

## 14. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

---

### 14.1. Τεχνητή Αποθήκευση Ενέργειας

---

Η αποθήκευση της ενέργειας (energy storage) αποτελεί με τον έναν ή τον άλλο τρόπο τόσο μια φυσική διεργασία (π.χ. δημιουργία ορυκτών καυσίμων), όσο και μια τεχνητή μέθοδο για την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών του ανθρώπου. Σε αυτήν την παρουσίαση δεν αναφέρονται τα συστήματα αποθήκευσης των συμβατικών καυσίμων (δεξαμενές, υπόγεια αποθήκευση φυσικού αερίου κτλ.).

Η ταξινόμηση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι αρκετά περίπλοκη. Μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το σκοπό του συστήματος (π.χ. παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ή θερμότητας), ανάλογα με τη μορφή της ενέργειας που αποθηκεύεται ή ανάλογα με το αν τα συστήματα αυτά είναι κινητά ή σταθερά. Στις σημειώσεις αυτές ακολουθείται η πρώτη ταξινόμηση. Έτσι, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν ως:

#### (α) Αποθήκευση Ηλεκτρισμού

1. *Δυναμική Ενέργεια*
  - Άντληση νερού (pumped hydro storage)
  - Συμπιεσμένος αέρας (compressed gas)
  - Ελατήρια (springs)
2. *Κινητική Ενέργεια*
  - Σφόνδυλοι (flywheels)
3. *Χημική Ενέργεια*
  - Συνθετικά καύσιμα (από τον γαιάνθρακα, υγρά και αέρια, και από τη βιομάζα)
  - Ηλεκτροχημικές ενεργειακές πηγές (Συσσωρευτές-batteries, Υδρογόνο - υγρό ή αέριο-, στοιχεία καυσίμων - fuel cells)
4. *Αποθήκευση ηλεκτρικής και μαγνητικής ενέργειας*
  - Μαγνητικά πεδία (υπεραγώγιμα πηνία εμβαπτισμένα σε υγρό ήλιο υπό κενό – superconducting magnetic energy storage, προβληματική η διατήρηση των χαμηλών θερμοκρασιών)
  - Ηλεκτρικά πεδία (υπερ-πυκνωτές από άνθρακα κ.α. – advanced electrochemical capacitors: βρίσκονται σήμερα σε νηπιακή ανάπτυξη)

#### (β) Αποθήκευση Θερμότητας

- Θερμό νερό, για βραχυπρόθεσμη (ώρες, ημέρες) ή μακροπρόθεσμη αποθήκευση (μήνες)
- Θερμά στερεά (π.χ. πέτρες, τούβλα, θερμοσυσσωρευτές, ανάλογα ψύξη για το καλοκαίρι)
- Με την τήξη ορισμένων στερεών (λανθάνουσα θερμότητα τήξης)

## 14.2 Αναγκαιότητα Αποθήκευση της Ενέργειας

---

Γιατί είναι σημαντική η αποθήκευση ενέργειας και κυρίως η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας;

- Σήμερα ουσιαστικά χρησιμοποιούμε αποθηκευμένη ενέργεια με τη μορφή των Ορυκτών Καυσίμων, τα οποία αποτελούν εξέλιξη της *αποθήκευσης* της βιομάζας. Αλλά και η αποθήκευση των συμβατικών καυσίμων (σε δεξαμενές, σε υπόγειες στοές για το φυσικό αέριο, στο ντεπόζιτο της βενζίνης του αυτοκινήτου) αποτελεί μορφή αποθήκευσης ενέργειας.
- Αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για να γίνει δυνατή η αξιοποίηση των περισσότερων ΑΠΕ και, ιδιαίτερα, της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας. Μόνο με αξιόπιστα συστήματα αποθήκευσης της ενέργειας μπορούν να λειτουργήσουν τα αυτόνομα συστήματα ΑΠΕ, αλλά και να επιτευχθεί η ενσωμάτωση σε μεγάλη κλίμακα της ηλεκτρικής ισχύος από τις ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο.
- Είναι σημαντική για την εξισορρόπηση της ηλεκτρικής ισχύος από τις εταιρίες ηλεκτροπαραγωγής: οι σταθμοί παραγωγής λειτουργούν αποδοτικότερα με σταθερή παραγωγή και για να καλύψουν ώρες αιχμής θα ήταν επιθυμητή η αποθήκευση της περίσσειας στα χρονικά διαστήματα με μικρότερη κατανάλωση. Η αποθήκευση ηλεκτρισμού μπορεί να μειώσει το λειτουργικό κόστος μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής. Επιπλέον βοηθά στο πρόβλημα της «ποιότητας» του ηλεκτρισμού, δηλαδή να μειώνει τις διακυμάνσεις του δυναμικού, της έντασης ή της συχνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Η διαθεσιμότητα αξιόπιστης αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας θα οδηγήσει στη χρήση ηλεκτρικών αυτοκινήτων, τουλάχιστον μέσα στις πόλεις, με προφανή θετική επίδραση στο περιβάλλον της πόλης.
- Μπορεί να καλύψει τους καταναλωτές σε περιπτώσεις διακοπών (συστήματα UPS) και για τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας στις ώρες αιχμής, όταν και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλότερο.

Η βέλτιστη μέθοδος αποθήκευσης της ενέργειας για κάθε περίπτωση εξαρτάται από την **ποσότητα** της ενέργειας που πρέπει να αποθηκευτεί (ενεργειακή πυκνότητα του υλικού), τη **χρονική διάρκεια αποθήκευσης**, τη **μορφή της ενέργειας** που απαιτείται για αποθήκευση και την **απόδοση** με την οποία ανακτάται η ενέργεια. Υπάρχουν διάφορα συστήματα αποθήκευσης της ενέργειας, από μερικά mW για το βηματοδότη μέχρι ορισμένα MW σε μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής.

Η *ενεργειακή πυκνότητα* καθορίζει κυρίως την επιλογή του συστήματος αποθήκευσης. Η ενεργειακή πυκνότητα ορισμένων υλικών παρουσιάζεται στον Πίνακα 14.1. Υπενθυμίζεται ότι τα πρώτα αυτοκίνητα ήταν ηλεκτρικά, αλλά η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα της βενζίνης γρήγορα άλλαξε τον τρόπο κίνησης των αυτοκινήτων. Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές δεν είναι αρκετή και συνεχίζονται οι προσπάθειες για τη βελτίωσή τους.

## 14.3 Αποθήκευση Ηλεκτρισμού με Δυναμική Ενέργεια

---

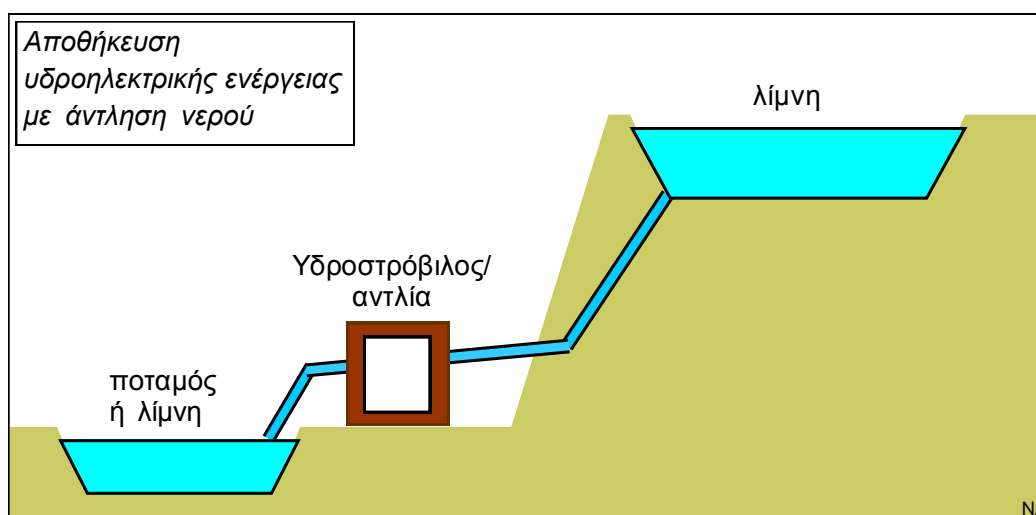
### 14.3.1 Αντλησιοταμίευση (pumped hydroelectric energy storage)

Η αρχή της μεθόδου είναι απλή. Χρησιμοποιεί την περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας (κατά τη διάρκεια χαμηλής ζήτησης) για να μεταφέρει νερό από ένα χαμηλότερο σε έναν υψηλότερο υδάτινο ταμιευτήρα (τεχνητό ή φυσικό) κατά τη διάρκεια της νύχτας που υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ισχύος. Η ανάκτηση της ενέργειας εξαρτάται από τον όγκο του νερού και από το ύψος πάνω από τον

στρόβιλο (Σχήματα 14.1 και 14.2). Για να είναι αποδοτική η αντλησιοταμίευση απαιτείται τουλάχιστον 100 m ύψος, ενώ συνήθως ο κατώτερος ταμιευτήρας είναι τεχνητός (με εκσκαφή). Η μονάδα δεν επηρεάζει τη φυσική ροή της λίμνης, ενώ περιορίζεται η συγκέντρωση ιζημάτων στον πυθμένα του ταμιευτήρα.

**Πίνακας 14.1.** Ενεργειακή Πυκνότητα Ορισμένων Υλικών (σε kW/kg)

Βενζίνη	14
Μπαταρίες μολύβδου	0,04
Υδροαποθήκευση	0,3 (ανά m <sup>3</sup> )
Σφόνδυλος (από ανοξείδωτο χάλυβα)	0,05
Σφόνδυλος (από carbon fiber)	0,2
Σφόνδυλος (από πυρίτιο)	0,9
Υδρογόνο	38
Συμπιεσμένος αέρας	2 (ανά m <sup>3</sup> )



**Σχήμα 14.1.** Σχηματικό διάγραμμα αποθήκευσης υδροενέργειας με άντληση.

Επειδή η υδροϊσχύς έχει απόδοση περίπου 80-90%, η συνολική απόδοση της μεθόδου ανέρχεται σε 65-70% (και ίσως λίγο λιγότερο, γιατί η απόδοση για την ανύψωση του νερού είναι μικρότερη από 0,8).

Η μέθοδος εφαρμόζεται από το 1929 στις Η.Π.Α. και σήμερα ακόμη παραμένει ουσιαστικά η κυριότερη, σχεδόν η μοναδική, μέθοδος αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεγαλύτερη εγκατάσταση στον κόσμο βρίσκεται στη λίμνη Michigan ( $1,5 \times 10^7$  kWh). Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι και η γρήγορη εκκίνηση και διακοπή λειτουργίας του συστήματος (μέσα σε 30 δευτερόλεπτα).

Ο κυριότερος περιορισμός στην ανάπτυξη της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος κατασκευής των τεχνητών ταμιευτήρων, αλλά υπάρχουν και γεωλογικοί, γεωγραφικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί. Σήμερα διερευνάται η δυνατότητα χρήσης υπόγειων ταμιευτήρων.

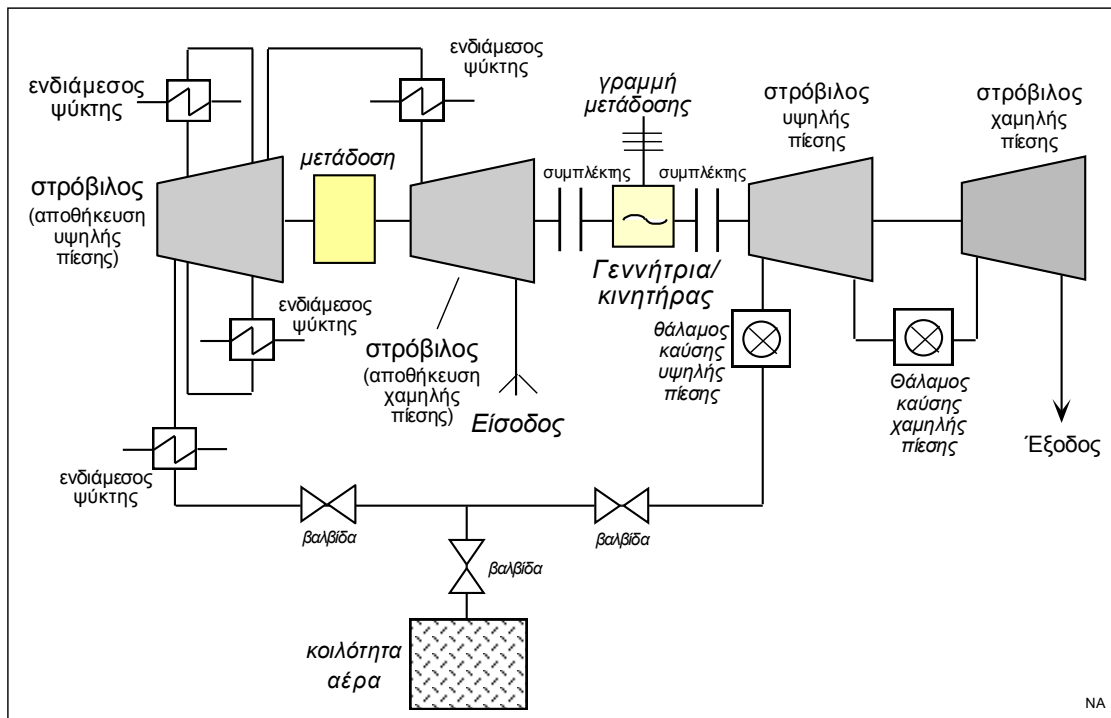


**Σχήμα 14.1.** Φωτογραφία τους ανώτερου ταμιευτήρα του σταθμού αντλησιοταμίευσης στο Goldisthal της Γερμανίας που βρίσκεται σε υψόμετρο 880 m. Κατασκευάστηκε μεταξύ 1997 και 2004 και έχει ισχύ 1060 MW (χρησιμοποιούνται τέσσερις υδροστρόβιλοι Francis).

### 14.3.2 Συμπιεσμένος Αέρας (compressed air)

Η μέθοδος χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια εκτός ωρών αιχμής για να συμπιέσει και να αποθηκεύσει αέρα σε αεροστεγή υπόγεια σπήλαια. Όταν υπάρξει ανάγκη ο αποθηκευμένος αέρας απελευθερώνεται, θερμαίνεται και εκτονώνεται μέσω αεριοστροβίλου (Σχήμα 14.3). Η τεχνική έχει υψηλή ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας συγκρινόμενη με τις εναλλακτικές μεθόδους. Η αποθηκευόμενη ενέργεια είναι περίπου 10 φορές υψηλότερη ανά  $m^3$  από την άντληση νερού. Σήμερα μπορούν να κατασκευαστούν μονάδες από 5 μέχρι 350 MW. Στις Η.Π.Α. από το 1991 λειτουργεί επίσης μονάδα 110 MW στην Alabama. Παρακάτω περιγράφεται η μονάδα που βρίσκεται στο Huntorf της Γερμανίας.

- Ο ταμιευτήρας αποθήκευσης είναι υπόγειο σπήλαιο (σε αποθέσεις φυσικού αλατιού)
- Ο όγκος αποθήκευσης είναι  $300.000 m^3$ .
- Ο αέρας συμπιέζεται στις 70 atm (Η συμπίεση γίνεται με ηλεκτρικούς συμπιεστές)
- Το σύστημα αποδίδει 300 MW για 2 ώρες χρησιμοποιώντας το συμπιεσμένο αέρα για να λειτουργήσει ένας στρόβιλος
- Δύσκολο να εκτιμηθεί η απόδοση του συστήματος, αν και δεν είναι υψηλή.
- Δυο παράγοντες είναι υπεύθυνοι για την όχι και τόσο καλή απόδοση του συστήματος:
  - Απαιτείται ενέργεια για να ψύξει τον αέρα καθώς αυτός συμπιέζεται. Κρίσιμη προϋπόθεση.
  - Απαιτείται ενέργεια (καύσιμο) για να διασειλεί τον αποθηκευμένο ψυχρό αέρα πριν μπει στο στρόβιλο
- Επιθυμητό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού θα ήταν η ανακύκλωση της απορριπτόμενης ενέργειας από το στάδιο της συμπίεσης και της χρήσης της στο στάδιο της εκτόνωσης.



**Σχήμα 14.3.** Σχηματικό διάγραμμα της μονάδας αποθήκευσης αέρα με συμπιεσμένο αέρα στο Hundorf της Γερμανίας.

Πόσο θα αυξηθεί η θερμοκρασία του αέρα (σε συνθήκες 1 atm και 20°C) όταν συμπιεστεί στις 100 atm;

Γενικά, η σχέση πίεσης και θερμοκρασίας είναι

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

Για ιδανικό αέριο  $\gamma=1$ . Για αέρα  $\gamma=1,4$ . Επομένως  $T_2 = 293 \times 100^{(1,4-1)/1,4}$

$\Rightarrow T_2 = 1093 \text{ K} = 720^\circ\text{C}$ . Δηλαδή, θα λιώσει ο ταμειυτήρας!

## 14.4 Αποθήκευση Ηλεκτρισμού με Κινητική Ενέργεια

### 14.4.1 Σφόνδυλοι (flywheels)

Οι σφόνδυλοι αποθηκεύουν κινητική ενέργεια σε ένα δρομέα (rotor) και λειτουργούν ως μια μηχανική μπαταρία. Η διάμετρος του δρομέα ποικίλλει από μερικά εκατοστά μέχρι ορισμένα μέτρα, με ταχύτητες περιστροφής που ξεπερνούν της 200.000 rpm. Λειτουργούν άλλοτε ως γεννήτριες και άλλοτε ως κινητήρες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά και εκεί που υπάρχει απότομα διαθέσιμη ενέργεια (π.χ. φρενάρισμα). Έχουν προταθεί για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Μέχρι τώρα βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο, είναι αντιοικονομικοί και δεν υπάρχει εφαρμογή σε μονάδα ηλεκτροπαραγωγής.

Τα βασικά μέρη ενός σφονδύλου είναι: (1) ο δρομέας, (2) ο άξονας, (3) το δοχείο κενού που το περιβάλλει και (4) η γεννήτρια (Σχήματα 14.4-6). Ο δρομέας κατασκευάζεται από υλικό με μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό και χαμηλή πυκνότητα (π.χ. Kevlar - είδος carbon fiber-, πυρίτιο).

### Δυναμικότητα

Η κινητική ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα σφόνδυλο δίνεται από τον τύπο

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (11-1)$$

όπου  $I$  είναι η ροπή αδρανείας ( $\text{kg m}^2$ ) και  $\omega$  η ταχύτητα περιστροφής ( $\text{rad/s}$ ). Οι σφόνδυλοι έχουν ικανότητα αποθήκευσης από 0,5-500 kWh.

### Πλεονεκτήματα:

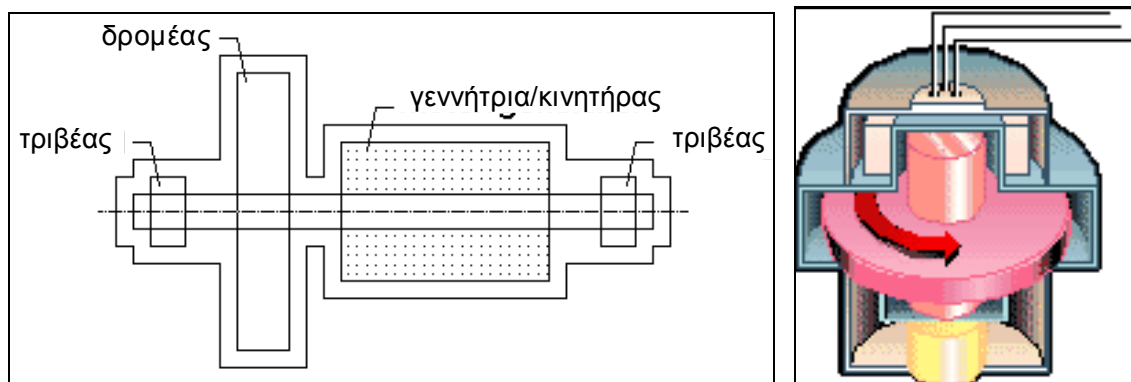
- Υψηλή απόδοση: ~80%
- Δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία
- Μεγάλος χρόνος ζωής

### Μειονεκτήματα:

- Απώλειες με το χρόνο (κατάλληλο για σχετικά βραχυπρόθεσμη αποθήκευση, κατάλληλο για συστήματα UPS)

### Προκλήσεις

- Μείωση του βάρους του συστήματος
- Ανάπτυξη δοχείου κενού
- Μείωση του κόστους

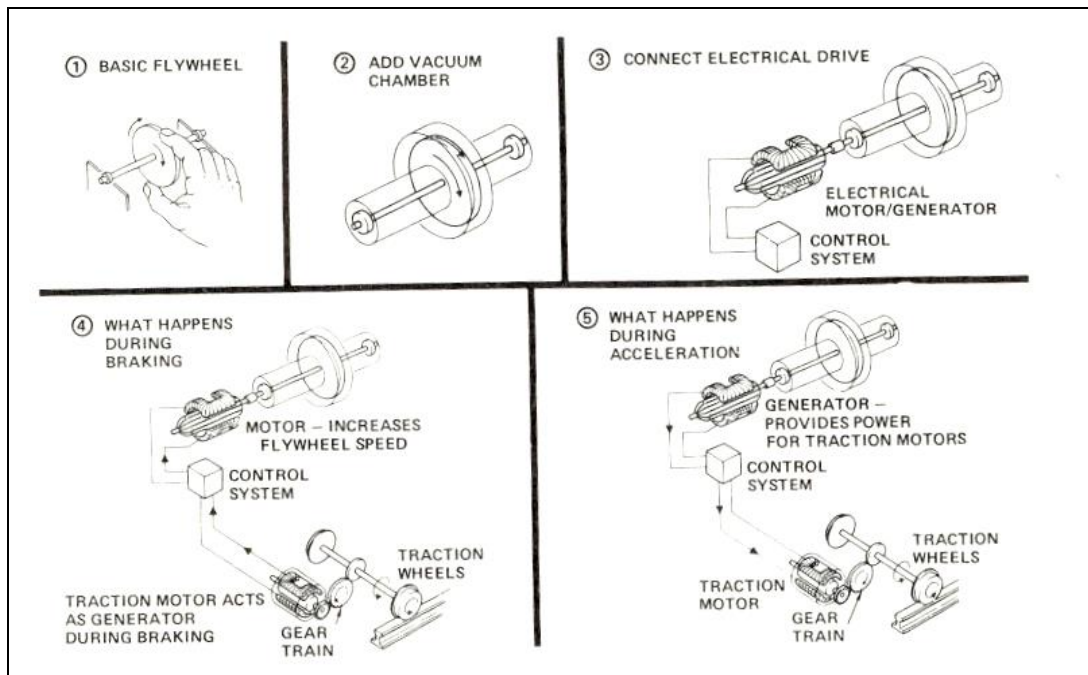


Σχήμα 14.4. Σχηματική παράσταση ενός μηχανικού σφονδύλου.

## 14.5 Αποθήκευση Ηλεκτρισμού με Χημική Ενέργεια

### 1) Συσσωρευτές

Υπάρχει ανάγκη για ανάπτυξη αξιόπιστων συσσωρευτών, ανώτερης ποιότητας από τα συμβατικά συστήματα των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος, που θα διαρκούν για περισσότερους από 2000 κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης. Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος εφευρέθηκαν το 1859 από τον Gaston Planté και χρησιμοποιούνται ακόμη ευρύτατα στο μεταφορικό τομέα, για αποθήκευση ηλιακής ενέργειας κτλ. Οι περιορισμοί τους είναι: (α) απαιτούν συχνή συντήρηση για αντικατάσταση του νερού που χάνεται, (β) είναι σχετικά ακριβά για ευρεία χρήση στα ΦΒ συστήματα και (γ) επειδή χρησιμοποιούν μολύβδο είναι σχετικά βαριά. Τα πλεονεκτήματά τους είναι ότι έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και υπάρχουν διαθέσιμα στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία.



Σχήμα 14.5. Τρόπος λειτουργίας του μηχανικού σφονδύλου.

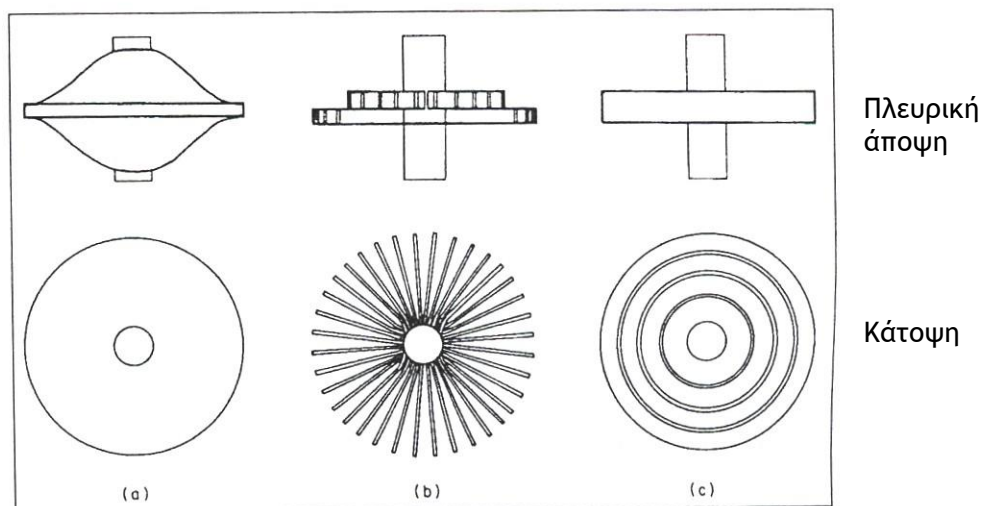


Figure 5.18. Different flywheel concepts. The upper line gives side views, the lower line top views.

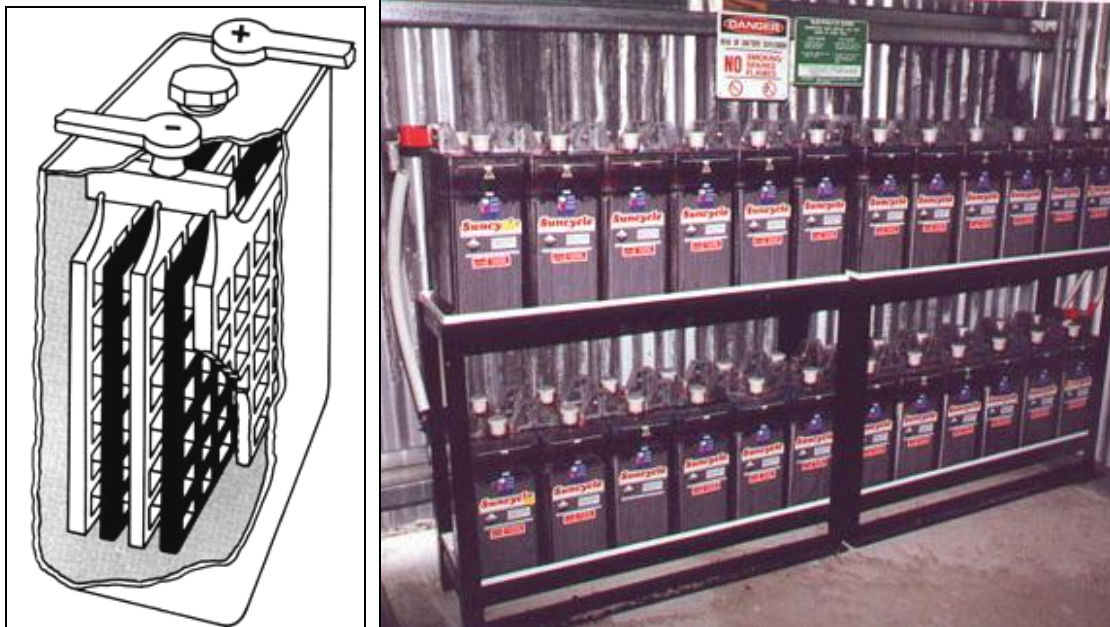
Σχήμα 14.6. Διάφορες γεωμετρίες του μηχανικού σφονδύλου.

Οι περιοχές ισχύος των συσσωρευτών κυμαίνονται ανάλογα με τη χρήση:

- (1) 1-4 kW για οικιακή χρήση
- (2) 30-100 kW για εμπορική, βιομηχανική ή οικιστική χρήση
- (3) >1 MW για σύνδεση με το δίκτυο.

Υποψήφια εναλλακτικά συστήματα υπάρχουν πολλά και, σίγουρα, πολλά ακόμη βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο (όπως το σύστημα ψευδάργυρος-βρώμιο):

- νικέλιο-ψευδάργυρος και νικέλιο-σίδηρος, παρέχουν ορισμένες βελτιώσεις
- ψευδάργυρος-χλώριο, νάτριο-θείο, λίθιο-θειούχος σίδηρος μπορούν να παρουσιάσουν σημαντικές βελτιώσεις. Μειονέκτημα το υψηλό κόστος και τα μέτρα ασφάλειας για μεγάλες μονάδες



**Σχήμα 14.7.** Σχηματική παράσταση μπαταρίας μολύβδου-οξέος (αριστερά) και φωτογραφία συστοιχίας συσσωρευτών 48 V DC για φωτοβολταϊκές εφαρμογές.

## 2) Το υδρογόνο ως δευτερογενές καύσιμο

Θεωρείται από ορισμένους ως το «απόλυτο» καύσιμο και μέσο αποθήκευσης του μέλλοντος. Αυτό γιατί μπορεί να παραχθεί από το νερό, που ως καύσιμο μπορεί να διαρκέσει για τουλάχιστον 1000 χρόνια.

Το υδρογόνο είναι το πιο άφθονο στοιχείο στον κόσμο και στη Γη συνήθως βρίσκεται ενωμένο με το οξυγόνο στο νερό. Με ηλεκτρόλυση διαχωρίζεται εύκολα από το  $O_2$ , με μέση απόδοση της διεργασίας να φτάνει το 67%. Η καύση του με το  $O_2$  παράγει νερό και κανένα άλλο προϊόν, εκτός από λίγα  $NO_x$ . Για να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη κλίμακα θα πρέπει να αποθηκευτεί σε θερμοκρασία 20 K ( $=-253^\circ C$ ). Η πυκνότητα του υγρού  $H_2$  είναι 1000 μεγαλύτερη από την πυκνότητα του αερίου. Οι ιδιότητες του υδρογόνου, καθώς και άλλων καυσίμων που μπορούν να συγκριθούν με αυτό παρουσιάζονται στον Πίνακα 14.2. Η κρυογονική εγκατάσταση για την υγροποίηση του υδρογόνου είναι εν γένει λιγότερη δαπανηρή από την εγκατάσταση άντλησής του και μεταφοράς. Η απόδοση της διεργασίας κρυογονικής αποθήκευσης του υδρογόνου ανέρχεται στο 25%. Εκτός από την καύση, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα στοιχεία καυσίμων  $H_2$ . Με τη χρήση καταλύτη ενώνεται το υδρογόνο με το οξυγόνο δίνοντας νερό και ηλεκτρισμό, με απόδοση 85%.

**Παραγωγή υδρογόνου:** Παράγεται σήμερα κυρίως καταλυτικά από  $CH_4$  και ατμό σε σημαντικές ποσότητες για την παρασκευή της  $NH_3$  και με μερική οξειδωση βαρέων κλασμάτων πετρελαίου. Υπάρχουν βέβαια πολυάριθμες άλλες μέθοδοι. Αν βεβαίως κάποτε η ηλεκτρική ενέργεια από το ήλιο γίνει προσιτή, τότε θα παράγεται το υδρογόνο με ηλεκτρόλυση (Σχήμα 14.7).

### Προβλήματα με τη χρήση υδρογόνου

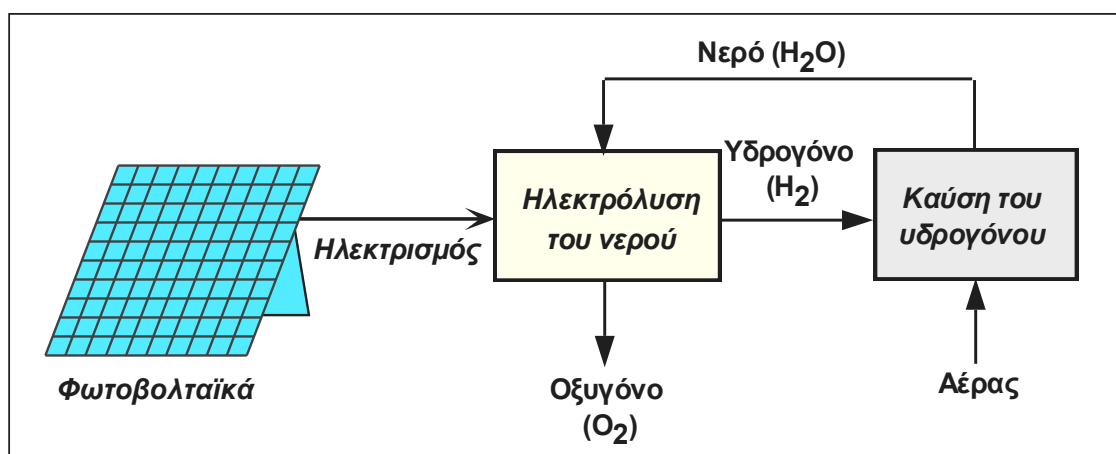
1. Για να ικανοποιηθεί το 10% της ενεργειακής κατανάλωσης των Η.Π.Α. απαιτούνται μονάδες με ισχύ  $\sim 400.000$  MW (διπλάσιο από τη σημερινή ισχύ!) για την ηλεκτρόλυση του  $H_2$ .



2. Είναι εξαιρετικά εκρηκτικό, περισσότερο και από το φυσικό αέριο. Μπορεί να εκραγεί με αέρα σε συγκέντρωση 4-75%. Η ενέργεια ανάφλεξης του πολύ μικρή.

**Πίνακας 14.2.** Ιδιότητες υδρογόνου και άλλων καυσίμων.

Ιδιότητα	Βενζίνη	Φυσικό αέριο	Υδρογόνο
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	0,73	0,78x10 <sup>-3</sup>	0,84x10 <sup>-4</sup> (αέριο) 0,71x10 <sup>-1</sup> (υγρό)
Σημείο ζέσεως (C)	38/204	-156	-253 (20 K)
Κατώτερη θερμογόνος αξία: μάζας (kJ/kg) Όγκου (kJ/m <sup>3</sup> )	4,45x10 <sup>4</sup> 32,0x10 <sup>6</sup>	4,8x10 <sup>4</sup> 37,3x10 <sup>3</sup>	12,5x10 <sup>4</sup> 10,4x10 <sup>3</sup> (αέριο) 8,52x10 <sup>6</sup> (υγρό)
Στοιχειομετρική σύσταση με τον αέρα (vol. %)	1,76	9,43	29,3
Όρια ανάφλεξης (% σε αέρα)	1,4-7,6	5-16	4-75
Ταχύτητα φλόγας (m/s)	0,4	0,41	3,45
Θερμοκρασία φλόγας στον αέρα (°C)	2197	1875	2045
Θερμοκρασία έναυσης (°C)	257	540	585
Φωτεινότητα φλόγας	μεγάλη	μέση	χαμηλή



**Σχήμα 14.8.** Σχηματική παράσταση παραγωγής υδρογόνου από ηλιακή ενέργεια.

**Αποθήκευση υδρογόνου:** υγροποιημένο, συμπιεσμένο αέριο, και σε υπόγεια αεροστεγή σπήλαια.

**Μεταφορά αέριου υδρογόνου:**

1. Χρήση υπαρχόντων αγωγών φυσικού αερίου. Για τις ίδιες ενεργειακές ανάγκες απαιτείται τριπλάσιος όγκος H<sub>2</sub>, αλλά λόγω της μικρότερης πυκνότητας μεταφέρεται τριπλάσιος όγκος από τους αγωγούς.

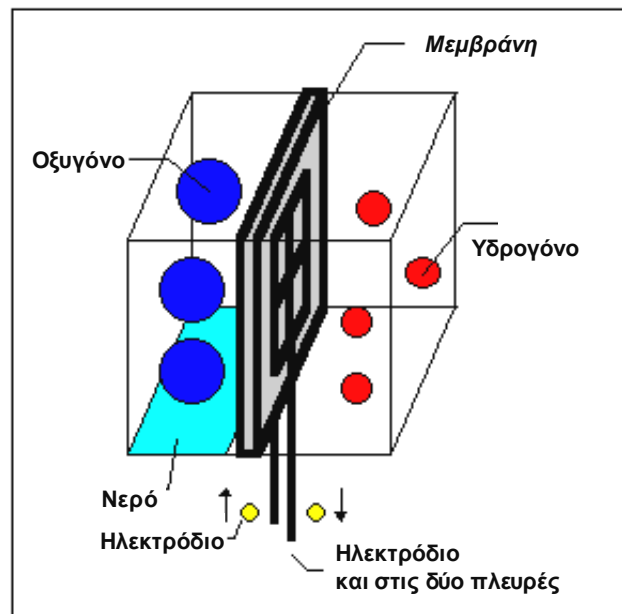
2. Η μεταφορά με αγωγούς (σε μεγάλες αποστάσεις) οικονομικότερη από τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.

#### Κόστος:

1. Λόγω της μικρής απόδοσης το υδρογόνο θα είναι πάντοτε ακριβότερο από τον ηλεκτρισμό που παράγει, εάν η σύγκριση γίνει για την ίδια περιοχή. Αν όμως είναι η ενέργεια (π.χ. ηλεκτρική) να μεταφερθεί σε απόσταση 2000 km, τότε αποβαίνει φθηνότερο !
2. Κατασκευή αιολικών πάρκων στην Αλάσκα και ηλιακών στη Σαχάρα.
3. Η χρήση υγρού  $H_2$  ως καυσίμου (π.χ. στα αεροπλάνα) έχει μέλλον, αλλά θα πρέπει να υπερπηδηθούν προβλήματα αποθήκευσης και διανομής.

#### Στοιχεία καυσίμων $H_2$

Τα πρώτα στοιχεία ή κυψελίδες καυσίμων κατασκευάστηκαν τον 1839 από τον William Grove. Στη δεκαετία του 50 οι ερευνητικές προσπάθειες εντάθηκαν για χρήση τους σε δορυφόρους, όπου αν και δαπανηρή τεχνική είναι αρκετά αξιόπιστη. Η βασική αρχή ενός στοιχείου καυσίμου (Σχήμα 14.8) είναι ότι το υδρογόνο και το οξυγόνο «καίγονται» σε θερμοκρασία 40-90°C σχηματίζοντας νερό και παράγοντας ηλεκτρισμό. Το στοιχείο αποτελείται από μια μεμβράνη που είναι διαπερατή μόνο στα πρωτόνια του υδρογόνου. Η απόδοση ενός στοιχείου καυσίμων υπερβαίνει το 65% και η διάρκεια ζωής του φαίνεται απεριόριστη.



Σχήμα 14.9. Σχηματική παράσταση στοιχείου καυσίμων  $H_2$ .

## 14.6 Αποθήκευση Θερμότητας

Η αποθήκευση θερμότητας μπορεί να οριστεί ως η αποθήκευση ενέργειας (προσωρινή ή όχι, σε χαμηλή ή υψηλή θερμοκρασία) για χρήση όταν αυτό απαιτηθεί. Ο κυριότερος λόγος που επιβάλλει την αποθήκευση θερμότητας είναι το γεγονός ότι τις περισσότερες φορές η διαθεσιμότητα της ενέργειας (ή όταν η τιμή της ενέργειας είναι φτηνή) δεν συμπίπτει με το χρόνο της ζήτησης. Τρεις

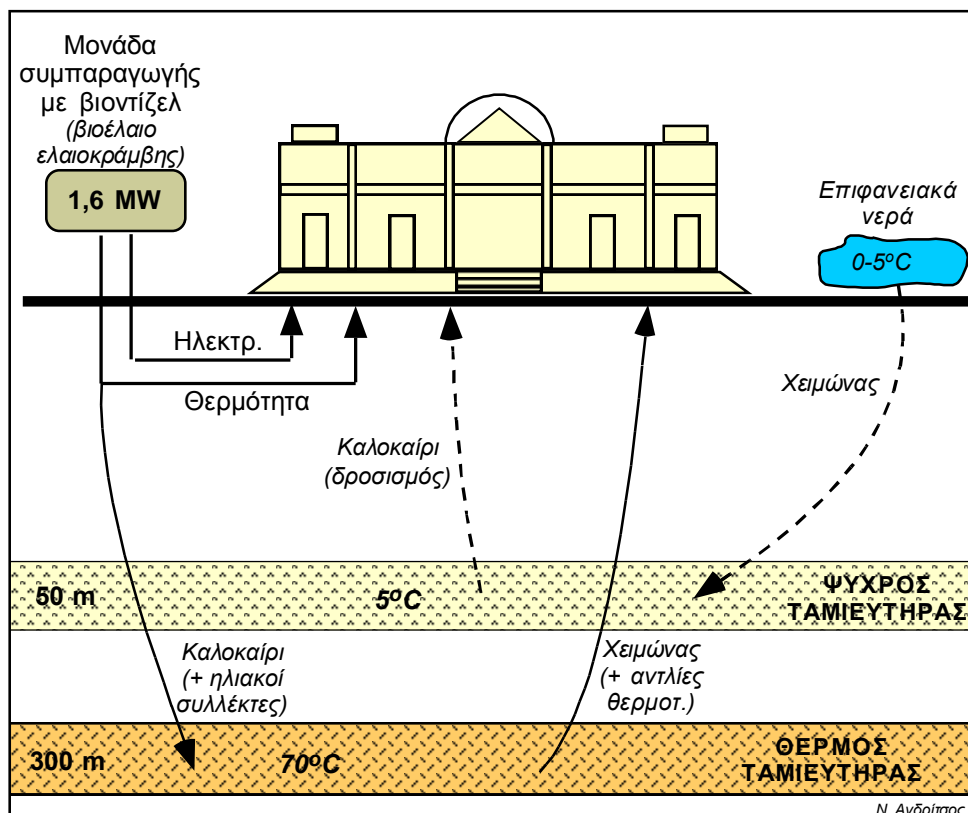
είναι οι κυριότεροι τύποι αποθήκευσης θερμότητας: η αποθήκευση αισθητής θερμότητας (π.χ. παθητικά ηλιακά συστήματα), η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας (όταν μια ουσία αλλάζει φάση, π.χ. από πάγο σε νερό) και η θερμοχημική αποθήκευση (που χρησιμοποιεί την ενέργεια αποθήκευσης σε αντιστρεπτές χημικές αντιδράσεις).

### Αποθήκευση αισθητής θερμότητας

(1) Δεξαμενές θερμού νερού. Για βραχυπρόθεσμη κυρίως αποθήκευση για αντιμετώπιση φορτίων αιχμής. Δεν απαιτείται εναλλάκτης. Το δοχείο μπορεί να είναι μεταλλικό (με εσωτερική κάλυψη) ή πλαστικό.

Με την ευρύτερη έννοια της δεξαμενής θερμού νερού μπορεί να θεωρηθεί η διοχέτευση ζεστού νερού στη διάρκεια του καλοκαιριού (από συστήματα συμπαραγωγής, ηλιακούς συλλέκτες, απορριπτόμενη ενέργεια από τη βιομηχανία) σε υπόγειους ταμιευτήρες. Μια τέτοια εφαρμογή παρουσιάζεται στο Σχήμα 14.10.

(2) Στερεά υλικά: κεραμικά ή κράματα. Η απολαβή της θερμότητας είναι συνάρτηση της θερμικής διαχυτότητας του υλικού. Περισσότερο διαδεδομένα στην Ευρώπη. Παράδειγμα «παθητικής» αποθήκευσης θερμότητας αποτελούν οι χοντροί τοίχοι κτηρίων (εκκλησιών, παλαιών σπιτιών κτλ.), οι οποίοι ψύχονται κατά τη διάρκεια της νύχτας και κρατούν ένα σχετικά δροσερό περιβάλλον κατά τη διάρκεια της ημέρας (ή θερμαίνονται το χειμώνα κατά τη διάρκεια της ημέρας και κρατούν κάποια θερμοκρασία στη διάρκεια της νύχτας).



**Σχήμα 14.10.** Σχηματικό διάγραμμα συστήματος αειφορικής κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του κτηρίου του Γερμανικού Κοινοβουλίου (Reichstag) στο Βερολίνο. Τέθηκε σε εφαρμογή το χειμώνα 1999-2000. Όταν κατά τη διάρκεια του χειμώνα η (μειωμένη) θερμοκρασία του θερμού ταμιευτήρα δεν καλύπτει τις θερμαντικές ανάγκες χρησιμοποιούνται και αντλίες θερμότητας.

### **Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας**

Αποτελεί την περισσότερη αποτελεσματική μέθοδο αποθήκευσης θερμότητας.

- (1) Αρκετά άλατα ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) και οργανικές ουσίες (οξικό νάτριο, παραφινικοί κηροί) λειώνουν όταν λαμβάνουν θερμότητα (αλλάζουν φάση) και γίνονται ξανά στερεά όταν αποδίδουν τη θερμότητα. Οι ουσίες αυτές θα πρέπει βέβαια να εγκλειστούν σε κάποιο ανθεκτικό στην υψηλή θερμοκρασία υλικό. Κύριο μειονέκτημα των ουσιών αυτών είναι η θερμική στρωμάτωση και η ανομοιομορφία στην τήξη και τη στερεοποίηση.
- (2) Η δημιουργία πάγου κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν το ηλεκτρικό ρεύμα είναι φθινό, χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο. Στη διάρκεια της ημέρας αέρας ψύχεται περνώντας από το δοχείο του πάγου. Πρόβλημα ο σχετικός μεγάλος όγκος του συστήματος. Η χωρητικότητα μέσω αποθήκευσης ψύξης δίνεται στον πίνακα 14.3. Ένα ολόκληρο εμπορικό κέντρο στο Σικάγο (Η.Π.Α.) κλιματίζεται την ημέρα με τη χρήση 900 τόνων πάγου που δημιουργούνται τη νύχτα.

### **Αποθήκευση θερμοχημικής θερμότητας**

Βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο. Συνδυάζεται η θερμότητα από κεντρικούς ηλιακούς δέκτες για να μετατραπεί σε αέριο σύνθεσης ( $\text{H}_2 + \text{CO}$ ) μεθάνιο και ατμός. Όταν το αέριο σύνθεσης εκτεθεί σε έναν καταλύτη νικελίου προκαλείται αντίδραση κατά την οποία απελευθερώνεται θερμότητα και ανακτούνται μεθάνιο και ατμός. Άλλη δυνατότητα είναι η διάσπαση της αμμωνίας σε άζωτο και υδρογόνο.

**Πίνακας 14.3** Χωρητικότητα μέσω αποθήκευσης ψύξης

<b>Υλικό</b>	<b>Χωρητικότητα (J/kg)</b>	<b>Πλεονεκτήματα (+) – Μειονεκτήματα (-)</b>
Πάγος	334.000	(+) για χαμηλές θερμοκρασίες (+) μικρή απαίτηση χώρου
Κρύο νερό	40.000	(+) για μέσες θερμοκρασίες (-) μεγάλη απαίτηση χώρου
Υλικά με αλλαγή φάσης	160.000	(+) για μέσες θερμοκρασίες (+) μικρή απαίτηση χώρου

## 15. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 15.1 Ενεργειακή Απόδοση

**Ενεργειακή μετατροπή** είναι η διεργασία της αλλαγής ενέργειας από μια μορφή σε μία άλλη. Υπάρχουν άπειρες διεργασίες μετατροπής που συμβαίνουν στη φύση, όπως η εξάτμιση νερού με ηλιακού ακτινοβολία. Μια συσκευή μετατροπής μετατρέπει μια μορφή ενέργειας σε άλλη μορφή. Μπορεί η συσκευή να είναι ένα μικρό παιχνίδι ή μια πολύπλοκη συσκευή, όπως ένα αυτοκίνητο. Όλες οι συσκευές μπορούν να παρασταθούν ως ένα «μαύρο κουτί».

Ως **απόδοση** (ή επιτευξιμότητα) μιας συσκευής μετατροπής ( $\alpha$  ή  $e$ ) ορίζεται ο λόγος της «χρήσιμης» ενέργειας (ή χρήσιμου έργου) που παράγεται προς την ενέργεια (ή έργο) που καταναλώνεται. Ο όρος στα αγγλικά είναι efficiency (effectiveness), στα γαλλικά effet utile (ή rendement thermique) και στα γερμανικά wirkungsgrad (ή gütergrad και leistungsgrad)

Η λέξη «**χρήσιμη**» είναι η λέξη κλειδί στον ορισμό της απόδοσης. Η λέξη «χρήσιμη» εξαρτάται από το σκοπό της συσκευής. Για παράδειγμα, από ένα θερμαντικό με ηλεκτρική αντίσταση η χρήσιμη αποδιδόμενη ενέργεια είναι η θερμότητα και η εισερχόμενη ενέργεια είναι ο ηλεκτρισμός. Αντίθετα, σε μια λάμπα πυρακτώσεως μέρος του ηλεκτρισμού μετατρέπεται σε φως (χρήσιμη εκροή) και ένα σημαντικό μέρος σε θερμότητα (μη χρήσιμη εκροή). Έτσι, η λάμπα πυρακτώσεως έχει γενικά μικρό βαθμό απόδοσης.



- Ένα ιδανικό μοντέλο μιας συσκευής έχει  $\alpha=100\%$
- Σε μια πραγματική συσκευή η απόδοση δεν μπορεί να ξεπεράσει το 100%.

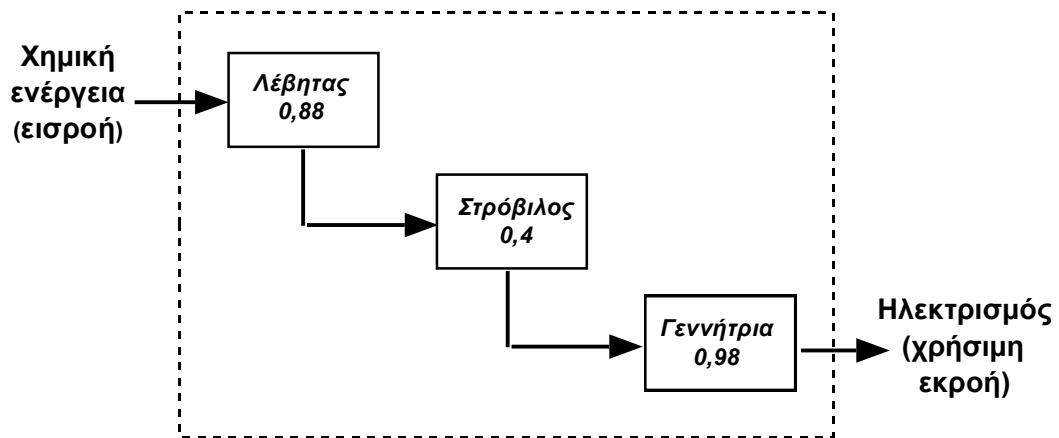
Κάθε ορισμός που δεν ανταποκρίνεται στα παραπάνω δεν θα πρέπει να καλείται απόδοση. Η έννοια της απόδοσης βασίζεται στην αρχή της διατηρήσεως της ενέργειας.

**Απόδοση συστήματος:** η απόδοση ενός ενεργειακού συστήματος ισούται με το γινόμενο των αποδόσεων των ξεχωριστών συσκευών (υποσυστημάτων) από τις οποίες απαρτίζεται το σύστημα (Σχήμα 15.1).

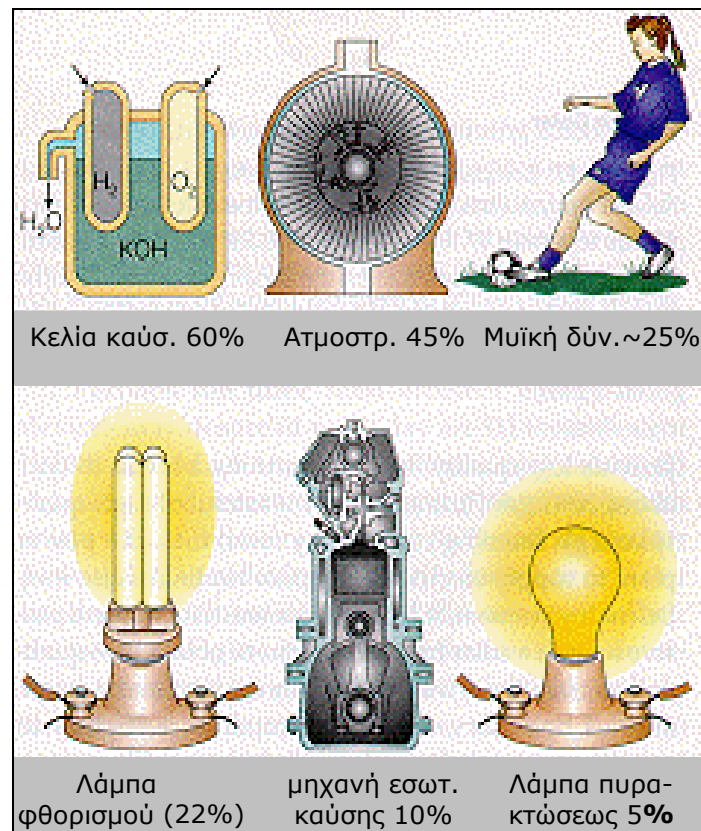
Το Σχήμα 15.2 και ο Πίνακας 15.1 παρουσιάζουν τις ενεργειακές αποδόσεις ορισμένων κοινών συσκευών μετατροπής της ενέργειας.

Η απόδοση μιας συσκευής ενεργειακής μετατροπής αποτελεί ποσοτική έκφραση του ισοζυγίου μεταξύ εισροής και εκροής ενέργειας από το σύστημα. Η αρχή της απόδοσης εμπεριέχει και τους δύο νόμους την θερμοδυναμικής. Ο Πίνακας 1.6 παρουσιάζει τις ενεργειακές αποδόσεις σειράς συσκευών ενεργειακής μετατροπής.

Η έννοια της απόδοσης περιλαμβάνει και τους δύο θερμοδυναμικούς νόμους. Από τη θερμοδυναμική ανάλυση είναι δυνατόν να οριστεί η μέγιστη (ιδανική) απόδοση μιας θερμικής συσκευής:



**Σχήμα 15.1.** Ενεργειακή μετατροπή σε μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. Αν οι επιμέρους αποδόσεις των κύριων συσκευών είναι 88% για το λέβητα, 40% για το στρόβιλο και 98% για τη γεννήτρια, τότε η απόδοση του συστήματος είναι:  $\alpha=(0,88)(0,4)(0,98)=0,35$ .



**Σχήμα 15.2.** Ενεργειακές αποδόσεις ορισμένων συσκευών μετατροπής της ενέργειας.

$$e = \frac{\text{μέγιστη χρήσιμη εκροή}}{\text{ενεργειακή εισροή}} = \frac{T_H - T_L}{T_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

όπου  $T_H$  και  $T_L$  είναι οι θερμοκρασίες του θερμού και του ψυχρού ταμιευτήρα αντίστοιχα.

**Πίνακας 15.1.** Αποδόσεις κοινών συσκευών ενεργειακής μετατροπής

Συσκευή ενεργειακής μετατροπής	Μετατροπή	Τυπική απόδοση, %
Ηλεκτρικό θερμαντικό	Ηλεκτρισμός / Θερμική	100
Στεγνωτής μαλλιών	Ηλεκτρισμός / Θερμική	100
Ηλεκτρική γεννήτρια	Μηχανική / Ηλεκτρισμός	95
Ηλεκτρικός κινητήρας (μεγάλος)	Ηλεκτρισμός / Μηχανική	90
Μπαταρία	Χημική / Ηλεκτρισμός	90
Λέβητας ατμού (σε μονάδα ισχύος)	Χημική / Θερμική	85
Οικιακός φούρνος αερίου	Χημική / Θερμική	85
Ηλεκτρικός κινητήρας (μικρός)	Ηλεκτρισμός / Μηχανική	65
Ατμοστρόβιλος	Θερμική / Μηχανική	45
Αεριοστρόβιλος (αεροπλάνων)	Χημική / Μηχανική	35
Αεριοστρόβιλος (βιομηχανίας)	Χημική / Μηχανική	30
Μηχανή αυτοκινήτου	Χημική / Μηχανική	25
Λαμπτήρας φθορισμού	Ηλεκτρισμός / Φως	22
ΦΒ στοιχείο πυριτίου	Ηλιακή / Ηλεκτρισμός	15
Ατμομηχανή	Χημική / Μηχανική	10
Λαμπτήρας πυρακτώσεως	Ηλεκτρισμός / Φως	5

## 15.2 Ενεργειακή Αξιολόγηση/Καταγραφή

Σκοπός της ενεργειακής αξιολόγησης/καταγραφής (Energy Auditing) είναι να προσδιορίσει σε ποια σημεία μιας βιομηχανίας ή ενός κτηρίου γίνεται χρήση ενέργειας και να προσδιορίσει πιθανές ευκαιρίες για εξοικονόμηση ενέργειας. Στις βιομηχανίες καταγραφές γίνονται κυρίως στις διεργασίες, ενώ στις κτιριακές εγκαταστάσεις αφορούν στα συστήματα θέρμανση και κλιματισμού, το φωτισμό και τη μόνωση. Υπάρχουν διάφορα είδη καταγραφής, ανάλογα με το κόστος και ποιος κάνει την καταγραφή. Έτσι μπορούμε να έχουμε:

**1. Συνοπτική Καταγραφή:** Απλές ενεργειακές αποτυπώσεις, καταγραφή των ενεργειακών τιμολογίων, χρόνου λειτουργίας συσκευών (μπορεί να γίνει από το προσωπικό της βιομηχανίας)

**2. Ενδιάμεση Καταγραφή:**

- Μετρήσεις για ποσοτικοποίηση των χρήσεων και των απωλειών (μερικές μέρες, 1-2 εβδομάδες)
- Ακριβέστερος προσδιορισμός οικονομικών μεγεθών

**3. Εκτεταμένη Καταγραφή:**

- Παρακολούθηση και καταγραφή (με όργανα) για 1-2 μήνες
- Εκτίμηση της καταναλισκόμενης ενέργειας σε κάθε διεργασία και συσκευή
- Ανάλυση (προσομοίωση) των τάσεων της ενεργειακής χρήσης, προβλέψεις για το μέλλον, θεώρηση των κλιματικών δεδομένων
- Δαπανηρή, εξειδικευμένο προσωπικό, αξιόπιστη

*α) Συλλογή Δεδομένων:*

- Λογαριασμοί ηλεκτρισμού, καυσίμων, κτλ. σε μια χρονική περίοδο

- Ενεργειακές ροές (εισορή/εκροή θερμότητας), ενεργειακά ισοζύγια
- Το ενεργειακό κόστος χωριστά για κάθε καύσιμο

Όργανα:

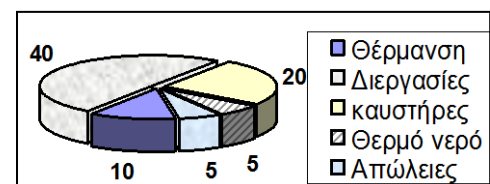
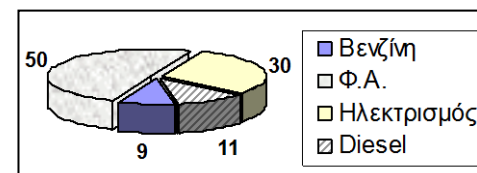
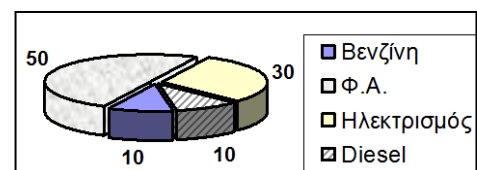
- Θερμογραφική κάμερα με υπέρυθη ακτινοβολία για τις απώλειες θερμότητας
- Αναλυτές ηλεκτρικής ενέργειας (μετρητές ισχύος, μετρήσεις 3 φάσεων, κτλ.)
- Αναλυτές καυσαερίων για απόδοση της καύσης
- Μετρητές πίεσης, παροχής, υγρασίας, κτλ.

β) Ανάλυση Δεδομένων:

- Πλήρης κατάλογος των ενεργειακών ευκαιριών
- Ανάλυση του κόστους του κύκλου ζωής κάθε περίπτωσης και προσδιορισμός προτεραιότητας των εναλλακτικών λύσεων
- Συσχέτιση της ενεργειακής κατανάλωσης με τα παραγόμενα προϊόντα ή υπηρεσίες (σύγκριση με ομοειδείς επιχειρήσεις).

Παράδειγμα: Ενεργειακές Κατανομές

<b>Χρήση Ενέργειας (kJ/έτος)</b>	Βενζίνη	10%
	Φ.Α.	50%
	Ηλεκτρισμός	30%
	Diesel	10%
<b>Ενεργειακό κόστος (π.χ. σε χιλ. €)</b>	Βενζίνη	9%
	Φ.Α.	50%
	Ηλεκτρισμός	30%
	Diesel	11%
<b>Χρήση ενέργειας ανά λειτουργία</b>	Θέρμανση	10%
	Διεργασίες	40%
	Καυστήρες	20%
	Θερμό νερό	5%
	Απώλειες ατμού	5%
<b>Κατανομή ατμού</b>	Διαρροές	5%
	Διεργασίες	40%
	Θερμό νερό	20%
	Τροφ. Καυστήρα	20%
	Θερμότητα	10%



### 15.3 Εξοικονόμηση Ενέργειας σε Βιομηχανία και Κτήριο

- Επιτυγχάνεται γενικά με το «καλό νοικοκύρεμα» (“good housekeeping”)
- Στη βιομηχανία, στις μεταφορές και στο κτήριο

**Πλεονεκτήματα από την εξοικονόμηση ενέργειας:**

1. Κάνει τα μη-ανανεώσιμα ορυκτά καύσιμα να διαρκέσουν περισσότερο.



2. Προσφέρει στην ανθρωπότητα το απαιτούμενο χρόνο για την ωρίμανση και διείσδυση των ΑΠΕ.
3. Μειώνει την εξάρτηση από τις εισαγωγές πετρελαίου, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό για χώρες σαν την Ελλάδα. Η συμμετοχή των εισαγόμενων ορυκτών καυσίμων στο ενεργειακό ισοζύγιο της Ελλάδας αναμένεται να αυξηθεί.
4. Μειώνει την πιθανότητα εμπόργκο από τις πετρελαιοπαραγωγικές χώρες και το κίνδυνο ανάφλεξης πολέμου στην ευαίσθητη Μέση Ανατολή.
5. Μειώνει τις τοπικές και παγκόσμιες επιπτώσεις από τις εκπομπές αερίων γιατί καταναλώνονται μικρότερες ποσότητες ενεργειακών πόρων για τις ίδιες ποσότητες τελικής χρήσιμης ενέργειας.
6. Είναι ο γρηγορότερος και πλέον οικονομικός τρόπος μείωσης της «παγκόσμιας θέρμανσης».
8. Ενισχύει την ανταγωνιστικότητα μιας χώρας ή μιας εταιρίας στη διεθνή αγορά.
9. Μπορεί να δημιουργήσει χιλιάδες νέες θέσεις εργασίας στην Ελλάδα (και εκατομμύρια στον κόσμο).

*Όσο, πάντως, η ενέργεια από τα συμβατικά καύσιμα παραμένει «φθηνή» (δεν προσμετράται το εξωτερικό κόστος της ρύπανσης), δεν υπάρχουν κίνητρα για εξοικονόμηση ενέργειας.*

## Παραδείγματα

### Κλιματισμός και Θέρμανση

Ο κλιματισμός και η θέρμανση συμμετέχει σημαντικά στο ενεργειακό ισοζύγιο σπιτιών, γραφείων, αλλά και εργοστασίων. Κυρίως απαιτούνται για την άνεση των εργαζομένων και για τη λειτουργία συσκευών ή διεργασιών ή την παραγωγή προϊόντων. Για την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών απαιτείται βασικά σωστός σχεδιασμός του κτηρίου, με την αύξηση της θερμοχωρητικότητας του κτηρίου, τις επικαλύψεις των παραθύρων και τη χρήση διπλών υαλοπινάκων (με αδρανές αέριο).

π.χ.	Απλό γυαλί	$k=21 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
	Απλό με κάλυψη	$k=11 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
	Διπλό (με κρυπτόν)	$k=3,3 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$

Επίσης απαιτείται τακτικός καθαρισμός των φίλτρων, έλεγχος (και ρύθμιση) της εσωτερικής θερμοκρασίας (χρήση εσωτερικών και εξωτερικών θερμοστατών), προσεκτική χρήση απορροφητήρων (οι οποίοι μπορούν να απομακρύνουν από το χώρο τον θερμό ή δροσερό αέρα), να κλείνονται τα σώματα και τα κλιματιστικά σε χώρους που δεν χρησιμοποιούνται, να υπάρχει μόνωση όλων των σωληνώσεων και γίνεται αφαίρεση του αέρα από τα σώματα καλοριφέρ σε τακτά χρονικά διαστήματα.

### Φωτισμός

Ο φωτισμός αποτελεί τομέα που φαίνεται να αγνοείται αναφορικά με την εξοικονόμηση ενέργειας, ενώ συνεισφέρει σημαντικά στα ενεργειακά έξοδα μιας επιχείρησης ή ενός σπιτιού. Μερικά μέτρα για εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων στον τομέα αυτό είναι:

- Αντικατάσταση των λαμπτήρων πυρακτώσεως με ηλεκτρονικούς συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού
- Τακτικός καθαρισμός των λαμπτήρων και των υποδοχέων τους (αλλά και των τοιχωμάτων των χώρων)

- Κλειστός ο φωτισμός όταν δεν απαιτείται, τοποθέτηση χρονοδιακόπτη ή αισθητήρων για αυτόματο κλείσιμο των χώρων που δεν υπάρχει ανθρώπινη παρουσία
- Εστίαση του φωτισμού εκεί που είναι απαραίτητο
- Χρήση χρονοδιακόπτη ανάλογα με το εξωτερικό φωτισμό
- Ανοικτά χρώματα στους τοίχους
- Ένταση φωτός ανάλογα με τη δραστηριότητα
- Η παραγωγή θερμότητας από το φωτισμό μπορεί να επιβαρύνει το φορτίο του δροσισμού το καλοκαίρι και να συνεισφέρει στη θέρμανση το χειμώνα.
- Αλλαγή των λαμπτήρων σε μια βιομηχανία με σύγχρονους μπορεί να εξοικονομήσει ~5% της ενέργειας. Χρόνος αποπληρωμής ~3 χρόνια.

9 years	Energy cost [€]	Cost of the lamps [€]	Total cost [€]
60 W incandescent lamp	$7,64 \times 9 = 68,76$	$1,50 \times 9 = 13,50$	82,26
13 W compact fluorescent lamp	$1,66 \times 9 = 14,94$	8	22,94
Savings (difference)	$5,98 \times 9 = 53,82$	5,50	<b>59,32</b>

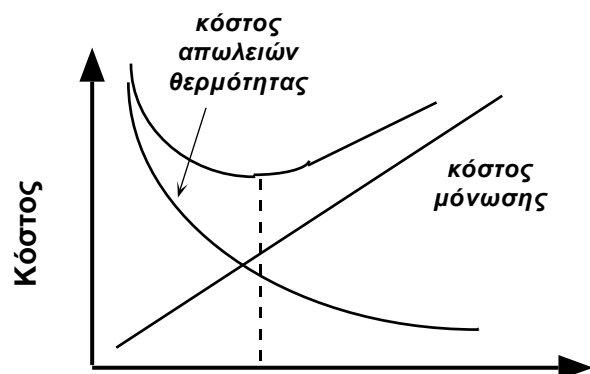
Πηγή: Union of the Electricity Industry-EURELECTRIC (2004)

#### Λέβητες

- Μόνωση παντού
- Όχι διαρροές
- Χρήση δεξαμενών αποθήκευσης
- Συντήρηση/καθαρισμός επικαθίσεων
- Ανάκτηση θερμότητα από τα καυσαέρια
- Επανεισαγωγή συμπυκνώματος
- Καλής ποιότητας νερό τροφοδοσίας
- Χρήση σύγχρονων καυστήρων
- Προθέρμανση αέρα
- Ανάκτηση θερμότητας νερού απομάστευσης και καυσαερίων

#### Μόνωση

- Σωστή επιλογή του πάχους (για καλύτερη οικονομικότητα) λαμβάνοντας υπόψη τις κλιματικές συνθήκες
- Παντού και πάντοτε
- Διάφορα είδη, ανάλογα με την εφαρμογή
- Σε δεξαμενές, για αποφυγή εξάτμισης, χρήση πλαστικών κενών σφαιριδίων πολυπροπυλενίου που καλύπτουν την επιφάνεια



### *Ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας*

Υπάρχει μεγάλος αριθμός μεθόδων ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας από πολλές διεργασίες και μονάδες, οι οποίες μπορούν να μειώσουν σημαντικά το λειτουργικό κόστος και να εξοικονομήσουν σημαντικές ποσότητες καυσίμων και χρημάτων. Ορισμένες από αυτές τις τεχνικές είναι:

- (1) Χρήση αντλιών θερμότητας, για αναβάθμιση της απορριπτόμενης ενέργειας
- (2) Εναλλάκτες θερμικών αγωγών, για εναλλαγή θερμότητας στο σύστημα αέριο-αέριο. Μπορεί να εφαρμοστεί σε πληθώρα διεργασιών στη βιομηχανία (φούρνοι βαφής, κλωστοϋφαντουργία, βιομηχανική ξήρανση), στις αγροτικές διεργασίες (ξήρανση σιτηρών), εμπορικά κτήρια κτλ.
- (3) Εναλλάκτες πλακών (για ανάκτηση από υγρά ρεύματα). Έχουν γίνει δημοφιλείς σε πλείστες διεργασίες.
- (4) Λέβητες απορριπτόμενης θερμότητας (π.χ. για παραγωγή ατμού χαμηλής πίεσης για θέρμανση)

## **15.4. Συμπαραγωγή**

---

**Συμπαραγωγή (cogeneration) ή συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ισχύος (CHP, Combined Heat and Power)** είναι η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού με ανάκτηση της θερμότητας που αλλιώς θα χανόταν και αποτελεί μια αειφόρο ενεργειακή διεργασία.

### *Πλεονεκτήματα*

- Πολύ αποδοτική μέθοδος με απόδοση μέχρι και 90%. Τυπικές αποδόσεις: 70-80% (απόδοση ΑΗ συμβατικών μονάδων ~35%)
- Ευελιξία ως προς τα καύσιμα (υγρά και αέρια καύσιμα, βιοκαύσιμα)
- Εξοικονόμηση ενέργειας ~20-40% (στις συμβατικές ατμοηλεκτρικές μονάδες ~60% απώλειες θερμότητας)
- Ο οικονομικότερος τρόπος για παραγωγή ηλεκτρισμού
- Υποβοηθείται από την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Αποκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ελάττωση του προβλήματος του φορτίου αιχμής, νέες θέσεις εργασίας
- Οι νεότερες τεχνολογίες ακόμη περισσότερο αποδοτικές (π.χ. ανάκτηση θερμότητας με στοιχεία καυσίμων)

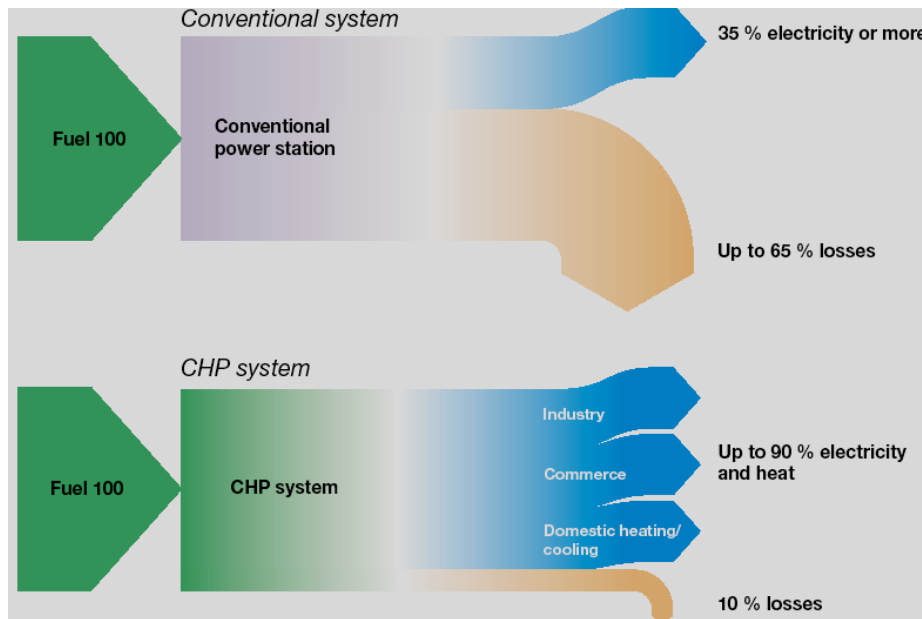
*Προβλήματα:*

- Η πώληση της περίσσειας του ηλεκτρισμού στο δίκτυο
- Η μικρή τιμή αυτού του ηλεκτρισμού σε πολλές χώρες και στην Ελλάδα.

*Κύρια μέρη του συστήματος:* (1) στρόβιλος ή μηχανή (ατμοστρόβιλος, αεριοστρόβιλος καύσης, μηχανή εσωτερική καύσης), (2) γεννήτρια, (3) σύστημα ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας και (4) σύστημα ελέγχου κι ρύθμισης.

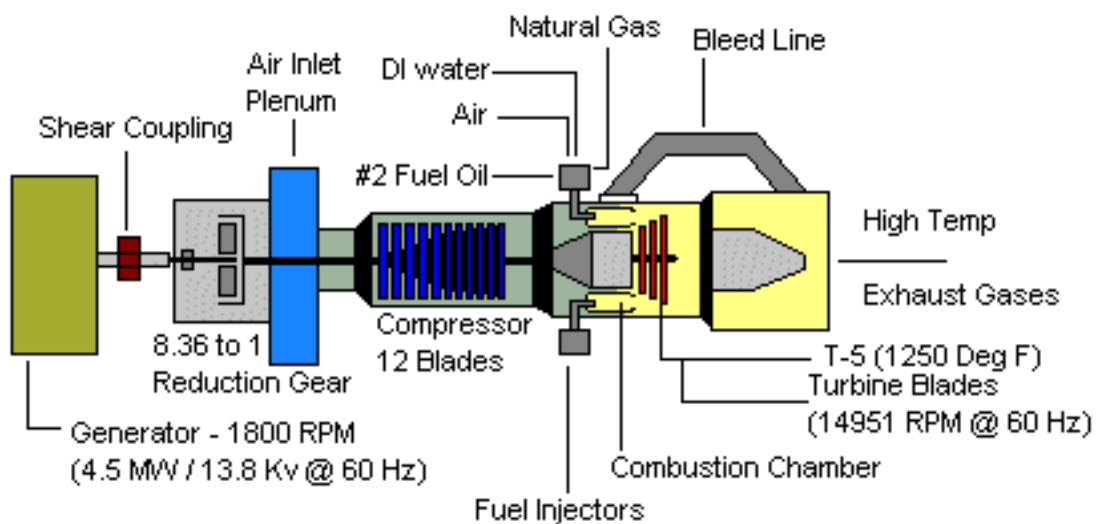
*Θερμοδυναμικοί κύκλοι:* (1) Ηλεκτρισμός από την απορριπτόμενη θερμότητα και (2) θερμό νερό ή ατμός από την απορριπτόμενη θερμότητα (κύκλοι Rankine, Brayton και συνδυασμένοι).

Στην Ευρώπη έχει σημειωθεί σημαντική προώθηση, με πρώτη τη Δανία και με λιγότερη διείσδυση τη Γαλλία. Στη χώρα μας υπάρχουν αρκετές μονάδες σε βιομηχανίες, δεν υπάρχει όμως ικανοποιητική διείσδυση.



*Περιορισμοί περαιτέρω ανάπτυξης*

- Έλλειψη πληροφόρησης, ενημέρωσης, κατανόησης
- Νομοθετικές ρυθμίσεις και, συχνά, απουσία κινήτρων (π.χ. φορολογικές απαλλαγές)
- Το αρχικό κόστος κεφαλαίου είναι ο κύριος περιορισμός στη διείσδυση της τεχνολογίας



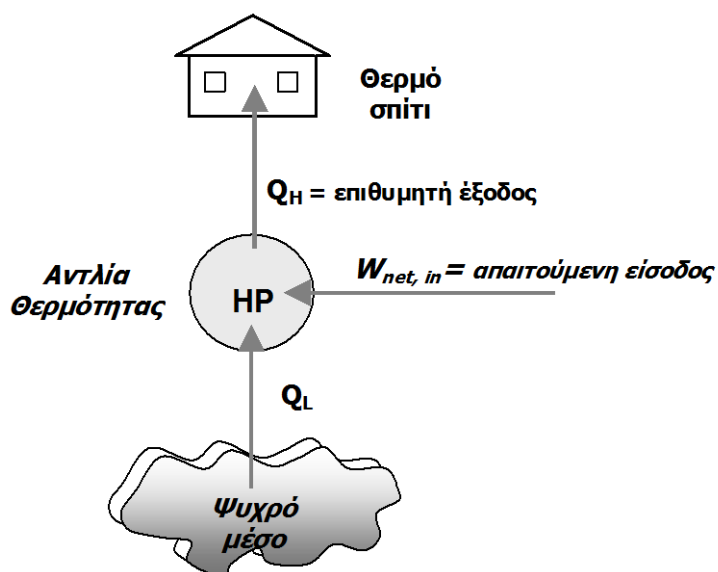
**Σχήμα 15.3.** Νέου τύπου αεριοστρόβιλος (22 MW) καύσης φυσικού αερίου για μονάδες συμπαραγωγής (Brayton cycle) που τοποθετήθηκε στο MIT. Εισαγωγή του καυσίμου περιφερειακά. Περίπου το 60% του παραγόμενου ηλεκτρισμού για τους συμπιεστές. Το σύστημα είναι 18% περισσότερο αποδοτικό από το να τοποθετούνταν ξεχωριστά συστήματα για παραγωγή ηλεκτρισμού και θέρμανσης.

## 15.5. Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας

### 15.5.1. Εισαγωγή

Η γεωθερμική αντλία θερμότητας (ΓΑΘ, geothermal heat pump) είναι μια συσκευή που έχει την ικανότητα να μεταφέρει θερμότητα από ένα μέσο με χαμηλή θερμοκρασία σε ένα άλλο μέσο με υψηλότερη θερμοκρασία. Αυτό πραγματοποιείται με απορρόφηση θερμότητας από μια πηγή χαμηλής σχετικά θερμοκρασίας (όπως είναι το υπόγειο ή επιφανειακό νερό, ο εξωτερικός αέρας κλπ.) προμηθεύοντας τη θερμότητα αυτή σε ένα θερμότερο μέσο, όπως είναι για παράδειγμα ένα σπίτι (Σχήμα 15.4). Τα βασικά εξαρτήματα μιας αντλίας θερμότητας είναι τα ίδια με τα κοινά κλιματιστικά και περιλαμβάνουν το συμπιεστή, το συμπυκνωτή, τον εξατμιστήρα, τη βαλβίδα εκτόνωσης και βέβαια μια πηγή ενέργειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις η αντλία θερμότητας είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να αντιστρέφει την ψυκτική και θερμαντική λειτουργία επιτρέποντας τη χρήση της ίδιας συσκευής για ψύξη και θέρμανση.

Οι αντλίες θερμότητας γνώρισαν πραγματική άνθηση την τελευταία δεκαετία σημειώνοντας ετήσια αύξηση σχεδόν 10%, και αυτή τη στιγμή αντιπροσωπεύουν μερίδιο 42% στις άμεσες χρήσεις της γεωθερμίας. Η μεγαλύτερη ανάπτυξη των ΓΑΘ σημειώθηκε στις ΗΠΑ και στην Δυτική Ευρώπη (Γερμανία, Ελβετία, Σουηδία).



Σχήμα 15.4. Αντλία θερμότητας

Στην αντλία θερμότητας θερμότητα από το «ψυχρό» μέσο τροφοδοτείται σε χαμηλή θερμοκρασία  $T_0$ . Μηχανικό έργο  $W_{net}$  προσφέρεται για τη μεταφορά της θερμότητας σε υψηλότερη θερμοκρασία  $T_h$ . Ισχύει λοιπόν

$$Q_H = Q_L + W_{net}$$

Η σωστή λειτουργία της αντλίας θερμότητας εκφράζεται από το συντελεστή απόδοσης, (COP, coefficient of performance), ο οποίος ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{COP} = \frac{\text{Επιθυμητή έξοδος}}{\text{Απαιτούμενη είσοδος}} = \frac{\text{Θερμό αποτέλεσμα}}{\text{Έργο εισόδου}} = \frac{Q_H}{W_{\text{net}}}$$

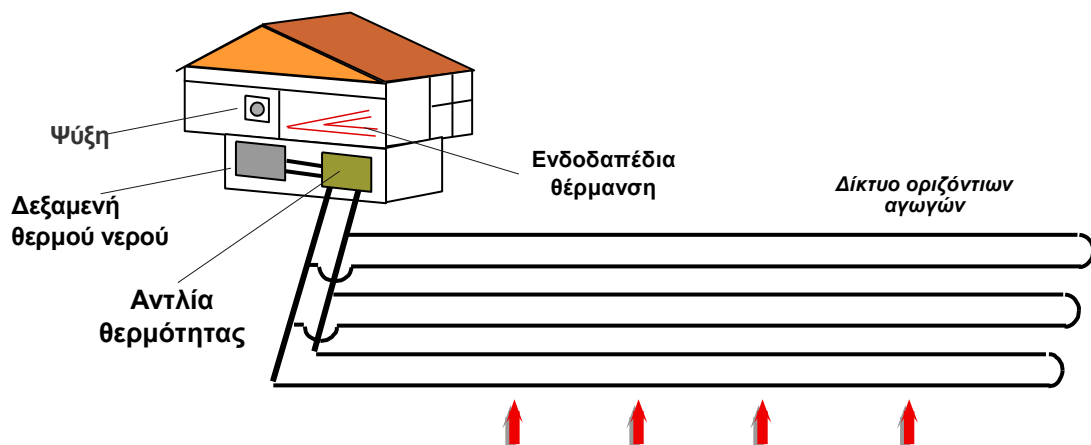
Στις αντλίες θερμότητας το COP κυμαίνεται από 1,5 μέχρι και 7, και βέβαια όσο μεγαλύτερη η τιμή του τόσο περισσότερο οικονομική γίνεται η χρήση της αντλίας.

Για τη επιλογή του ψυκτικού μέσου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι θερμοκρασίες των δύο μέσων με τα οποία το ψυκτικό αλλάζει θερμοκρασία. Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του ψυκτικού μέσου είναι: (1) να μην είναι τοξικό υγρό, (2) να μην είναι διαβρωτικό, (3) να μην είναι εύφλεκτο, (4) να είναι σταθερό στις θερμοκρασίες εφαρμογής και (5) να διατίθεται σε χαμηλό κόστος.

Η πιο συνηθισμένη πηγή ενέργειας για τις αντλίες θερμότητας είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας (συστήματα αέρα-αέρα, τα κοινά κλιματιστικά), με σοβαρό μειονέκτημα όπως ότι δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά σε θερμοκρασίες μικρότερες περίπου από 5. Τα τελευταία 20 χρόνια βρίσκουν όλο και περισσότερες εφαρμογές οι αντλίες θερμότητας που χρησιμοποιούν για πηγή θερμότητας το έδαφος και το νερό και ονομάζονται **γεωθερμικές αντλίες θερμότητας**. Οι αντλίες αυτές δεν παρουσιάζουν προβλήματα ακόμη και σε χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες.

Τα κύρια σχήματα με τα οποία λειτουργούν οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας είναι:

(α) **Συστήματα κλειστού βρόχου** (closed loop systems) ή συστήματα συζευγμένα με το υπέδαφος (ground-coupled systems). Στα συστήματα αυτά ένα δευτερεύον υγρό (νερό ή διάλυμα αντιψυκτικού, συνήθως προπυλενο-γλυκόλης) κυκλοφορεί σε μία διάταξη σωληνώσεων σε κλειστό κύκλωμα και μεταφέρει θερμότητα από ή προς το έδαφος (γεωεναλλάκτης). Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτού του τύπου είναι η ανεξαρτησία από την ύπαρξη νερού στην περιοχή η στη γεώτρηση και από την ποιότητα του νερού. Τα συστήματα αυτά διαχωρίζονται περαιτέρω σε **οριζόντια** (Σχήμα 15.6) και **κατακόρυφα** (Σχήμα 15.7), ανάλογα με τη γεωμετρία του υπόγειου εναλλάκτη. Στα πρώτα συστήματα απαιτείται η ανόρυξη μιας ή περισσότερων γεωτρήσεων.

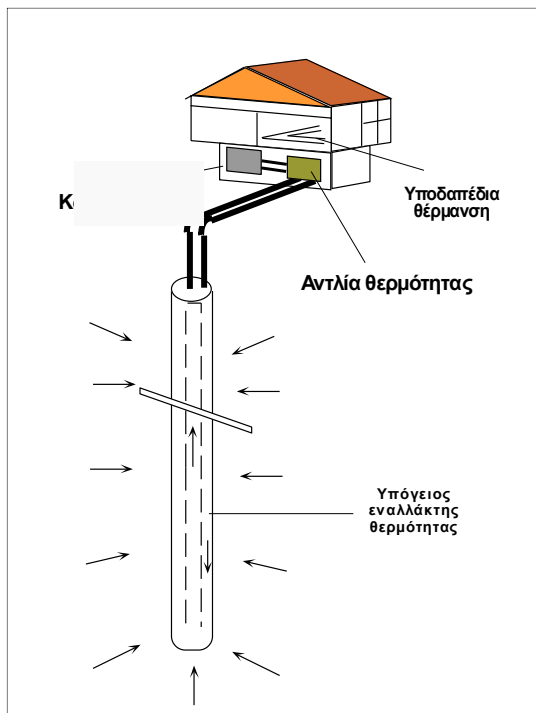


Σχήμα 15.5. Αρχή του συστήματος ΓΑΘ με χρήση οριζόντιου κυκλώματος αγωγών.

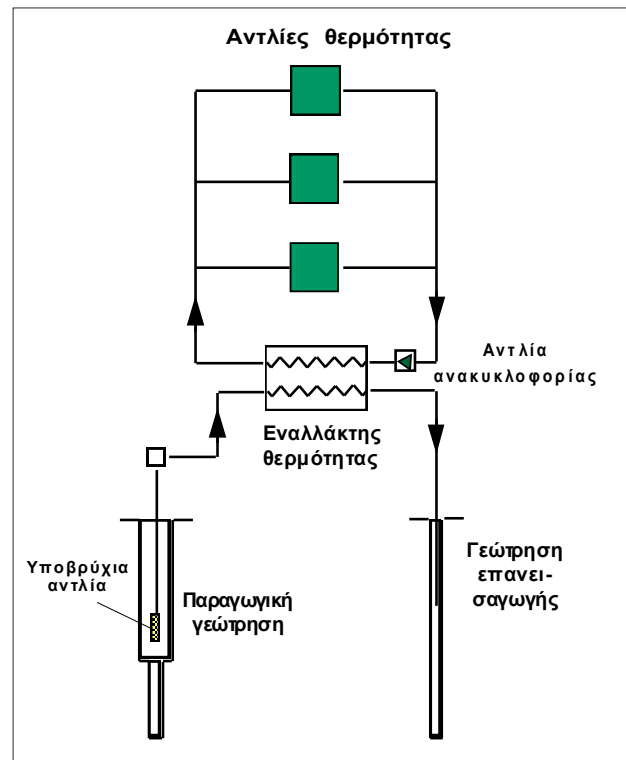
(β) **Συστήματα ανοικτού βρόχου** (open loop systems). Σε αυτά τα συστήματα χρησιμοποιείται νερό από γεωτρήσεις, πηγάδια, ποτάμια, θάλασσα, λίμνες, εγκαταλεημένα ορυχεία κτλ. Προϋπόθεση για τη λειτουργία τέτοιων συστημάτων είναι η επαρκής ποσότητα νερού (αν πρόκειται για υπόγειο ή ποτάμιο, μπορεί να είναι μειωμένη σε κάποιες περιόδους), η καλή ποιότητά του και η δυνατότητα

διάθεσης του νερού μετά τη χρήση του. Κύριο πλεονέκτημα αποτελεί η αποδοτικότερη μεταφορά θερμότητας (π.χ. για θερμικό φορτίο 10 kW,  $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$  και  $\text{COP}=4$  απαιτούνται μόνο  $0,5 \text{ m}^3/\text{hr}$ ).

(γ) **Υβριδικά συστήματα.** Συνδυασμός των παραπάνω, συνδυασμός με άλλα ανανεώσιμα συστήματα θέρμανσης (π.χ. ηλιακοί συλλέκτες) ή συνδυασμός με συμβατικά συστήματα θέρμανσης-ψύξης. Δύο είναι τα κύρια σχήματα με τα οποία λειτουργούν οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας: οι αντλίες που λειτουργούν με τα υπόγεια νερά (ground water) και οι αντλίες που είναι συνδεδεμένες με το υπέδαφος (ground coupled).



**Σχήμα 15.6.** Αρχή του κατακόρυφου συστήματος ΓΑΘ κλειστού βρόχου (ομοαξονικός διπλός πλαστικός σωλήνας).



**Σχήμα 15.7.** Σχηματικό συστήματος ανοικτού βρόχου

### Συστήματα ανοικτού βρόχου

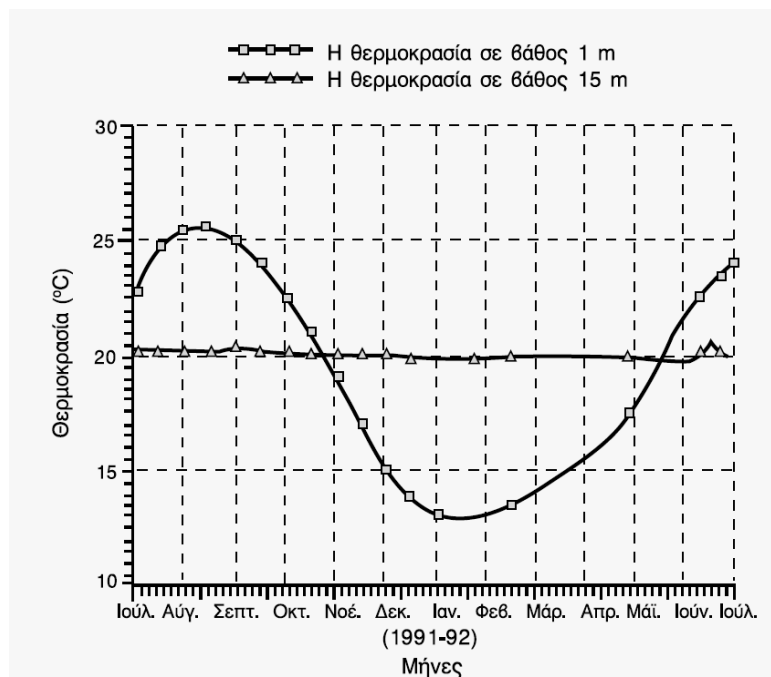
Στα συστήματα αυτά η συλλογή και η απόρριψη της θερμότητας επιτυγχάνονται με τη διέλευση υπόγειου νερού μέσω ενός εναλλάκτη, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 15.7. Το κόστος που σχετίζεται με τις γεωτρήσεις του νερού είναι κατά κάποιο τρόπο παρόμοιο με το κόστος για τις γεωτρήσεις στα συστήματα που είναι συνδεδεμένα με το υπέδαφος. Το κόστος συνήθως είναι ανάλογο με το βάθος της γεώτρησης. Βέβαια, εκείνο που καθορίζει την ικανότητα της γεώτρησης να εξυπηρετεί τις ανάγκες σε θέρμανση και κλιματισμό είναι η παροχή και η θερμοκρασία του νερού και όχι το μήκος. Σε γενικές γραμμές, επειδή με μια μόνο γεώτρηση μπορούν να υποστηριχθούν μεγάλες επιφάνειες, φαίνεται ότι για μικρές και απομονωμένες κατοικίες τα συστήματα αυτά έχουν πλεονεκτήματα.

### Συστήματα κλειστού βρόχου

Ένα σύστημα ΓΑΘ κλειστού βρόχου αποτελείται ουσιαστικά από τρία υποσυστήματα: το υποσύστημα με τις σωληνώσεις που βρίσκονται μέσα στο έδαφος, το υποσύστημα της αντλίας

θερμότητας και στο υποσύστημα θέρμανσης-ψύξης του χώρου. Συχνά, υπάρχει και το υποσύστημα του «θερμαντήρα» (desuperheater), το οποίο μπορεί να προσφέρει θερμό νερό χρήσης με θερμοκρασία 40-45°C. Στη διάρκεια του κύκλου ψύξης του συστήματος η παραγωγή του νερού χρήσης γίνεται πρακτικά δωρεάν. Επειδή το υποσύστημα με τις σωληνώσεις είναι κλειστό σύστημα, δεν παρουσιάζονται επικαθίσεις αλάτων σε αυτό, με αποτέλεσμα η συντήρηση του συστήματος να είναι μηδαμινή. Τα ψυκτικά που χρησιμοποιούνται σήμερα στις αντλίες θερμότητας είναι το R17a, R134a, R407c, R410 κ.ά.

Η αρχή ενός συστήματος ΓΑΘ κλειστού βρόχου βασίζεται στο ότι η θερμοκρασία του υπεδάφους μένει σχεδόν αμετάβλητη σε βάθος μεγαλύτερο από 5 m, προσεγγίζοντας τη μέση ετήσια θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, ενώ ακόμη και σε βάθος 2 m η θερμοκρασία του εδάφους αποκρίνεται στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις, με κάποια χρονική υστέρηση, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 15.8 για την Αττική. Για την περιοχή της Θεσσαλονίκης η μέση τιμή της διακύμανσης υπολείπεται κατά 2-3°C από τις αντίστοιχες τιμές της Αττικής. Το είδος της κάλυψης του εδάφους (χόρτο, χώμα, χιόνι) παίζει σημαντικό ρόλο στη συσσώρευση της θερμότητας. Σε αυτά τα μικρά βάθη, η αποθηκευμένη ενέργεια του εδάφους προέρχεται βασικά από την ηλιακή ακτινοβολία και μόνο ένα μικρό ποσοστό (2-3%) προέρχεται από τη θερμότητα της γης. Σε αντίθεση, η θερμότητα σε βάθη μεγαλύτερα από 15 m προέρχεται μόνο από τη γεωθερμία.



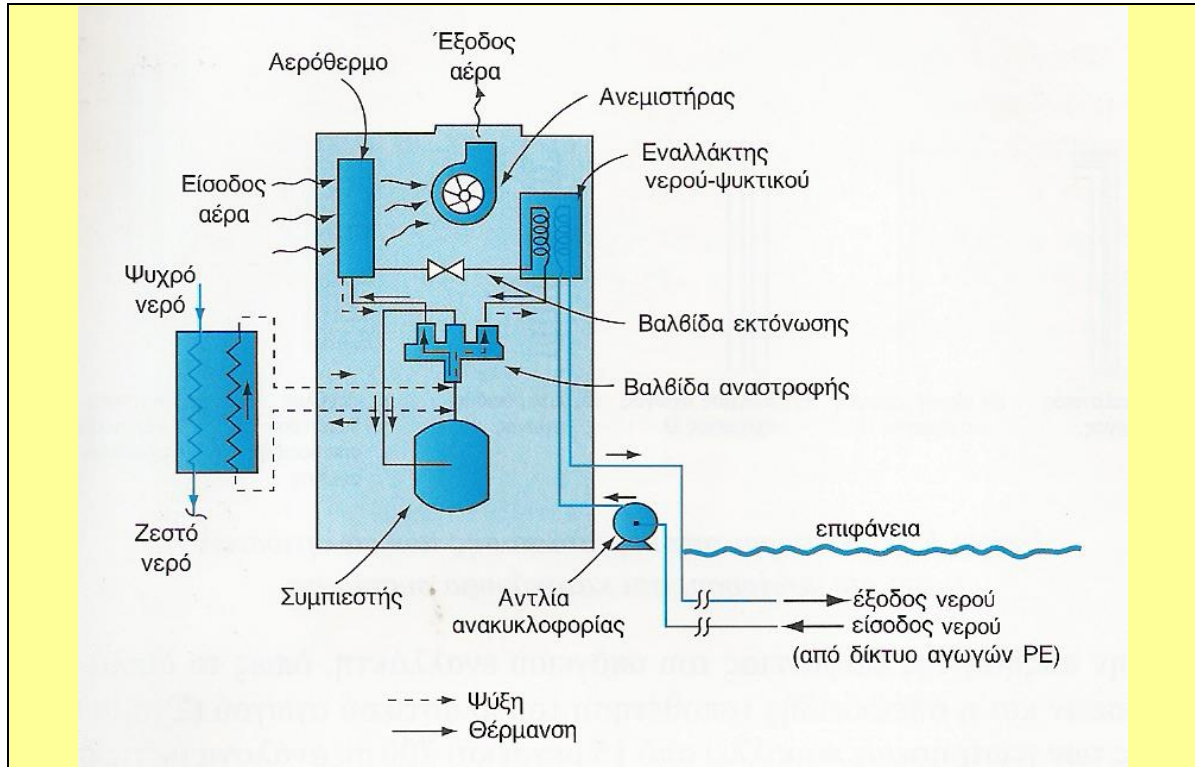
**Σχήμα 15.8.** Μετρήσεις θερμοκρασιών εδάφους σε βάθος 1 m και 15 m στο Κορωπί Αττικής.

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα μιας εγκατάστασης ΓΑΘ κλειστού κυκλώματος είναι: (α) το κλίμα και η θερμοκρασία του εδάφους, (β) οι θερμικές ιδιότητες του υπεδάφους, (γ) το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, (δ) το κόστος ανόρυξης της γεώτρησης ή της εκσκαφής των ορυγμάτων και (ε) οι τυχόν επιδοτήσεις και κίνητρα για την εγκατάσταση μονάδων εξοικονόμησης ενέργειας.

Ο κύριος λόγος για την εγκατάσταση ενός συστήματος ΓΑΘ κλειστού βρόχου είναι βασικά η εξοικονόμηση ενέργειας (που μπορεί να φτάσει ακόμη και το 60%) που συνεπάγεται χαμηλότερο κόστος για τον ιδιοκτήτη και χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στο περιβάλλον. Τα



συστήματα αυτά γίνονται περισσότερο ελκυστικά οικονομικά όταν η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχετικά χαμηλή (η περίπτωση της χώρας μας σήμερα) ή όταν εφαρμόζεται η πολιτική της τιμής αιχμής της ηλεκτρικής κιλοβατώρας (για το καλοκαίρι) και περιβαλλοντικά όταν χρησιμοποιείται «πράσινος» ηλεκτρισμός.



Η γεωθερμική αντλία θερμότητας (είτε για θέρμανση είτε για ψύξη) συνίσταται από τρεις «βρόχους»: βρόχος διανομής, βρόχος ψυκτικού και βρόχος του υπεδάφους.



Εγκατάσταση σωληνώσεων σε οριζόντιο σύστημα ΓΑΘ



## 16. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ

### ΜΙΑΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ\*

#### 16.1 Εισαγωγή

Για οποιαδήποτε εφαρμογή ανανεώσιμης ενέργειας είναι σημαντικό να προσδιοριστεί πόση ενέργεια μπορεί να παραχθεί και ποιο θα είναι το κόστος αυτής της ενέργειας. Το κόστος της παραγόμενης ενέργειας είναι τις περισσότερες φορές ο καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή ή όχι μιας τεχνολογίας και για την υλοποίηση ή όχι μιας ανανεώσιμης εφαρμογής. Επομένως, η αξιόπιστη κοστολόγηση ενός σχεδίου ΑΠΕ αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση και κρίσιμο σημείο στην απόφαση για την υλοποίησή του. Πάντως, θα πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι η οικονομικότητα μιας τεχνολογίας δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας υιοθέτησής της, δεδομένου ότι υπεισέρχονται σημαντικές άλλες συνιστώσες, όπως εθνικές, αναπτυξιακές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές, ενός ενεργειακού σχεδίου που θα μπορούσαν να αντιστρέψουν μία απόφαση βασισμένη σε αυστηρά οικονομικά κριτήρια.

Αν και οι βασικές έννοιες μιας αναλυτικής μεθόδου αποτίμησης μιας επένδυσης είναι απλές, και βασίζονται στην αναγωγή της επένδυσης στην παρούσα αξία, η ενεργειακή αποτίμηση δεν είναι απλή υπόθεση και πολλοί παράγοντες (συχνά απρόβλεπτοι ή όχι καλά εκτιμημένοι) πρέπει να ληφθούν υπόψη. Για παράδειγμα, η ραγδαία πτώση των τιμών του πετρελαίου μετά τα μέσα της δεκαετίας του 1980 (σε σταθερές τιμές η τιμή του πετρελαίου ήταν μεγαλύτερη από 40 δολάρια Η.Π.Α. ανά βαρέλι για περισσότερο από μία δεκαετία), επέδρασε αρνητικά στην οικονομική απόδοση των περισσότερων σχημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που είχαν υλοποιηθεί.

Άλλες δυσκολίες που συνδέονται με ένα ενεργειακό σχέδιο είναι ότι η εκτίμηση της διαθέσιμης ανανεώσιμης ενέργειας δεν είναι απόλυτα αξιόπιστη, ιδιαίτερα όταν η εκτίμηση αναφέρεται σε όχι καλά ερευνημένη περιοχή. Συχνά δίνονται εκτιμήσεις χωρίς κατάλληλη τεκμηρίωση, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες συγκρίσεις και αποφάσεις. Στο κεφάλαιο αυτό θα επιχειρηθεί αρχικά να περιγραφούν συνοπτικά και με απλό τρόπο οι αρχές κοστολόγησης ενός ενεργειακού σχεδίου.

#### 16.2 Κοστολόγηση ενός Ενεργειακού Σχεδίου

Ίσως ο ευκολότερος τρόπος να εκφραστεί το κόστος ενός ενεργειακού σχεδίου είναι η τιμή της παραγόμενης ενέργειας ανά κιλοβατώρα παραγόμενης θερμικής ή ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh). Βεβαίως ο τρόπος αυτός αποτίμησης δεν είναι ο μοναδικός. Άλλες εκφράσεις είναι το κόστος σε Ευρώ ανά kW εγκατεστημένης ισχύος και η *περίοδος αποπληρωμής* (payback period), δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για την απόσβεση της αρχικής επένδυσης. Για πολλές ενεργειακές επενδύσεις, η περίοδος αποπληρωμής συνιστά ένα ικανοποιητικό κριτήριο στο οποίο μπορεί να βασιστεί μία οικονομική απόφαση. Αν όμως η περίοδος αποπληρωμής είναι μεγάλη (όπως συμβαίνει συχνά με τις ΑΠΕ) ή η κατανομή των χρηματορροών με το χρόνο δεν είναι σταθερή, τότε το κριτήριο της περιόδου αποπληρωμής δεν είναι αποδεκτό.

\* Από το βιβλίο των Φυτίκα & Ανδρίτσου, «Γεωθερμική Ενέργεια», Εκδόσεις Τζιόλα, 2004.  
N. Ανδρίτσος: «Ενέργεια και Περιβάλλον»

Εδώ θα πρέπει να διευκρινιστεί μία λεπτή διαφορά μεταξύ κόστους και τιμής της ενέργειας. Το κόστος αναφέρεται στο ελάχιστη χρέωση της ενέργειας για να θεωρηθεί η σχετική επένδυση επικερδής. Δηλαδή, στο κόστος συμπεριλαμβάνεται και ένα αποδεκτό από τον επενδυτή επίπεδο κέρδους. Από την άλλη μεριά, η χρέωση της ενέργειας ρυθμίζεται και εξαρτάται από τις τάσεις της αγοράς. Εάν η τιμή πώλησης είναι μεγαλύτερη από το κόστος, τότε τα κέρδη θα είναι μεγαλύτερα από τα αποδεκτά. Εάν, αντιθέτως, η τιμή πώλησης είναι μικρότερη από το κόστος, τότε ο επενδυτής είτε θα δεχθεί να έχει χαμηλότερα κέρδη είτε θα αποφασίσει να μην προχωρήσει η επένδυση.

Αλλά, ας δώσουμε ένα απλό παράδειγμα για να κατανοηθεί η έννοια της ενεργειακής χρέωσης. Ας υποθέσουμε για παράδειγμα ότι κατασκευάζεται γεωθερμική μονάδα εγκατεστημένης ισχύος 200 kW, για την παραγωγή θερμικής ενέργειας (θέρμανση θερμοκηπίου). Αν το συνολικό πάγιο κόστος (δηλ. το κόστος για την έρευνα ή/και την άδεια εκμετάλλευσης, τη γεώτρηση, τη μεταφορά των ρευστών, την εναλλαγή θερμότητας, τη διάθεση ρευστών κτλ.) για τη μονάδα ανέρχεται σε 150.000 €, τα ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης της μονάδας είναι 3.000 €, η μονάδα λειτουργεί έξι μήνες το έτος και ο χρόνος ζωής της είναι 10 χρόνια, τότε το κόστος της θερμικής κιλοβατώρας μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\begin{aligned}\text{Ετήσιο κόστος} &= [\text{πάγιο κόστος}/\text{έτος}] + [\text{κόστος λειτουργίας \& συντήρησης}] \\ &= 150.000/10 + 3000 = 18.000 \text{ €}\end{aligned}$$

$$\text{Παραγόμενη ενέργεια} = 200 \text{ kW} \times (6 \times 30 \times 24) \text{ h} = 864.000 \text{ kWh}$$

$$\text{Κόστος ανά παραγόμενη κιλοβατώρα} = 18.000 \text{ €}/864.000 \text{ kWh} = 2,1 \text{ λεπτά/kWh}$$

Βέβαια στους παραπάνω απλούς υπολογισμούς υπάρχει ένα πρόβλημα. Ενώ η παραγόμενη ενέργεια είναι σταθερή κάθε χρόνο, το ετήσιο κόστος δεν είναι, γιατί απλούστατα η «αξία» του χρήματος δε μένει σταθερή με το χρόνο. Οι λόγοι που συμβάλλουν σε αυτό είναι ποικίλοι, οι κυριότεροι από αυτούς είναι οι ακόλουθοι:

- 1) Η δυνατότητα να δανείσουμε τα χρήματα της επένδυσης με ορισμένο επιτόκιο.
- 2) Η επίδραση του πληθωρισμού, η οποία «ροκανίζει» με το χρόνο την αξία του χρήματος.

Είναι αναγκαίο επίσης να διευκρινίσουμε ορισμένες ακόμη έννοιες. Ας υποθέσουμε ότι τοποθετούμε στην τράπεζα (ή επενδύουμε κάπου) 1000 € με ετήσιο επιτόκιο 10%. Σε ένα χρόνο το ποσό θα γίνει 1100 € και σε δέκα χρόνια 2600 €, δηλαδή τα 1000 € σήμερα, σε 10 χρόνια θα έχουν «μελλοντική αξία» 2600 €. Αυτό μπορεί να εκφραστεί και διαφορετικά: η «παρούσα αξία» των 2600 € σε 10 χρόνια με επιτόκιο 10% είναι μόνο 1000 €. Με αυτόν το τρόπο προεξοφλούμε μελλοντικές πληρωμές. Αυτή η έννοια έχει οδηγήσει στη μέθοδο οικονομικής αποτίμησης γνωστής ως *ανάλυση εσωτερικού επιτοκίου* (discounted cash flow analysis). Αυτό επιτρέπει για παράδειγμα να εκφράσουμε λογαριασμούς που θα πληρωθούν στο μέλλον σε *καθαρή παρούσα αξία* (net present value). Σημειώνεται ότι το εσωτερικό επιτόκιο (discount rate) δεν ταυτίζεται πάντα με το τραπεζικό επιτόκιο και είναι ουσιαστικά ένα οικονομικό κριτήριο.

Η σχέσεις του κριτηρίου της *παρούσας αξίας* προκύπτουν ως εξής: με δεδομένο εσωτερικό επιτόκιο 10%, η αξία ενός χρηματικού ποσού 1000 € σε 1,2,...n χρόνια θα είναι:

$$\text{Σε 1 χρόνο: } 1000 \text{ €} \times (1+0,1)$$

$$\text{Σε 2 χρόνια: } 1000 \text{ €} \times (1+0,1)^2$$

$$\text{Σε n χρόνια: } 1000 \text{ €} \times (1+0,1)^n$$

Η γενική σχέση για ένα χρηματικό πόσο με παρούσα αξία  $V_p$  σε  $n$  χρόνια και για εσωτερικό επιτόκιο  $r$  θα είναι

$$V_n = V_p \times (1+r)^n \quad \text{ή}$$

$$V_p = \frac{1}{(1+r)^n} V_n \quad (16.1)$$

Η παραπάνω σχέση εκφράζει την παρούσα αξία ενός χρηματικού ποσού που θα δαπανηθεί (ή θα αποκτηθεί) σε  $n$  χρόνια στο μέλλον. Εάν τώρα υπάρχει μία σειρά χρηματορροών για κάποιο μεγάλο χρονικό διάστημα, τότε η συνολική παρούσα αξία τους καλείται *καθαρά παρούσα αξία*. Εάν οι χρηματορροές είναι ίσες κάθε χρόνο με τιμή  $A$ , τότε η *καθαρά παρούσα αξία*  $V_p$  των  $n$  ίσων χρηματορροών δίνεται από τη σχέση:

$$V_p = \frac{1-(1+r)^{-n}}{r} A \quad (16.2)$$

Εάν αντιστρέψουμε τη σχέση, τότε προκύπτει ότι:

$$A = \frac{r}{1-(1+r)^{-n}} V_p \quad (16.3)$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να ερμηνευτεί ως εξής: μία παρούσα πάγια επένδυση  $V_p$ , είναι ισοδύναμη με την ετήσια καταβολή ποσού  $A$  (το οποίο είναι υψηλότερο από το  $A' = V_p / n$ ) και ονομάζεται ετήσια πάγια αξία.

Η μετατροπή της πάγιας επένδυσης σε ετήσιες πάγιες αξίες, οι τιμές των οποίων εξαρτώνται από το εσωτερικό επιτόκιο και τον οικονομικό χρόνο ζωής ενός εγχειρήματος αποτελεί ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στην εκτίμηση του ενεργειακού κόστους, το οποίο μπορεί να δοθεί από τη σχέση

$$\text{Κόστος ενέργειας} = \frac{\text{Ετήσια πάγια αξία} + \text{Μέσο ετήσιο λειτουργικό κόστος}}{\text{Μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια}} \quad (16.4)$$

Η παραπάνω απλουστευμένη σχέση δεν ισχύει προφανώς όταν τα ετήσια κόσθη διαφέρουν.

Αν τώρα στο παράδειγμα της γεωθερμικής μονάδας 200 kW λάβουμε υπόψη τα παραπάνω, το ενεργειακό κόστος θα είναι αρκετά μεγαλύτερο από ό,τι υπολογίστηκε, όπως αναλύεται στο πλαίσιο.

Αρχικά από τη σχέση (9.4) βρίσκουμε την ετήσια πάγια αξία

$$A = \frac{0,1}{1-(1+0,1)^{-10}} \times 150000 = 24412 \text{ €}$$

Προσθέτοντας και το λειτουργικό κόστος, το ενεργειακό κόστος προκύπτει:

$$= (24412 + 3000) \text{ €} / 864000 \text{ kWh} = 3,2 \text{ λεπτά/kWh}$$

Στο παράδειγμα που παρατέθηκε χρησιμοποιήθηκαν μόνο δύο κατηγορίες κόστους, οι πάγιες δαπάνες και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Στην πράξη βέβαια έχουμε μία πληθώρα από δαπάνες, μερικές από τις οποίες καταγράφονται στον Πίνακα 16.1. Και σε αυτό το σχήμα υπάρχει η ομάδα των παγίων (οι δαπάνες στην έναρξη του εγχειρήματος) και οι τρέχουσες δαπάνες (οι δαπάνες που επαναλαμβάνονται σε όλη τη διάρκεια ζωής της μονάδας). Έχει προστεθεί και μία ακόμη κατηγορία δαπανών που σχετίζεται με τον παροπλισμό της μονάδας. Κάθε δαπάνη στον Πίνακα 16.1 γίνεται συνήθως σε διαφορετική χρονική στιγμή. Έστω ότι οι συνολικές χρηματορροές για τον πρώτο χρόνο είναι  $K_1$ , για το δεύτερο χρόνο  $K_2$  και για το  $n$  χρόνο  $K_n$ . Η συνολική καθαρή παρούσα αξία των δαπανών ( $K$ ) στην αρχή της πρώτης περιόδου ισούται με το άθροισμα των επιμέρους καθαρών αξιών των χρηματορροών:

$$K = \sum_{j=1}^{j=n} \frac{K_j}{(1+r)^j} \quad (16.5)$$

Οι τρέχουσες δαπάνες διαχωρίζονται περαιτέρω σε μεταβλητές δαπάνες και σε σταθερές δαπάνες. Οι πρώτες είναι ανάλογες με την παραγόμενη ποσότητα ενέργειας, όπως το κόστος των καυσίμων ή του ηλεκτρισμού (που στις γεωθερμικές εφαρμογές είναι πολύ μικρό) και τμήμα του κόστους λειτουργίας και συντήρησης. Οι σταθερές δαπάνες είναι ανεξάρτητες από την ενεργειακή παραγωγή και μπορεί να εκφραστούν με μονάδες Ευρώ ως προς την εγκατεστημένη ισχύ της μονάδας. Τέτοιες δαπάνες είναι η ασφάλιση των εγκαταστάσεων και το κόστος του προσωπικού.

**Πίνακας 9.1.** Γενικευμένη ταξινόμηση των δαπανών ενός ενεργειακού εγχειρήματος με έμφαση στη γεωθερμική ενέργεια (τροποποίηση από Boyle, 1995).

Πάγιες δαπάνες (capital costs)	
Προετοιμασία	- γεωθερμική έρευνα - ανάπτυξη και προγραμματισμός - σχεδιασμός της μονάδας - αμοιβή για τη τεχνογνωσία κτλ.
Κατασκευή – οικοδομικά	- προετοιμασία της έκτασης γης - κατασκευή γεωτρήσεων - κατασκευή μονάδας παραγωγής - κατασκευή μονάδων διάθεσης των ρευστών
Ολοκλήρωση	- εγκατάσταση μονάδας - εργασίες παράδοσης ολοκληρωμένου έργου σε λειτουργία (commissioning) - σύνδεση με το δίκτυο κτλ.
Κεφάλαιο υποστήριξης	- εφεδρικό κεφάλαιο
Διαχείριση εγχειρήματος	- επίβλεψη - έλεγχος ποιότητας - άλλα
Απρόοπτα	
Τρέχουσες δαπάνες (current costs)	
Λειτουργία	- κόστος καυσίμων και ηλεκτρισμού - κόστος προσωπικού - ενοίκια, τέλη κτλ. - γενικής χρήσης (τηλεφωνία κτλ.)
Συντήρηση	- ασφάλιση - επιθεώρηση-καταγραφή - εργασίες συντήρησης μονάδας και γεωτρήσεων - επισκευές - χρήση ανταλλακτικών
Γενικά έξοδα	
Δαπάνες διάθεσης – μεταβίβασης (disposal costs)	
	- θέση εκτός λειτουργίας (decommissioning) - πώληση

Επίσης, εκτός από τη διασπορά και τη μεταβλητότητα των δαπανών, μπορεί και η παραγόμενη ενέργεια να μεταβάλλεται με το χρόνο για ενδογενείς ή εξωγενείς λόγους, και επομένως και τα

έσοδα. Όπως και με τις δαπάνες, μπορεί να γραφεί και για τα έσοδα η συνολική παρούσα αξία τους, E:

$$E = \sum_{j=1}^{j=n} \frac{E_j}{(1+r)^j} \quad (16.6)$$

όπου  $E_j$  είναι τα έσοδα στη χρονιά  $j$ .

Για τον υπολογισμό του συνολικού ενεργειακού κόστους σε ένα περίπλοκο σχήμα απαιτείται η λεπτομερειακή καταχώριση των χρηματορροών και η ακριβής ανάλυση της ενεργειακής παραγωγής. Η καθαρή παρούσα αξία όλου του εγχειρήματος (NPV) υπολογίζεται από τη διαφορά της συνολικής παρούσας αξίας των δαπανών από τη συνολική παρούσα αξία των εσόδων και την αφαίρεση του αρχικού κεφαλαίου (I) :

$$NPV = \sum_{j=1}^{j=n} \frac{E_j - K_j}{(1+r)^j} - I \quad (16.7)$$

Τέλος, σημειώνεται ότι υπάρχουν και αρκετές άλλες μέθοδοι οικονομικής αξιολόγησης ενός ενεργειακού σχεδίου. Ορισμένα από τα οικονομικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, και τα οποία δεν διαφέρουν σημαντικά από τη μέθοδο της καθαρής παρούσας αξίας, είναι η απόδοση με βάση την αρχική επένδυση (return on original investment, ROI), η απόδοση με βάση το εσωτερικό επιτόκιο (Internal Rate of Return), η ανάλυση ωφέλειας-κόστους (benefit-cost ratio, B/C) κ.ά. Μία σύνοψη των οικονομικών κριτηρίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 9.2.

**Πίνακας 9.2.** Ορισμοί και σχόλια στα κυριότερα οικονομικά κριτήρια (τροποποίηση από Boyle, 1995).

Κριτήριο	Ορισμός	Σχόλια
Περίοδος αποπληρωμής	$= \frac{\text{Πάγιο κόστος}}{\text{Μέσα ετήσια κέρδη}}$	Αριθμός ετών που απαιτούνται για να αποπληρωθεί το πάγιο κόστος. Απλό αλλά αρκετά χοντρικό.
Απόδοση με βάση την αρχική επένδυση (return on original investment, ROI) (%)	$= \frac{\text{Μέσα ετήσια κέρδη}}{\text{Πάγιο κόστος}}$	Ψευδο-μέτρηση της κερδοφορίας, αγνοώντας την «προεξόφληση». Απλό αλλά αρκετά χοντρικό.
Καθαρή παρούσα αξία, NPV (€)	Εξίσωση (9.6)	Όσο μεγαλύτερη η NPV, τόσο καλύτερο. Σχέδια με NPV >0 θεωρούνται υλοποιήσιμα.
Απόδοση με βάση το εσωτερικό επιτόκιο (Internal Rate of Return, IRR) (%)	= Η τιμή του εσωτερικού επιτοκίου που μηδενίζει την NPV	Το IRR είναι μία μέτρηση της κερδοφορίας. Αποδεκτό είναι το σχέδιο με το μεγαλύτερο IRR ή το σχέδιο του οποίου το IRR υπερβαίνει μία ελάχιστη αποδεκτή τιμή.
Λόγος ωφέλειας-κόστους (benefit-cost ratio), B/C	$= \frac{\text{Παρούσα αξία των εσόδων}}{\text{Παρούσα αξία των δαπανών}}$	Σχέδια με B/C > 1 είναι υλοποιήσιμα. Όσο υψηλότερο ο B/C, τόσο καλύτερα

### 9.3. Κοστολόγηση ενός Γεωθερμικού Σχεδίου

Η κοστολόγηση ενός γεωθερμικού εγχειρήματος αποτελεί συνάρτηση πολλών παραμέτρων, οι κυριότερες από τις οποίες είναι:

(1) Τα κόστος της διάτρησης και κατασκευής της γεώτρησης, από την επιφάνεια μέχρι τον ταμειυτήρα. Συμπεριλαμβάνει το κόστος των διαγραφιών και δοκιμών της γεώτρησης και το κόστος αντλιών παραγωγής και μεταφοράς της γεώτρησης.

(2) Το κόστος κατασκευής της μονάδας παραγωγής της ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας, το οποίο εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ταμειυτήρα (πίεση, θερμοκρασία, αλατότητα, περιεκτικότητα των ρευστών σε μη συμπυκνώσιμα αέρια κτλ.), το μέγεθος της μονάδας, το σχεδιασμό της μονάδας (π.χ. επιλογή του κύκλου παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας), το συντελεστή λειτουργίας κτλ. Για μία θερμική μονάδα το κόστος αναφέρεται στους εναλλάκτες θερμότητας, τους αγωγούς μεταφοράς των ρευστών, το σύστημα διανομής και το σύστημα συμπληρωματικής θέρμανσης.

(3) Το κόστος που αφορά στη διάθεση των ρευστών, ιδιαίτερα το κόστος επανεισαγωγής των ρευστών (γεώτρηση επανεισαγωγής, άντληση νερών, συμπίεση αερίων κτλ.) και επεξεργασίας των αέριων εκπομπών (βασικά του υδροθείου).

4) Το κόστος λειτουργίας (π.χ. ηλεκτρισμού για την άντληση των ρευστών και την εισαγωγή των αντικαθαλατωτικών, ορυκτών καυσίμων στο σύστημα συμπληρωματικής θέρμανσης) και συντήρησης της μονάδας (π.χ. αντικατάσταση των διαβρωμένων τμημάτων) σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο, συνήθως για 30 χρόνια.

Το κυριότερο ίσως κόστος σε ένα γεωθερμικό εγχείρημα είναι το κόστος κατασκευής και συντήρησης των γεωτρήσεων. Το κόστος της γεώτρησης αυξάνει σημαντικά με το βάθος και επηρεάζεται από το ρυθμό διάτρησης. Ο διπλασιασμός για παράδειγμα του ρυθμού διάτρησης (π.χ. με βελτίωση των κοπτικών άκρων) μπορεί να μειώσει το συνολικό κόστος μιας γεώτρησης καρά 20%. Σε σταθερές τιμές το κόστος διάτρησης μειώθηκε τα τελευταία 20 χρόνια. Το κόστος αυτό ποικίλλει σημαντικά από χώρα σε χώρα και είναι αρκετά διαφορετικό για της γεωτρήσεις χαμηλής ενθαλπίας σε σχέση με το κόστος για γεώτρηση υψηλή ενθαλπίας. Το κόστος των γεωτρήσεων χαμηλής ενθαλπίας σε ορισμένες χώρες της Ε.Ε. παρουσιάζει σημαντική διακύμανση. Μέρος της διαφοροποίησης του κόστους μπορεί να αποδοθεί στις διαφορετικές τεχνικές και περιβαλλοντικές προδιαγραφές που ισχύουν στις διάφορες χώρες και στο διαφορετικό κόστος εργασίας, το οποίο αποτελεί συνήθως το 20% τους συνολικού κόστους της κατασκευής των γεωτρήσεων. Επίσης το κόστος των γεωτρήσεων είναι γενικά χαμηλότερο στις «γεωθερμικά» αναπτυγμένες χώρες, καθώς και στις χώρες με ανεπτυγμένη αγορά και έρευνα στο τομέα του πετρελαίου και του φυσικού αερίου (π.χ. υπάρχουν περισσότερα διαθέσιμα γεωτρυπανικά συστήματα και τα ανταλλακτικά βρίσκονται ευκολότερα). Στην Ισλανδία, το κόστος των γεωτρήσεων υψηλής είναι 1,7-2 φορές περισσότερο από το κόστος των γεωτρήσεων χαμηλής ενθαλπίας.



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

---

## I.1. Βιβλία

---

- Boyle, G., *“Renewable Energy: Power for a Sustainable Future”*. Oxford University Press, Oxford, 1998. (Επίσης, 2<sup>nd</sup> edition, 2004).
- Boyle, G., B. Everett, and J. Ramage, *“Energy Systems and Sustainability”*. Oxford University Press, 2003.
- Brower, M. *“Cool Energy: Renewable Solutions to Environmental Problems”*. MIT Press, 1997.
- da Rosa A.V., *“Fundamentals of Renewable Energy Processes”*. Academic Press Inc., 2005.
- Hinrichs, R.A., 1996, *“Energy: Its use and the environment”*. Saunders College Publishing, New York.
- Kraushaar and Ristinen, *“Energy and Problems of a Technical Society”*. Wiley, 2<sup>nd</sup> ed., 1993.
- Radovic, L.R., *“Energy and fuels in Society”*. McGraw-Hill, 1997.
- Ristinen, R.A. and J.P. Kraushaar *“Energy and the Environment”*. Wiley, 1999.
- Sorensen, Bent, *“Renewable Energy”*. 2<sup>nd</sup> edition, Academic Press, 2000.
- Twidell, J. & Weir, T., *“Renewable Energy Resources”*. E & FN Spon, London, 1997.
- Tyler Miller, Jr., G., *“Living in the Environment; Principles, Connections, and Solutions”*. 10th Edition, 2000 (Ελληνική μετάφραση, «Βιώνοντας το περιβάλλον», 9<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Ιων, 1999).
- Τσιλιγκιρίδης, Γ. *«Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας»*. Διδακτικές Σημειώσεις, Θεσσαλονίκη, 2000.

### Εξειδικευμένα

- Avery, William H. et al., *“Renewable Energy from the Ocean: A Guide to Otec”*. Johns Hopkins University, 1994.
- Dickson, M.H. and Fanelli, M. (Editors), *Geothermal Energy*, Wiley, John & Sons (1995).
- Walker, J.F. and Jenkins, N. *Wind Energy Technology*, Wiley, John & Sons (1997).
- Klass, D.L. *“Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals”*, 1998, Academic Pr.
- Roberts, Simon, *“Solar Electricity : Practical Guide to Designing and Installing Small Photovoltaic Systems”*.
- ΕΛΚΕΠΑ, *«Παραγωγή ενέργειας από βιομάζα»*.
- Καγκαράκης, *«Φωτοβολταϊκή τεχνολογία»*. Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, Αθήνα, 1992.
- Καλδέλης, Ι.Κ. και Καββαδίας Κ.Α., *«Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας»*, Εκδ. Σταμούλης, Αθήνα, 2001.
- Φυτίκας Μ. και Ανδρίτσος, Ν. *«Γεωθερμία – Γεωθερμικοί πόροι, Γεωθερμικά Ρευστά, Εφαρμογές, Περιβάλλον»*. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2004.

Επίσης πολλές πληροφορίες για τις ΑΠΕ, την κατάσταση στην Ελλάδα και τις ερευνητικές δραστηριότητες στην περιοχή περιέχονται στα **Πρακτικά των 8 Συνεδρίων για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας** που οργανώνει με επιτυχία ανά τριετία το Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής [[vergina.eng.auth.gr/IHT/ist.htm](http://vergina.eng.auth.gr/IHT/ist.htm)].

## 1.2. Σχετικά Περιοδικά (ενδεικτικά)

---

- *ENERΓΕΙΑ* (Μηνιαίο ελληνικό περιοδικό) [[www.energia.gr](http://www.energia.gr), όπου μπορείτε να βρείτε και άλλες χρήσιμες διευθύνσεις στο διαδίκτυο]
- *Energy* [για την ανάπτυξη, αποτίμηση και διαχείριση ενεργειακών σχεδίων, [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)]
- *The Energy Journal* [περισσότερο γύρω από τις πολιτικές, [www.iaee.org/en/publications/journal.aspx](http://www.iaee.org/en/publications/journal.aspx)]
- *Solar Energy*
- *The Solar Energy Journal Energy Policy* [[www.ises.org/](http://www.ises.org/)]
- *Journal of Solar Energy Engineering* [[www.asme.org](http://www.asme.org)]
- *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Elsevier Science, [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)]
- *Renewable Energy* [Elsevier Science, [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)]
- *Geothermics* [Elsevier Science, [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)]
- *Biomass and Bioenergy*.
- *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Elsevier Science, [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)]
- PHOTON International (<http://www.photon-magazine.com/>)
- Systemes Solaires (<http://www.systemes-solaires.com>)
- Renewable ENERGY World, James & James publication (<http://www.jxj.com/magsandj/rew/index.html> (... και πολλά άλλα)

## 1.3. Σχετικές Ιστοσελίδες

---

Υπάρχουν πολλές ιστοσελίδες σε ενεργειακά θέματα και το Διαδίκτυο προσφέρεται στο να δώσει πληθώρα πληροφοριών. Μερικές από τις ιστοσελίδες δίνονται παρακάτω:

- Energy Efficiency and Renewable Energy Network: <http://www.eren.doe.gov/>
- ATLAS Project European Network of Energy Agencies: [http://europa.eu.int/comm/energy/index\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/energy/index_en.html) (για το τι συμβαίνει στην Ε.Ε.)
- United Nation Environmental Programme: <http://www.unepie.org/home.html>
- BP world statistics: <http://www.bp.com> (πολλά χρήσιμα στοιχεία για την κατανάλωση, παραγωγή και αποθέματα ενέργειας)
- ΚΑΠΕ: <http://www.cres.gr/kape/index.htm>
- International Energy Agency: <http://www.iea.org/>
- Australian Cooperative Research Centre For Renewable Energy: <http://www.acre.murdoch.edu.au/>
- The World-wide Information System for Renewable Energy: <http://wire0.ises.org/>
- US Department of Energy Web site - Energy Information Administration - <http://www.eia.doe.gov>
- National Renewable Energy Laboratory - <http://www.nrel.gov>
- United Nations Framework Convention on Climate Change (1992) - <http://www.ipcc.ch/index.htm>
- Global Warming Central - <http://www.law.pace.edu/env/energy/globalwarming.html>
- Solar Energy Industries Association - SEIA - <http://www.seia.org>
- GreenPeace - <http://www.greenpeace.org>
- Resources for the Future - <http://www.rff.org>
- Soltstice: Sustainable Energy and Development Online - <http://solstice.crest.org>

## 1.4. Μονάδες Ενέργειας και Συντελεστές Μετατροπής

### Προθέματα μονάδων

Κατά τη συζήτηση ενεργειακών θεμάτων προκύπτει η ανάγκη να γραφούν μεγάλες τιμές κάποιων ποσοτήτων (π.χ. η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας) ή πάρα πολύ μικρών τιμών (ατομικό επίπεδο). Δύο λύσεις έχουμε για αυτό το πρόβλημα: τη χρήση εκθετικών δυνάμεων του 10 ή τη χρήση αποδεκτών προθεμάτων πριν από μία μονάδα. Τα κυριότερα προθέματα που συναντάμε στα ενεργειακά θέματα είναι:

atto (a)	= $10^{-18}$	= ένα πεντάκις εκατομμυριοστό
femto (f)	= $10^{-15}$	= ένα τετράκις εκατομμυριοστό
pico (p)	= $10^{-12}$	= ένα τρισεκατομμυριοστό
nano (n)	= $10^{-9}$	= ένα δισεκατομμυριοστό
micro (μ)	= $10^{-6}$	= ένα εκατομμυριοστό
milli (m)	= $10^{-3}$	= ένα χιλιοστό
centi (c)	= $10^{-2}$	= ένα εκατοστό
deci (d)	= $10^{-1}$	= ένα δέκατο
deca (da)	= 10	= δέκα
hecto (h)	= $10^2$	= εκατό
kilo (k)	= $10^3$	= χίλια
mega (M)	= $10^6$	= εκατομμύριο
giga (G)	= $10^9$	= δισεκατομμύριο
tera (T)	= $10^{12}$	= τρισεκατομμύριο
peta (P)	= $10^{15}$	= τετράκις εκατομμύριο
exa (E)	= $10^{18}$	= πεντάκις εκατομμύριο

παράδειγμα: 1 EJ =  $10^{18}$  J, 1 GW =  $10^9$  W

### Συστήματα μονάδων:

- Διεθνές (SI) ή Μετρικό Σύστημα Μονάδων: καθιερωμένο σε Ευρώπη, Κίνα, Ιαπωνία, Καναδάς (και γενικά σε εκπαίδευση και έρευνα). Το SI (Système International d' Unitès) συμφωνήθηκε από τη διεθνή κοινότητα το 1960 ως κοινό σύστημα μονάδων. Οι τρεις κύριες μονάδες ορίζονται ως: το μέτρο (m), το χιλιόγραμμα (kg) και το δευτερόλεπτο (s).
- Βρετανικό ή Αγγλικό Σύστημα (π.χ. Btu): χρησιμοποιείται στη Μ. Βρετανία, με τάση όμως για υιοθέτηση του SI.
- Αμερικανικό Σύστημα (συγγενές με το βρετανικό): Η.Π.Α.

### Μονάδες Ενέργειας

**Joule (J)** (προς τιμήν του James Joule): είναι η μονάδα ενέργειας στο SI. Ένα Joule ενέργειας καταναλώνεται όταν μία δύναμη 1 N δρα σε ένα σώμα σε μία απόσταση 1 m.

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N}\cdot\text{m} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2.$$

$$1000 \text{ J} = 0,945 \text{ BTU} \quad (1 \text{ BTU}=1055 \text{ J})$$

**Calorie (cal)** ή θερμίδα: 1 gram calorie είναι η ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται για να ανυψωθεί η θερμοκρασία 1 g νερού κατά 1°C (από 14,5 σε 15,5°C). Συχνά μιλάμε για την ενέργεια που περιέχεται στις τροφές με το όρο «θερμίδα» ή «Calorie» με κεφάλαιο C. Αυτή η μονάδα ισοδυναμεί με 1000 cal.

$$1 \text{ Cal} = 1000 \text{ cal} = 4,2 \text{ kJ}$$

**Btu:** Το Btu (British Thermal Unit) χρησιμοποιείται στις Η.Π.Α., κυρίως για μέτρηση θερμότητας (π.χ. τα κλιματιστικά δίνονται σε Btu). Το Btu αντιπροσωπεύει την ποσότητα θερμότητας που απαιτείται για την ανύψωση της θερμοκρασίας 1 lb νερού κατά 1 βαθμό Fahrenheit.

$$1 \text{ BTU} = 1055 \text{ J} = 0,252 \text{ kcal} = 0,00029 \text{ kWh}$$

1 quad =  $10^{15}$  Btu (χρησιμοποιείται για μεγάλες ποσότητες ενέργειας, π.χ. ως μονάδα για την ενεργειακή κατανάλωση μιας χώρας)

**kilowatt-hour (kWh)** – κιλοβατώρα: αντιπροσωπεύει την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται σε μια ώρα από κύκλωμα με ονομαστική ισχύ 1 kW. Για παράδειγμα ένας ηλεκτρικός θερμαντήρας 3 kW που χρησιμοποιείται για 40 λεπτά της ώρας μετατρέπει 2 kWh ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα.

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

**tonne of oil equivalent (TOE)** - Τόνοι Ισοδύναμου Πετρελαίου (ΤΙΠ): μονάδα που χρησιμοποιούνται από την πετρελαιοβιομηχανία, αλλά και όταν θέλουμε να συγκρίνουμε ενεργειακές ποσότητες από διαφορετικές ενεργειακές πηγές. Χρειάζεται κάποια προσοχή στις μετατροπές γιατί σε διαφορετικές εκδόσεις υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις

$$1 \text{ TOE} = 42 \text{ GJ} \text{ ή για περισσότερη ακρίβεια, } 1 \text{ TOE} = 41,868 \text{ GJ}$$

**Barrel (bbl)** - Βαρέλια: βασικά είναι μονάδα όγκου (= 42 gallons USA), αν και συχνά χρησιμοποιείται και ως μονάδα ενέργειας.

$$1 \text{ bbl} = 1700 \text{ kWh} = 6,12 \text{ GJ}$$

$$[1 \text{ bbl (USA)} = 42 \text{ gallons (USA)} = 158,99 \text{ (L)} \times (\sim 850 \text{ kg/1000 L}) \times (\sim 10.700 \text{ kcal/kg}) \approx 6,12 \text{ GJ}]$$

**Electron-Volt (eV)** - Ηλεκτρονιοβόλτ: η μονάδα ενέργειας για να μετακινηθεί ένα ηλεκτρόνιο μέσω ενός ηλεκτρικού πεδίου με διαφορά δυναμικού 1 V.

$$1 \text{ eV} = 1,4 \times 10^{-19} \text{ J}$$

### Μονάδες ισχύος

Κοινότερες μονάδες το Watt (W), το κιλοβάτ (kW) και ο ίππος (hp).

$$1000 \text{ W} = 1 \text{ kW} = 1,34 \text{ hp}$$

Συχνά οι όροι ενέργεια και ισχύς χρησιμοποιούνται σαν να είναι συνώνυμοι, π.χ. αιολική ισχύς / αιολική ενέργεια. Στον επιστημονικό όμως λόγο θα πρέπει να διαφοροποιούνται. Ισχύς είναι ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια μετατρέπεται από μία μορφή σε μία άλλη, ή μεταφέρεται από μία θέση σε μία άλλη θέση. Μονάδα ισχύος στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων είναι το W (Watt), το οποίο ορίζεται ως 1 Joule ανά δευτερόλεπτο.

### Μάζα

$$1 \text{ kg} = 2,2046 \text{ lb}$$

$$1 \text{ μετρικός τόνος (metric tonne)} = 1000 \text{ kg} = 1,1023 \text{ ton}$$

$$1 \text{ ton} = 2000 \text{ lb} = 907,18 \text{ kg} = 0,90718 \text{ metric tonne}$$

### Όγκος

$$1 \text{ m}^3 = 35,31 \text{ ft}^3$$

$$1 \text{ liter (L)} = 0,264 \text{ gallons (gal)}$$

$$1 \text{ gal} = 3,785 \text{ L}$$

$$1 \text{ bbl} = 42 \text{ gal} = 159 \text{ L}$$

### Θερμότητα και Ενέργεια

1 Btu = 1,055 kJ = 0,252 kcal = 0,000295 kWh  
 1 kcal = 4186,8 J = 0,001163 kWh = 3,968 Btu

### Πετρέλαιο

1 εκατομμύριο μετρικοί τόνοι πετρελαίου  
 = 7,5 εκατομμύρια bbl  
 = 12000 GWh ενέργειας

### Παραγωγή ηλεκτρισμού

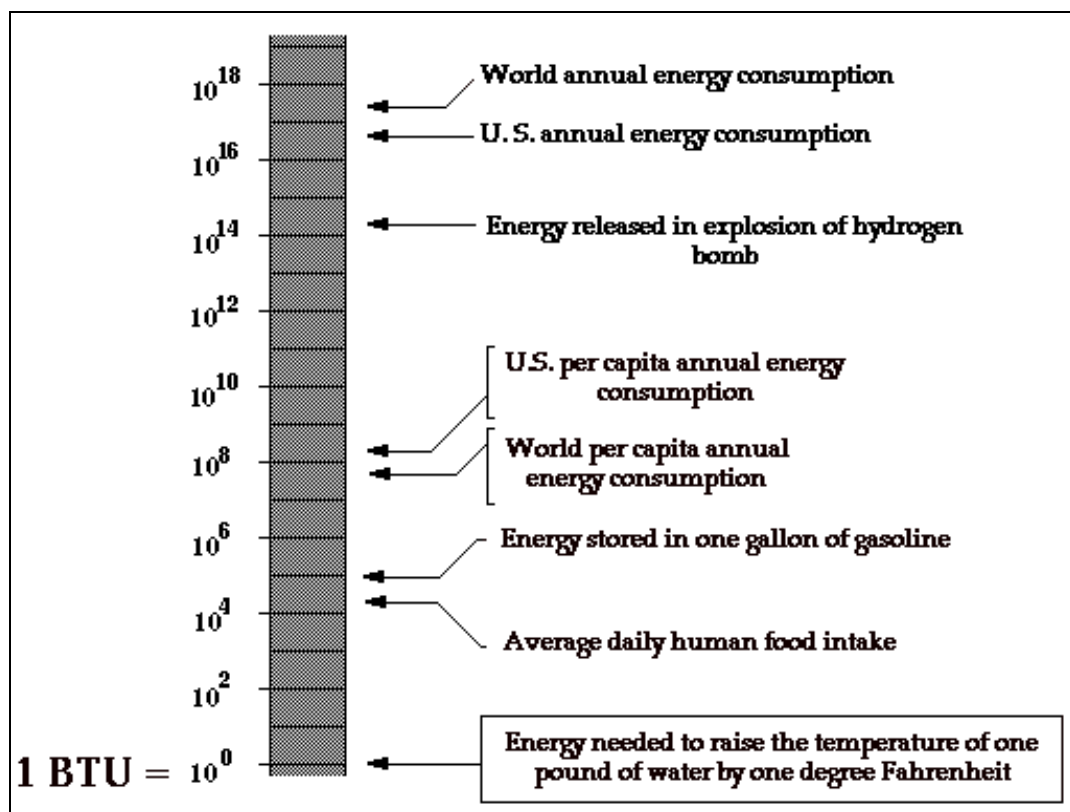
Με την υπόθεση ότι ο ηλεκτρισμός παράγεται από τα ορυκτά καύσιμα με απόδοση 30% (με τη γεωθερμική ενέργεια η απόδοση είναι ~10%), τότε ισχύει η αναλογία:

1 GWh = 500 τόνοι άνθρακα  
 = 280 τόνοι πετρελαίου  
 = 2100 BBL πετρελαίου

Μια GWh μπορεί να θερμάνει 860.000 τόνους νερού κατά ένα βαθμό Κελσίου.

Σημείωση: πολλοί σύγχρονοι στρόβιλοι λειτουργούν με απόδοση 40%.

Επίσης, οι μονάδες παραγωγής θερμικής ή ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζονται σε kW ή MW (θέτοντας το δείκτη t ή e, αντίστοιχα) από την ονομαστική τους ισχύ. Η ενέργεια που θα παραχθεί τελικά εξαρτάται από το συντελεστή διαθεσιμότητας (availability factor, το ποσοστό δηλαδή του χρόνου που η μονάδα είναι διαθέσιμη να παραγάγει ενέργεια) και από τον συντελεστή φορτίου (capacity factor, ο λόγος της παραγόμενης ενέργειας ως προς τη μέγιστη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από τη μονάδα), ο οποίος εξαρτάται και από τη ζήτηση της αγοράς. Μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος MWe επαρκεί για περίπου 2000 άτομα στην Ελλάδα.



Σχήμα 1.1. Η ενεργειακή κλίμακα σε BTU.

## 1.5. Θερμογόνος Δύναμη Καυσίμων

Ως θερμογόνος αξία ή θερμογόνος δύναμη (heating value) ενός καυσίμου θεωρείται το ποσό της χημικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένο σε ένα καύσιμο. Η θερμογόνος αξία εκφράζεται σε MJ/kg, MJ/L, BTU/lb, BTU/gallon κτλ. Συνήθως διαχωρίζεται σε ανώτερη (higher heating value) και σε κατώτερη θερμογόνος αξία (lower heating value). Η πρώτη τιμή αντιστοιχεί στην καύση δείγματος καυσίμου σε περιβάλλον οξυγόνου και μέτρηση του ποσού της θερμότητας που μεταφέρεται σε γνωστή ποσότητα νερού. Το ποσό της θερμότητας περιλαμβάνει και την λανθάνουσα θερμότητα του συμπυκνωμένου ατμού. Για τη μέτρηση της κατώτερης θερμογόνου αξίας δεν λαμβάνεται υπόψη η λανθάνουσα θερμότητα του συμπυκνωμένου ατμού, γιατί στην πράξη η θερμότητα αυτή δεν είναι διαθέσιμη. Η ανώτερη και η κατώτερη θερμογόνος αξία διαφέρουν περίπου κατά 10%. Στην Ευρώπη χρησιμοποιείται η κατώτερη θερμογόνος αξία και στις ΗΠΑ η ανώτερη.

*Πίνακας 1.1. Τυπικές τιμές θερμογόνου αξίας ορυκτών καυσίμων και βιοκαυσίμων.*

<b>Στερεά καύσιμα</b>	<b>Καθαρή θερμογόνος αξία (MJ/kg)</b>
<b>Βιομάζα</b>	
Ξυλεία (υγρή, πρόσφατη κοπή)	10,9
Ξυλεία (ξήρανση στο αέρα, υγρές περιοχές)	15,5
Ξυλεία (ξήρανση στο αέρα, ξηρές περιοχές)	16,6
Ξυλεία (ξήρανση σε φούρνο)	20,0
Ξυλάνθρακας	29,0
Κατάλοιπα αποχύμωσης ζαχαροκάλαμου (υγρό)	8,2
Κατάλοιπα αποχύμωσης ζαχαροκάλαμου -bagasse (ξήρανση στο αέρα)	16,2
Φλούδες καφέ	16,0
Φλούδες ρυζιού (αποξηραμένες)	14,4
Άχυρα σιταριού	15,2
Κοτσάνια καλαμποκιού	14,7
Κώνοι καλαμποκιού	15,4
Κοτσάνια βαμβακιού	16,4
Κελύφη ινδικής καρύδας	9,8
Φλούδες ινδικής καρύδας	17,9
Αποξηραμένη μάζα κοπριάς	12,0
<b>Ορυκτά καύσιμα</b>	
Ανθρακίτης	31,4
Πισσούχος άνθρακας	29,3
Λιγνίτης	11,3
Τύρφη	14,6
Κοκ (κάρβουνο)	28,5

Υγρά καύσιμα	Καθαρή θερμογόνος αξία	
	(MJ/kg)	MJ/liter
<b>Ορυκτά καύσιμα</b>		
Ακατέργαστο πετρέλαιο	41,9	36,7
LPG (Υγροποιημένο αέρια πετρελαίου)	45,6	24,6
Προπάνιο	45,7	23,3
Βουτάνιο	45,3	26,3
Βενζίνη	43,9	32,6
Κηροζίνη	43,2	35,0
Καύσιμα αεροπλοΐας	43,1	35,4
Πετρέλαιο θέρμανσης	43,0	35,7
Πετρέλαιο Ντίζελ	42,8	36,0
Υγροποιημένο φυσικό αέριο	52,8	22,2
<b>Βιοκαύσιμα</b>		
Αιθανόλη	27,6	21,9
Μεθανόλη	20,9	16,8

Αέρια	Καθαρή θερμογόνος αξία (MJ/m <sup>3</sup> )
<b>Ορυκτά καύσιμα</b>	
Φυσικό αέριο	34,8
Μεθάνιο	33,5
Αιθάνιο	59,5
Προπάνιο (LPG)	85,8
Βουτάνιο (LPG)	111,8
<b>Αέρια από βιομάζα</b>	
Καύσιμο αέριο	5,9
Βιοαέριο	22,5