



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας

Ενότητα 6^η : Γεωθερμία

Αναπλ. Καθηγητής: Γεώργιος Μαρνέλλος

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ψηφιακά Μαθήματα του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Περιεχόμενα

1. Περιγραφή μαθήματος.....	4
1.1 Διάκριση γεωθερμικών πηγών	4
1.2 Παράδειγμα: απόληψη γεωθερμικού νερού.....	6
2. Εφαρμογές θέρμανσης	8
2.1 Παράδειγμα: Γεωθερμική θέρμανση	9
3. Γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή	10
3.1 Παράδειγμα: Γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή	11
4. Άσκηση.....	13

1. Περιγραφή μαθήματος

Η θερμοκρασία της Γής αυξάνεται με το βάθος και το γεγονός αυτό προκαλεί μία ροή θερμότητας προς την επιφάνεια της (η μέση ροή γεωθερμικής θερμότητας στον ηπειρωτικό φλοιό της Γής είναι 60 mW/m^2 και η μέση βαθμίδα θερμοκρασίας $30 \text{ }^\circ\text{C/km}$). Η μεταφορά αυτή της θερμότητας γίνεται κυρίως με αγωγή, μέσω των πετρωμάτων του εξωτερικού φλοιού και σε λίγες περιπτώσεις μέσω της κυκλοφορίας υπογείων υδάτων ή ακόμη και μάγματος. Το μέσο πάχος του εξωτερικού φλοιού είναι 30 km (μπορεί να φθάσει ακόμη και τα 70 km στις ηπείρους και ελαττώνεται έως και τα 6 km στον πυθμένα των ωκεανών). Η θερμοκρασία στα όρια του εξωτερικού φλοιού είναι της τάξης των $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Ο εξωτερικός αυτός φλοιός είναι στερεός με μέση πυκνότητα 2700 kg/m^3 , ειδική θερμότητα $1 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ και θερμική αγωγιμότητα $2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

Στα γεωθερμικά πεδία οικονομικού ενδιαφέροντος ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι σημαντικά υψηλότερος του μέσου ($10 - 20 \text{ W/m}^2$) και συνοδεύεται από υψηλότερες βαθμίδες θεοκρασίας, ενώ σε πολλά από αυτά είναι τεχνικά δυνατή η απόληψη θερμότητας με ρυθμούς πολύ μεγαλύτερους των φυσικών.

1.1 Διάκριση γεωθερμικών πηγών

Οι γεωθερμικές αυτές πηγές ή πόροι ενδιαφέροντος διακρίνονται σε:

Υδροθερμικές πηγές, που περιλαμβάνουν φυσικά υπόγεια θερμά νερά, τα οποία διαφεύγουν (φυσικά ή μέσω γεώτρησης) προς την επιφάνεια και τα οποία αναπληρώνονται με φυσικό τρόπο. Το 90% των νερών αυτών είναι μετεωρικά (από τη βροχή ή το χιόνι) ενώ το υπόλοιπο 10% είναι είτε μαγματικής προέλευσης είτε εγκλωβισμένο θαλασσινό νερό από παλαιότερες γεωλογικές περιόδους. Το παγιδευμένο θαλασσινό νερό δεν ανανεώνεται και βρίσκεται υπό υψηλή πίεση συνήθως μαζί με ορυκτούς υδρογονάνθρακες (κυρίως φυσικό αέριο – ειδικά τα συστήματα αυτά ονομάζονται και γεω-πετρεωσμένα). Στις πηγές αυτές οι κυκλοφορία του νερού είναι φυσική και μεταφέρει θερμότητα προς την επιφάνεια με συναγωγή (λόγω κίνησης του νερού). Οι υδροθερμικές πηγές διακρίνονται σε αυτές που περιέχουν ατμό (ονομάζονται και ξηρού ατμού), οι οποίες συναντώνται σε βάθη έως 1500 m και η θερμοκρασία του ατμού μπορεί να φθάνει ακόμα και τους $250 \text{ }^\circ\text{C}$ και σε αυτές που περιέχουν κυρίως ή εξολοκλήρου θερμό νερό. Οι τελευταίες συναντώνται σε βάθη έως 3 km και διακρίνονται σε υψηλής θερμοκρασίας (έως και $150 \text{ }^\circ\text{C}$), μέσης θερμοκρασίας ($90 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$ και υπό πίεση) και χαμηλής θερμοκρασίας ($< 90 \text{ }^\circ\text{C}$ υπό μικρή πίεση). Τα μη διαπερατά κοιτάσματα εγκλωβισμένου θαλασσινού νερού έχουν θερμοκρασίες $60 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$ και συναντώνται σε βάθη $1 - 3 \text{ km}$ και υπεδάφη με μεγάλο πορώδες.

Αβαθή γεωθερμία, η οποία δεν βρίσκει διέξοδο προς την επιφάνεια και μπορεί να αντληθεί με γεωτρήσεις. Η θερμοκρασίας τους είναι μικρότερη των $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Η αβαθής γεωθερμία ενδέχεται να αφορά γεωθερμικά ρευστά σε μικρό βάθος και υπό χαμηλή θερμοκρασία, ενδέχεται όμως επίσης να είναι και ξηρή.

Γεωθερμία ξηρών βράχων, η οποία αφορά θερμά πετρώματα σε βάθη $3 - 10 \text{ km}$, χωρίς την παρουσία γεωθερμικών ρευστών και η άντληση της θερμότητας γίνεται με την τροφοδοσία νερού μέσω γεωτρήσεων, το οποίο νερό ανακτάται

θερμότερο μέσω των ίδιων ή άλλων γεωτρήσεων. Τα πετρώματα αυτά είναι μη διαπερατά από το νερό (και για αυτό είναι ξηρά) και οι σχετικές γεωτρήσεις είναι δίδυμες με την πρώτη να επιχειρεί και τη διάρρηξη ή την αποσάθρωση των βράχων μέσω της άσκησης υψηλών πιέσεων ή τη δημιουργία έκρηξης. Η δεύτερη γεώτρηση είναι λίγο πιο ρηχή από την πρώτη και απαντεί το ρευστό που η πρώτη διοχετεύει στο θρυμματισμένο βράχο. Αυτού του τύπου η γεωθερμία διακρίνεται σε υψηλής θερμοκρασίας ($> 250\text{ }^{\circ}\text{C}$) και χαμηλής ή μέσης θερμοκρασίας ($< 150\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Μαγματική γεωθερμία, στην οποία γίνεται απόληψη θερμότητας από διεισδύσεις μάγματος στο φλοιό με κατάλληλες γεωτρήσεις κοντά στη διείσδυση μάγματος και σε βάθος λίγων χιλιομέτρων. Η θερμοκρασία τους φθάνει ακόμα και τους $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Με βάση το ενεργειακό τους περιεχόμενο, τα γεωθερμικά πεδία διακρίνονται σε:

- **Υψηλής ενθαλπίας**, στα οποία η θερμοκρασία ξεπερνάει τους $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ και βρίσκονται συνήθως σε σεισμογενείς περιοχές κοντά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών. Ενδείκνυνται για ηλεκτροπαραγωγή ή συμπαραγωγή.
- **Μέσης ενθαλπίας** με θερμοκρασίες $100 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Χαμηλής ενθαλπίας** με θερμοκρασίες $25 - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Ομαλής ενθαλπίας** σε περιοχές συνήθους θερμικής ροής και θερμοκρασιακής βαθμίδας και θερμοκρασίες $15 - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Απόληψη ή παραγωγή γεωθερμικών ρευστών¹.

Η θερμότητα του γεωθερμικού πόρου λαμβάνεται με γεωτρήσεις μέσω των οποίων τα γεωθερμικά ρευστά φθάνουν θερμά στην επιφάνεια. Η ροή διαμέσω αυτών των γεωτρήσεων μπορεί να είναι αυθόρμητη (εξαιτίας της πίεσης που επικρατεί στον γεωθερμικό ταμιευτήρα ή να προκαλείται με άντληση. Μπορεί επίσης να εφαρμόζεται άντληση ακόμη και σε περιπτώσεις αυθόρμητης ροής προκειμένου να αυξηθεί η παροχή της. Συνήθως η άντληση γεωθερμικών ρευστών συνοδεύεται με την υπο πίεση παροχή ρευστών στον ταμιευτήρα για την αναπλήρωση του γεωθερμικού ρευστού και την υποβοήθηση της άντλησης.

Σε κάθε περίπτωση η παροχή γεωθερμικού ρευστού είναι ανάλογη της διαφοράς πίεσης ΔP που επικρατεί μεταξύ του γεωθερμικού ταμιευτήρα και της θέσης απάντλησης του ρευστού (κεφαλή της γεώτρησης). Αυτό συμβαίνει είτε η παροχή των γεωθερμικών ρευστών είναι αυθόρμητη είτε υποβοηθείται με την παροχή συμπιεσμένου ρευστού στο ταμιευτήρα. Έτσι, ελαττώνοντας την πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης (αυξάνοντας τη ΔP) η παροχή γεωθερμικού ρευστού αυξάνεται.

Επίσης, για σταθερή διαφορά πίεσης μεταξύ του ταμιευτήρα και της κεφαλής η παροχή γεωθερμικού ρευστού ελαττώνεται αργά με το χρόνο. Έτσι, για να διατηρηθεί σταθερή η παροχή γεωθερμικού ρευστού από τον ταμιευτήρα η διαφορά πίεσης θα πρέπει να αυξάνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος που λειτουργεί η γεώτρηση.

¹ “Πηγές Ενέργειας. Συμβατικές και Ανανεώσιμες” Ι. Ι. Γελεγένης, Π. Ι. Αξαόπουλος, Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα 2005

Οι αλληλεξάρτηση παροχής- ΔP -χρόνου, για υγρά γεωθερμικά ρευστά, περιγράφεται από την Εξίσωση:

$$1. \Delta P = \frac{Q \times \mu}{4 \times \pi \times k \times h} \times \ln \left(\frac{2,246 \times k \times t}{\phi \times \mu \times \sigma \times r^2} \right)$$

όπου:

ΔP η διαφορά πίεσης μεταξύ ταμιευτήρα και κεφαλής της γεώτρησης [Pa]

Q η ογκομετρική παροχή γεωθερμικού ρευστού [m³/s]

μ το ιξώδες του γεωθερμικού ρευστού [kg/m/s]

k η διαπερατότητα του ταμιευτήρα [m³/m = m²]

h το πάχος του ταμιευτήρα [m]

t ο χρόνος άντλησης [s]

ϕ το πορώδες του διαπερατού πετρώματος του ταμιευτήρα

σ η συμπιεστότητα των ρευστών του ταμιευτήρα και

r η ακτίνα της γεώτρησης

Ειδικότερα τα μεγέθη $k \times h$ και $\phi \times \sigma \times h$ ονομάζονται “μεταδοτικότητα” και “αποθηκευτικότητα” του ταμιευτήρα. Για διφασικά γεωθερμικά ρευστά, η ροή μάζας υπολογίζεται με σχετική ακρίβεια από τη συσχέτιση:

$$2. \frac{G \times H}{p^{-0,18}} = 0,765 \times 10^6$$

όπου:

G : η ροή μάζας διφασικού γεωθερμικού ρευστού [kg/m²/s].

H : η ειδική ενθαλπία του διφασικού γεωθερμικού ρευστού [kJ/kg] και

P : η διαφορά πίεσης μεταξύ του ταμιευτήρα και της κεφαλής της γεώτρησης [bar].

Η τελευταία συσχέτιση υπολογίζει την εξάρτηση της ροής διφασικών γεωθερμικών μιγμάτων από την πίεση εξόδου της γεώτρησης, με απόκλιση της τάξης του 3 %, αν είναι γνωστή η ειδική τους ενθαλπία.

1.2 Παράδειγμα: απόληψη γεωθερμικού νερού

Σε γεώτρηση ακτίνας 10 cm από γεωθερμικό ταμιευτήρα νερού θερμοκρασίας 80 °C καταγράφηκε η πτώση πίεσης με το χρόνο για τις 48 πρώτες ώρες άντλησης με ρυθμό 65 m³/h:

h	1	2	3	6	12	24	48
bar	22,5	23,5	24,1	25,1	26,1	27,1	28,1

Να υπολογιστούν η μεταδοτικότητα και η αποθηκευτικότητα του ταμιευτήρα και ο ρυθμός άντλησης για τον οποίο η πτώση πίεσης να μην υπερβεί 30 bar για τα επόμενα 10 έτη. Το ιξώδες του νερού στους 80 °C είναι 0,365 10⁻³ kg/m*s.

ΛΥΣΗ

Η εξίσωση 1 γράφεται ως εξής:

$$\Delta P = \frac{Q \times \mu}{4 \times \pi \times k \times h} \times \ln\left(\frac{2,246 \times k}{\varphi \times \mu \times \sigma \times r^2}\right) + \frac{Q \times \mu}{4 \times \pi \times k \times h} \times \ln(t)$$

Δηλαδή η ΔP είναι γραμμική συνάρτηση του $\ln t$ με κλίση:

$$K = \frac{Q \times \mu}{4 \times \pi \times k \times h} \left[\frac{\frac{m^3}{s} \times \frac{kg}{m \times s}}{m^2 \times m} = \frac{kg \times m}{m^2 \times s^2} = \frac{Nt}{m^2} = Pa \right]$$

και τεταγμένη επί της αρχής:

$$A = \frac{Q \times \mu}{4 \times \pi \times k \times h} \times \ln\left(\frac{2,246 \times k}{\varphi \times \mu \times \sigma \times r^2}\right) [Pa]$$

Από το Νόμο των Ελαχίστων Τετραγώνων υπολογίζεται η κλίση K και η τεταγμένη επί της αρχής A της ευθείας $\Delta P - \ln t$:

t, sec	X_i ($\ln t$)	Y_i (ΔP)	$X_i \cdot Y_i$	X_i^2
3600	8,189	22,5	184,246	67,055
7200	8,882	23,5	208,723	78,887
10800	9,287	24,1	223,824	86,254
21600	9,980	25,1	250,509	99,609
43200	10,674	26,1	278,581	113,926
86400	11,367	27,1	308,039	129,203
172800	12,060	28,1	338,883	145,441
Άθροισμα	70,439	176,500	1792,804	720,374

$$\begin{aligned} K &= [N \cdot \Sigma(X_i \cdot Y_i) - \Sigma(X_i) \cdot \Sigma(Y_i)] / [N \cdot \Sigma(X_i^2) - \Sigma(X_i) \cdot \Sigma(X_i)] = \\ &= (7 \cdot 1792,804 - 70,439 \cdot 176,5) / (7 \cdot 720,374 - 70,439 \cdot 70,439) = \\ &= 117,236 / 81,031 \\ &= 1,447 \text{ bar} = 1,447 \cdot 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= [\Sigma(Y_i) \cdot \Sigma(X_i^2) - \Sigma(X_i) \cdot \Sigma(X_i \cdot Y_i)] / [N \cdot \Sigma(X_i^2) - \Sigma(X_i) \cdot \Sigma(X_i)] = \\ &= (176,5 \cdot 720,374 - 70,439 \cdot 1792,804) / (7 \cdot 720,374 - 70,439 \cdot 70,439) = \\ &= 863,624 / 81,031 \\ &= 10,657 \text{ bar} = 10,657 \cdot 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Οπότε:

$$\frac{Q \times \mu}{4 \times \pi \times k \times h} = 144700 \rightarrow \frac{65 \times 0,365 \times 10^{-3}}{4 \times 3,14 \times k \times h} = 144700 \rightarrow k \times h = 3,626 \times 10^{-12} \text{ m}^3$$

και:

$$1.065.700 = 144.700 \times \ln\left(\frac{2,246 \times k}{\varphi \times \mu \times \sigma \times r^2}\right) \rightarrow$$

$$\rightarrow 7,365 = \ln\left(\frac{2,246 \times k \times h}{\varphi \times \sigma \times h \times \mu \times r^2}\right) \rightarrow e^{7,365} = \frac{2,246 \times 3,626 \times 10^{-12}}{\varphi \times \sigma \times h \times 0,365 \times 10^{-3} \times 0,01} \rightarrow$$

$$\rightarrow 1.579,546 = \frac{2,231 \times 10^{-6}}{\varphi \times \sigma \times h} \rightarrow \varphi \times \sigma \times h = 1,412 \times 10^{-9} \text{ m/Pa}$$

Ο ζητούμενος ρυθμός άντλησης υπολογίζεται από την ίδια σχέση με δεδομένες τη μεταδοτικότητα και αποθηκευτικότητα του ταμειυτήρα και για τη δεδομένη πτώση πίεσης (30 bar = 3.000.000 Pa) σε χρόνο 10 έτη ($10 \times 365 \times 24 \times 3600 = 315.360.000$ sec):

$$\Delta P = \frac{Q \times \mu}{4 \times \pi \times k \times h} \times \ln\left(\frac{2,246 \times k \times h \times t}{\varphi \times \sigma \times h \times \mu \times r^2}\right)$$

$$3.000.000 = \frac{Q \times 0,365 \times 10^{-3}}{4 \times \pi \times 3,626 \times 10^{-12}} \times \ln\left(\frac{2,246 \times 3,626 \times 10^{-12} \times 315.360.000}{1,412 \times 10^{-9} \times 0,365 \times 10^{-3} \times 0,01}\right)$$

$$3.000.000 = Q \times 8.010.418 \times 26,934 \rightarrow Q = 0,0139 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 50 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

2. Εφαρμογές θέρμανσης

Οι χρήσεις της γεωθερμίας για θέρμανση καθορίζονται από τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού και τις θερμικές ανάγκες στη γύρω περιοχή. Όσον αφορά στις πιθανές εφαρμογές αυτές με φθίνουσα θερμοκρασία είναι:

- Ξήρανση ανόργανων 110 – 180 °C
- Ξήρανση τροφίμων και φυτικών υλών 90 – 160 °C
- Οικιακή θέρμανση 40 – 80 °C
- Θερμοκήπια 30 – 80 °C
- Θέρμανση κτηνοτροφικών μονάδων < 60 °C
- Θέρμανση κολυμβητηρίων και ιχθυοκαλλιεργειών 20 – 30 °C

Στις εφαρμογές αυτές τα γεωθερμικά ρευστά μπορούν να χρησιμοποιούνται απευθείας ή να θερμαίνουν εναλλάκτη με ξεχωριστό κύκλωμα καθαρού νερού, το οποίο στη συνέχεια θα μεταφέρει τη θερμότητα στην κάθε εφαρμογή. Η δεύτερη αυτή λύση προτιμάται γιατί τα γεωθερμικά ρευστά είναι διαβρωτικά και περιέχουν συνήθως υψηλές συγκεντρώσεις σε άλατα. Οι χρήσεις της γεωθερμίας για θέρμανση είναι συνήθως εποχικές γιατί η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών δεν επαρκεί πάντα για βιομηχανικές θερμικές εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας. Αυτό εν τούτοις δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα γιατί, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ΑΠΕ, η γεωθερμία μπορεί να παράγει θερμότητα παρακολουθώντας τη ζήτηση της. Συχνά επίσης, στην περιοχή ενός γεωθερμικού πεδίου υπό εκμετάλλευση η χρήση της

παραγόμενης θερμότητας γίνεται σε σειρά καλύπτοντας διαδοχικά διαφορετικές τοπικές ανάγκες με φθίνουσα θερμοκρασιακή απαίτηση.

2.1 Παράδειγμα: Γεωθερμική θέρμανση

Το γεωθερμικό ρευστό του Παραδείγματος 2 χρησιμοποιείται διαδοχικά σε δίκτυο τηλεθέρμανσης, για τη θέρμανση θερμοκηπίων και για τη θέρμανση ιχθυοκαλλιεργειών. Στις τρεις αυτές εφαρμογές η θερμοκρασία του νερού του δευτερεύοντος κυκλώματος των σχετικών εναλλακτών πρέπει να είναι 60 °C στην πρώτη, 40 °C στη δεύτερη και 30 °C στην τρίτη. Θεωρώντας ότι το γεωθερμικό ρευστό θα πρέπει να αφήνει τον εναλλάκτη του κάθε συστήματος σε θερμοκρασία 5 °C υψηλότερη από την αντίστοιχη θερμοκρασιακή απαίτηση και ότι οι απαιτήσεις θέρμανσης διαρκούν έξι μόνο μήνες το χρόνο, να υπολογιστεί η διαθέσιμη γεωθερμική θερμότητα για κάθε σύστημα και η αντίστοιχη εξοικονόμηση πετρελαίου. Δίνεται η θερμοχωρητικότητα του νερού 4,2 kJ/kg/°C και θερμογόνο δύναμη πετρελαίου 36 MJ/lt.

ΛΥΣΗ

Ο γεωθερμικός πόρος του Παραδείγματος 1 παράγει 50 m³/h νερό θερμοκρασίας 80 °C, οπότε η διαθέσιμη θερμότητα στη διάρκεια 6 μηνών που λειτουργεί η γεώτρηση είναι:

$$Q_t = 50 * 1000 * 4,2 * (80 - 25) * 24 * 30 * 6 = 49.896.000 \text{ MJ} = 13.860 \text{ MWh}.$$

Από τον εναλλάκτη της πρώτης εφαρμογής το γεωθερμικό ρευστό εξέρχεται στους 65 °C, οπότε η διαθέσιμη θερμότητα για την πρώτη εφαρμογή είναι:

$$Q_{dh} = 50 * 1000 * 4,2 * (80 - 65) * 24 * 30 * 6 = 13.080.000 \text{ MJ} = 3.780 \text{ MWh}.$$

Για την παροχή του παραπάνω ποσού θερμότητας από πετρέλαιο (θερμογόνο δύναμη: 36.000 kJ/lt = 10 kWh/lt απαιτούνται:

$$3.780.000 / 10 = 378.000 \text{ lt πετρελαίου}.$$

Από τον εναλλάκτη της δεύτερης εφαρμογής το γεωθερμικό ρευστό εξέρχεται στους 45 °C, οπότε η διαθέσιμη θερμότητα για την πρώτη εφαρμογή είναι:

$$Q_{dh} = 50 * 1000 * 4,2 * (65 - 45) * 24 * 30 * 6 = 18.144.000 \text{ MJ} = 5.040 \text{ MWh}.$$

Για την παροχή του παραπάνω ποσού θερμότητας από πετρέλαιο απαιτούνται:

$$5.040.000 / 10 = 504.000 \text{ lt πετρελαίου}.$$

Από τον εναλλάκτη της τρίτης εφαρμογής το γεωθερμικό ρευστό εξέρχεται στους 35 °C, οπότε η διαθέσιμη θερμότητα για την πρώτη εφαρμογή είναι:

$$Q_{dh} = 50 * 1000 * 4,2 * (45 - 35) * 24 * 30 * 6 = 9.072.000 \text{ MJ} = 2.520 \text{ MWh.}$$

Για την παροχή του παραπάνω ποσού θερμότητας από πετρέλαιο απαιτούνται:

$$2.520.000 / 10 = 252.000 \text{ lt πετρελαίου.}$$

Η συνολική απόδοση του συστήματος διαδοχικής θέρμανσης είναι:

$$(3.780 + 5.040 + 2.520)/13680 = 83 \text{ \%}.$$

3. Γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή

Για να ενδείκνυται ένα γεωθερμικό πεδίο για ηλεκτροπαραγωγή θα πρέπει να είναι υψηλής ενθαλπίας (θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού πάνω από 150 °C) αν και η χρήση των δυαδικών συστημάτων που θα αναπτυχθούν στη συνέχεια επιτρέπει την οικονομικά βιώσιμη ηλεκτροπαραγωγή ακόμα και για πηγές χαμηλής ενθαλπίας (θερμοκρασία της τάξης των 80 °C). Για την γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή και ανάλογα με τη θερμοκρασία και την περιεκτικότητα των γεωθερμικών ρευστών σε σταθερά αέρια (κυρίως CO₂ αλλά ενώσεις του θείου κ.α.) χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές στην βάση των οποίων βρίσκεται ο θερμικός κύκλος τους αμμοστροβίλου (κύκλος Rankine). Έτσι τα συστήματα γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να διακριθούν στα εξής:

1. Για **πεδία υψηλής ενθαλπίας και ξηρού (υπέρθερμου) ατμού** ο γεωθερμικός ατμός, στην πίεση της κεφαλής της γεώτρησης, εκτονώνεται άμεσα στο στρόβιλο του κύκλου Rankine. Αν ο ατμός δεν περιέχει μεγάλο κλάσμα σταθερών αερίων, τότε μετά το στρόβιλο ακολουθεί συμπυκνωτής του ατμού που παραμένει μετά το στρόβιλο, ο οποίος συμπυκνωτής λειτουργεί σε υποπίεση και αυξάνει την απόδοση του αμμοστροβίλου. Το συμπύκνωμα (νερό) από τον συμπυκνωτή είτε χρησιμοποιείται σε εφαρμογές θέρμανσης είτε επανεκχέεται στον ταμιευτήρα, υπό πίεση, είτε απορρίπτεται, αν πληρεί τις περιβαλλοντικές προδιαγραφές. Αν ο ατμός περιέχει σημαντικό ποσοστό σταθερών αερίων (πάνω από 20 %) τότε μετά το στρόβιλο είτε διαφεύγει στο περιβάλλον (σε ατμοσφαιρική πίεση, γεγονός που ελαττώνει την απόδοση του στροβίλου, όμως η δημιουργία υποπίεσης μετά το στρόβιλο, παρουσία σταθερών αερίων είναι πολύ ενεργοβόρα και δεν συμφέρει ούτε ενεργειακά ούτε οικονομικά), είτε συμπιέζεται εκ νέου και επανεκχέεται στον ταμιευτήρα.
2. Για **πεδία υψηλής ενθαλπίας και υγρού ατμού (μίγμα κορεσμένου ατμού και νερού)** μετά την κεφαλή της γεώτρησης και στην ίδια πίεση παρεμβάλλεται ένας διαχωριστής, ο οποίος οδηγεί το κλάσμα ατμού του

ρευστού στο στρόβιλο και το κλάσμα υγρού σε περεταίρω χρήσεις θέρμανσης ή για επανέκχυση στον ταμιευτήρα. Και στην περίπτωση αυτή αν ο ατμός δεν περιέχει μεγάλο κλάσμα σταθερών αερίων, τότε μετά το στρόβιλο ακολουθεί συμπυκνωτής που αυξάνει την απόδοση του ατμοστροβίλου, ενώ στην αντίθετη περίπτωση χρησιμοποιείται ατμοσφαιρικός συμπυκνωτής και τόσο το συμπύκνωμα όσο και τα σταθερά αέρια χρησιμοποιούνται όπως στην πρώτη περίπτωση. Στην περίπτωση που η υγρή φάση από τον πρώτο διαχωριστή έχει υψηλή θερμοκρασία τότε μπορεί να οδηγηθεί σε δεύτερο διαχωριστή χαμηλότερης πίεσης (η ελάττωση της πίεσης εξατμίζει ένα μέρος της) και από το διαχωριστή αυτό οι ατμοί οδηγούνται σε δεύτερο στρόβιλο, για τη συμπληρωματική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

3. Για **πεδία μέσης ή ακόμα και χαμηλής ενθαλπίας** το γεωθερμικό ρευστό (που στην περίπτωση αυτή είναι συνήθως υγρό με μικρό ποσοστό σταθερών αερίων) οδηγείται σε εναλλάκτη θερμότητας όπου εξατμίζει υγρό χαμηλότερου σημείου ζέσης (ψυκτικό, ισοβουτάνιο, ισοπεντάνιο κ.α.) οι ατμοί του οποίου τροφοδοτούνται στο στρόβιλο, στη συνέχεια υγροποιούνται υπό χαμηλή πίεση, συμπιέζονται σε αντλία και οδηγούνται ξανά στον εναλλάκτη για επαναληφθεί ο κλειστός κύκλος του ψυκτικού.

Στις δύο πρώτες περιπτώσεις που είναι και οι πλέον αποδοτικές, η αύξηση της πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης αυξάνει την απόδοση του ατμοστροβίλου, ελαττώνει όμως την παροχή γεωθερμικού ρευστού και κατά συνέπεια την παροχή θερμότητας στον στρόβιλο. Η ελάττωση αυτή ελαττώνει την ηλεκτροπαραγωγή του στροβίλου. Γενικά θα πρέπει να τονισθεί ότι οι μονάδες γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής έχουν συνήθως πολύ χαμηλότερο συντελεστή απόδοσης από τις εφαρμογές ατμοστροβίλων με ορυκτά καύσιμα.

3.1 Παράδειγμα: Γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή

Η θερμοκρασία γεωθερμικού ταμιευτήρα είναι 300 °C και περιέχει κορεσμένο νερό. Για την γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή από τον ταμιευτήρα αυτό χρησιμοποιείται ατμοστροβίλος με συμπυκνωτή που λειτουργεί στα 0,1 bar. Αν η ακτίνα της γεώτρησης είναι 15 cm, να υπολογιστεί η ηλεκτρική ισχύ και η απόδοση της ηλεκτροπαραγωγής αν η κεφαλή της γεώτρησης και ο διαχωριστής λειτουργούν στα 5, 10, 15 και 20 bar.

ΛΥΣΗ

Η ειδική ενθαλπία του γεωθερμικού ρευστού είναι 1344 kJ/kg (θεωρείται κορεσμένο υγρό στη θερμοκρασία του ταμιευτήρα). Για τη συγκεκριμένη διατομή γεωτρήσεων και για τις παραπάνω πιέσεις υπολογίζεται η ογκομετρική παροχή γεωθερμικού ρευστού (δυναμικού μίγματος κορεσμένου νερού και ατμού), από την Εξίσωση 2.

P, bar	10	20	30	40
--------	----	----	----	----

G, kg/m ² /s	376	332	309	293
Q, tn/h	43	38	35	33

Από τους θερμοδυναμικούς πίνακες βρίσκουμε τις ειδικές ενθαλπίες και εντροπίες κορεσμένου νερού και ατμού στις συνθήκες του διαχωριστή:

	ενθαλπία		εντροπία
	ατμός	νερό	ατμός
	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg/K
10 bar	2778,1	762,81	6,5865
20 bar	2799,5	908,79	6,3409
30 bar	2804,2	1008,42	6,1869
40 bar	2801,4	1087,31	6,0701

Θεωρώντας ότι το δυαδικό γεωθερμικό ρευστό δεν ανταλλάσει ενέργεια κατά την άνοδο του από τη γεώτρηση, η συνολική του ενθαλπία στο διαχωριστή θα συνεχίσει να είναι 1344 kJ/Kg και αν x το ποσοστό του ατμού στο διαχωριστή τότε αυτό θα είναι:

10 bar	$1344 = 2778,1 \cdot x + 762,81 \cdot (1 - x) \Leftrightarrow x = 581,19 / 2015,29 = 0,288$
20 bar	$1344 = 2799,5 \cdot x + 908,79 \cdot (1 - x) \Leftrightarrow x = 435,21 / 1890,71 = 0,230$
30 bar	$1344 = 2804,2 \cdot x + 1008,42 \cdot (1 - x) \Leftrightarrow x = 335,58 / 1795,78 = 0,187$
40 bar	$1344 = 2801,4 \cdot x + 1087,31 \cdot (1 - x) \Leftrightarrow x = 256,69 / 1714,09 = 0,150$

και η ποσότητα ατμού που θα διοχετεύεται στο στρόβιλο θα είναι:

10 bar	$0,288 \cdot 43 = 12,4 \text{ tn/h}$ με ενθαλπία	$12,4 \cdot 1000 \cdot 2778,1 / 3600 = 9,56 \text{ MJ/s}$
20 bar	$0,230 \cdot 38 = 8,7 \text{ tn/h}$ με ενθαλπία	$8,7 \cdot 1000 \cdot 2799,5 / 3600 = 6,80 \text{ MJ/s}$
30 bar	$0,187 \cdot 35 = 6,5 \text{ tn/h}$ με ενθαλπία	$6,5 \cdot 1000 \cdot 2804,2 / 3600 = 5,09 \text{ MJ/s}$
40 bar	$0,150 \cdot 33 = 4,9 \text{ tn/h}$ με ενθαλπία	$4,9 \cdot 1000 \cdot 2801,4 / 3600 = 3,84 \text{ MJ/s}$

Στην έξοδο του στρόβιλου και πίεση 0,1 bar η εντροπία κορεσμένου νερού και ατμού είναι αντίστοιχα 0,6493 και 8,1502 kJ/kg/s και η ενθαλπία κορεσμένου νερού και ατμού είναι 191,83 και 2584,7 kJ/kg. Αν η λειτουργία του στρόβιλου θεωρηθεί ισεντροπική:

10 bar	$6,5865 = 8,1502 \cdot x + 0,6493 \cdot (1 - x) \Leftrightarrow x = 5,937 / 7,5009 = 0,792$
20 bar	$6,3409 = 8,1502 \cdot x + 0,6493 \cdot (1 - x) \Leftrightarrow x = 5,692 / 7,5009 = 0,758$
30 bar	$6,1869 = 8,1502 \cdot x + 0,6493 \cdot (1 - x) \Leftrightarrow x = 5,538 / 7,5009 = 0,738$
40 bar	$6,0701 = 8,1502 \cdot x + 0,6493 \cdot (1 - x) \Leftrightarrow x = 5,421 / 7,5009 = 0,723$

και η θερμοότητα που φθάνει στον συμπυκνωτή θα είναι:

10 bar	$12,4 * (1000 / 3600) * (0,792 * 2584,7 + 0,208 * 191,83) = 7,18 \text{ MJ/s}$
20 bar	$8,7 * (1000 / 3600) * (0,758 * 2584,7 + 0,241 * 191,83) = 4,88 \text{ MJ/s}$
30 bar	$6,5 * (1000 / 3600) * (0,738 * 2584,7 + 0,262 * 191,83) = 3,56 \text{ MJ/s}$
40 bar	$4,9 * (1000 / 3600) * (0,723 * 2584,7 + 0,277 * 191,83) = 2,54 \text{ MJ/s}$

Οπότε η ισχύς του ατμοστροβίλου είναι:

10 bar	$0,8 * (9,56 - 7,18) = 2,38 \text{ MW}$
20 bar	$0,8 * (6,80 - 4,88) = 1,92 \text{ MW}$
30 bar	$0,8 * (5,09 - 3,56) = 1,54 \text{ MW}$
40 bar	$0,8 * (3,84 - 2,54) = 1,21 \text{ MW}$

και η απόδοση της γεωθερμικής διάταξης είναι:

10 bar	$2,38 / (1344 * 43 * 1000 / 3600) = 14,8 \%$
20 bar	$1,92 / (1344 * 38 * 1000 / 3600) = 13,5 \%$
30 bar	$1,54 / (1344 * 35 * 1000 / 3600) = 11,8 \%$
40 bar	$1,21 / (1344 * 33 * 1000 / 3600) = 9,8 \%$

4. Άσκηση

Η συνολική ετήσια κατανάλωση πετρελαίου θέρμανσης σε πόλη Α χιλιάδων κατοίκων ανέρχεται σε Β τόνους, στο διάστημα Οκτωβρίου – Μαρτίου. Γεωθερμική γεώτρηση νερού 90 °C και ακτίνας 25 cm για την οποία έχουν ληφθεί τα παρακάτω αποτελέσματα πτώσης πίεσης:

ώρες	1	6	12	24	48
bar	20	21	22	24	26

υπό παροχή Γ m³/h, πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των παραπάνω θερμικών αναγκών μέσω δικτύου τηλεθέρμανσης. Αν το νερό του δικτύου τηλεθέρμανσης πρέπει να έχει θερμοκρασία 60 °C και το νερό της γεώτρησης να εξέρχεται από την εγκατάσταση των εναλλακτών σε θερμοκρασία 5 °C υψηλότερη, να υπολογιστεί η διάρκεια ζωής της γεώτρησης εάν αυτή μπορεί να λειτουργεί σε μέγιστη ΔΡ ίση με 50 bar. Δίνονται: ιξώδες νερού στους 90 °C 0,000315 kg/m/s και θερμογόνο δύναμη πετρελαίου 42 MJ/kg.

				A	B	Γ
1η	Παπανικολάου	Κοκκίνης	Χατζόπουλος	25	4167	300
2η	Παζούρου	Βελάλη	Έλληνα	26	4333	310

				A	B	Γ
3η	Κρανιώτης	Λεργιός	Δημητράκης	27	4500	320
4η	Παληάς	Γκαδανόπουλος	Ασιμής	28	4667	330
5η	Στάμος	Αγιασμένος	Κόκκινος	29	4833	340
6η	Λυμπέρης	Παρασκευάς		30	5000	350
7η	Βογιατζή	Χλιβίνου	Οικονόμου	31	5167	360
8η	Καρδάκη	Πλέσια		32	5333	370
9η	Παναγόπουλος	Σαχινίδης		33	5500	380
10η	Καδεμίδου	Σαμακόβλη		34	5667	390
11η	Κιατίπης	Σιπαράς	Kabongo	35	5833	400
12η	Δημότα	Καζαντζίδης		36	6000	410
13η	Χατζόγλου	Τσικαμπάκας	Νικάκης	37	6167	420
14η	Χρόνη	Αθανασίου		38	6333	430
15η	Ιωαννάκη	Σιμπούλου	Αθανασίου	39	6500	440
16η	Συμεωνίδης	Μπούσης	Κοσμαδάκη	40	6667	450
17η	Ευσταθοπούλου	Ματζώρου		41	6833	460
18η	Τσαλικίδου	Χαραλάμπους		42	7000	470
19η	Μηλιώτη	Αναστασίου		43	7167	480
20η	Πογαρίδου	Ζέρβα		44	7333	490
21η	Κεβρεκίδης	Γαλανόπουλος	Μελισσάρης	45	7500	500
22η	Πέτας	Ζήσκος		46	7667	510
23η	Κουφούδης	Μίχας	Μεγρέμης	47	7833	520
24η	Καραβασίλη	Βαγγέλη		48	8000	530
25η	Σαρρίδου			49	8167	540
26η	Καραγιάννης			50	8333	550