and R. Cataldi, Methods for regional assessment of geothermal resources, *Geothermics*, 7, 53-89 (1978)

J. Lavigne, Les ressources géothermiques françaises - possibilités de mise en valeur, *Ann. des Mines*, Avril, 1-16 (1978)

V. Stefánsson and I. B. Fridleifsson, Geothermal Energy European and worldwide perspective, Expert hearing on “Assessments and Prospects for Geothermal Energy in Europe” in the framework of Sub-Committee on Technology Policy and Energy of the Parliamentary Assembly of the Council of Europe, Strasbourg, 12 May 1998

J. Demanje, F. Jaudin, J. Lemale and A. Munjoz, 1995. The use of low-enthalpy geothermal energy in France, in: E. Barbier, E. Frye, E. Iglesias and G. Pálmason (eds.), Proc. World Geothermal Congress 1995, **Vol. 1**, 105-109 (1995)

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.

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.

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.

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

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.

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.

NICHOLSON, K., 1993. *Geothermal Fluids*. Springer Verlag, Berlin, XVIII - 264 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, 310.

GARNISH, J.D., ed., 1987. Proceedings of the First EEC/US Workshop on Geothermal Hot-Dry Rock Technology, *Geothermics* 16, 323-461.

TENZER, H., 2001. Development of hot dry rock technology. *Bulletin Geo- Heat Center*, 32, 4, 14-22.

STEFANSSON, V., 2000. The renewability of geothermal energy. *Proc. World Geothermal Energy, Japan*. On CD-ROM

WRIGHT, P.M., 1998. The sustainability of production from geothermal resources. *Bull. Geo-Heat Center*, 19, 2, 9-12.

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.

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.

MEIDAV, T., 1998. Progress in geothermal exploration technology. *Bulletin Geothermal Resources Council*, 27, 6, 178-181.



ΦΥΤΙΚΑΣ ΜΙΧΑΛΗΣ και ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΟΥ ΜΑΡΙΑ, Γεωθερμική ενέργεια στη Μήλο και αξιοποίηση της, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας

ΦΥΤΙΚΑΣ ΜΙΧΑΛΗΣ και ΑΝΔΡΙΤΣΟΣ ΝΙΚΟΣ, Γεωθερμικές εφαρμογές στις Κυκλάδες και εφαρμογές υψηλής ενθαλπίας, Συνέδριο IENE, Σύρος, 2008

MARY H. DICKSON and MARIO FANELLI, February 2004. What is Geothermal Energy?. Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR , Pisa, Italy

Ruggero Bertani, Enel - International Division - Renewable Energy Business Development - Via Dalmazia 15, 00198 Rome, Italy

Κατσοτούρχης Μιχαήλ, 2008. Ανάλυση κόστους γεωθερμικών εγκαταστάσεων για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, 2009. 2008 Geothermal Technologies - Market Report

Sanyal S. Cost of Geothermal Power and Factors that affect it, GeothermEx, 2004.

WERES, O., 1984. Environmental protection and the chemistry of geothermal fluids. *Lawrence Berkeley Laboratory, Calif., LBL 14403, 44 pp.*

FRIDLEIFSSON, I.B., 2001. Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 5, 299-312.*



ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

www.iea.org/

<http://www.geothermie.de/>

<http://www.rae.gr/>

<http://www.geothermal-energy.org/>

<http://geothermal.marin.org/>

<http://www.geothermie.de/egec-geothernet.htm>

<http://www.worldbank.org/html/fpd/energy/geothermal/index.htm>