



ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ



026000146013

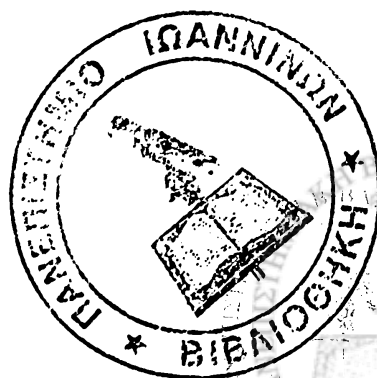


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Γ. Παντής - Ι. Πνευματικός

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2007



© ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
UNIVERSITY OF IOANNINA

ISBN 960-233-174-7

- Το δικαίωμα της έκδοσης του παρόντος βιβλίου ανήκει στο Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων
- Η δημοσίευση φωτογραφιών, η μερική ή ολική ανατύπωση, καθώς και η λήψη φωτοαντιγράφων από το βιβλίο απαγορεύεται χωρίς την έγγραφη άδεια του Γραφείου Δημοσιευμάτων του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Σχεδίαση - Ηλεκτρονική επεξεργασία: Γ. Παντής – Ι. Πνευματικός
Εκτύπωση: Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο Ιωαννίνων



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την πρόοδο της οικονομίας και την αύξηση του βιοτικού επιπέδου, η ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται ραγδαία. Η παραγωγή της ενέργειας που προέρχεται από τις συμβατικές πηγές (πετρέλαιο, βενζίνη, άνθρακας) προβλέπεται ότι σύντομα θα εξαντληθεί, ενώ οι πηγές αυτές είναι υπεύθυνες για μια σειρά από περιβαλλοντικά προβλήματα (φαινόμενο του θερμοκηπίου, όξινη βροχή, κ.α.). Αντίθετα οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες γιατί ανανεώνονται μέσω του κύκλου της φύσης.

Η ολοένα αυξανόμενη σημασία των ΑΠΕ την τελευταία εικοσαετία αποκάλυψε και την ανάγκη συγγραφής διδακτικών συγγραμμάτων για τις πηγές ενέργειας.

Πιστεύουμε ότι η επιτυχής σύνθεση των θετικών στοιχείων των παλαιότερων εκδόσεων για τις ΑΠΕ και άλλων συγγραμμάτων με νεώτερα θέματα και διδακτικά χαρακτηριστικά, επιβάλλουν την έκδοση ενός νέου συγγραμματος.

Η παρούσα έκδοση άρχισε ως μια συνεργασία με τον συνάδελφο κ. Ι. Πνευματικό με σκοπό τη βελτίωση και την συμπλήρωση της Δ' Έκδοσης του βιβλίου «Πηγές Ενέργειας» έχοντας ύλη και δικές του σημειώσεις.

Κατά τη διάρκεια των εργασιών μου έγινε αντιληπτό ότι λόγω ανειλημμένων υποχρεώσεών μου, μπορούσα να διαθέσω μόνο περιορισμένο χρόνο και έτσι μόνο μικρές αλλαγές θα μπορούσαμε να κάνουμε στην τελευταία έκδοση.

Έχοντας όμως εντυπωσιαστεί από την πληρότητα και την καλή κατανόηση των σημειώσεων του συναδέλφου Ι. Πνευματικού, απόρροια της πολυετούς διδασκαλίας του μαθήματος, κατάφερα να τον πείσω να αναλάβει αυτός την πρωτοβουλία της συνεργασίας για μια νέα έκδοση, κρατώντας τα στοιχεία που ήταν δυνατά στις προηγούμενες εκδόσεις, απόρροια επίσης μιας εικοσιπεντάχρονης διδασκαλίας. Έτσι προέκυψε το παρόν κείμενο. Όπως και τα προηγούμενα προορίζεται για προπτυχιακό μάθημα. Θα μπορούσε όμως να χρησιμοποιηθεί και ως εισαγωγικό μάθημα σε μεταπτυχιακό πρόγραμμα.

Προέκυψαν δύο γνωρίσματα που διακρίνουν την παρούσα έκδοση. Το πρώτο αφορά την έμφαση στο εύρος της ύλης. Η παρουσίαση μιας μεγάλης ευρύτητας επιτρέπει στον διδάσκοντα να επιλέγει την ύλη έτσι ώστε να μπορεί να δίνει στους φοιτητές την πλατύτερη δυνατή εισαγωγή στο μάθημα των Πηγών Ενέργειας σε ένα εξάμηνο. Το δεύτερο αφορά την



έμφαση στις κατασκευές και στα παραδείγματα. Τα επιλέξαμε με μεγάλη προσοχή από τη σύγχρονη ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία, ώστε όχι μόνο να συμβάλλουν στην κατανόηση του μαθήματος αλλά και να χρησιμεύουν και ως παραδείγματα για κατασκευές.

Για την καλύτερη κατανόηση του μαθήματος, εμπλουτίσαμε κάθε κεφάλαιο με λυμένες ασκήσεις και παραθέσαμε και καινούργια προβλήματα στο τέλος κάθε κεφαλαίου για αυτόν που θα ήθελε να ασχοληθεί περισσότερο με το μάθημα.

Θέλουμε να ευχαριστήσουμε κάθε συνάδελφο, φοιτητή, ή άλλον που με την εποικοδομητική κριτική του συνέβαλλε στην καλυτέρευση του συγγράμματος. Ιδιαίτερα όμως θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον φίλο και συνάδελφο κ. Γ. Θρουμουλόπουλο, του οποίου η συμβολή ήταν καθοριστική σε όλες τις προηγούμενες εκδόσεις. Πολλές από τις ασκήσεις και τα προβλήματα προήλθαν από την δική του πολύχρονη διδασκαλία του μαθήματος και τα κρατήσαμε τα ίδια. Επίσης θέλουμε να τον ευχαριστήσουμε και για τις καίριες παρατηρήσεις και διορθώσεις του και τον σχολαστικό έλεγχο του κειμένου.

Γ. Παντής – Ι. Πνευματικός
Ιωάννινα, Σεπτέμβριος 2006



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΕΛ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

9

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ

- 1.1 Γενικά
- 1.2 Ενεργειακές ανάγκες
- 1.3 Αποθέματα μη πυρηνικών καυσίμων
- 1.4 Αποθέματα πυρηνικών καυσίμων
- 1.5 Ενεργειακή μετατροπή
- 1.6 Ενεργειακές μορφές και μονάδες μέτρησης
- 1.7 Ασκήσεις

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

27

ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

- 2.1 Εισαγωγή
- 2.2 Ηλιακή ακτινοβολία
- 2.3 Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας
- 2.4 Ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια
- 2.5 Ηλιοφάνεια
- 2.6 Όργανα μετρήσεων



- 2.7 Ασκήσεις
- 2.8 Προβλήματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

45

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

- 3.1. Εισαγωγή
- 3.2 Μετατροπή σε θερμότητα
- 3.3 Απόδοση συλλεκτών
- 3.4 Απορρόφηση ακτινοβολίας από τον συλλέκτη
- 3.5 Εφαρμογές
- 3.6 Μετατροπή απ' ευθείας σε ηλεκτρισμό
- 3.7 Ηλιακές λίμνες
- 3.8 Ασκήσεις
- 3.9 Προβλήματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

83

ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

- 4.1 Εισαγωγή
- 4.2 Φωτοσύνθεση
- 4.3 Βιομάζα
- 4.4 Απορρίμματα - Βιομάζα
- 4.5 Γεωθερμία
- 4.6 Υδρογόνο - Κυψέλες καυσίμων
- 4.7 Ασκήσεις
- 4.8 Προβλήματα



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

109

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

- 5.1 Εισαγωγή
- 5.2 Ιστορική ανασκόπηση
- 5.3 Κινητική ενέργεια του ανέμου
- 5.4 Αιολική ενέργεια
- 5.5 Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς του ανέμου - Όριο Betz
- 5.6 Απόδοση αιολικών μηχανών
- 5.7 Τύποι αιολικών μηχανών
- 5.8 Αιολική ενέργεια και Περιβάλλον
- 5.9 Ασκήσεις
- 5.10 Προβλήματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

139

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

- 6.1 Εισαγωγή
- 6.2 Μηχανισμός σχάσης
- 6.3 Προϊόντα σχάσης και ενεργειακό ισοζύγιο
- 6.4 Πυρηνικοί ενεργειακοί σταθμοί σχάσης
- 6.5 Εισαγωγή στην ελεγχόμενη σύντηξη
- 6.6 Συνθήκες για την δημιουργία θερμοπυρηνικής σύντηξης
- 6.7 Μαγνητικός περιορισμός, ισορροπία και σταθερότητα
- 6.8 Εσωτερικός περιορισμός
- 6.9 Θέρμανση και τεχνολογική ανάπτυξη
- 6.10 Πυρηνική ενέργεια και περιβάλλον
- 6.11 Ασκήσεις
- 6.12 Προβλήματα



8 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

171

ΡΥΠΑΝΣΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

187

Τα έργα ΑΠΕ στην Ελλάδα: Υφιστάμενη κατάσταση, Προοπτικές

Γλωσσάρι

Πηγές πληροφόρησης στο διαδίκτυο

Βιβλιογραφία

Ευρετήριο



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ

1.1 Εισαγωγή

Η πετρελαϊκή κρίση την δεκαετία του 1970 αλλά και στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, μας έκανε να συνειδητοποιήσουμε το πρόβλημα της ενέργειας και την σημασία της στην εξέλιξη της κοινωνίας μας. Είναι φανερό ότι αυτή η συνειδητοποίηση έγινε πάρα πολύ αργά αν αναλογιστεί κανείς ότι ο άνθρωπος άρχισε να χρησιμοποιεί την ενέργεια από τα πολύ παλιά χρόνια και συγκεκριμένα από την εποχή που, σύμφωνα με την Ελληνική μυθολογία, ο Προμηθέας έκλεψε τη φωτιά από τους Θεούς.

Σήμερα είναι γενικά παραδεκτό ότι το ύψος της παραγωγής και της κατανάλωσης της ενέργειας είναι συνδεδεμένο με το βιοτικό επίπεδο και την ανάπτυξη της κοινωνίας. Η ενέργεια λοιπόν μπήκε στην ζωή του ανθρώπου σαν αναγκαίο αγαθό και μετατράπηκε με την ανάπτυξη της Τεχνολογίας και της Επιστήμης σε καταναλωτικό αγαθό. Έτσι στις μέρες μας σχεδόν οι περισσότερες από τις διεθνείς τριβές οφείλονται σε προσπάθειες ελέγχου περιοχών που έχουν αρκετές ενεργειακές πηγές.

Μέχρι το 1850 η κύρια πηγή ενέργειας ήταν το ξύλο. Στη συνέχεια μέχρι το 1910 το ξύλο αντικαταστάθηκε από το κάρβουνο. Στο διάστημα 1910-1960 το κάρβουνο παραχώρησε τη θέση του στο πετρέλαιο και στο φυσικό αέριο που φάνηκαν να είναι πιο φτηνά και πιο εύχρηστα. Τις τελευταίες δεκαετίες του προηγούμενου αιώνα λόγω του τετραπλασιασμού της τιμής του πετρελαίου, της συνειδητοποίησης



12 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

της στρατηγικής του σημασίας και της περιορισμένης ποσότητάς του, παρατηρήθηκε επιστροφή προς το κάρβουνο και εντατικοποίηση της έρευνας για άλλες μορφές ενέργειας. Αυτή η μεταστροφή ήταν αναγκαία γιατί οι ενεργειακές ανάγκες αυξάνονταν αρκετά γρήγορα και όλα τα αποθέματα, ιδιαίτερα το πετρέλαιο και το κάρβουνο θα εξαντληθούν στις επόμενες δεκαετίες. Έτσι άρχισε η ανάπτυξη άλλων μορφών ενέργειας όπως η σύντηξη και οι ήπιες μορφές που αντιπροσωπεύουν ποσά ενέργειας τα οποία είναι ικανά να λύσουν τις ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη μας.

Σ' αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε τις ενεργειακές ανάγκες και τα ενεργειακά αποθέματα. Θα φανεί ότι η πυρηνική ενέργεια από σχάση μπορεί να αντιμετωπίσει τις ενεργειακές ανάγκες για εκατονταετίες. Δυστυχώς υπάρχουν πολλά προβλήματα στους πυρηνικούς αντιδραστήρες σχάσης και έτσι η πυρηνική σχάση δεν μπορεί μακροπρόθεσμα να θεωρηθεί σα λύση του ενεργειακού προβλήματος. Η πυρηνική σύντηξη παρουσιάζει ενδιαφέρον. Η πραγμάτωσή της όμως συνεπάγεται τη λύση πολλών δύσκολων προβλημάτων, όπως τον περιορισμό και την ισορροπία του πλάσματος την δημιουργία αρκετά υψηλών θερμοκρασιών και τον έλεγχο των υλικών σ' αυτές τις θερμοκρασίες. Τέλος οι ήπιες μορφές ενέργειας θα μπορούσαν να καλύψουν εξολοκλήρου τις ενεργειακές μας ανάγκες. Όπως θα δούμε όμως υπάρχουν και για αυτές αρκετοί παράγοντες που δρουν περιοριστικά. Τελικά θα δούμε ότι στο εγγύς μέλλον καμιά από αυτές τις μορφές ενέργειας δεν θα μπορέσει να αντιμετωπίσει το ενεργειακό πρόβλημα από μόνη της. Τους λόγους θα τους αναπτύξουμε στα επόμενα κεφάλαια στα οποία θα εξετάσουμε όλες τις μορφές ενέργειας χωριστά.

Επιγραμματικά, για την ιστορική εξέλιξη της ενέργειας μπορούμε να πούμε ότι: Η ενέργεια, στις διάφορες μορφές της, είναι παλιά όσο και το σύμπαν.

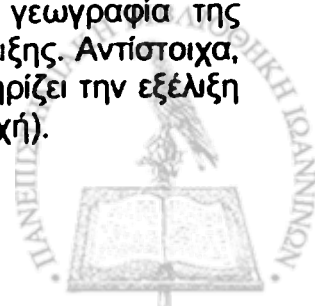
Την διακρίνουμε σαν:

- Μυϊκή δύναμη (χημική ενέργεια)
- Ζώα + εργασία.
- Άνεμος (ανεμόμυλοι-ιστιοφόρα).
- Τα πρώτα ορυκτά καύσιμα ήταν αποθέματα τύρφης, άνθρακα και πετρελαίου.
- Το πετρέλαιο σαν καύσιμο χρησιμοποιήθηκε, για πρώτη φορά (1640), στην Μοντένα της Ιταλίας.
- Η δημιουργία της πρώτης εταιρείας πετρελαίου (Τζον Ροκφέλερ) και η κατασκευή του πρώτου αυτοκίνητου (Χένρι Φόντα) δημιούργησαν το νέο καθεστώς της ενέργειας.

Έτσι στην νέα εποχή, η ενέργεια μετατράπηκε σταδιακά από φυσικό αγαθό σε εμπόρευμα.

Η πυρηνική ενέργεια εξασφαλίζει τεράστιες ποσότητες ενέργειας, αλλά δημιουργεί τεράστια προβλήματα (Χιροσίμα-Ναγκασάκι-Τσερνομπίλ-Κοζλοντούι).

Η γεωγραφική κατανομή της ενέργειας δεν συμπίπτει με τη γεωγραφία της κατανάλωσης. Η ενέργεια είναι κυρίως προϊόν της κοινωνικής εξέλιξης. Αντίστοιχα, η κατανάλωση 2.000, 26.000 και 230.000 kcal την ημέρα, χαρακτηρίζει την εξέλιξη του ανθρώπου (πρωτόγονος, αγροτική περίοδος, βιομηχανική εποχή).



1.2 Ενεργειακές ανάγκες

Μια σύντομη επισκόπηση των ενεργειακών αναγκών και των διαθέσιμων ενεργειακών πηγών θα μας δώσει τον βαθμό κρισιμότητας του ενεργειακού προβλήματος και θα εξηγήσει την σημασία που πρέπει να δώσουμε όχι μόνο στην ανάπτυξη της έρευνας και της τεχνολογίας στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας και τον τομέα των ήπιων μορφών ενέργειας αλλά και στον ίδιο τον τρόπο ζωής μας. Κι αυτό γιατί αν αναλογιστεί κανείς ότι μέχρι το 1970 ένα μεγάλο μέρος της καταναλισκόμενης ενέργειας ήταν άσκοπη σπατάλη θα καταλάβει ότι το πρόβλημα δεν είναι μόνο οι πηγές ενέργειας αλλά κι ο τρόπος κατανάλωσής της. Είναι γεγονός ότι ούτε οι πηγές ούτε οι ανάγκες μπορούν να προσδιοριστούν απόλυτα. Για τον Πρωτόνθρωπο η κυριότερη ενεργειακή ανάγκη ήταν η τροφή. Στο σημερινό άνθρωπο υπολογίζεται ότι αυτή η ανάγκη κατά μέσο όρο είναι περίπου 10^7 J/d (Joules/day) που αντιστοιχεί σε μια πηγή ισχύος των 115 W (Watt). Από αυτή την ενέργεια ένα μέρος (~10-15%) διατίθεται σε μυϊκή ενέργεια ενώ το υπόλοιπο αποβάλλεται στο περιβάλλον υπό μορφή θερμότητας. Αν παρέμενε ο άνθρωπος σ' αυτή την ανάγκη και μόνο δεν θα είχαμε προβλήματα σήμερα. Στην εξέλιξη του όμως, ο άνθρωπος πέρασε από ένα ανάλογο στάδιο εξέλιξης των ενεργειακών του αναγκών όπως και των πηγών από τις οποίες κάλυπτε αυτές τις ανάγκες. Για παράδειγμα, η χρήση της φωτιάς, η χρησιμοποίηση ζώων στην γεωργία και τις μεταφορές, η κατασκευή ανεμόμυλων και νερόμυλων, που αργότερα αντικαταστάθηκαν βαθμιαία από το κάρβουνο, το πετρέλαιο και άλλα. Η κατανάλωση ενέργειας από τον άνθρωπο κατά την διάρκεια της εξέλιξής του δίνεται στον Πίνακα 1.1. Η προβολή των ενεργειακών αναγκών του στο μέλλον βασιζόμενη στην αύξηση του πληθυσμού και στην αύξηση του κατά κεφαλήν εισοδήματος δίνεται στο Σχήμα 1.1. Σαν μονάδα μέτρησης χρησιμοποιούμε το 1Q (~1.021 Joules) το οποίο θα ορίσουμε με ακρίβεια παρακάτω. Είναι προφανές ότι η καταναλισκόμενη ενέργεια αυξάνεται με ένα ρυθμό 3 έως 5% τον χρόνο έτσι που αν συνεχιστεί, η παρούσα κατανάλωση, θα χρειαζόμαστε τεράστια ποσά ενέργειας τις επόμενες εκατονταετίες. Ιδιαίτερα ανησυχητικός είναι ο ρυθμός αύξησης τα τελευταία χρόνια. Συγκεκριμένα, κατά την διάρκεια της εικοσιπενταετίας 1925-1950 η μέση χρονική αύξηση κατανάλωσης ήταν γύρω στα 2,2%. Στο διάστημα 1956-1966 ανέβηκε γύρω στα 5,5% και στο διάστημα 1966-1976 έγινε 7,4%.

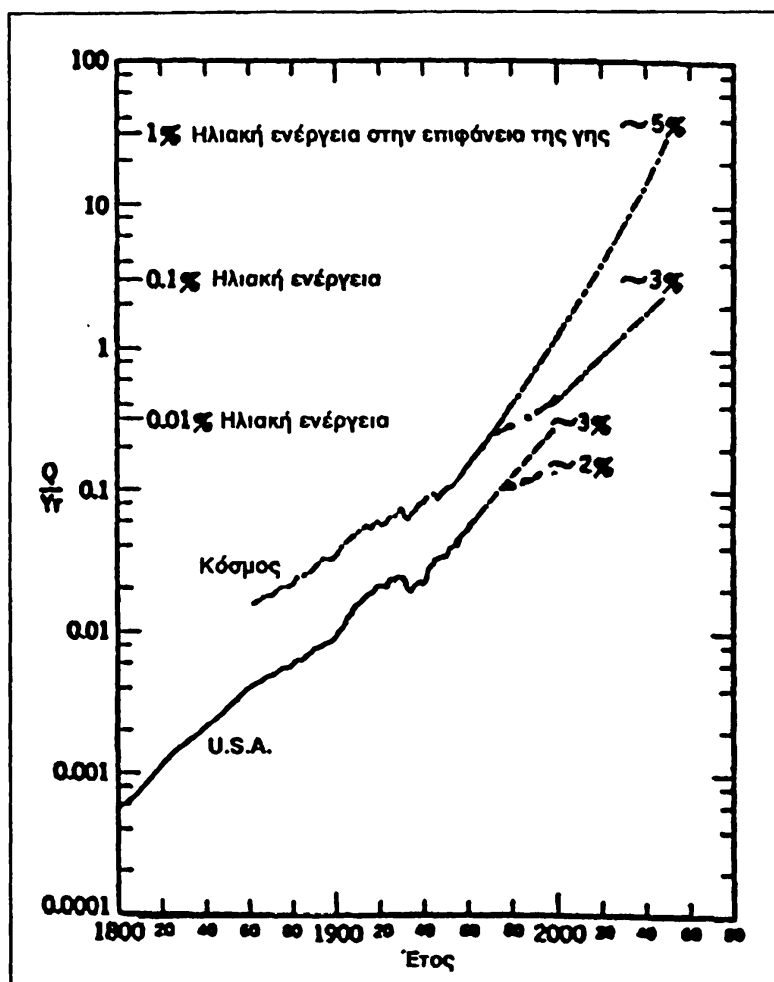
Πίνακας 1.1: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας.

M.X. 1-1850	0,3 - 0,5	Q/cent
M.X. 1850-1950	4	---
M.X. 1950-2050	90	---
Χρονική αύξηση 1897-1950	3%	---
--- 1950-1980	6,5%	---
Αύξηση μελλοντική	4%	---



14 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Το πρόβλημα δεν εντοπίζεται μόνο στο γεγονός ότι δεν θα υπάρχουν πηγές να καλύψουν τις ανάγκες, αλλά εξίσου σοβαρό είναι το γεγονός ότι δεν μπορεί να αυξάνεται η ενέργεια συνεχώς χωρίς να δημιουργήσει κλιματολογικά προβλήματα. Στην πραγματικότητα υπάρχει ένα ανώτατο όριο ενέργειας που μπορούμε να καταναλώσουμε στον πλανήτη μας χωρίς να αλλάξουμε τις κλιματολογικές του συνθήκες.



Σχήμα 1.1: Η αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας σαν συνάρτηση του χρόνου.

Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται (και επαναακτινοβολείται) από τη γη είναι περίπου 4 Q/day ή 1.460 Q/year. Η επιπρόσθετη αύξηση αυτού του ποσού δεν πρέπει να ξεπερνά το 1% δηλαδή το 15 Q/year εάν δεν θέλουμε να επιφέρουμε σοβαρές κλιματολογικές αλλαγές. Με μια μέση αύξηση της κατανάλωσης κατά 4% το χρόνο θα ξεπεράσουμε αυτό το ποσό μετά από 100 χρόνια.

Συμπέρασμα

- Η κυριότερη ενεργειακή ανάγκη είναι η τροφή: 10^7 Joules την ημέρα.
- Μεγάλα ποσά ενέργειας ξοδεύονται σε: Μεταφορές - Βιομηχανία - Οικιακές δραστηριότητες.
- Σήμερα κάθε κάτοικος των βιομηχανικά ανεπτυγμένων χωρών χρειάζεται 150-300 GJ το χρόνο (το 1/3 σε ηλεκτρική ενέργεια).
- Η χρήσιμη ενέργεια υπολογίζεται στο 40% περίπου της χρησιμοποιούμενης ενέργειας (Εξοικονόμηση ενέργειας- ΕΕ, Ορθολογική χρήση ενέργειας- ΟΧΕ).
- Το 77% της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας καταναλώνεται από το 28% του πληθυσμού των αναπτυγμένων βιομηχανικά περιοχών.



1.3 Αποθέματα μη πυρηνικών καυσίμων

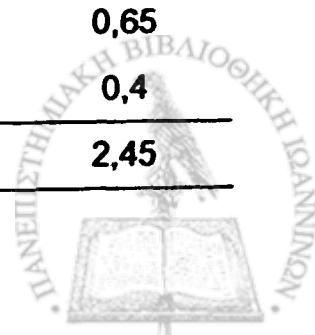
Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται τα αποθέματα των μη πυρηνικών καυσίμων. Οι αριθμοί που αναφέρονται για κάθε πηγή δεν είναι απόλυτοι αλλά μεταβάλλονται συνεχώς λόγω της εντατικοποίησης της έρευνας, της ανάπτυξης της τεχνολογίας και της εξερεύνησης νέων κοιτασμάτων. Όσον αφορά τα υγρά και τα αέρια καύσιμα οι ποσότητές των είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις ενεργειακές ανάγκες. Ειδικά για το πετρέλαιο υπολογίζεται ότι αν συνεχιστεί η κατανάλωσή του με τον ίδιο ρυθμό που καταναλώνεται σήμερα θα εξαντληθεί στα επόμενα 50 χρόνια. Με μια αύξηση των 4%, τα συμβατικά καύσιμα θα εξαντληθούν στα επόμενα 100 χρόνια.

Υπάρχει ένα ιστορικό παράδειγμα ολοκληρωτικής καταστροφής μιας πρωτογενούς ενέργειας. Στο διάστημα μετά την Ελληνική και Ρωμαϊκή αυτοκρατορία πολλά δάση της Μεσογειακής Ευρώπης και της Βορείου Αφρικής καταστράφηκαν. Χρησιμοποιήθηκαν απερίσκεπτα σαν καύσιμα και έτσι μεγάλες περιοχές μετατράπηκαν σε ερήμους. Ένα άλλο επίσης σοβαρό στοιχείο αναφορικά με τα συμβατικά καύσιμα είναι το ότι αντιπροσωπεύουν σχεδόν αποκλειστικά τις βιομηχανικές πρώτες ύλες και επομένως η χρησιμοποίησή τους σαν καύσιμα θα δημιουργήσει και προβλήματα έλλειψης βιομηχανικών υλών.

Στον Πίνακα 1.2 δεν αναφέρουμε την ηλιακή ενέργεια, παρότι τα συμβατικά καύσιμα και η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι έμμεσες μορφές ηλιακής ενέργειας. Σαν ηλιακή ενέργεια θα αναφέρουμε αυτήν που δέχεται η γη από τον ήλιο από ακτινοβολία και ισοδυναμεί με μια πηγή ισχύος γύρω στα $1,7 \times 10^{14}$ kW. Είναι φανερό ότι αν μπορούσαμε να εκμεταλλευτούμε έστω και το 1% αυτής της ποσότητας θα είχαμε λύσει το πρόβλημα των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη μας.

Πίνακας 1.2: Παγκόσμιες μη πυρηνικές πηγές ενέργειας.

	Συμβατικά καύσιμα (Q)		Υδροηλεκτρικά (10^{13} kWh/year)		
	Κάρβουνο	Πετρέλαιο	Αέριο	Δυν. Ενέργεια	Ηλ. Ενέργεια
Αφρική	0,42	0,58	0,4	1,56	0,5
Ευρώπη	7,09	0,416	0,8	1,4	0,45
Β. Αμερική	5,04	0,30	0,38	1,25	0,4
Αυστραλία	0,66	0,01	0,03	0,156	0,05
Ασία	2,62	2,42	0,45	2	0,65
Ν. Αμερική	0,0075	0,37	0,08	1,245	0,4
Παγκόσμια	15,9	4,1	1,95	7,61	2,45



Στην πραγματικότητα όμως αυτό είναι αδύνατο γιατί υπάρχουν τεχνολογικά, οικονομικά και άλλου είδους προβλήματα που δρουν περιοριστικά στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Τα κυριότερα από αυτά τα προβλήματα είναι: α) Η μικρή πυκνότητα, (η μέγιστη μεσημεριανή ακτινοβολία είναι περίπου $1,3 \text{ kW/m}^2$). β) Η ηλιακή ενέργεια είναι διακοπτόμενη (ημέρα-νύχτα-συνεφίες). γ) απορροφάται σε σημαντικό ποσό από την ατμόσφαιρα. δ) παρουσιάζει τοπικότητα και ε) η μετατροπή της σε χρήσιμη ενέργεια γίνεται με μικρό συντελεστή απόδοσης.

Ειδικές λεπτομέρειες θα δώσουμε στο Κεφάλαιο 2. Εδώ θα συνοψίσουμε μερικούς τυπικούς αριθμούς. Η μέση ετήσια ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο πάνω στην επιφάνεια της γης κυμαίνεται από 100 μέχρι 300 W/m^2 (Η μέση τιμή ορίζεται στο εικοσιτετράωρο). Η ηλιακή σταθερά, δηλαδή η ηλιακή ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνο στο ανώτατο όριο της ατμόσφαιρας είναι 1.368 W/m^2 . Η τιμή αυτή υπόκειται σε διακυμάνσεις ($\sim 3,5\%$) λόγω του ελλειπτικού σχήματος της τροχιάς της γης, και λόγω ατμοσφαιρικών διαταραχών και ηλιακών κηλίδων ($\sim 1,5\%$). Η ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι περίπου κατά 23% μικρότερη. Για παράδειγμα στο Montpellier (44° Βόρειο πλάτος) σε ύψος 40 m από τη θάλασσα μετρήθηκε σε 1.053 W/m^2 .

Η ηλιακή ενέργεια δημιουργεί και άλλες έμμεσες πηγές ενέργειας. Οι κυριότερες από αυτές είναι η ενέργεια που προέρχεται από τη φωτοσύνθεση και η αιολική ενέργεια που θα δούμε σε ξεχωριστά κεφάλαια. Επίσης τα θαλάσσια ρεύματα στους ωκεανούς και στην επιφάνεια των θαλασσών που ξέχωρα του ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν απ' ευθείας συμβάλλουν και αυτά στην δημιουργία αιολικής και υδροηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικά για τους ωκεανούς υπάρχει καλή δυνατότητα χρησιμοποίησης της ενέργειας που εμφανίζεται σε ορισμένα σημεία λόγω των μεγάλων διαφορών θερμοκρασίας από τα ανώτερα στρώματα ($\sim 20^\circ \text{C}$) στα κατώτερα στρώματα (4°C). Η διαφορά αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κίνηση καταλλήλων στροβίλων και σε αρκετά μέρη του κόσμου έχει βρει πρακτική και οικονομική εφαρμογή. Τέλος μια άλλη μορφή ενέργειας είναι η γεωθερμία που άρχισε να χρησιμοποιείται εντατικά τα τελευταία χρόνια και βέβαια η κάθε λογής βιομάζα (απορρίμματα κ.λπ.).

1.4 Αποθέματα πυρηνικών καυσίμων

Ιδιαίτερα ανησυχητική είναι και η εξέλιξη της πυρηνικής ενέργειας. Η ανάπτυξη της ενεργειακής αυτής μορφής, που αρχικά είχε αρχίσει με αρκετά αισιόδοξες προβλέψεις, αντιμετωπίζει σήμερα αρκετά σοβαρά προβλήματα. Υπάρχουν δύο διαμετρικά αντίθετες διαδικασίες που απελευθερώνουν πυρηνική ενέργεια. Η σχάση και η σύντηξη. Στην σχάση, ένας βαρύς πυρήνας με την ενσωμάτωση ενός νετρονίου διασπάται σε περισσότερους ελαφρότερους πυρήνες. Κατά την αντίδραση απελευθερώνεται ενέργεια και άλλα νετρόνια που με την σειρά τους προκαλούν νέες διασπάσεις κι έτσι συνεχίζεται μια αλυσιδωτή αντίδραση. Στην σύντηξη δύο ελαφροί πυρήνες ενώνονται κάτω από ορισμένες συνθήκες και απελευθερώνουν ενέργεια. Και στις δύο περιπτώσεις η ενέργεια λέγεται Πυρηνική.



18 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στον Πίνακα 1.3 δίνεται το χρονοδιάγραμμα συμμετοχής της πυρηνικής ενέργειας σε διάφορες χώρες. Στο Κεφάλαιο 6 θα εξετάσουμε τις βασικές αρχές που διέπουν αυτές τις αντιδράσεις τον τρόπο παραγωγής ενέργειας και τα προβλήματα που αντιμετωπίζει η παραγωγή πυρηνικής ενέργειας. Εδώ θα αναφερθούμε κύρια στα αποθέματα.

Πυρήνες με ενδιάμεσους μαζικούς αριθμούς δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ούτε για σχάση ούτε για σύντηξη. Από τους πυρήνες που υπάρχουν στην φύση μόνο το ουράνιο 235 (U^{235}) παθαίνει σχάση με την σύλληψη ενός αργού νετρονίου. Έτσι μόνο αυτό το στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί απ' ευθείας στους αντιδραστήρες. Όμως οι πυρήνες Θόριο-232 (Th^{232}) και Ουράνιο-238 (U^{238}) που εμφανίζονται ελεύθερα στη φύση μπορούν να μετασχηματιστούν σε U^{233} και Πλουτώνιο-239 (Pu^{239}) και να χρησιμοποιηθούν και αυτοί στους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Τα στοιχεία Th^{232} και U^{238} ονομάζονται γόνιμα καύσιμα ενώ τα στοιχεία U^{235} , U^{233} και Pu^{239} ονομάζονται σχάσιμα καύσιμα. Το U^{235} υπάρχει σε ποσοστό 0,71% στο φυσικό ουράνιο το οποίο βρίσκεται σε αναλογία $4 \times 10^{-6}\%$ στο φλοιό της γης.

Πίνακας 1.3: Χρονοδιάγραμμα συμμετοχής πυρηνικής ενέργειας.

Χώρες	Έναρξη	Ποσοστό έναρξης (%)	Ποσοστό σήμερα (%)
Η.Π.Α.	1957	0,07	13
Ε.Σ.Σ.Δ.	1957	0,2	20
ΣΟΥΗΔΙΑ	1964	0,08	18
ΓΑΛΛΙΑ	1959	0,25	65
Δ. ΓΕΡΜΑΝΙΑ	1966	0,7	36

Η αντίστοιχη αναλογία του Θορίου είναι $12 \times 10^{-6}\%$. Όπως δείχνουν αυτοί οι αριθμοί, τα αποθέματα των πυρηνικών καυσίμων δεν είναι ανεξάντλητα. Ο χρόνος ζωής τους όμως προβλέπεται να επιμηκυνθεί αρκετά με την λειτουργία των αντιδραστήρων νέας γενιάς, των αναπαραγωγικών, που αναπαράγουν ένα μέρος από το καύσιμο που χρησιμοποιούν οι ίδιοι ή άλλοι αντιδραστήρες.

Υπολογίζεται ότι τα αποθέματα του Ουρανίου με χαμηλό κόστος εξόρυξης ανέρχονται σε 2×10^6 τόνους. Εάν σ' αυτό το ποσό συμπεριλάβουμε και όλα τα γόνιμα υλικά και τα αποθέματα με υψηλότερο κόστος εξόρυξης τότε φτάνουμε στο ποσό των 10^8 τόνων σχάσιμου και γόνιμου υλικού. Από αυτό βρίσκουμε περίπου την ισοδύναμη ενέργεια των 5.000 Q. Αυτό βέβαια δεν είναι αρκετά σημαντικό ποσό όμως με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών μπορούμε να πετύχουμε καλύτερη αξιοποίηση οπότε τα αποθέματα αυτά θα μπορέσουν να διαρκέσουν αρκετές εκατοντάδες χρόνια.



Εκτός του ότι μερικές εκατοντάδες χρόνια είναι ένας μικρός ιστορικός χρόνος, το πρόβλημα των ραδιενεργών καταλοίπων θα γίνει σοβαρό. Με την προβλεπόμενη ανάπτυξη θα παράγονται περίπου 10^{13} Curies/year μακρόβια σχάσιμα παράγωγα που θα αντιπροσωπεύουν έναν σοβαρό κίνδυνο για την ανθρωπότητα.

Όσον αφορά την σύντηξη υπάρχουν τρεις πυρήνες που παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξή της. Το Δευτέριο (D) το Τρίτιο (T) και το Ήλιο-τρία ^3He . Υπολογίζεται ότι οι πρώτοι αντιδραστήρες θα είναι αντιδραστήρες (D-T), λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας της αντίδρασης και της μικρότερης θερμοκρασίας ανάφλεξης του πλάσματος. Η επόμενη γενιά θα είναι (D-D) και η τελευταία για το απώτερο μέλλον (D- ^3He). Το Τρίτιο δεν υπάρχει ελεύθερο στη Φύση. Μεταστοιχειώνεται σε ^3He με ένα μέσο όρο ζωής 12 χρόνια. Το ^3He όπως άλλωστε και το Τρίτιο παράγονται με την ίδια πιθανότητα στην αντίδραση (D-D). Συνεπώς τα αποθέματα για σύντηξη είναι απεριόριστα και σε χαμηλό κόστος. Το Δευτέριο που είναι το βασικό υλικό υπάρχει σε ποσοστό 0,0153% στο θαλάσσιο νερό. Αυτό το ποσό για μια κατανάλωση των 15 Q/year θα ήταν αρκετό να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη μας για 10^9 χρόνια. Όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 6 οι αντιδράσεις σύντηξης δεν παράγουν πολύ επικίνδυνα και μακρόβια ραδιενεργά στοιχεία. Ραδιενέργεια βέβαια θα δημιουργείται στα υλικά που θα περιβάλλουν τον αντιδραστήρα. Υπολογίζεται όμως ότι αυτή θα είναι κατά πολύ μικρότερη από αυτή που παράγεται κατά την σχάση. Εξάλλου η ραδιενέργεια αυτή οφείλεται στα ενεργητικά νετρόνια και επομένως θα υπάρχει μόνο στις αρχικές γενιές αντιδραστήρων σύντηξης.

Στην σύντηξη λοιπόν τα προβλήματα είναι κύρια τεχνολογικά. Οι θερμοκρασίες που χρειαζόμαστε είναι 10^8 με 10^9 K. Σ' αυτές τις θερμοκρασίες όλα τα άτομα είναι ιονισμένα και βρίσκονται στην κατάσταση πλάσματος. Το πλάσμα αυτό θα πρέπει να περιοριστεί σε μεγάλες πυκνότητες και να συγκρατηθεί αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να γίνει η πυρηνική αντίδραση. Αυτό είναι ένα σημαντικό πρόβλημα για την σύντηξη και έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικοί μέθοδοι επίλυσής του. Ο μαγνητικός περιορισμός που στηρίζεται σε εξωτερικά μαγνητικά πεδία και ο εσωτερικός περιορισμός που στηρίζεται σε ακτίνες Laser. Όλα αυτά θα τα εξετάσουμε στο Κεφάλαιο 6.

1.5 Ενεργειακή μετατροπή

Με τα σημερινά τεχνολογικά και οικονομικά δεδομένα οι ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου είναι δυνατό να καλυφθούν από τις ακόλουθες πηγές:

- Τα συμβατικά ή απολιθωμένα καύσιμα, δηλαδή τους ορυκτούς άνθρακες ή γαιάνθρακες (τύρφη, λιγνίτης, λιθάνθρακας, ανθρακίτης) και τους ορυκτούς υδρογονάνθρακες (πετρέλαιο, φυσικό αέριο).
- Τα πυρηνικά καύσιμα (ορυκτά μεταλλεύματα του ουρανίου και θορίου).
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ, ηλιακή, αιολική, υδραυλική, γεωθερμική, βιομάζα, ενέργεια των κυμάτων, παλίρροιες, υδρογόνο).
- Η ενέργεια μπορεί να μετατρέπεται από τη μια μορφή στην άλλη.



20 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

- Εσωτερική ενέργεια (U) = Κινητική + δυναμική ενέργεια των σωματιδίων.
- Κατά την διάρκεια μιας μεταβολής της κατάστασης ενός συστήματος η εσωτερική ενέργεια μεταβάλλεται από την αρχική U_1 σε μια τελική U_2 , $\Delta U = U_2 - U_1$.
- $\Delta Q = \Delta U + \Delta W$ (Α΄ Θερμοδυναμικό αξίωμα).
- Το αξίωμα αυτό είναι μία έκφραση της διατήρησης της ενέργειας (συμπεριλαμβανομένης της εσωτερικής ενέργειας, της θερμότητας και του έργου) σε συνδυασμό με το γεγονός, ότι σε οποιαδήποτε συγκεκριμένη κατάσταση ένα σύστημα έχει μια ορισμένη ποσότητα εσωτερικής ενέργειας.
- Κατά τις μετατροπές αυτές η ενέργεια δεν μπορεί να χαθεί, και ακόμα λιγότερο να κερδηθεί.
- Μια θερμική μηχανή μετατρέπει μέρος της θερμότητας σε μηχανικό έργο (Σχήμα 1.2). Σημασία για την αξιολόγηση ενός συστήματος παραγωγής ενέργειας ή μετατροπή της από μια μορφή σε άλλη μορφή έχει ο συντελεστής θερμικής απόδοσης (η).

Για την μετατροπή της θερμότητας (Q) για παράδειγμα σε μηχανικό έργο (W) έχουμε την απόδοση

$$\eta = \frac{W}{Q} \quad (1)$$

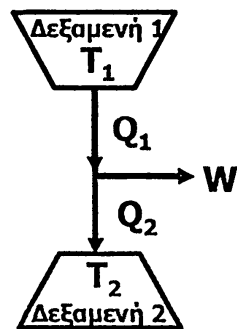
Αν η θερμότητα Q αντιστοιχηθεί στην διαφορά θερμοκρασίας $T_1 - T_2$ ($T_1 > T_2$) τότε μπορούμε να ορίσουμε την μεταβολή της εντροπίας (S) που προκαλείται σ' ένα σύστημα κατά την μετάβαση από την κατάσταση (1) στην κατάσταση (2) με το ολοκλήρωμα

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{T} = S_2 - S_1 \quad (2)$$

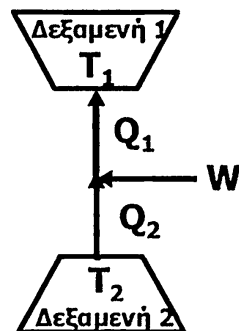
όπου η μεταβολή $1 \rightarrow 2$ είναι πάντα αντιστρεπτή ($2 \rightarrow 1$) με τις ίδιες τελικές και αρχικές καταστάσεις. Κι αυτό γιατί η εντροπία είναι μια θερμοδυναμική συνάρτηση της κατάστασης του συστήματος και δεν εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο έφτασε το σύστημα σ' αυτή την κατάσταση. Στο μάθημα αυτό θα συναντήσουμε την "χρησιμοποιήσιμη ενέργεια" ενός φυσικού συστήματος όπως ορίστηκε από τον Kelvin. Σε μια θερμική μηχανή, μόνο μέρος της θερμότητας Q_1 που αφαιρείται από τη θερμή δεξαμενή θερμοκρασίας T_1 κατά τη διάρκεια ενός κύκλου μετατρέπεται σε μηχανικό έργο W , ενώ η υπόλοιπη θερμότητα Q_2 αποδίδεται αναγκαστικά στην κρύα δεξαμενή θερμοκρασίας T_2 (Σχήμα 1.3)

$$W = Q_1 - Q_2$$





Σχήμα 1.2: Θερμική μηχανή.



Σχήμα 1.3: Ψυκτική μηχανή.

Είναι δηλαδή αδύνατο να κατασκευάσουμε μηχανή, η οποία θα δουλεύει κυκλικά και δεν θα έχει αποτέλεσμα άλλο, από το να παράγει έργο και να παίρνει θερμότητα από μια δεξαμενή θερμότητας. Ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής θα είναι

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (3)$$

και ο συντελεστής απωλειών

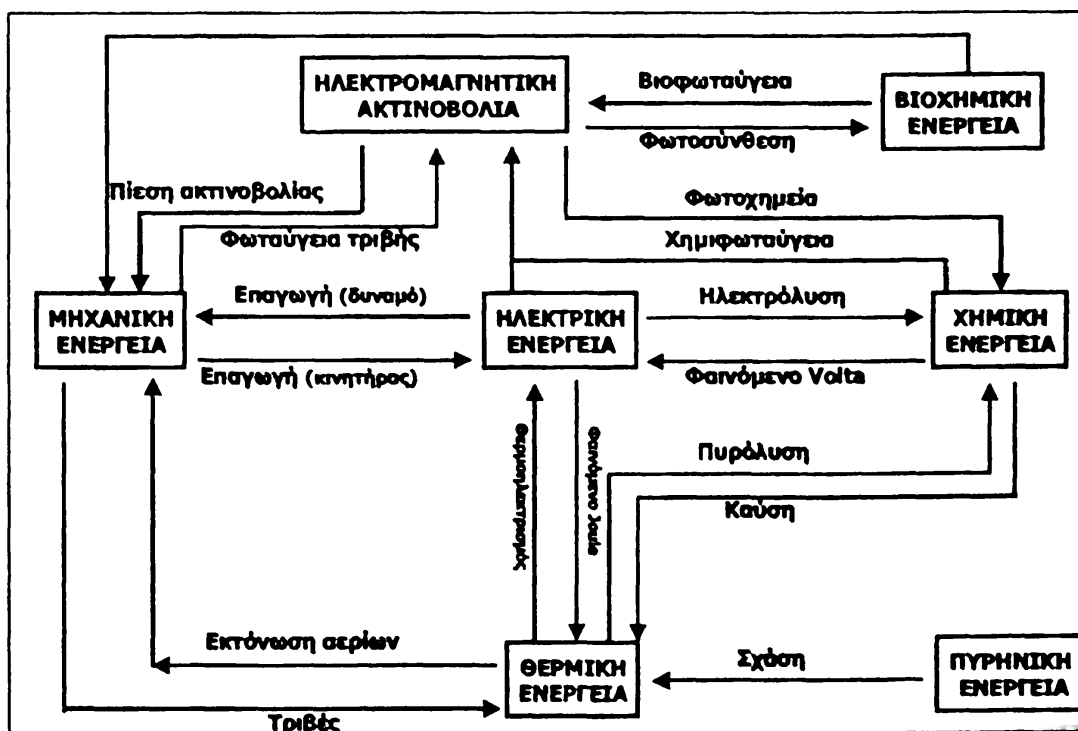
$$\eta_L = 1 - \eta = \frac{T_2}{T_1} \quad (4)$$



1.6 Ενεργειακές μορφές και μονάδες μέτρησης

Η ενέργεια εμφανίζεται σε διάφορες μορφές. Οι κυριότερες από αυτές είναι η μηχανική, η θερμική, η ηλεκτρική, η ηλεκτρομαγνητική, η χημική και η πυρηνική. Με κατάλληλο τρόπο μια μορφή ενέργειας μπορεί να μετασχηματιστεί σε μια άλλη (Σχήμα 1.4). Για παράδειγμα σ' έναν πυρηνικό αντιδραστήρα, η πυρηνική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική με την σχάση του πυρήνα, σε θερμική με την επιβράδυνση και σε ηλεκτρική με τις τουρμπίνες. Στο μάθημα αυτό θα διακρίνουμε δύο μορφές ενέργειας. Την μεταβιβάσιμη ενέργεια (transitional energy) και την αποθηκευμένη ενέργεια (stored energy). Ένα παράδειγμα μεταβιβάσιμης ενέργειας είναι η ηλεκτρική ακτινοβολία. Αντίθετα ένα παράδειγμα αποθηκευμένης ενέργειας είναι η ενέργεια που έχει ένα παραμορφωμένο ελατήριο. Στην περίπτωση αυτή πρόκειται για δυναμική ενέργεια. Μια αποθηκευμένη κινητική ενέργεια είναι ο σφόνδυλος. Και στις δύο τελευταίες περιπτώσεις οι ενέργειες ανήκουν στην κατηγορία της μηχανικής ενέργειας.

Η μεταβιβάσιμη μορφή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι το ηλεκτρικό ρεύμα. Αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια είναι η ενέργεια ενός φορτισμένου πυκνωτή ή ενός πηνίου. Τόσο η χημική όσο και η πυρηνική ενέργεια υπάρχουν μόνο σαν αποθηκευμένη ενέργεια και απελευθερώνονται ύστερα από κατάλληλες αντιδράσεις. Τέλος η θερμική ενέργεια είναι δυνατόν να αποθηκευτεί σαν λανθάνουσα θερμότητα (latent heat). Επίσης μπορούμε να πούμε ότι η θερμική ενέργεια είναι η βασική μορφή ενέργειας στην οποία καταλήγουν όλες οι άλλες.



Σχήμα 1.4: Ενεργειακές μετατροπές.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 • ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ 23

Για την μέτρηση της ενέργειας χρησιμοποιούνται κύρια το σύστημα MKS (Μήκος, m (meter) Μάζα, Kg (Kilogram), χρόνος s (second) ή το International System of Units (SI Units). Στο σύστημα αυτό έχουμε για την ενέργεια σαν μονάδες μέτρησης το

$$1 \text{ Joule (J)} = 1 \text{ Watt} \cdot \text{second (Ws)} = 1 \text{ Newton} \cdot \text{meter (Nm)}$$
$$1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 10^7 \text{ erg} = 277,8 \times 10^{-9} \text{ kWh (kiloWattthour)}$$

Η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου λέγεται ισχύς και ορίζεται σαν

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$$

Για την ισχύ επίσης χρησιμοποιούμε το

$$1 \text{ hp (horse} \cdot \text{power)} = 745,7 \text{ W}$$

Για την θερμική ενέργεια χρησιμοποιούμε το calorie (cal)

$$1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$$

και το British thermal unit (Btu)

$$1 \text{ Btu} = 1.055,06 \text{ J}$$

Στην πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιούμε το electron-Volt (eV) και τα πολλαπλάσιά του keV και MeV

$$1 \text{ eV} = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Στην Φυσική Πλάσματος αντιστοιχίζουμε την ενέργεια $kT = 1 \text{ eV}$ σε θερμοκρασία T θέτοντας την σταθερά Boltzman $k = 1,38 \times 10^{-16} \text{ erg/}^\circ\text{K}$ ίση με τη μονάδα. Προκύπτει ότι $T = 1,6 \times 10^{-12} / (1,38 \times 10^{-16}) = 11.600 \text{ }^\circ\text{K}$. Δηλαδή αντί να πούμε ότι έχουμε ένα πλάσμα θερμοκρασίας $T = 11.600 \text{ }^\circ\text{K}$ λέμε ότι έχουμε ένα πλάσμα θερμοκρασίας 1 eV .

Άλλες μονάδες με τις οποίες εκφράζονται μεγάλα ποσά ενέργειας είναι το

$$1 \text{ Q} = 10^{18} \text{ Btu}$$

$$1 \text{ toe (tons oil equivalent)} = 4,19 \times 10^{10} \text{ J}$$

$$1 \text{ Boe (Barrels oil equivalent)} = 5,74 \times 10^9 \text{ J}$$

$$1 \text{ tce (tons coal equivalent)} = 2,93 \times 10^{10} \text{ J}$$



24 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.7 Ασκήσεις

1. Η απορρόφηση και επανεκπομπή της ηλιακής ακτινοβολίας που κρατά την θερμοκρασία πάνω στη γη σταθερά, ανέρχεται σε 4 Q/day. Ο άνθρωπος δεν πρέπει να αυξήσει το ποσό αυτό περισσότερο από 1% αν δεν θέλει να διαταράξει τις κλιματολογικές συνθήκες. Με την παρούσα αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 4%, σε πόσα χρόνια θα ξεπεραστεί το ποσό αυτό; (Η παρούσα κατανάλωση ανέρχεται σε 0,34 Q/year).

Λύση

$$4Q/day = 4 \times 365 Q/year = 1.460 Q/year$$

Επιτρεπτό όριο

$$1\% \times 1,460 = 14,6 Q/year = 15 Q/year$$

Αν θα φτάσουμε στο ποσό αυτό μετά από v - χρόνια τότε η κατανάλωση που θα έχουμε θα είναι

$$0,34 + 0,34 \cdot v \cdot \rho + 0,34 [v(v-1)\rho^2/2] + \dots + 0,34\rho^v$$

$$= 0,34 [1 + v\rho + (v(v-1)\rho^2/2) + \dots + \rho^v] =$$

$$= 0,34 (1+\rho) v = 15$$

$$(1+\rho) v = (15/0,34) = 45$$

$$v \ln(1+\rho) = \ln 45$$

$$v = (\ln 45 / \ln(1+\rho)) = (3,8/0,04) = 95 \text{ year}$$

2. Αν η μέση ηλιακή ακτινοβολία είναι $1 \text{ Langley min}^{-1}$ ($1 \text{ Langley} = 1 \text{ cal/cm}^2$). Να βρείτε πόση ενέργεια δέχεται η σκεπή ενός σπιτιού επιφανείας 100 m^2 όταν υπάρχει ηλιοφάνεια 500 min (δηλαδή 8 ώρες). Μετατρέψτε αυτή την ενέργεια (E_i) σε ηλεκτρική (E_{el}) με συντελεστή μετατροπής 10%, σε κάρβουνο, ($1 \text{ kg} = 6 \times 10^3 \text{ kcal}$), σε βενζίνη ($1 \text{ lit} = 10^4 \text{ Kcal}$) και σε καυσόξυλο ($1 \text{ kg} = 3,74 \times 10^3 \text{ Kcal}$ με 50% υγρασία).

Λύση

$$\text{Ηλεκτρικές μονάδες } 1 \text{ kcal} = 1,16 \times 10^{-3} \text{ kWh}$$

$$1 \text{ kWh} = 8,59 \times 10^2 \text{ kcal}$$

$$E_i = 1 \text{ L/min} \times 100 \text{ m}^2 \times 500 \text{ min} = 1 \text{ cal/cm}^2 \text{ min} \times 100 \text{ m}^2 \times 500 \text{ min} = \\ = 1 \text{ cal} \times 100 \times 500 \times 10^4 = 500 \times 10^6 \text{ cal.}$$

$$E_i = 500 \times 10^3 \text{ kcal} = 500 \times 10^3 \times 1,16 \times 10^{-3} \text{ kWh}$$

$$E_i = 580 \text{ kWh}; E_{el} = 580 \times 10\% = 58 \text{ kWh}$$

$$\text{Κάρβουνο: } 500 \times 10^3 \text{ kcal} / 6 \times 10^3 \text{ kcal} = 80 \text{ kg}$$

$$\text{Βενζίνη: } 500 \times 10^3 \text{ kcal} / 10 \times 10^3 \text{ kcal} = 50 \text{ lit}$$

$$\text{Καυσόξυλο: } 500 \times 10^3 \text{ kcal} / 3,74 \times 10^3 \text{ kcal} = 130 \text{ kg}$$



3. Σε έναν αντιδραστήρα σύντηξης δευτέρου-δευτέρου χρησιμοποιείται ο κύκλος κατάλυσης που παράγει ενέργεια 7,2 MeV για κάθε δευτέριο που καίγεται. Πόσα γραμμάρια δευτέρου και πόσα χιλιόγραμμα θαλασσινού νερού την ημέρα χρειάζεται ο αντιδραστήρας για την παραγωγή ισχύος 1 MW.

Λύση

$$1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1\text{MeV} = 1,6 \times 10^{-13} \text{ J}$$

Η ενέργεια που παράγεται από την καύση ενός υδρογόνου είναι
 $E = 7,2 \text{ MeV} \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} = 1,15 \times 10^{-12} \text{ J} = 1,15 \times 10^{-12} \text{ Wsec.}$

Ο αριθμός των υδρογόνων επομένως για την παραγωγή ενέργειας
 $N_D = 1/1,15 \times 10^{-12} = 0,87 \times 10^{12} \text{ D/Wsec}$

Ο αριθμός κατανάλωσης δευτερίων την ημέρα για την παραγωγή 1MW θα είναι επομένως

$$v_D = (10^6 \text{ W}) (0,87 \times 10^{12} \text{ D/Wsec}) (86.400 \text{ sec/day}) =$$

$$v_D = 7,5 \times 10^{22} \text{ D/day.}$$

Επειδή 2g του δευτέρου αντιστοιχούν σε $6,022 \times 10^{23} \text{ D}$ (αριθμός Avogadro) θα έχουμε ότι το βάρος του δευτέρου που καίγεται θα είναι

$$Y_D = \frac{2 \times 7,5 \times 10^{22}}{6,022 \times 10^{23}} = 2,4 \text{ g/day}$$

και το βάρος του θαλασσινού νερού θα είναι αντίστοιχα

$$Y_{H_2O} = \frac{0,24 \times 100}{0,015} = 1.600 \text{ g} = 1,6 \text{ kg}$$

4. Σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα σχάσης, παράγεται ενέργεια $E_f = 200 \text{ MeV}$ για κάθε πυρηνική αντίδραση. Να βρεθεί ο λόγος της παραγωγής ενεργειών πυρηνικής/χημικής για ένα χιλιόγραμμο καυσίμου.

Λύση

Τα 235 g U-235 περιέχουν τον αριθμό ατόμων $N_D = 6,022 \times 10^{23}$ και επομένως και τον ίδιο αριθμό αντιδράσεων.

Η ολική παραγόμενη ενέργεια λοιπόν θα είναι
 $E_f = 200 \text{ (MeV)} \times 6,022 \times 10^{23} = 1,2 \times 10^{26} \text{ MeV}$
 $= 1,2 \times 10^{26} \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J} = 1,9 \times 10^{13} \text{ J}$



26 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Επομένως η παραγόμενη ενέργεια ανά γραμμάριο U-235 θα είναι
 $E_{\text{ug}} = (1,9/235) \times 10^{13} \text{ J/g} = 0,8 \times 10^{-2} \times 10^{13} \text{ J/g}$

Επομένως

$$1\text{kg} \rightarrow \text{Καθαρό} \rightarrow \text{U235} \rightarrow 0,8 \times 10^{14} \text{ J}$$

Αν πάρουμε φυσικό ουράνιο τότε επειδή το U-235 = 0,71% φυσικού ουρανίου
 $1\text{kg- φυσικό Ουράνιο } 0,8 \times 0,71\% \times 10^{14} \text{ J} = 5,6 \times 10^{11} \text{ J}$

$$\text{Αλλά } 1 \text{ kg βενζίνη} = 10^7 \text{ cal} = 4,184 \times 10^7 \text{ J}$$

άρα ο λόγος R πυρηνικής/χημικής ενέργειας θα είναι

$$R = \frac{5,6 \times 10^{11}}{4,14 \times 10^7} = 10^4$$



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η ηλιακή ενέργεια είναι η ενέργεια που προέρχει από τον ήλιο. Είναι η πιο άφθονη και καθαρή πηγή ενέργειας που έχουμε στη φύση. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια των ηλιακών κυττάρων. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να ζεσταθεί το νερό ή να ζεσταθεί ο χώρος. Η ηλιακή ενέργεια είναι μια καθαρή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο άφθονη και καθαρή πηγή ενέργειας που έχουμε στη φύση. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια των ηλιακών κυττάρων. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να ζεσταθεί το νερό ή να ζεσταθεί ο χώρος. Η ηλιακή ενέργεια είναι μια καθαρή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

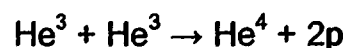
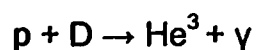
ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1 Εισαγωγή

Η ακτινοβολία που δεχόμαστε από τους αστέρες οφείλεται σε τρεις φυσικές διαδικασίες:

- α) Θερμική ακτινοβολία: Ακτινοβολία που εκπέμπει κάθε σώμα λόγω της θερμοκρασίας του.
- β) Συγχροτρονική ακτινοβολία: Ακτινοβολία λόγω της σχετικιστικής ταχύτητας των ηλεκτρονίων μέσα σε μαγνητικό πεδίο.
- γ) Ακτινοβολία πλάσματος: Ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα ιονισμένο αέριο.

Και οι τρεις αυτές ακτινοβολίες είναι αποτέλεσμα ενός τεράστιου ποσού παραγωγής ενέργειας από πυρηνικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των αστέρων σε αποστάσεις μέχρι $0,25R$ (R = ακτίνα του αστέρα). Στη φάση που βρίσκεται ο ήλιος του δικού μας συστήματος (σε θερμοκρασία $T = 10\sim 40$ keV και πυκνότητα $\rho = 10^5$ kg/m³) η καύση αυτή είναι καύση υδρογόνου (πρωτονίου p) σε ήλιο και περιλαμβάνει τις ακόλουθες αντιδράσεις



Αν προσθέσουμε τις εξισώσεις αυτές τότε θα δούμε ότι το άθροισμα των μαζών του πρώτου μέρους είναι μεγαλύτερο από το άθροισμα των μαζών του δεύτερου μέρους, έτσι κατά την αντίδραση αυτή έχουμε ένα έλλειμμα μάζας περίπου 1% που μετατρέπεται σε ενέργεια με βάση την εξίσωση του Einstein $E = mc^2$.

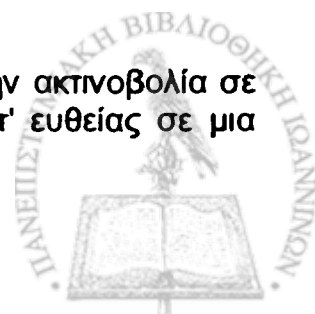
Είναι φανερό ότι με αυτόν τον τρόπο παράγονται τεράστια ποσά ενέργειας. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται ότι ο ήλιος ακτινοβολεί 4×10^{26} Joules/sec δηλαδή ένα ποσό ενέργειας που αντιστοιχεί σε μια απώλεια μάζας 4×10^6 τόνων το δευτερόλεπτο και που θα μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες του πλανήτη μας για εκατομμύρια χρόνια.

Ένα μέρος της ενέργειας αυτής διαδίδεται προς τα έξω και ένα μέρος από αυτό που διαδίδεται προς τα έξω, φτάνει στη γη. Στην ατμόσφαιρα του ήλιου η διάδοση της ενέργειας δεν γίνεται μόνο με ακτινοβολία αλλά και με μεταφορά. Το όριο το έχει καθορίσει ο Schwarzschild από τον οποίο πήρε και το ομώνυμο κριτήριο. Υπολογίζεται ότι σε μικρές αποστάσεις $d < 0,7R$ η διάδοση γίνεται με ακτινοβολία ενώ για αποστάσεις $0,7 - 1,0R$ γίνεται με μεταφορά. Η περιοχή αυτή λέγεται φωτόσφαιρα και αποτελείται από ισχυρά ιονισμένα αέρια χαμηλής πυκνότητας που είναι και η κύρια πηγή της ακτινοβολίας πλάσματος. Την φωτόσφαιρα ακολουθεί η χρωμόσφαιρα που περιέχει αέρια χαμηλότερης πυκνότητας και μεγαλύτερης θερμοκρασίας. Τα τρία αυτά μέρη του ήλιου αποτελούν τις κυριότερες πηγές της ηλιακής ακτινοβολίας. Από αυτές τις πηγές προέρχεται και η ακτινοβολία που φτάνει στη γη και αποτελεί την λεγόμενη ηλιακή ενέργεια. Υπολογίζεται ότι αυτό το ποσό ανέρχεται σε $1,5 \times 10^{18}$ kWh/year από το οποίο 30% περίπου ανακλάται πίσω στο διάστημα. Έτσι το καθαρό ποσό ηλιακής ενέργειας που φτάνει στη γη είναι περίπου 10^{18} kWh/year. Από αυτό $2,9 \times 10^{17}$ kWh/year χρησιμοποιείται για την εξάτμιση νερού (έμμεση υδροηλεκτρική ενέργεια) $2,0 \times 10^{17}$ kWh/year μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του αέρα (αιολική ενέργεια) και $8,0 \times 10^{14}$ kWh/year χρησιμοποιείται στην φωτοσύνθεση. Το υπόλοιπο ποσό των 5×10^{17} kWh/year κρατάει τη θερμοκρασία της γης σταθερά με θέρμανση και επανεκπομπή. Από τα παραπάνω συνάγεται ότι στη γη έρχονται τεράστια ποσά ενέργειας τα οποία θα μπορούσαμε να εκμεταλλευτούμε. Πέρα από την αιολική και την υδροηλεκτρική ενέργεια που είναι και αυτές έμμεσες μορφές ηλιακής ενέργειας αν μπορούσαμε να εκμεταλλευτούμε το 1% αυτής της ενέργειας που προσπίπτει στη γη σε ένα χρόνο θα είχαμε ένα ποσό ενέργειας 100 φορές μεγαλύτερο από τις συνολικές ανάγκες του πλανήτη μας σε ένα χρόνο. Θα ήταν λοιπόν προτιμότερο να αναπτύσσαμε τρόπους εκμετάλλευσης ενός μέρους αυτού του ποσού, παρά να καταναλώνουμε απερίσκεπτα το πετρέλαιο, το αέριο και το κάρβουνο που είναι και μη-ανανεώσιμες πηγές αλλά συγχρόνως και αναντικατάστατες βιομηχανικές πρώτες ύλες.

2.2 Ηλιακή ακτινοβολία

2.2.1 Ηλιακή σταθερά

Για την καλύτερη κατανόηση του μαθήματος θα διαχωρίσουμε την ακτινοβολία σε δύο κατηγορίες: την άμεση I_d δηλαδή αυτή που προσπίπτει απ' ευθείας σε μια



επιφάνεια πάνω στη γη χωρίς να έχει πάθει σκέδαση στην ατμόσφαιρα, και την διάχυτη I_s , που προέρχεται από ηλιακές ακτίνες που έχουν υποστεί σκέδαση Rayleigh ή άλλης μορφής όπως από σκόνη από σύννεφα κ.λπ.

Ο διαχωρισμός είναι αναγκαίος γιατί η άμεση ακτινοβολία μπορεί να συγκεντρωθεί με κάτοπτρα πάνω σε συλλέκτες ενώ η έμμεση δεν συγκεντρώνεται. Έτσι γίνεται πιο εύκολος και πιο ακριβής ο προσδιορισμός της άμεσης και της έμμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα χρόνου. Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στην μονάδα επιφάνεια ενός επίπεδου συλλέκτη που είναι τοποθετημένος στο όριο της ατμόσφαιρας όταν η γη βρίσκεται στη μέση απόστασή της από τον ήλιο λέγεται ηλιακή σταθερά. Είναι προφανές ότι αυτό το ποσό δεν μπορεί να μετρηθεί με απόλυτη ακρίβεια γιατί εξαρτάται από την επίδραση της ατμόσφαιρας, τις αλλαγές (γύρω στα 3,3%) της έντασης του ηλιακού φωτός λόγω της ελλειπτικής τροχιάς της γης κ.α. Οι σημερινές τιμές της σταθεράς αυτής σε συνδυασμό και με μετρήσεις που γίνονται από δορυφόρους είναι 1.368 W/m^2 .

2.2.2 Ηλιακό φάσμα

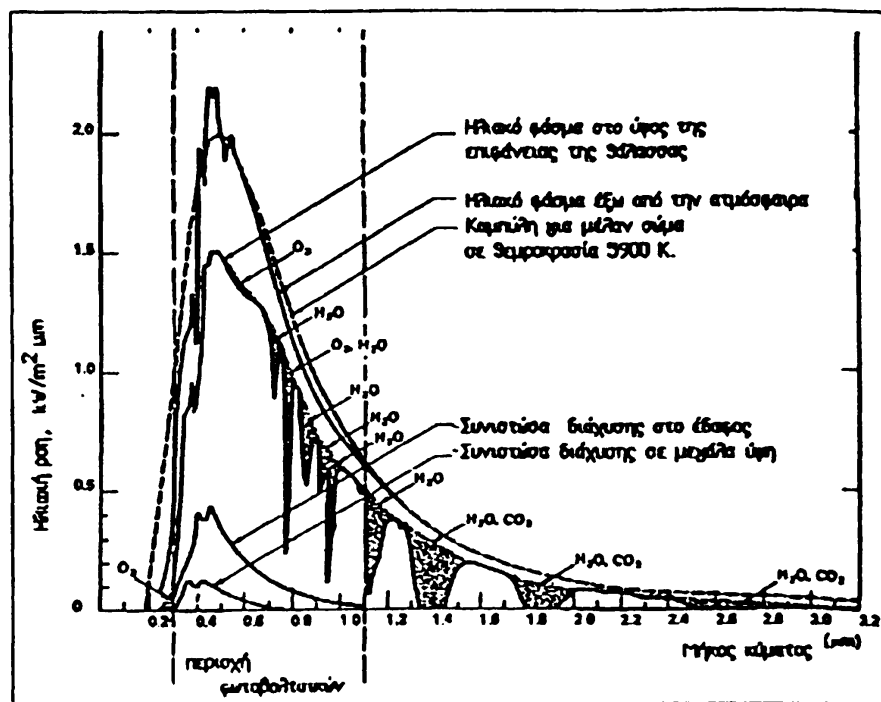
Για την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας με συλλεκτικές επιφάνειες είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας σαν συνάρτηση του μήκους κύματος. Η κατανομή αυτή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1, έξω από την ατμόσφαιρα της γης είναι βασικά όμοια με την κατανομή ακτινοβολίας μέλανος σώματος σε θερμοκρασία $5.800 \text{ }^\circ\text{K}$ με μερικές αλλαγές στην περιοχή $0,3 - 0,6 \text{ }\mu\text{m}$ που οφείλονται στην απορρόφηση από την ηλιακή ατμόσφαιρα, από αρνητικά ιόντα υδρογόνου και από μοριακούς συνδέσμους.

Το φάσμα πάνω στο έδαφος δίνεται επίσης στο Σχήμα 2.1. Βλέπουμε ότι κατά την διέλευση του από την γήινη ατμόσφαιρα υφίσταται σημαντική απορρόφηση και σκέδαση από υδρατμούς, μόρια O_3 , H_2O , και CO_2 και από σωματίδια σκόνης. Το όζον (O_3) απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή $\lambda < 0,3 \text{ }\mu\text{m}$ (υπεριώδες) και οι υδρατμοί στο υπέρυθρο, δηλαδή σε μήκη κύματος $\lambda > 3 \text{ }\mu\text{m}$.

Ανάμεσα στα δύο αυτά όρια υπάρχουν αρκετές άλλες απορροφήσεις που τροποποιούν το ηλιακό φάσμα. Αυτές όμως δεν έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, γιατί εμάς κύρια μας ενδιαφέρει η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκη κύματος μεταξύ $0,3 - 3 \text{ }\mu\text{m}$ που αντιπροσωπεύει περίπου το 98% της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη. Εξασθένιση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη έχουμε επίσης λόγω σκέδασης. Εδώ σημαντικό ρόλο παίζει ο μηχανισμός της σκέδασης.

Τα μόρια για παράδειγμα είναι υπεύθυνα για την σκέδαση Rayleigh που γίνεται αρκετά μεγάλη σε μικρά μήκη κύματος επειδή είναι ανάλογη του λ^{-4} . Η σκέδαση από υδρατμούς είναι ανάλογη του λ^{-2} και από σωματίδια σκόνης ανάλογη του λ^{-1} .





Σχήμα 2.1: Ηλιακή ακτινοβολία σαν συνάρτηση του μήκους κύματος.

2.3 Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

Είναι φανερό ότι η ένταση του ηλιακού φωτός μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ημέρας. Αυτό οφείλεται στην αλλαγή της γωνίας θ_z που σχηματίζει ο ήλιος με το ζενίθ και στην αλλαγή της πυκνότητας των σωματιδίων μέσα από τα οποία περνούν οι ακτίνες. Οι αλλαγές αυτές είναι διαφορετικές από μέρα σε μέρα και εξαρτώνται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Από παρατηρήσεις που έγιναν το 1970 φαίνεται ότι η αλλαγή της έντασης του ηλιακού φωτός με την αύξηση της γωνιακής απόστασης του ήλιου από το ζενίθ είναι ανάλογη της αύξησης της μάζας αέρα. Η αύξηση αυτή ορίζεται σαν ο λόγος M της οπτικής πυκνότητας της ατμόσφαιρας κατά την διαδρομή της ακτίνας προς την οπτική πυκνότητα όταν ο ήλιος βρίσκεται στο Ζενίθ. Για μια οριζόντια επίπεδη ατμόσφαιρα ο λόγος αυτός είναι αντίστροφα ανάλογος του συνημίτονου της γωνιακής απόστασης από το Ζενίθ. Για μια καμπυλόγραμμη ατμόσφαιρα οι αστρονομικές παρατηρήσεις δεν δίνουν σοβαρές αλλαγές αυτού του νόμου ώστε να υπάρχουν σοβαρές επιπτώσεις στις ηλιακές εφαρμογές. Εμπειρικά φαίνεται ότι

$$\begin{aligned}
 M &= \sec\theta_z & 0 \leq \theta_z \leq 65^\circ \\
 M &= (\sec\theta_z)^s & \theta_z > 65^\circ
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

όπου s είναι μια εμπειρική σταθερά. Από την εξίσωση (1) φαίνεται ότι $M = 1$ για $\theta_z = 0$ και $M = 2$ για $\theta_z = 60^\circ$. Στο Σχήμα 2.1 η σταθερά M έχει πάρει την τιμή $M = 1$.



Από την εξίσωση (1) έχουμε επίσης για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μια εμπειρική συνάρτηση της μορφής

$$I(\theta_z) = I_0 e^{-cM} \quad (2)$$

όπου c είναι μια εμπειρική σταθερά και το I_0 είναι η ηλιακή σταθερά, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα. Τα πειραματικά δεδομένα μας δίνουν για τις εμπειρικές σταθερές $c = 0,357$, $s = 0,678$ και $I_0 = 1.368 \text{ W/m}^2$.

Η εξίσωση (2) προϋποθέτει ότι οι μετρήσεις έγιναν στο επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας. Είναι φανερό ότι η ένταση $I(z)$ θα αυξάνει όπως αυξάνει το ύψος του σημείου στο οποίο γίνεται η μέτρηση και επομένως θα είναι και συνάρτηση του ύψους h από την επιφάνεια της θάλασσας. Το φαινόμενο αυτό είναι παρατηρήσιμο και από την αύξηση του μπλε χρώματος του ουρανού στα μεγαλύτερα υψόμετρα αλλά και από το γρήγορο μαύρισμα της επιδερμίδας των ορειβατών και των ανθρώπων που ζουν στα βουνά.

Η αλλαγή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σαν συνάρτηση της γωνιακής απόστασης και του ύψους για μικρά υψόμετρα μπορεί να δοθεί από την εξίσωση

$$I(\theta_z, h) = I_0 (1 - \alpha h) e^{-cM} + \alpha h I_0 \quad (3)$$

Η εμπειρική σταθερά $\alpha = 0,14/\text{km}$ έχει προσδιοριστεί από παρατηρήσεις. Η ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του εδάφους είναι το άθροισμα των εντάσεων της άμεσης D (direct) και της διάχυτης S (scattered). Η άμεση ακτινοβολία μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (3). Ο υπολογισμός όμως της έμμεσης είναι πολύπλοκος. Όταν ο ουρανός είναι καλυμμένος με σύννεφα τότε όλη η ακτινοβολία είναι διάχυτη. Το αντίθετο βέβαια συμβαίνει όταν δεν υπάρχουν σύννεφα οπότε η διάχυτη είναι ένα μικρό ποσοστό της ολικής. Και σ' αυτήν την περίπτωση όμως η διάχυτη ακτινοβολία μπορεί να γίνει αρκετά μεγάλη όταν ο ήλιος δύει και είναι κοντά στον ορίζοντα. Η ένταση λοιπόν της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από την γωνιακή απόσταση του ήλιου από το Ζενίθ, από το ύψος του σημείου, όπου γίνεται η μέτρηση, από την διάχυση στην ατμόσφαιρα κ.α. Υπολογίζεται ότι στο επίπεδο της θάλασσας ανέρχεται στα 1 kW/m^2 ενώ πιο ψηλά ανέρχεται γύρω στα $1,1 \text{ kW/m}^2$. Στο Σχήμα 2.2 δίνονται μερικές καμπύλες που δείχνουν την μεταβολή της έντασης στην επιφάνεια της θάλασσας (Standard) στην έρημο (Desert) και σε κατοικημένες περιοχές (Urban). Οι καμπύλες δεν περιλαμβάνουν σκεδάσεις που προέρχονται από το έδαφος, όπως για παράδειγμα οικοδομές κ.α. Είναι φανερό ότι για οποιαδήποτε χρήση και προσδιορισμό ηλιακών συλλεκτών πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κι αυτά τα φαινόμενα. Σε πρώτη προσέγγιση υπολογίζεται ότι η σκέδαση από το έδαφος είναι στα ίδια ποσοστά με τη σκέδαση από τον ουρανό και έχει την ίδια εξάρτηση από την απόσταση Ηλίου - Ζενίθ που έχει και η άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Μόνο στην περίπτωση που τα υλικά του εδάφους είναι σκοτεινά όπως η άσφαλτος και το τσιμέντο ή είναι κοκοϊδείς επιφάνειες όπως η άμμος, η σκέδαση από το έδαφος διαφέρει κατά πολύ από την σκέδαση από τον ουρανό. Σ' αυτή την περίπτωση για τον ακριβή



προσδιορισμό της ολικής έντασης πρέπει να γίνονται αντίστοιχες διορθώσεις. Την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας την μετράμε σε $\text{cal/cm}^2\text{min}$ ή σε kW/m^2 . Η μονάδα cal/cm^2 ονομάζεται Langley (ly).

2.4 Ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια

Για να βρούμε την ακτινοβολία που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια θα πρέπει να ορίσουμε ορισμένα μεγέθη και κατά κύριο λόγο τις γωνίες από τις οποίες εξαρτώνται και να τις συσχετίσουμε μεταξύ τους. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια επιφάνεια που παρακολουθεί την κίνηση της γης. Τότε μπορούμε να ορίσουμε τις ακόλουθες γωνίες

φ = γεωγραφικό πλάτος $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$

δ = Γωνία απόκλισης, (απόκλιση): Γωνιακή θέση του ηλίου το ηλιακό μεσημέρι σε σχέση με τον ισημερινό $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$. Η βόρεια θεωρείται θετική.

β = Γωνία κλίσης του συλλέκτη ως προς οριζόντιο επίπεδο.

ω = Ωριαία γωνία, η γωνιακή μεταβολή της θέσης του ηλίου κατά την κίνηση της γης γύρω από τον άξονά της με γωνιακή ταχύτητα $15^\circ/\text{hour}$. (Το πρωί αρνητική το απόγευμα θετική).

θ = Γωνία πρόσπτωσης ως προς την κάθετο προς την επιφάνεια του συλλέκτη

γ = Γωνιακή μετατόπιση (Ανατολική ή Δυτική).

Πρέπει επίσης να ορίσουμε την ημέρα στον χρόνο εφόσον η ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται και από αυτήν

η = ημέρα στο χρόνο ($1 \leq \eta \leq 365$), Julian date.

Είναι προφανές ότι η γωνία πρόσπτωσης θα είναι μια συνάρτηση όλων των παραπάνω μεγεθών, δηλαδή

$$\theta = \theta(\cos\varphi, \sin\varphi, \cos\delta, \sin\delta, \cos\omega, \sin\omega, \cos\gamma, \sin\gamma)$$

Μπορούμε όμως αυτήν την εξίσωση να την απλοποιήσουμε κάνοντας ορισμένες παραδοχές π.χ., όταν ο συλλέκτης είναι τοποθετημένος στο Βόρειο ημισφαίριο είναι προσανατολισμένος προς το Νότο, οπότε $\gamma = 0^\circ$, και όταν είναι τοποθετημένος στο Νότιο ημισφαίριο είναι προσανατολισμένος προς το Βορρά, οπότε $\gamma = 180^\circ$.

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \cos(\varphi \pm \beta) \cos\delta \cos\omega + \sin(\varphi \pm \beta) \sin\delta & + \text{Νότος} \\ & & - \text{Βορράς} \end{aligned} \quad (3)$$

Από την εξίσωση αυτή βλέπουμε ότι αν $\beta=0^\circ$

$$\cos\theta_z = \cos\varphi \cos\delta \cos\omega + \sin\varphi \sin\delta \quad (4)$$

Από την (2) μπορούμε εύκολα να βρούμε την ωριαία γωνία της δύσης του ηλίου. Για $\theta_z = 90^\circ$



$$\cos\omega = -\frac{\sin\varphi\sin\delta}{\cos\varphi\cos\delta} = \tan\varphi\tan\delta \quad (5)$$

Για τις άλλες γωνίες έχουμε
Γωνία απόκλισης

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360\frac{284+\eta}{365}\right) \quad (6)$$

Ωριαία γωνία ω :

Μπορεί να θέσουμε το μέσο της ημέρας, δηλαδή τις 12:00 το μεσημέρι σαν $\omega = 0^\circ$, οπότε επειδή η γωνιακή ταχύτητα της γης γύρω από τον άξονα της είναι ίση με $15^\circ/\omega\text{ρα}$, τότε πριν τις 12:00 $\omega < 0^\circ$ και μετά τις 12:00 $\omega > 0^\circ$ π.χ.

στις 10:00 $\omega = -30^\circ$ στις 11:00 $\omega = -15^\circ$,
στις 12:00 $\omega = +0^\circ$, στις 13:00 $\omega = 15^\circ$
στις 14:00 $\omega = 30^\circ$, κ.ο.κ.

Ηλιακός χρόνος:

$$S_T = C_T + 4(90 - \text{Γεωγραφικό μήκος}) + E$$

$$E = 9,87 \sin 2B - 7,58 \cos B - 1,5 \sin B \quad (7)$$

$$B = \frac{360(\eta - 81)}{364}$$

Ωρες ηλιοφάνειας:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan\varphi\tan\delta) \quad (8)$$

Για οποιοδήποτε χρόνο λοιπόν η ακτινοβολία G πάνω σε μια οριζόντια επιφάνεια αν δεν θα υπήρχε η ατμόσφαιρα θα ήταν

$$G = I_o \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360\eta}{365}\right) \right) \cos\theta_z$$

ή

$$G = I_o \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360\eta}{365}\right) \right) (\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega) \quad (9)$$

Επομένως, εάν θέλουμε να βρούμε την ωριαία ακτινοβολία I που δέχεται η οριζόντια επιφάνεια από την ωριαία γωνία ω_1 στην ωριαία γωνία ω_2 , τότε επειδή



36 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

$$I_{\omega_1 \rightarrow \omega_2} = \frac{1}{\omega_T} \int_{\omega_1}^{\omega_2} d\omega, \quad \text{όπου } \omega_1 = \frac{2\pi}{24 \text{ ώρες}} \quad (10)$$

θα έχουμε

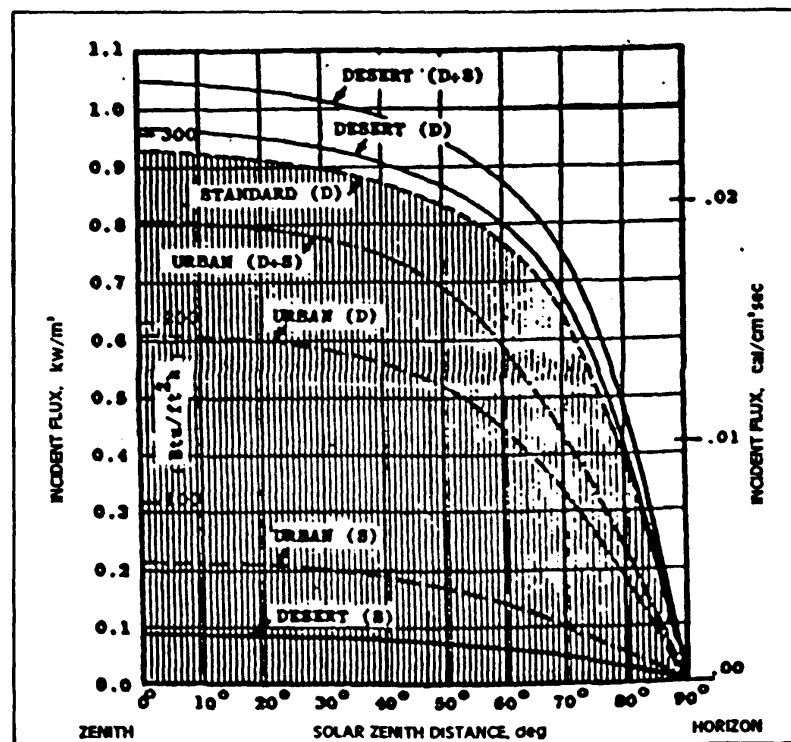
$$I_{\omega_1 \rightarrow \omega_2} = \left[\frac{24 \times 3.600(s)}{2\pi} * 1.368(W/m^2) \right] * \left[\frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} * (\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta(\sin(\omega_2 - \omega_1))) \right] \quad (11)$$

και αν θέλουμε την ολική ακτινοβολία που δέχεται την ημέρα μια επιφάνεια από την ανατολή μέχρι τη δύση του ηλίου, τότε θα έχουμε

Καθημερινή ηλιακή ακτινοβολία (εξωτερική)

$$H_o [J/m^2] = \left(\frac{2 \times 12 \times 3.600}{\pi} \right) * I_o * \left[1 + 0,033 \cos \frac{360\eta}{365} \right] * (\cos\phi \cos\delta \sin\omega + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin\phi \sin\delta) \quad (12)$$

εφ' όσον $\omega_1 = -\omega_2 = \omega_s$.



Σχήμα 2.2: Η ηλιακή ακτινοβολία σαν συνάρτηση της ζενίθιας γωνίας για διαφορετικά είδη φυσικών και τεχνητών επιφανειών.

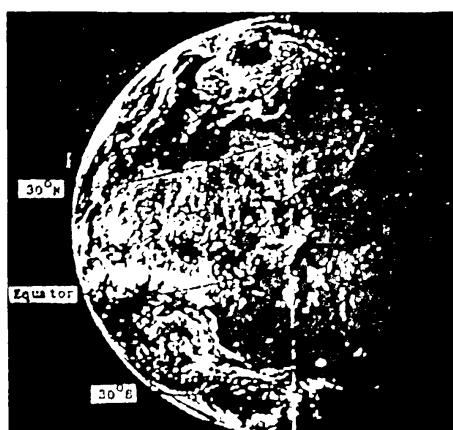


2.5 Ηλιοφάνεια

Εάν δεν υπήρχε η ατμόσφαιρα ο βόρειος και ο νότιος πόλος θα είχαν την ίδια ηλιοφάνεια, όπως κάθε άλλο μέρος της γης. Οι κλιματολογικές όμως συνθήκες αλλάζουν αυτή την κατάσταση δραστικά. Έτσι βλέπουμε ότι αν ο ουρανός είναι καθαρός, την μέγιστη ακτινοβολία δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια το μεσημέρι στον ισημερινό. Σ' αυτή την περίπτωση οι ακτίνες του ήλιου περνούν ευθύγραμμα μέσα από την ατμόσφαιρα και έχουν ελάχιστη σκέδαση και απορρόφηση. Το πρωί και το απόγευμα οι ακτίνες δεν περνούν ευθύγραμμα στην ατμόσφαιρα και παθαίνουν σημαντική σκέδαση και απορρόφηση.

Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται λοιπόν μια επιφάνεια πάνω στην γη εξαρτάται από την ώρα της ημέρας από την ημέρα στο χρόνο, από το γεωγραφικό πλάτος που βρίσκεται η επιφάνεια και από την καθαρότητα της ατμόσφαιρας.

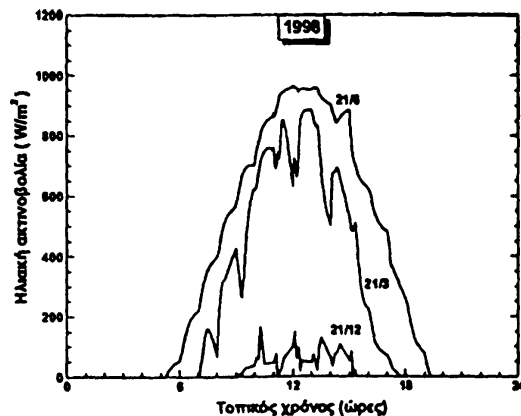
Στο βόρειο ημισφαίριο ο ήλιος είναι ψηλότερα στον ουρανό στις 21 Ιουνίου και χαμηλότερα στις 21 Δεκεμβρίου. Οι μέσες τιμές είναι στις ισημερίες στις 21 Μαρτίου και στις 21 Σεπτεμβρίου. Στο νότιο ημισφαίριο ισχύει το αντίθετο. Γενικά η περισσότερη ηλιοφάνεια εντοπίζεται σε δύο κύριες ζώνες με γεωγραφικά πλάτη 20° - 30° N (βόρεια) και 20° - 30° S (νότια). Οι περιοχές αυτές συγκεντρώνουν σχεδόν το 90% της ηλιακής ακτινοβολίας στη γη. Δεν είναι λοιπόν παράξενο που σ' αυτές τις περιοχές υπάρχουν και οι μεγαλύτερες έρημες περιοχές όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2.3.



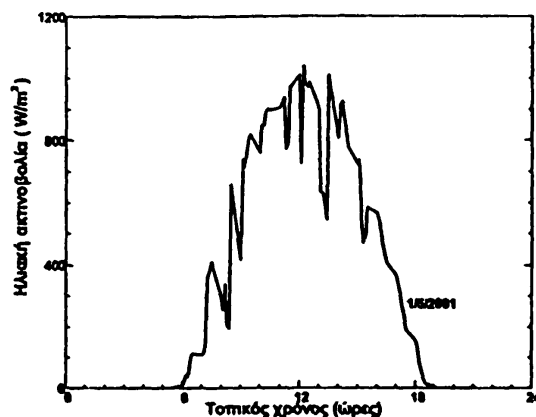
Σχήμα 2.3: Περιοχές μέγιστης ηλιοφάνειας.

Η τυπική καμπύλη της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια ανέφελη ημέρα την 21^η Ιουνίου, την 21^η Δεκεμβρίου και την 21^η Μαρτίου σε γεωγραφικό πλάτος $38,28^{\circ}$ N (Πανεπιστημίου Πάτρας) δίνεται στο Σχήμα 2.4. Φαίνονται οι διαφοροποιήσεις τις πρωινές και τις βραδινές ώρες και κατά τις διάφορες εποχές. Στο Σχήμα 2.5 φαίνεται η επίδραση που έχουν στην ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο έδαφος οι ολιγοδιαρκείς νεφώσεις. Είναι φανερό ότι για τον ακριβή προσδιορισμό ενός συστήματος εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας χρειάζεται να εκτιμηθούν σωστά όλες οι επιπτώσεις που αναφέραμε παραπάνω.





Σχήμα 2.4: Τυπικό διάγραμμα ακτινοβολίας σε γεωγραφικό πλάτος 38,28° N.



Σχήμα 2.5: Επίδραση της νέφωσης στην ηλιακή ακτινοβολία.

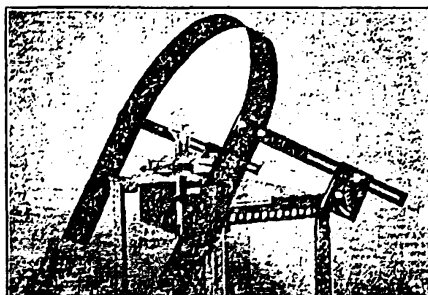
2.6 Όργανα μετρήσεων

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να προσδιοριστεί από την ηλιακή σταθερά εφόσον γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις για τον υποβιβασμό που υφίσταται κατά το πέρασμα της μέσα από την ατμόσφαιρα. Υπάρχουν βέβαια και απ' ευθείας μέθοδοι μετρήσεων με ειδικά όργανα που έχουν αναπτυχθεί στην μετεωρολογία. Γενικά υπάρχουν 700 σταθμοί στον κόσμο που μετρούν την ολική ηλιακή ακτινοβολία. Υπάρχουν 100 σταθμοί που μετρούν την ακτινοβολία συνεχώς σε μια επιφάνεια κάθετη στις ηλιακές ακτίνες και 2.000 σταθμοί που μετρούν την ηλιοφάνεια.

Συνήθως οι μετρήσεις γίνονται για την ολική ακτινοβολία (άμεση και διάχυτη) και για την ηλιοφάνεια. Η ολική ακτινοβολία μετριέται με τα πυρανόμετρα (pyranometers). Είναι όργανα αρκετά απλά που παρουσιάζουν ευαισθησία στην περιοχή 0,3 - 3 μm του ηλιακού φάσματος. Στις μετρήσεις πρέπει να τοποθετούνται

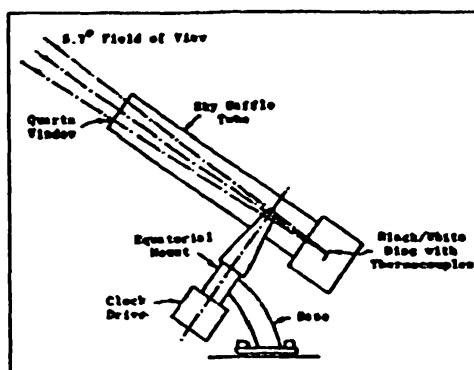
έτσι που να μην υπάρχουν γύρω τους οικοδομές ή άλλα αντικείμενα σκέδασης ώστε το πυρανόμετρο να δέχεται ακτινοβολία ολόκληρο το ημισφαίριο. Ένα από τα πιο απλά πυρανόμετρα είναι το πυρανόμετρο του Erppley. Αποτελείται από δύο ομόκεντρα ημισφαιρικά καλύμματα από γυαλί που αποκόπτουν μήκη κύματος $\lambda > 3$ μm και δύο εσωτερικά δαχτυλίδια ένα μαύρο και ένα λευκό ώστε να δημιουργείται διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των. Αυτή η διαφορά μετριέται από μια σειρά θερμοζευγών που την μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα της τάξης των mV. Τα πυρανόμετρα έχουν ένα χρόνο απόκρισης της τάξης των 30 sec. Συνήθως είναι συνδεδεμένα με καταγραφείς ή ολοκληρωτές ώστε να μετρούν την ολική ηλιακή ενέργεια σε μεγάλα χρονικά διαστήματα. Περίπου 90% των μετρήσεων που γίνονται σήμερα, γίνονται με πυρανόμετρα.

Επίσης και η διάχυτη ακτινοβολία μετριέται με πυρανόμετρα. Αυτά όμως σκιάζονται με ένα ειδικό δαχτυλίδι ώστε να μην προσλαμβάνουν και την άμεση ακτινοβολία. Η σκίαση μπορεί να γίνει και με μια ταινία (πέτασμα) που στερεώνεται στον πολικό άξονα (βλ. Σχήμα 2.6).



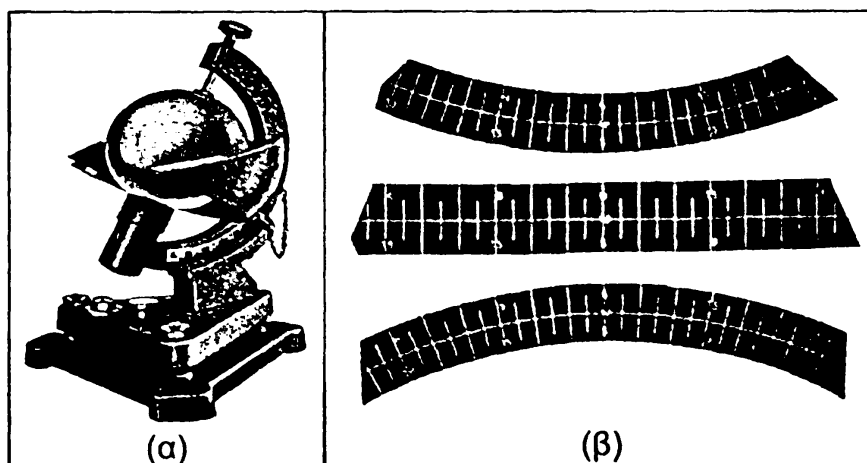
Σχήμα 2.6: Διάταξη μέτρησης της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας.

Σ' αυτή την περίπτωση όμως εμποδίζεται και ένα μέρος της διάχυτης ακτινοβολίας να φτάσει στο όργανο και έτσι πρέπει να γίνονται οι κατάλληλες διορθώσεις. Την άμεση ηλιακή ακτινοβολία την μετράμε με το πυρηλιόμετρο (pyroheliometer). Αυτό αποτελείται από ένα κυλινδρικό σωλήνα η βάση του οποίου είναι από μαύρο υλικό για να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία που προέρχεται από τον ηλιακό δίσκο και γύρω από αυτόν. Στο πάνω μέρος φέρει ένα δαχτυλίδι, μέσα από το οποίο περνάει η ακτινοβολία, το δαχτυλίδι μεταβάλλεται έτσι που να δίνει το είδωλο του ήλιου στο κέντρο του δίσκου της βάσης. Το πυρηλιόμετρο παρακολουθεί την κίνηση του ήλιου με τέτοιο τρόπο ώστε οι ακτίνες να είναι κάθετες προς τη βάση. Ένα συνηθισμένο πυρηλιόμετρο φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Σύνηθες πυρηλιόμετρο για την μέτρηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Τέλος η ηλιοφάνεια μετριέται συνήθως με τον καταγραφέα ηλιοφάνειας Campbell-Stokes (Σχήμα 2.8α). Πάνω στην ταινία του καταγραφέα δημιουργείται ένα σημάδι όταν η ηλιοφάνεια ξεπεράσει ένα ελάχιστο όριο (Σχήμα 2.8β). Το μήκος του σημαδιού δίνει την χρονική διάρκεια της ηλιοφάνειας (σε ώρες).



Σχήμα 2.8: (α) Ηλιογράφος Campbell-Stokes, (β) Ταινίες ηλιογράφου για διάφορες εποχές του έτους.

2.7 Ασκήσεις

1. Να βρεθεί η σχέση μεταξύ της ολικής ακτινοβολίας και της απόστασης του ήλιου από το Ζενίθ. Σαν βάση μπορούν να ληφθούν οι καμπύλες του Σχήματος 2.2 για την ηλιακή ακτινοβολία σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Λύση

Γενικά η άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε ένα οριζόντιο επίπεδο h πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας δίνεται από τη σχέση

$$I = I_0 (1 - ah) e^{-Mc} + ahI_0$$

όπου a και c είναι σταθερή και $M = (1/\cos\theta_z)$, με θ_z η γωνιακή απόσταση του ήλιου από το Ζενίθ. Από τις δύο καμπύλες του Σχήματος 2.2 θα μπορούσε κανείς να βρει ξεχωριστά τα I_d και I_s σαν συνάρτηση της θ_z . Μετά στην κάθε μια να υπολογίσει την εξάρτηση από το ύψος και έτσι να βρεί και το τελικό $I_{ολ}(h, z)$.

Παρατηρώντας όμως ότι η $I_s(\theta_z) \sim I_d(\theta_z)$ μπορούμε να υποθέσουμε ότι η αναλογία αυτή θα ισχύει και τις $I_s(\theta_z, h) \sim I_d(\theta_z, h)$.

Έτσι μπορούμε να πούμε ότι $I_{ολ}(\theta_z, h) \sim I_{ολ}(\theta_z)f(h)$ οπότε

$$I_{ολ}(\theta_z, h) = I_{ολ}(\theta_z) (1 + ah)$$

όπου $I_{ολ}(\theta_z)$ είναι το άθροισμα των δύο καμπυλών I_d , I_s .

2. Αν η γη ήταν μια σφαίρα χωρίς σύννεφα ο άξονας της οποίας σχηματίζει με το επίπεδο το ήλιου γωνία $23,5^\circ$ α) Ποια θα είναι η εξίσωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις 21 Ιουνίου β) Ποίο θα είναι το ολικό ηλιακό φως το χρόνο;

Λύση

α) Η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας με την απόσταση του ήλιου από το Ζενίθ και το υψόμετρο δίνεται από τη σχέση

$$I = I_0 (1 - ah) e^{-Mc} + ah I_0 \text{ [kW/m}^2\text{]}$$

$$M = (1/\cos\theta_z)$$

Εάν η γωνία κλίσης είναι β τότε το Ζενίθ θα μετατοπιστεί κατά β οπότε

$$\frac{1}{\cos(\theta_z - \beta)}$$

$$\beta) \varepsilon = I t = 365 I_0 (1 - ah) e^{-Mc} + ah 365 I_0 \text{ [kW/m}^2\text{]}$$



42 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3. Αν δεν υπήρχε η ατμόσφαιρα ποια θα ήταν η ηλιακή ακτινοβολία σε μια οριζόντια επιφάνεια σε ένα μέρος με γεωγραφικό πλάτος $\varphi = 43^\circ \text{ N}$, στις 15 Απριλίου μεταξύ 10:00 και 11:00 το πρωί;

Λύση

$$\begin{aligned} \text{Δίνονται : } \varphi &= 43^\circ \text{ N}, & \eta &= 90^\circ + 15^\circ = 105^\circ \\ \omega_1 &= -30^\circ, & \omega_2 &= -15^\circ \end{aligned}$$

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \frac{284 + \eta}{365}\right)$$

$$\sin\left(360 \frac{284 + \eta}{365}\right) = 0,401$$

άρα $\delta = 9,4^\circ$
από την (11) έχουμε:

$$I_{\omega_1 \rightarrow \omega_2} = \left[\frac{12 \times 3.600(\text{s})}{\pi} \cdot 1.368(\text{W/m}^2) \right] \cdot \left[1 + 0,33 \cos\left(\frac{3.600 \times 105}{365}\right) \right]$$

$$\begin{aligned} H_o [\text{J/m}^2] &= \left(\frac{2 \times 3.600}{\pi} \right) \cdot 1.368(\text{W/m}^2) \cdot \left[1 + 0,033 \cos \frac{3.600 \times 105}{365} \right] \cdot \\ &\quad \cdot (\cos(43) \cos(9,4) \sin(-30) + \frac{2\pi(-15 - (-30))}{360} \sin(-15) \sin(-30)) \end{aligned}$$



2.8 Π ρ ο β λ ή μ α τ α

1. Ποια θα ήταν η ημερήσια ακτινοβολία που θα δεχόταν η οριζόντια επιφάνεια της προηγούμενης άσκησης;
2. Για επίπεδη επιφάνεια με γωνία κλίσης β να αποδειχθούν τα ακόλουθα:
 - α) Όταν είναι τοποθετημένη σε τόπο με γεωγραφικό πλάτος φ Βόρειο και προσανατολισμένη προς το Νότο ($\gamma = 0^\circ$) δέχεται την ίδια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας με οριζόντια επιφάνεια τοποθετημένη σε τόπο με γεωγραφικό πλάτος φ -β.
 - β) Όταν είναι τοποθετημένη σε τόπο με γεωγραφικό πλάτος φ Νότιο και προσανατολισμένη προς το Βορρά ($\gamma = 180^\circ$) δέχεται την ίδια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας με οριζόντια επιφάνεια τοποθετημένη σε γεωγραφικό πλάτος φ +β.
3. Να βρεθεί ο λόγος R της ολικής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια γωνίας κλίσης $\beta = 60^\circ$ προσανατολισμένης προς το Νότο προς την ολική ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, σε τόπο με γεωγραφικό πλάτος 40° Βόρειο την 20η Φεβρουαρίου στις 09:30. Να υποτεθεί ότι:
 - α) Τα $3/4$ της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας είναι άμεση και το $1/4$ είναι έμμεση.
 - β) Η διαχεόμενη ακτινοβολία από τον ουρανό είναι ισοτροπική και ισοδύναμη με τη διαχεόμενη ακτινοβολία από το έδαφος.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Ο Ήλιος είναι μια μεγάλη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Όμως αν και μεγάλα ποσά ηλιακής ενέργειας προσφέρονται καθημερινά στη γη, η πυκνότητα ενέργειας (ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας) δεν είναι μεγάλη. (Η μέση πυκνότητα ενέργειας σε ένα εικοσιτετράωρο ανέρχεται σε $100\text{-}300\text{ W/m}^2$). Για να αξιοποιήσουμε λοιπόν αυτήν την ενέργεια χρειαζόμαστε διάφορα συστήματα συλλογής και μετατροπής.

Τα συστήματα αυτά μπορούμε να τα ταξινομήσουμε ανάλογα με τον τρόπο που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε χρησιμοποιήσιμη ενέργεια. Έτσι διακρίνουμε συστήματα:

i) Απ' ευθείας μετατροπής σε θερμότητα

- Θέρμανση και ψύξη χώρων (ενεργητική ή παθητική)
- Θέρμανση νερού
- Αγροτικές εφαρμογές (άρδευση, θερμοκήπια, αποξήρανση)
- Αφαλάτωση νερού
- Ηλιακοί φούρνοι

ii) Άμεση μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια

- Φωτοηλεκτρική
- Θερμοηλεκτρική



- Θερμοϊονική
- iii) Έμμεση μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενδιάμεσων μορφών ενέργειας
 - Ηλιακοί πύργοι
 - Ηλιακές λίμνες
- iv) Μετατροπή σε χημική ενέργεια
 - Βιομάζα
 - Φωτοηλεκτρόλυση

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τις τρεις πρώτες μετατροπές. Την μετατροπή σε χημική ενέργεια θα την μελετήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο.

3.2 Μετατροπή σε θερμότητα

Στο στάδιο που βρίσκεται σήμερα η τεχνολογική εξέλιξη για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας έχει γίνει σημαντική ανάπτυξη στον τομέα της θέρμανσης. Από τις μέχρι τώρα εφαρμογές φαίνεται ότι όσον αφορά την θέρμανση μπορούμε να χωρίσουμε τα συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας σε κατηγορίες ανάλογα με την θερμοκρασία που αναπτύσσουν. Έτσι διακρίνουμε συστήματα : α) χαμηλής, $T \sim 100^\circ\text{C}$, θερμοκρασίας, β) μέσης, $T \sim 100\text{--}400^\circ\text{C}$, θερμοκρασίας, και γ) υψηλής, $T > 400^\circ\text{C}$, θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, οι ηλιακοί φούρνοι ανήκουν στην κατηγορία (γ) ενώ η θέρμανση, η ψύξη χώρων, η θέρμανση νερού, και οι αγροτικές εφαρμογές, ανήκουν στην κατηγορία (α). Στην κατηγορία αυτή ανήκει φυσικά και ο γνωστός "ηλιακός θερμοσίφωνας", το πιο απλό και χρήσιμο σύστημα για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Αποτελείται από τον συλλέκτη της ηλιακής ακτινοβολίας και το δοχείο αποθήκευσης του ζεστού νερού. Εάν το δοχείο τοποθετηθεί πάνω από το συλλέκτη τότε το σύστημα εργάζεται με φυσική ροή σύμφωνα με το θερμοσιφωνικό φαινόμενο: Το θερμαινόμενο νερό αποκτά μικρότερη πυκνότητα και ανεβαίνει προς τα πάνω, προς το δοχείο, ενώ το ψυχρό νερό μετακινείται προς τα κάτω, προς το συλλέκτη. Ένα να τέτοιο σύστημα λέγεται και παθητικό γιατί η λειτουργία του γίνεται αυθόρμητα χωρίς να χρησιμοποιηθεί βοηθητικά άλλη μορφή ενέργειας. Όπως θα δούμε παρακάτω το ίδιο σύστημα θα μπορούσε να λειτουργήσει και με το δοχείο αποθήκευσης σε οποιαδήποτε άλλη θέση. Στην περίπτωση αυτή, η κυκλοφορία του νερού θα έπρεπε να γίνεται με κυκλοφορητή και το σύστημα τότε θα ονομάζετο ενεργητικό, επειδή θα χρησιμοποιούσε πρόσθετη ενέργεια για την λειτουργία του. Πρωταρχική σημασία για όλα τα συστήματα ηλιακής ενέργειας έχουν, η θέση, ο προσδιορισμός και ο τύπος του συλλέκτη.

Διακρίνουμε δύο κατηγορίες συλλεκτών:

Τους επίπεδους συλλέκτες και τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες. Οι επίπεδοι είναι σχεδόν πάντα εγκατεστημένοι σταθερά σε ένα μέρος και σπάνια μετατοπίζονται για να παρακολουθούν τον ήλιο. Στο βόρειο ημισφαίριο είναι προσανατολισμένοι προς τα νότια και σχηματίζουν πάντα μια γωνία με το οριζόντιο επίπεδο, η οποία εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος του σημείου εγκατάστασης. Γενικά, ισχύει ότι η πιο καλή εγκατάσταση θα ήταν αυτή που θα έπαιρνε υπ' όψιν της την αλλαγή της τροχιάς του ήλιου το χειμώνα και το καλοκαίρι. Αν υπάρχει δυνατότητα κίνησης του

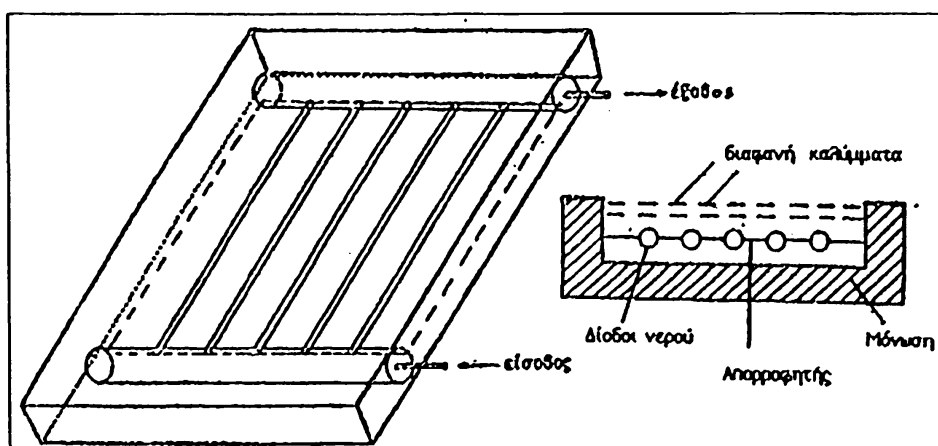


συλλέκτη τότε η περιστροφή του γύρω από ένα οριζόντιο άξονα κατά 15° θα έδινε την πιο καλή απόδοση. Γενικά ισχύει ότι η κλίση του επίπεδου συλλέκτη θα πρέπει να είναι:

Χειμώνας : Γεωγραφικό πλάτος $+ 5^\circ$

Καλοκαίρι : Γεωγραφικό πλάτος $- 5^\circ$

Αυτό όμως δεν εφαρμόζεται σχεδόν ποτέ στην πράξη κυρίως λόγω του μεγάλου μεγέθους της συλλεκτικής επιφάνειας. Παρόλο αυτό το μειονέκτημα οι επίπεδοι συλλέκτες είναι αρκετά αποδοτικοί γιατί έχουν την δυνατότητα απορρόφησης και της άμεσης αλλά και της διάχυτης ακτινοβολίας. Έτσι είναι αποδοτικοί και τις ημέρες που υπάρχει ηλιοφάνεια αλλά και τις ημέρες που επικρατεί αραιή νέφωση. Η πιο απλή κατασκευή ενός επίπεδου συλλέκτη δίνεται στο Σχήμα 3.1. Αποτελείται από ένα ορθογώνιο πλαίσιο από ξύλο, πλαστικό ή μέταλλο μικρού πάχους για να μην έχει μεγάλες απώλειες θερμότητας με αγωγή. Στο κάτω μέρος του πλαισίου τοποθετείται μαύρη επιφάνεια απορρόφησης και κάτω από αυτήν την επιφάνεια είναι τοποθετημένοι σωλήνες μέσα από τους οποίους περνάει το νερό. Το πλαίσιο καλύπτεται από το πάνω μέρος με γυαλί ή πλαστικό για να ελαττώνονται οι απώλειες θερμότητας λόγω αγωγής ή ακτινοβολίας. Δύο ή περισσότερα γυαλίνα ή πλαστικά καλύμματα είναι πιο αποδοτικά από ένα όσον αφορά αυτές τις απώλειες. Από την άλλη μεριά όμως κάθε πρόσθετο κάλυμμα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της απορρόφησης ακτινοβολίας από το ίδιο το κάλυμμα λόγω της ανάκλασης του ηλιακού φωτός στην διαχωριστική επιφάνεια γυαλί-αέρα. Υπάρχει ένας βέλτιστος αριθμός καλυμμάτων, που εξαρτάται από το είδος του καλύμματος, όπως υπάρχει και η δυνατότητα βελτιστοποίησης της επιφάνειας του καλύμματος με επεξεργασία και με προσθήκη από διαφανή υλικά πάχους $0,25$ του μήκους κύματος λ του φωτός.



Σχήμα 3.1: Τυπικός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης και η τομή του.

Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερα καλύμματα χωρίς απώλεια απόδοσης. Γενικά ένα καθαρό γυαλί δεν απορροφά περισσότερο από 3% της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει επάνω του. Εάν είναι αναγκαίες ακριβείς



μετρήσεις τότε πρέπει να υπολογιστεί το ποσό I_r της ακτινοβολίας που ανακλάται σε σχέση με την ακτινοβολία I_o που προσπίπτει σαν συνάρτηση του δείκτη διάθλασης (n). Για κάθετη πρόσπτωση ισχύει η σχέση

$$\frac{I_r}{I_o} = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (1)$$

Η ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιών δεν είναι δυνατή στους επίπεδους συλλέκτες. Στην καλύτερη περίπτωση δεν υπερβαίνει τους 70 °C. Αυτό οφείλεται κύρια σε απώλειες λόγω ακτινοβολίας που είναι ανάλογες της τετάρτης δύναμης της θερμοκρασίας και επομένως αρχίζουν να γίνονται σημαντικές σε μεγάλες θερμοκρασίες. Οι απώλειες λόγω μεταφοράς στον αέρα είναι ανάλογες της ταχύτητας του αέρα. Μπορούν λοιπόν να παραμείνουν μικρές όταν ο συλλέκτης προστατεύεται από τον αέρα.

Η παραγωγή θερμότητας ενός επίπεδου συλλέκτη μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση

$$Q = (q_o - (q_r + q_i)) A \quad (2)$$

q_o = ρυθμός απορρόφησης ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας

q_r = ρυθμός απώλειας λόγω ακτινοβολίας

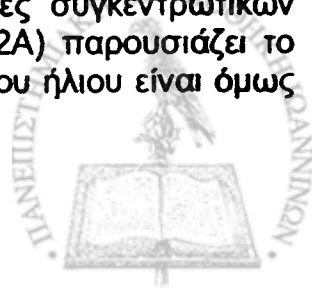
q_i = ρυθμός απώλειας λόγω αγωγής και μεταφοράς στο περιβάλλον και στο σύστημα

A = συλλεκτική επιφάνεια

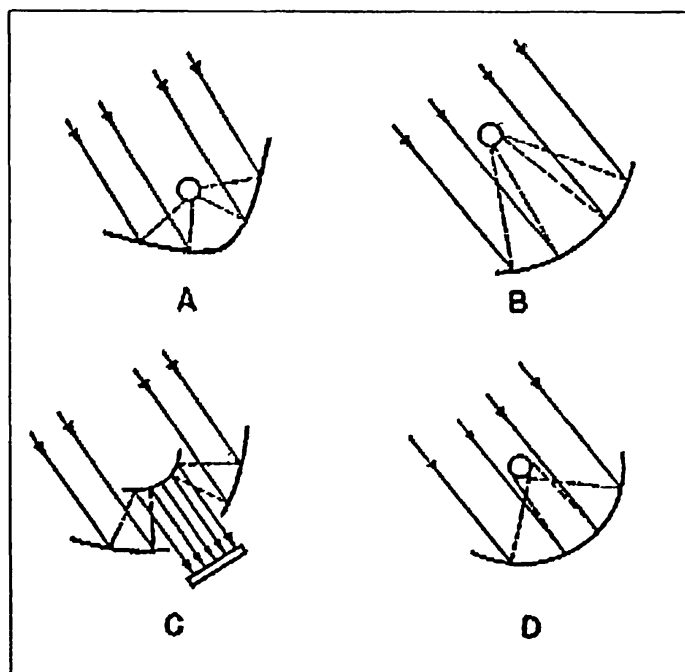
Σε αντίθεση με τους επίπεδους συλλέκτες οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες δρουν σαν κάτοπτρα και συγκεντρώνουν την ακτινοβολία σε μια μικρή επιφάνεια (στόχο) και έτσι έχουν την δυνατότητα να αναπτύσσουν μεγάλες θερμοκρασίες, γύρω στο 3.500 °C. Συνήθως οι στόχοι επιλέγονται με τέτοιες διαστάσεις ώστε να απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας που συγκεντρώνεται και κατασκευάζονται από μέταλλο για να γίνεται καλύτερη κατανομή της θερμοκρασίας. Η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται όταν το είδωλο του ήλιου σχηματίζεται ολόκληρο πάνω στο στόχο. Έτσι μπορεί να προσδιοριστεί ένας βέλτιστος λόγος του μεγέθους του ειδώλου προς το μέγεθος του κατόπτρου.

Στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες δεν αξιοποιείται η διάχυτη ακτινοβολία αλλά μόνο η άμεση. Επομένως ο άξονας του συστήματος πρέπει να ευθυγραμμίζεται με τις ηλιακές ακτίνες για να σχηματίζεται μικρή γωνία απόκλισης από την κάθετη πρόσπτωση. Η ευθυγράμμιση αυτή συνεπάγεται την περιστροφή του συστήματος για την παρακολούθηση της φαινόμενης κίνησης του ήλιου.

Από τους κυριότερους συγκεντρωτικούς συλλέκτες είναι οι παραβολικοί που συγκεντρώνουν τις ακτίνες σε μια μικρή επιφάνεια. Διατομές συγκεντρωτικών συλλεκτών δίνονται στο Σχήμα 3.2. Ο καθρέπτης (Σχήμα 3.2Α) παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζεται να παρακολουθεί την κίνηση του ήλιου είναι όμως



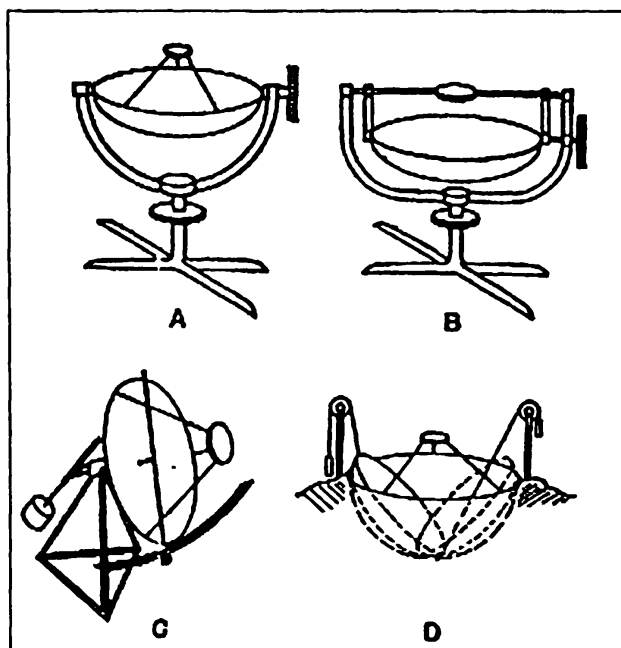
δύσκολος στην κατασκευή του για καλή συγκεντρωτικότητα. Ο συλλέκτης (Σχήμα 3.2B) κατασκευάζεται πιο εύκολα πρέπει όμως να παρακολουθεί την κίνηση του ήλιου για καλή αποδοτικότητα. Στις ελαφρές κατασκευές χρησιμοποιείται ο (Σχήμα 3.2C). Στο Σχήμα 3.2D δίνεται ένας σφαιρικός καθρέπτης που μπορεί να αντικαταστήσει έναν παραβολικό όταν δεν είναι αναγκαία μεγάλη συγκεντρωτικότητα ή έναν κυλινδρικό (δεν χρειάζεται περιστροφή). Η τελευταία εξέλιξη στους συγκεντρωτικούς καθρέφτες είναι οι ανακλαστές Fresnel: Ομόκεντρα δαχτυλίδια που το καθένα τοποθετείται με διαφορετική γωνία κλίσης ώστε να ανακλώνται όλες οι ακτίνες στο ίδιο σημείο. Το υλικό κατασκευής μπορεί να είναι από πλαστικό ή αλουμίνιο. Βασικό και στις δύο περιπτώσεις είναι η καλή ανακλαστικότητα. Το μειονέκτημα της περιστροφής συνεπάγεται ότι δεν μπορούν να αναπτυχθούν σε μεγάλες επιφάνειες. Ορισμένες βασικές ιδέες περιστροφής δίνονται στο Σχήμα 3.3. Στο Σχήμα 3.3A έχουμε διπλή περιστροφή με τον στόχο κινούμενο μαζί με τον καθρέπτη. Στο Σχήμα 3.3B γίνεται διπλή περιστροφή αλλά ο στόχος δεν ακολουθεί την κίνηση του καθρέπτη. Στο Σχήμα 3.3C πρόκειται για μια μόνο κίνηση. Στο Σχήμα 3.3D έχουμε κινούμενες ημισφαιρικές επιφάνειες με σταθερό στόχο.



Σχήμα 3.2: Διατομές συγκεντρωτικών συλλεκτών.

Η παρακολούθηση του ήλιου μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους: Με το χέρι, με ωρολογιακό μηχανισμό με φωτοευαίσθητο σύστημα και με ηλεκτρικό αυτοματισμό. Αν υπάρχει εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα τότε με ένα συγχρονισμένο μοτέρ μπορεί να γίνεται η περιστροφή του συλλέκτη κατά 15° την ώρα ($360^\circ/24 = 15^\circ$). Μ' αυτή την σταθερή αλλαγή το είδωλο του ήλιου θα σχηματίζεται πάνω στον στόχο όλη την διάρκεια της ημέρας.





Σχήμα 3.3: Τρόπος περιστροφής συγκεντρωτικών καθρεφτών.

Αυτό βέβαια μπορεί να γίνει και με πολλούς άλλους τρόπους. Επειδή όμως όλοι οι τρόποι περιστροφής εκτός από την περιστροφή με το χέρι χρειάζονται πρόσθετη ενέργεια, για τους μεγάλους συλλέκτες ο συνήθης τρόπος περιστροφής είναι με το χέρι. Από την σκοπιά αυτή ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο κυλινδρικός συλλέκτης. Η τοποθέτησή του είναι απλή, με τον άξονα του κυλίνδρου να βρίσκεται παράλληλα προς το επίπεδο της τροχιάς του ήλιου. Κατά την διάρκεια της ημέρας μπορεί να μετακινείται γύρω από τον άξονά του και κάθε εποχή μπορεί να μετακινείται ο άξονας ώστε ο συλλέκτης να παρακολουθεί τον ήλιο. Το προτέρημα στον κυλινδρικό συλλέκτη, όπως και στον επίπεδο συλλέκτη, είναι ότι δεν χρειάζεται να παρακολουθεί την κίνηση του ήλιου. Σ' αυτήν την περίπτωση ο άξονας του κυλίνδρου πρέπει να τοποθετείται από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Εάν ο συλλέκτης τοποθετηθεί με λίγη κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο τότε υπάρχει μεγάλη συγκεντρωτικότητα σχεδόν όλη την ημέρα εκτός από τις πρωινές και τις βραδινές ώρες.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι και οι δύο τύποι συλλεκτών έχουν προτερήματα και μειονεκτήματα. Για πολύ ψηλές θερμοκρασίες πιο χρήσιμοι είναι η συγκεντρωτικοί συλλέκτες, εκμεταλλεύονται όμως μόνο την άμεση ακτινοβολία και επομένως έχουν αποδοτικότητα μόνο σε ημέρες με ηλιοφάνεια. Επίσης, πρέπει να παρακολουθούν την κίνηση του ήλιου. Αντίθετα οι επίπεδοι συλλέκτες δεν παράγουν μεγάλες θερμοκρασίες, δεν χρειάζονται μετακίνηση και έχουν κάποια αποδοτικότητα και όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια.

3.3 Απόδοση συλλεκτών

Με βάση την εξίσωση (2) μπορούμε να υπολογίσουμε την απόδοση ενός συλλέκτη. Συνήθως αυτή ορίζεται με το λόγο της ολικής χρήσιμης συλλεγόμενης ενέργειας Q ανά μονάδα χρόνου δια της ολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας I ανά μονάδα χρόνου. Έτσι για έναν επίπεδο συλλέκτη με συλλεκτική επιφάνεια A η στιγμιαία απόδοση είναι

$$\eta = \frac{Q}{AI} \quad (3)$$

Είναι φανερό ότι η απόδοση δεν μπορεί να υπολογιστεί για μια ορισμένη χρονική στιγμή. Η εξίσωση (3) πρέπει λοιπόν να κανονικοποιηθεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Για τον λόγο αυτό στην πράξη δεν χρησιμοποιείται η εξίσωση (3) αλλά η μέση τιμή της που υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που ορίζεται η μέση τιμή μιας φυσικής μεταβλητής.

$$\langle \eta \rangle = \frac{\int_{t_a}^{t_b} Q dt}{\int_{t_a}^{t_b} (AI) dt} \quad (4)$$

Για την καλύτερη κατανόηση των φυσικών μεγεθών που παίζουν ρόλο στον προσδιορισμό της απόδοσης ενός συλλέκτη μπορούμε να μετασχηματίσουμε την εξίσωση (3) έτσι ώστε οι ρυθμοί απώλειας q_r και q_l λόγω ακτινοβολίας, αγωγής και μεταφοράς να είναι συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού στον συλλέκτη T_i και θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_a . Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση (2) γράφεται

$$Q = A \cdot f \cdot [q_o - u(T_i - T_a)] \quad (5)$$

όπου u είναι ο λεγόμενος παράγοντας $-u$ που δίνει τον ρυθμό της θερμικής απώλειας ανά μονάδα θερμοκρασίας και f είναι ο συντελεστής απόδοσης ενός εναλλάκτη. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται σαν τον λόγο της μεταφοράς θερμότητας προς την μέγιστη δυνατή μεταφορά θερμότητας. Με βάση την εξίσωση (5), η εξίσωση (3) γράφεται

$$h = \left(\frac{q_o}{I} - u \frac{\Delta T}{I} \right) f \quad (6)$$

ή

$$\eta = \eta_o - u \frac{\Delta T}{I} f \quad (7)$$



Από την εξίσωση (7) φαίνεται καθαρά ότι ο συντελεστής απόδοσης σαν συνάρτηση της ποσότητας ($\Delta T/I$) είναι μια ευθεία, η κλίση της οποίας εξαρτάται από τον παράγοντα u . Για $f = 1$ και $\Delta T = 0$ έχουμε την οπτική απόδοση του συλλέκτη

$$\eta_0 = \frac{q_0}{I} \quad (8)$$

δηλαδή την απόδοση ενός συλλέκτη που δεν παρουσιάζει κανενός είδους απώλειες.

3.4 Απορρόφηση ακτινοβολίας από τον συλλέκτη

Για τον υπολογισμό της απόδοσης ενός συλλέκτη από την εξίσωση (7) χρειαζόμαστε να γνωρίζουμε το ρυθμό απορρόφησης q_0 της ηλιακής ροής που είναι συνάρτηση της διαπερατότητας και της ανακλαστικότητας της ηλιακής ροής στην διαχωριστική επιφάνεια γυαλιού - αέρα.

Είναι γνωστό, από την Οπτική, ότι εάν το φως δεν είναι πολωμένο ο συντελεστής ανάκλασης σε μια επιφάνεια με δείκτη διάθλασης $n = \sin\theta_1/\sin\theta_2$ (Νόμος Snell) δίνεται από την γνωστή σχέση Fresnel

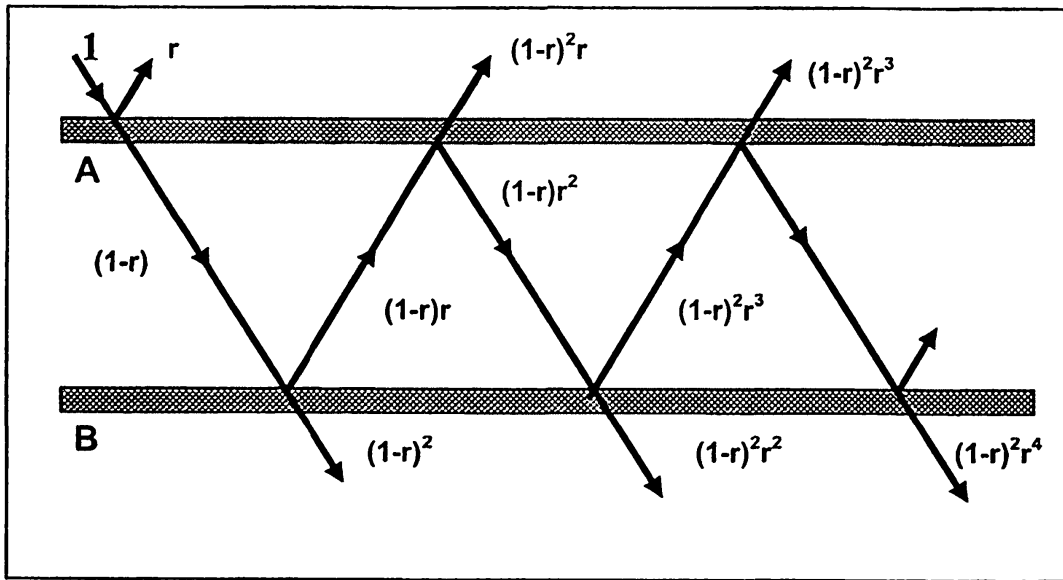
$$r(\theta_1) = \frac{I_r}{I_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right) \quad (9)$$

όπου θ_1 και θ_2 είναι οι γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης. Είναι προφανές ότι η εξίσωση (1) προκύπτει από την εξίσωση (9) για $\theta_1=0$ δηλαδή για κάθετη πρόσπτωση οπότε και $\theta_2=0$.

Στην περίπτωση μιας γυάλινης πλάκας με ορισμένο πάχος και πολωμένο φως μπορούμε να διαχωρίσουμε την διαπερατότητα σε μια συνιστώσα κάθετη στο επίπεδο πρόσπτωσης και μια συνιστώσα παράλληλη προς αυτό. Από το Σχήμα 3.4 φαίνεται ο τρόπος ανάκλασης μιας ακτίνας στις δύο διαχωριστικές επιφάνειες Α και Β γυαλιού - αέρα. Αν υποθέσουμε ότι η αρχική ένταση μιας ακτίνας ήταν 1 και ο συντελεστής ανάκλασης στην πρώτη διαχωριστική επιφάνεια r , τότε η διερχόμενη ακτινοβολία μετά την πρώτη ανάκλαση στην διαχωριστική επιφάνεια Α είναι $(1-r)$ και η ανακλώμενη r , στη συνέχεια το $(1-r)r$ ανακλάται από την διαχωριστική επιφάνεια Β πίσω στην επιφάνεια Α ενώ το $(1-r)(1-r)$ διαπερνά την επιφάνεια Β κ.ο.κ. Έτσι για τον συντελεστή διαπερατότητας λόγω ανάκλασης στην επιφάνεια θα έχουμε:

$$\tau_r = (1-r)^2 \sum_{n=0}^{\infty} r^{2n} = \frac{(1-r)^2}{(1-r^2)} = \frac{1-r}{1+r} \quad (10)$$





Σχήμα 3.4: Ανάκλαση στις διαχωριστικές επιφάνειες A και B.

Από την εξίσωση (10) εύκολα προκύπτει για τις δύο συνιστώσες της ακτινοβολίας

$$r_{\perp} = \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}} \quad \text{και} \quad r_{\parallel} = \frac{1-r_{\parallel}}{1+r_{\parallel}} \quad (11)$$

Ο συντελεστής διαπερατότητας λόγω ανάκλασης, αρχικά μη πολωμένης ακτινοβολίας, είναι η μέση τιμή των δύο συναρτήσεων:

$$r_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}} + \frac{1-r_{\parallel}}{1+r_{\parallel}} \right) \quad (12)$$

Για N γυάλινες πλάκες εύκολα βρίσκεται ότι

$$r_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1-r_{\perp}}{1+(2N-1)r_{\perp}} + \frac{1-r_{\parallel}}{1+(2N-1)r_{\parallel}} \right) \quad (13)$$

Ο συντελεστής διαπερατότητας r_r δεν παίρνει υπόψη του την απορρόφηση της ακτινοβολίας από την ίδια την γυάλινη πλάκα. Αν ορίσουμε γι αυτό το φαινόμενο έναν συντελεστή

$$\tau_a = e^{-\lambda x}; \quad \lambda = k/\cos\theta_2 \quad (k \text{ συντελεστής απόσβεσης})$$

τότε έχουμε για τον συντελεστή διαπερατότητας

$$\tau = \tau_r \cdot \tau_a$$

(14)



Προσεγγιστικά, μπορούμε επίσης να βρούμε την απορροφητικότητα του καλύμματος από τη σχέση

$$\alpha \approx 1 - \tau_a \quad (15)$$

και την ανακλαστικότητα του καλύμματος από τη σχέση

$$\rho \equiv 1 - (\alpha + \tau) \tau_a - \tau = \tau_a(1 - \tau_r) \quad (16)$$

Ο ρυθμός απορρόφησης ακτινοβολίας q_o ανά ώρα, μετρώντας την ηλιακή ακτινοβολία I σε (MJ/m^2) μπορεί τώρα να γραφεί:

$$q_o = I_d \tau_d R_d(\theta) + I_s \tau_s \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + g(I_d + I_s) \tau_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (17)$$

όπου β είναι η κλίση του συλλέκτη με το οριζόντιο επίπεδο, g είναι ο παράγοντας ανακλαστικότητας του εδάφους και $R_d(\theta)$ είναι ο λόγος της ακτινοβολίας που δέχεται μια επιφάνεια με γωνία πρόσπτωσης θ , ως προς την ακτινοβολία που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια. Δηλαδή

$$R_d(\theta) = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta}$$

Από την εξίσωση (15) εύκολα φαίνεται ότι ο πρώτος όρος αντιστοιχεί στην άμεση ακτινοβολία ο δεύτερος όρος στην έμμεση (διάχυτη) και ο τρίτος στην ακτινοβολία που προέρχεται από σκέδαση στο έδαφος και την ατμόσφαιρα. Οι παράγοντες $(1 + \cos \beta)/2$ και $(1 - \cos \beta)/2$ εκφράζουν το μέρος του ουρανού και του εδάφους που "βλέπει" ο συλλέκτης. Στην πράξη συνήθως θέτουμε

$$\tau_d \approx \tau_s \approx \tau_g \approx \tau_a \quad (18)$$

οπότε η εξίσωση (15) γίνεται

$$q_o = \tau \left[I_d R_d + I_s \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + g(I_d + I_s) \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right] \quad (19)$$

που μπορεί να χρησιμοποιηθεί πιο εύκολα για αριθμητικούς υπολογισμούς. Όταν οι υπολογισμοί δεν χρειάζεται να γίνουν με μεγάλη ακρίβεια τότε προσεγγιστικά μπορεί να ορίσει κανείς μια μέση τιμή για τον συντελεστή διαπερατότητας οπότε η εξίσωση (19) μπορεί και να γραφεί σαν

$$q_o = \bar{\tau} I \quad (20)$$



όπου συνήθως σαν 1 θεωρείται η άμεση ακτινοβολία I_d σε (MJ/m^2) και $\bar{\tau} = \tau_a$. Είναι προφανές ότι η εξίσωση (20) θα δίνει μια καλή προσέγγιση της εξίσωσης (19) τις ημέρες με μεγάλη ηλιοφάνεια για τις οποίες ισχύει $I_d \gg I_s$.

Στην εξίσωση (19) ορίζοντας το $\tau = \tau_r, \tau_a$ πήραμε μόνο τον συντελεστή απορρόφησης του καλύμματος και δεν λάβαμε υπ' όψιν μας και τους συντελεστές απορρόφησης της μαύρης πλάκας. Μπορεί να αποδειχθεί ότι, αν ορίσουμε με ρ_m την ανακλαστικότητα του καλύμματος για προσπίπτουσα ακτινοβολία από την κάτω πλευρά και τ_m τον συντελεστή απορρόφησης της μαύρης πλάκας για μήκη κύματος s , τότε

$$\tau_m = \frac{\alpha_s}{1 - (1 - \alpha_s)\rho_m} \quad (21)$$

όπου α_s είναι η απορροφητικότητα της μαύρης πλάκας στο μήκος κύματος s . Στην πράξη χρησιμοποιούμε συνήθως την προσέγγιση

$$\tau_m = 1,01 \alpha_s \quad (22)$$

Το ποσοστό της ακτινοβολίας που απορροφάται τελικά από το συλλέκτη μπορεί, με βάση τις (14) και (22), να πάρει τη μορφή

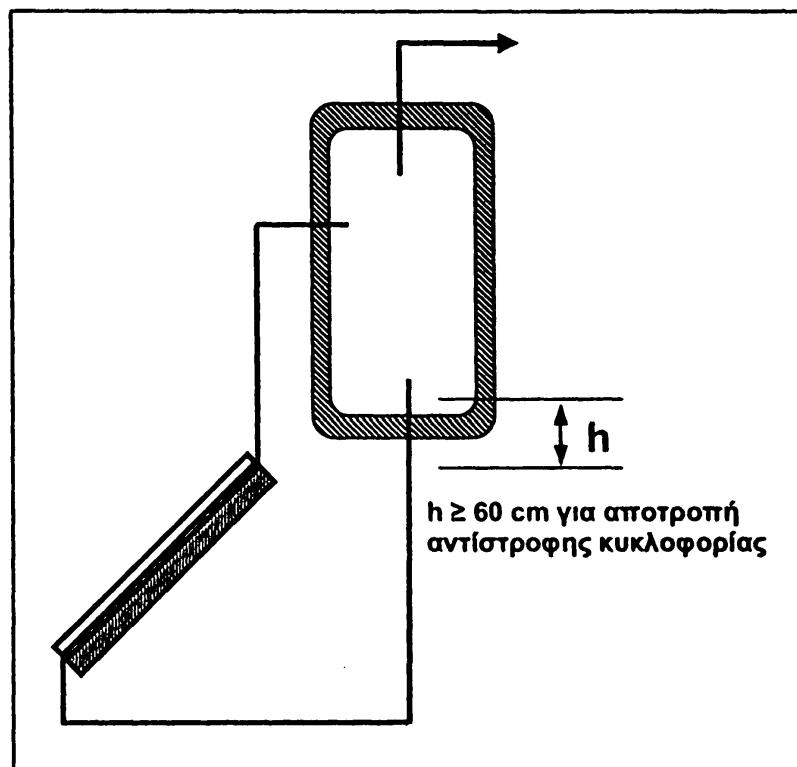
$$\tau_m = \tau \tau_m = 1,01 \tau \tau_a t_s$$

3.5 Εφαρμογές

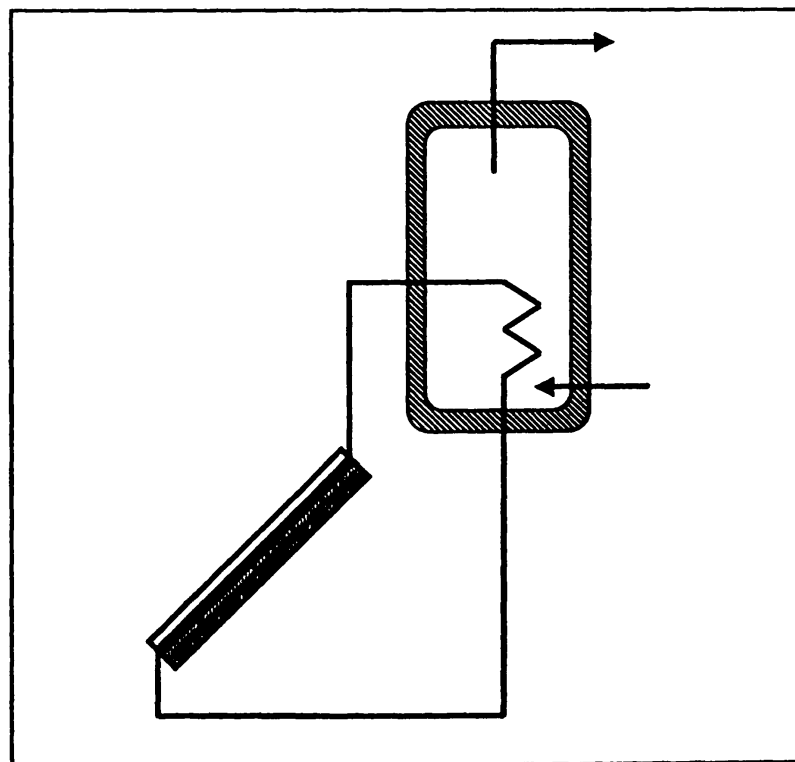
Οι πιο συνήθεις εφαρμογές ηλιακών συστημάτων είναι τα συστήματα για θέρμανση νερού οικιακής χρήσης που λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες $T < 100$. Διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες : α) Τα συστήματα ανοικτού κυκλώματος β) Τα συστήματα κλειστού κυκλώματος. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.5, στο σύστημα ανοικτού κυκλώματος το νερό χρήσης θερμαίνεται κατά την διέλευσή του μέσα από τον ίδιο τον ηλιακό συλλέκτη. Αντίθετα στην διάταξη κλειστού κυκλώματος (Σχήμα 3.6) το νερό που καταναλώνεται είναι διαφορετικό από το ρευστό που κυκλοφορεί μέσα στο συλλέκτη. Η θέρμανσή του επομένως γίνεται με την βοήθεια εναλλάκτη θερμότητας. Το προτέρημα αυτής της διάταξης είναι ότι το ρευστό του συλλέκτη μπορεί να είναι υγρό διαφορετικό από το νερό ή και αέρας. Έτσι σε περίπτωση που χρειάζεται μπορούν να προστεθούν σ' αυτό αντιδιαβρωτικό, αντιπηκτικό κ.λπ.

Η κυκλοφορία του ρευστού είτε γίνεται με φυσική ροή, θερμοσιφωνικό φαινόμενο, όταν το δοχείο αποθήκευσης είναι πάνω από το συλλέκτη, είτε με κυκλοφορητή όταν το δοχείο αποθήκευσης είναι κάτω από το συλλέκτη. Οπότε το σύστημα είναι βεβαιασμένης κυκλοφορίας. Για το σύστημα αυτό υπάρχουν διάφορες παραλλαγές ανάλογα με τον τρόπο τροφοδότησης του ρευστού του συλλέκτη.





Σχήμα 3.5: Διάταξη θερμοσίφωνα ανοικτού κυκλώματος.

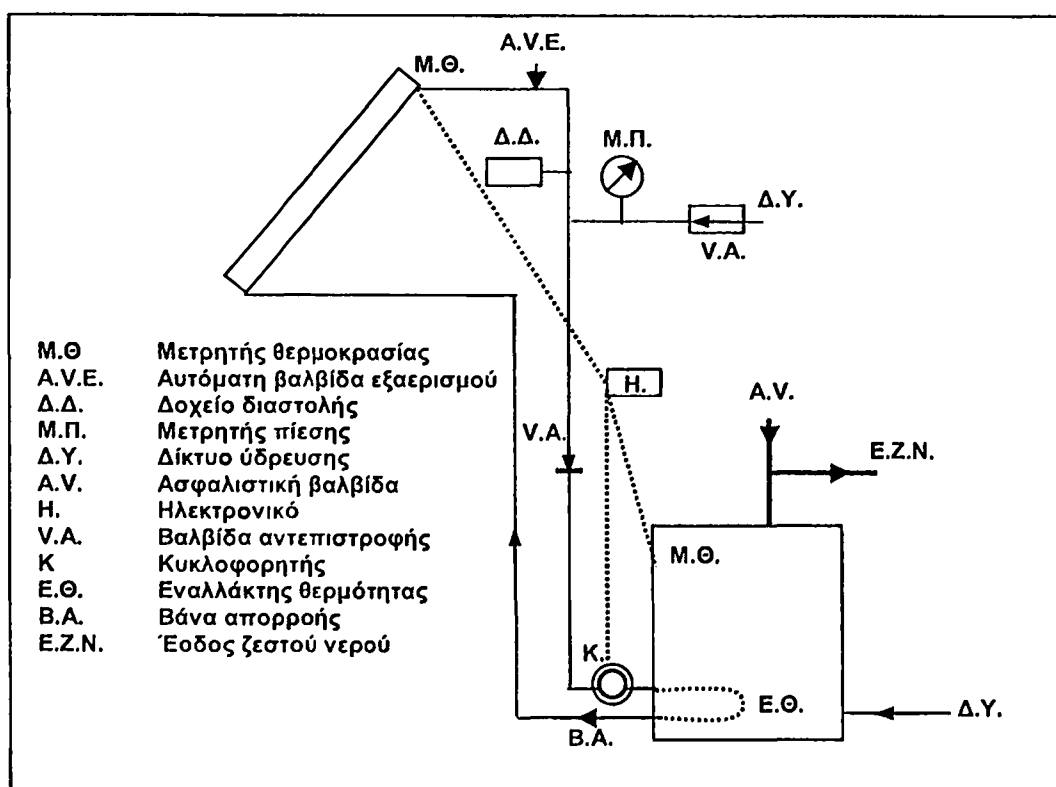


Σχήμα 3.6: Διάταξη θερμοσίφωνα κλειστού κυκλώματος.

Έτσι διακρίνουμε τα ακόλουθα συστήματα :

- α) Αεριζόμενα, όταν η τροφοδοσία του συλλέκτη γίνεται από ένα ανοικτό δοχείο που βρίσκεται πάνω από το υψηλότερο σημείο του κυκλώματος.
- β) Μη αεριζόμενα, όταν η τροφοδοσία του συλλέκτη γίνεται με κλειστό κύκλωμα και το ρευστό δεν έρχεται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Είναι προφανές ότι στην περίπτωση αυτή πρέπει να υπάρχει δοχείο διαστολής για την διόγκωση του ρευστού, βαλβίδες αντεπιστροφής και υπερχειλίσσης για την περίπτωση βρασμού καθώς και δυνατότητα απορροής. Ένας βασικός τύπος τέτοιου ηλιακού συστήματος δίνεται στο Σχήμα 3.7. Το δοχείο αποθήκευσης μπορεί να είναι τριπλής ενέργειας οπότε μπορεί να συνδεθεί με εναλλάκτη με το σύστημα κεντρικής θέρμανσης ή με ηλεκτρική αντίσταση.



Σχήμα 3.7: Σχεδιάγραμμα εγκατάστασης ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού.

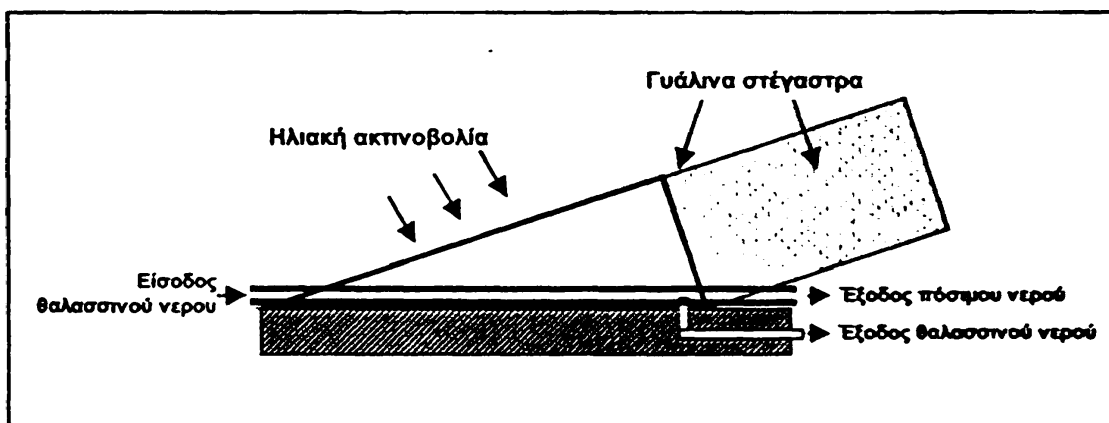
Για θερμοκρασίες του νερού χρήσης από 60 ως 70 °C μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλοί ή επιλεκτικοί επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες. Όταν απαιτούνται θερμοκρασίες της τάξης των 90 °C χρησιμοποιούνται συλλέκτες κενού.

Αρκούν 2 m² επιπέδων ηλιακών συλλεκτών για να καλυφθούν οι ανάγκες σε ζεστό νερό μίας οικογένειας 2 ατόμων. Θερμαίνοντας νερό με τη βοήθεια ενός τετραγωνικού μέτρου ηλιακού συλλέκτη εξοικονομούνται ετησίως από 200 έως 600 kWh ηλεκτρικής ενέργειας.



Στην Ελλάδα πωλούνται ετησίως περισσότεροι από 50.000 ηλιακοί θερμοσίφωνες. Στη χώρα μας βρίσκεται εγκατεστημένη συλλεκτική επιφάνεια 2.700.000 m² που αντιστοιχεί στο 30% της επιφάνειας των ηλιακών συλλεκτών της ΕΕ. Οι εξαγωγές των Ελλήνων κατασκευαστών είχαν απορροφήσει το 1994 το 35% της παραγωγής. Με τη σημερινή χρήση ενεργητικών ηλιακών συστημάτων από 800.000 οικογένειες στη χώρα μας, αποφεύγεται η εκπομπή περισσότερων από 1,5 εκατ. τόνων CO₂ ετησίως.

Άλλη συνήθης εφαρμογή ηλιακής ενέργειας σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι η αφαλάτωση του νερού με ηλιακούς αποστακτήρες (Σχήμα 3.8). Οι αποστακτήρες αυτοί είναι δεξαμενές (ή μικρές λίμνες) που περιέχουν το νερό που πρόκειται να αφαλατωθεί. Καλύπτονται με γυάλινα ή πλαστικά κεκλιμένα στέγαστρα στα οποία επικάθονται και υγροποιούνται οι υδρατμοί που εξατμίζονται από την επίδραση της ακτινοβολίας. Το αφαλατωμένο νερό συγκεντρώνεται στους συλλεκτικούς αγωγούς.



Σχήμα 3.8: Ηλιακός αποστακτήρας.

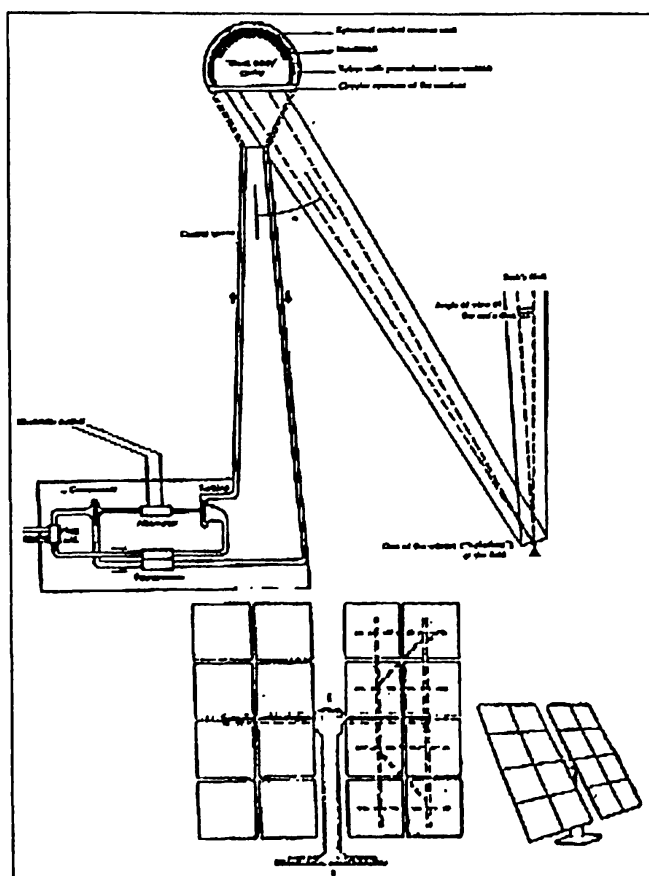
Το σύστημα συλλέκτης - εναλλάκτης - αποθηκευτής έχει χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή ψυκτικών μηχανημάτων που μπορούν να χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για κλιματισμό. Η τεχνική και η γνώση σ' αυτή την περιοχή δεν είναι αρκετά προχωρημένη. Χρησιμοποιείται η αρχή του ψυγείου. Διάλυμα αμμωνίας ή Βρωμιούχου Λιθίου (LiBr) θερμαίνεται και εξατμίζεται στον συλλέκτη. Ακολουθεί συμπύκνωση του ψυκτικού, εκτόνωση και δημιουργία ψύξης. Στην συνέχεια το ψυκτικό υλικό επιστρέφει στους συλλέκτες για θέρμανση και επανάληψη του κύκλου.

Για τη δημιουργία μέσων και υψηλών θερμοκρασιών $T \sim 100-400$ °C χρησιμοποιούνται συγκεντρωτικοί συλλέκτες, φακοί, κάτοπτρα ή ανακλαστήρες. Συνήθως συναντιούνται στους ηλιακούς πύργους και τους ηλιακούς φούρνους. Γενικά, συστήματα που χρησιμοποιούν πολλά κάτοπτρα για την δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών δεν υπάρχουν πάρα πολλά λόγω της περιπλοκότητας που παρουσιάζουν και του κόστους κατασκευής των. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για πειραματισμό και αργότερα σαν ηλιακοί φούρνοι για την παραγωγή πολύ καθαρών

ουσιών Σήμερα έχουν εξελιχθεί σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εγκαταστάσεις αυτές έχουν σαν βασικό στοιχείο τον ηλιοστάτη (Heliostat), ο οποίος είναι ένας ανακλαστήρας επιφάνειας γύρω στο $3,6 \text{ m}^2$, συνδεδεμένος σ' ένα σύστημα περιστροφής (Σχήμα 3.9).

Το σύστημα περιστροφής μπορεί να περιστρέψει τον ηλιοστάτη και στο οριζόντιο αλλά και στο κατακόρυφο επίπεδο έτσι ώστε να παρακολουθεί συνέχεια τον ήλιο και να ανακλά την προσπίπτουσα ακτινοβολία σ' έναν ειδικό συλλέκτη. Ο συλλέκτης αυτός είναι τοποθετημένος στην κορυφή ενός πύργου ύψους γύρω στα 50 με 60 m και αναπτύσσει θερμοκρασίες γύρω στους 530°C , οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ατμού και την κίνηση ατμοστροβίλου - ηλεκτρογεννήτριας. Για συνεχή παραγωγή ενέργειας, όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια ή και κατά τη νύχτα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και συμβατικό καύσιμο.

Το αρνητικό σ' αυτά τα συστήματα είναι ότι χρειάζονται μεγάλες εκτάσεις για την εγκατάσταση των ανακλαστήρων και η περιστροφή τους πρέπει να είναι καλά προγραμματισμένη και να γίνεται με ακρίβεια. Για τις δύο γνωστές εγκαταστάσεις που λειτουργούν σήμερα στον Adriano Ιταλία και στην Cesa της Ισπανίας, έχουμε για μεν το Adriano ισχύ 1 MW και εμβαδόν κατόπτρων 6.200 m^2 για δε την Cesa ισχύ 10 MW και εμβαδόν 9.828 m^2 .



Σχήμα 3.9: Πύργος-συλλέκτης με ατμογεννήτρια και πεδίο ηλιοστατών.



Μια άλλη συνήθης εφαρμογή είναι τα παθητικά δομικά συστήματα. Σ' αυτά ηλιακός συλλέκτης μπορεί να λειτουργήσει έχοντας σαν ρευστό τον αέρα για την θέρμανση χώρων.

Όταν η κυκλοφορία του αέρα είναι φυσική (όχι βεβιασμένη) τότε το σύστημα λέγεται παθητικό. Χαρακτηριστικές εφαρμογές γίνονται από ορισμένα απαραίτητα στοιχεία μιας οικοδομής που εκτός από τον οικοδομικό ρόλο τους έχουν την δυνατότητα να παίρνουν την ηλιακή ενέργεια και να την αποδίδουν σε χρησιμοποιήσιμη ενέργεια χωρίς την παρεμβολή κάποιων άλλων συστημάτων μετατροπής ή μεταφοράς. Στην πράξη, σαν τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται οι στέγες και οι τοίχοι που έχουν ηλιακό προσανατολισμό. Η επιφάνειά τους βάφεται με σκούρο χρώμα και καλύπτεται αεροστεγανά με γυαλί σε απόσταση ορισμένων εκατατοστών 15-20 cm ώστε να υπάρχει η δυνατότητα εύκολης κυκλοφορίας αέρα στο διάκενο. Το στοιχείο μπορεί να κατασκευαστεί από οικοδομικά υλικά τσιμέντο ή τούβλο ή μπορεί να είναι ένα στοιχείο με νερό.

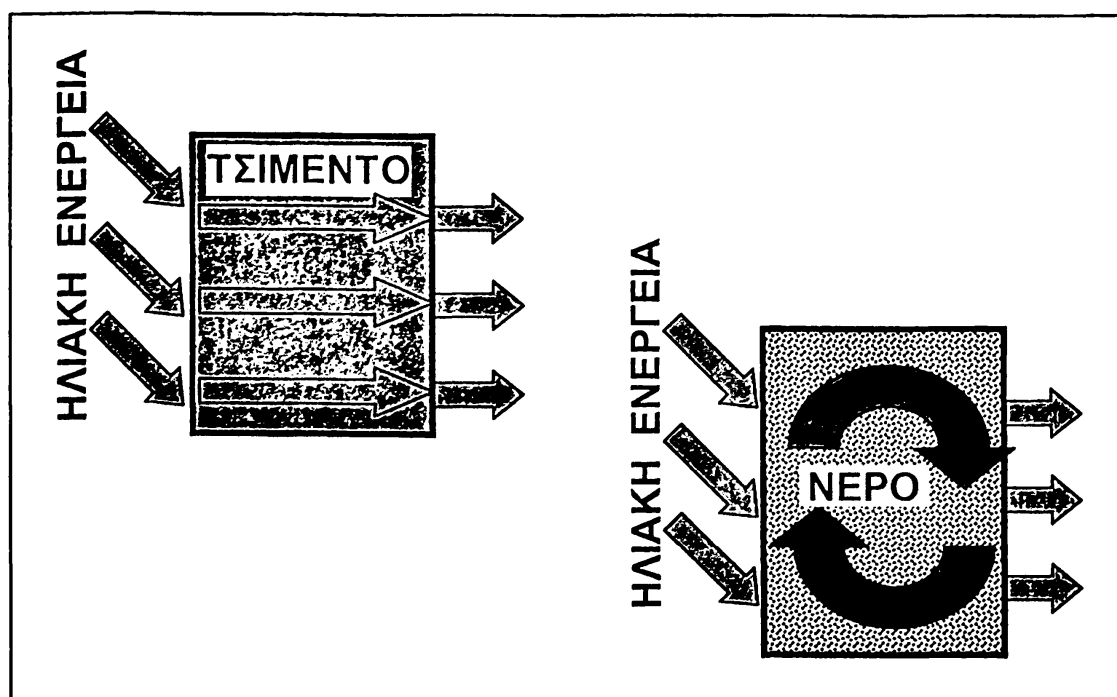
Το μέγεθος της επιφάνειας του στοιχείου εξαρτάται από τρεις παράγοντες: το τοπικό κλίμα, τη γεωγραφική θέση και τις απώλειες θερμότητας του χώρου θέρμανσης. Το τοπικό κλίμα επηρεάζει την κατασκευή γιατί οι απώλειες θερμότητας είναι συνάρτηση της διαφοράς της εσωτερικής και της εξωτερικής θερμοκρασίας. Σε ψυχρά κλίματα χρειαζόμαστε επομένως περισσότερη επιφάνεια απορρόφησης. Το γεωγραφικό πλάτος προσδιορίζει και τον προσανατολισμό του ηλιακού στοιχείου κι εδώ παίζουν ρόλο η αρχιτεκτονική καθώς και η αισθητική της οικοδομής. Οι απώλειες θερμότητας του χώρου είναι επίσης ένας καθοριστικός παράγοντας γιατί εάν ο χώρος που πρέπει να θερμανθεί από το παθητικό σύστημα έχει καλή θερμομόνωση θα χρειάζεται λιγότερη θερμική ενέργεια και αυτό μεταφράζεται σε λιγότερη απορροφητική επιφάνεια για το παθητικό σύστημα.

Σαν γενικό κανόνα έχουμε ότι, για ένα κλίμα με μέτριους χειμώνες (θερμοκρασίες 2-7 °C) χρειάζονται μεταξύ 0,2 – 0,6 τετραγωνικά μέτρα επιφάνειας απορρόφησης για κάθε τετραγωνικό μέτρο δαπέδου θερμαινόμενου χώρου. Για παθητικά στοιχεία με νερό οι επιφάνειες μπορεί να είναι κατά 30% μικρότερες λόγω της καλής θερμικής αγωγιμότητας του νερού. Λόγω του θερμοσιφωνικού φαινομένου, η αγωγή θερμότητας προς το εσωτερικό γίνεται καλύτερα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.10, και επομένως οι απώλειες είναι λιγότερες.

Η αποδοτικότητα ενός παθητικού συστήματος εξαρτάται κύρια από το πάχος του στοιχείου, από το υλικό κατασκευής του και από το χρώμα της επιφάνειάς του. Εάν ο τοίχος είναι δυσανάλογα μεγάλος μπορεί να υπερθερμαίνει έναν χώρο εάν είναι πολύ παχύς ή έχει ακατάλληλο χρώμα μπορεί να μην είναι αποδοτικός. Για κάθε υλικό υπάρχει ένα βέλτιστο πάχος όπως φαίνεται παρακάτω.



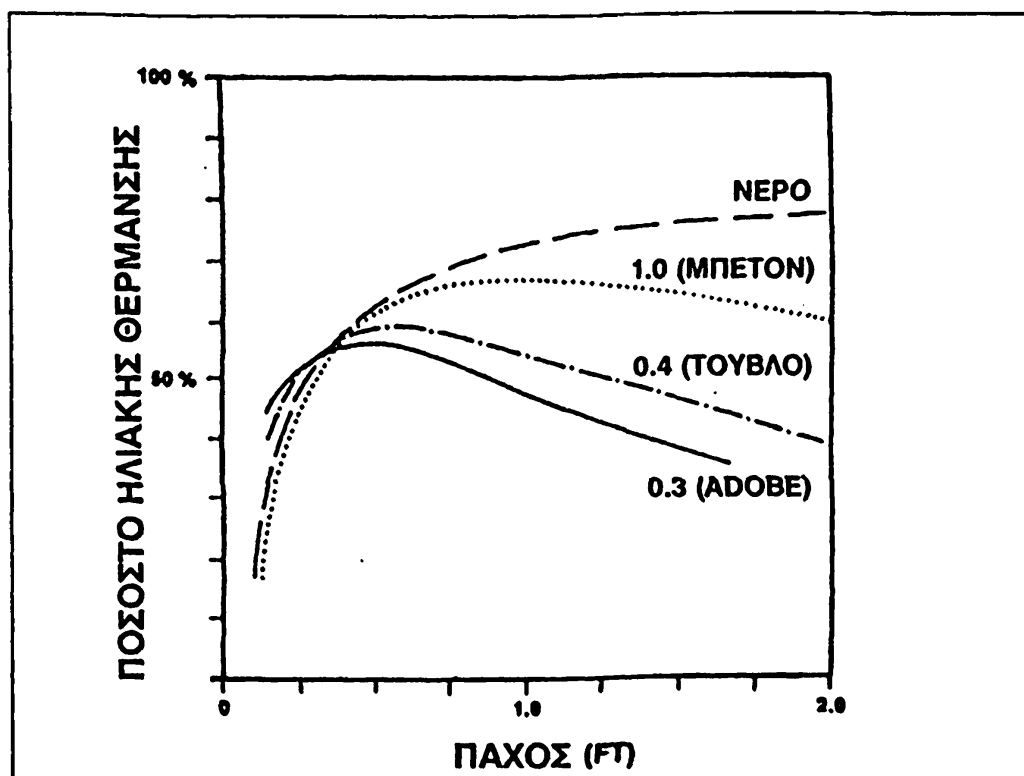
Υλικό	Πάχος (cm)
Τούβλο	24-26
Τούβλο (συμπαγές)	20 -30
Μπετόν (πυκνό)	30 -45
Νερό	16



Σχήμα 3.10: Ηλιακοί παθητικοί τοίχοι από τσιμέντο και από νερό.

Στο Σχήμα 3.11 δίνεται η ποσοστιαία απορρόφηση ενέργειας για ένα χρόνο σαν συνάρτηση του πάχους του στοιχείου για υλικά με διαφορετική αγωγιμότητα.

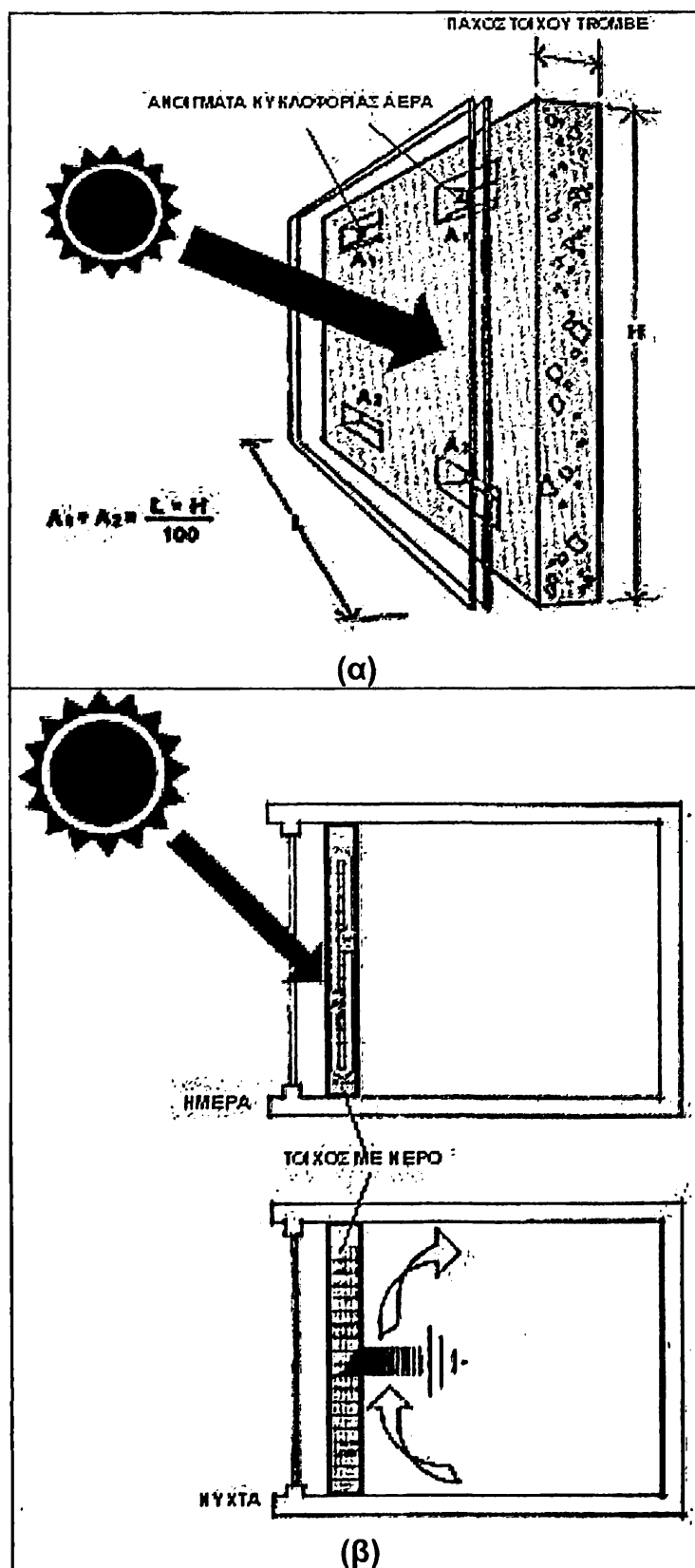
Γενικά ισχύει ότι το νερό και το μπετόν είναι τα πιο καλά υλικά για παθητικά συστήματα. Το στοιχείο πρέπει να είναι βαμμένο με σκοτεινό χρώμα ώστε να απορροφά όσο το δυνατόν περισσότερη ακτινοβολία.



Σχήμα 3.11: Απορρόφηση ενέργειας σαν συνάρτηση του πάχους.

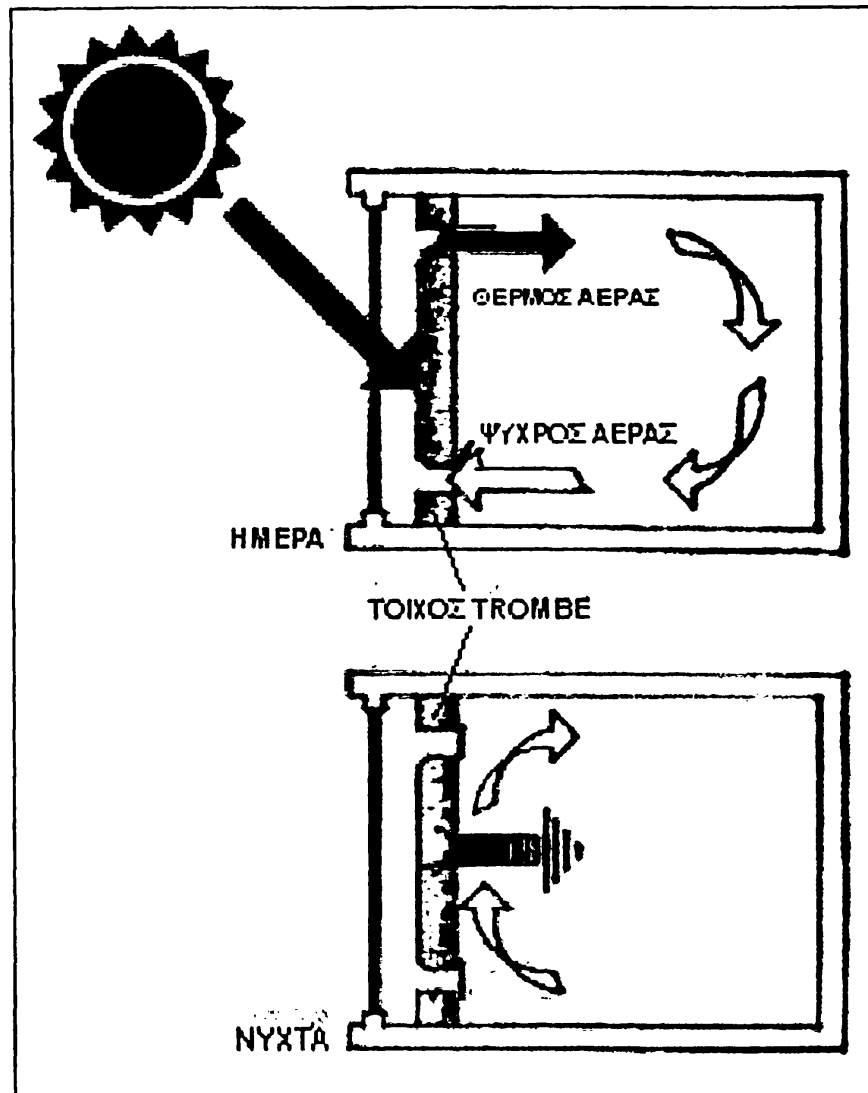
Πρέπει να έχει ανοίγματα πάνω και κάτω, διαστάσεων 1% της επιφάνειας του στοιχείου για να γίνεται η κυκλοφορία του αέρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12 και πρέπει να κλείνουν τα ανοίγματα τις βραδινές ώρες για να μην γίνεται αντιστροφή της κυκλοφορίας του αέρα όπως στο Σχήμα 3.13.

Τα στοιχεία αυτά με τα ανοίγματα λέγονται και τοίχοι Trombe από τον Γάλλο πρωτοκατασκευαστή τους Michel Trombe.



Σχήμα 3.12: (α) Τοίχος Trombe. (β) Παθητικό στοιχείο από νερό με ανοίγματα για την κυκλοφορία του αέρα.





Σχήμα 3.13: Κυκλοφορία αέρα μέρα-νύχτα με ανοιχτά και κλειστά ανοίγματα.

3.6 Μετατροπή απ' ευθείας σε ηλεκτρισμό

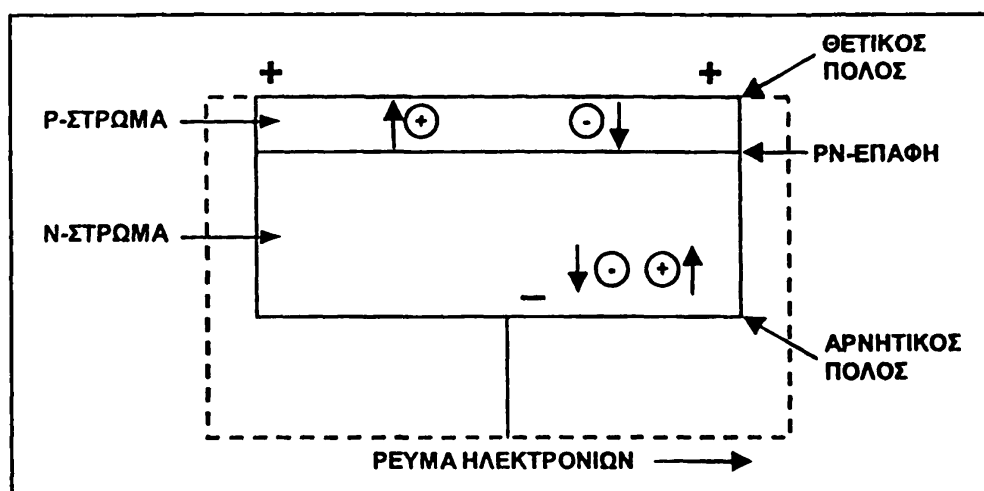
Η μετατροπή ηλιακής ενέργειας απ' ευθείας σε ηλεκτρισμό είναι αρκετά απλή γιατί γίνεται με την βοήθεια θερμοζευγών και έτσι δεν στηρίζεται σε μηχανική κίνηση. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή, στην απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου από ένα κρύσταλλο κατά την απορρόφηση ενός ενεργητικού φωτονίου. Υπάρχουν ακόμη δύο φαινόμενα που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια απ' ευθείας σε ηλεκτρική, όμως μέσω του θερμικού κύκλου. Τα φαινόμενα αυτά είναι το θερμοηλεκτρικό και το θερμοϊονικό. Το θερμοηλεκτρικό εμφανίζεται όταν θερμανθεί η επιφάνεια που ενώνονται δύο διαφορετικά μέταλλα. Το θερμοϊονικό εμφανίζεται όταν θερμανθεί ένα μέταλλο που είναι κλεισμένο σε δοχείο με χαμηλή πίεση. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο έχει βρει ευρεία εφαρμογή στα ηλιακά στοιχεία. Υπερτερεί των δύο άλλων φαινομένων γιατί δεν το περιορίζει ο θερμικός κύκλος Carnot, στον οποίο ο συντελεστής απόδοσης είναι ανάλογος

του πηλίκου $1-T_2/T_1$. Ένας άλλος λόγος είναι ότι αντιδρά αμέσως στην ηλιακή ροή σε αντίθεση με τα άλλα δύο φαινόμενα που χρειάζονται ορισμένο χρόνο για να φτάσουν στην κανονική θερμοκρασία λειτουργίας. Υπάρχουν δύο τύποι φωτοηλεκτρικού φαινομένου: το εξωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο απελευθερώνονται ηλεκτρόνια από την επιφάνεια ενός υλικού κατά την απορρόφηση ενός φωτονίου και το εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο κατά το οποίο τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται μέσα στο ίδιο το υλικό. Το εξωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο εμφανίζεται σε μέταλλα στο κενό όταν θερμαίνονται σε μεγάλες θερμοκρασίες. Τα ηλεκτρόνια φεύγουν από την επιφάνεια του μετάλλου και εάν υπάρχει απέναντί τους ένα ηλεκτρόδιο με θετικό δυναμικό επιταχύνονται προς αυτό. Το εξωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ηλιακών στοιχείων γιατί δεν δημιουργεί εσωτερικό δυναμικό που χρειάζεται για να οδηγήσει τα ηλεκτρόνια στην άνοδο. Το εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο εμφανίζεται στους ημιαγωγούς. Η απορρόφηση ενός ενεργητικού φωτονίου δημιουργεί ένα ηλεκτρόνιο και μια οπή. Όταν το φωτόνιο έχει ενέργεια μεγαλύτερη από την ενέργεια του χάσματος τότε τα φορτία αυτά μεταφέρονται στη ζώνη αγωγιμότητας όπου κινούνται για ορισμένο χρονικό διάστημα μέχρι να αλληλοαναιρεθούν. Εάν υπάρχει ένα εσωτερικό φράγμα δυναμικού τότε τα φορτία αυτά διαχωρίζονται και κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Το εσωτερικό φράγμα δυναμικού μπορεί να δημιουργηθεί στην επιφάνεια ένωσης δύο ημιαγωγών διαφορετικού τύπου. Έτσι αν στα άκρα τους συνδεθούν ηλεκτρόδια τότε θα δημιουργείται ένα ρεύμα.

Ένας από τους πιο συνηθισμένους ημιαγωγούς είναι το Πυρίτιο (Si) που έχει σθένος 4. Εάν βάλουμε μέσα σ' αυτό μια μικρή ανομοιογένεια από ένα άλλο στοιχείο, για παράδειγμα ένα άτομο από Αρσένιο (As) που έχει σθένος 5, τότε τα 4 από τα 5 ηλεκτρόνια του σχηματίζουν δεσμούς με τα 4 ηλεκτρόνια του πυριτίου ενώ το 5ο παραμένει ασύνδετο κι έτσι μπορεί με λίγη ενέργεια (0,5 eV) να μεταφερθεί στην αγωγή ζώνη και να κινείται ελεύθερα. Αυτός ο ημιαγωγός λέγεται τύπος n -Silicon γιατί τα κινούμενα φορτία είναι ηλεκτρόνια. Με τον ίδιο τρόπο θα μπορούσαμε να φτιάξουμε έναν p-τύπο ημιαγωγού όπου τα κινούμενα φορτία είναι οπές βάζοντας μέσα στο πυρίτιο μια ανομοιογένεια από άτομα του στοιχείου Βόριο (B) που έχει 3-σθενή ηλεκτρόνια. Τα τρία ηλεκτρόνια από το πυρίτιο θα μετακινηθούν να σχηματίσουν δεσμούς με τα τρία ηλεκτρόνια του Βορίου ενώ το τέταρτο θα παραμείνει χωρίς δεσμό. Τον δεσμό αυτό θα προσπαθήσει να αποκαταστήσει ένα ηλεκτρόνιο από γειτονικό δεσμό αφήνοντας πίσω του μια οπή. Τον νέο κενό δεσμό θα προσπαθήσει να καλύψει ένα άλλο ηλεκτρόνιο από γειτονικό δεσμό κ.ο.κ. Έτσι η οπή αυτή θα κινείται μέσα στο κρύσταλλο και με λίγη ενέργεια (0,5 eV) μπορεί να μεταφερθεί στην αγωγή ζώνη. Η ένωση δύο τέτοιων ημιαγωγών σχηματίζει στην διαχωριστική τους επιφάνεια την λεγόμενη np- επαφή. Επειδή από την μια μεριά έχουμε πληθώρα θετικών φορτίων και από την άλλη πληθώρα αρνητικών, σχηματίζεται στην ένωση ένα εσωτερικό δυναμικό γύρω στο $0,5 \approx 0,6$ mV που δρα στα ελεύθερα φορτία κατευθύνοντάς τα προς τα άκρα. Όταν τα δύο άκρα συνδεθούν με αγωγούς όπως στο Σχήμα 3.14 έχουμε την παραγωγή ρεύματος. Το ηλιακό φωτοστοιχείο (solar cell) είναι ακριβώς μια τέτοια np-επαφή. Το φως που πέφτει στην επαφή ελευθερώνει θετικά και



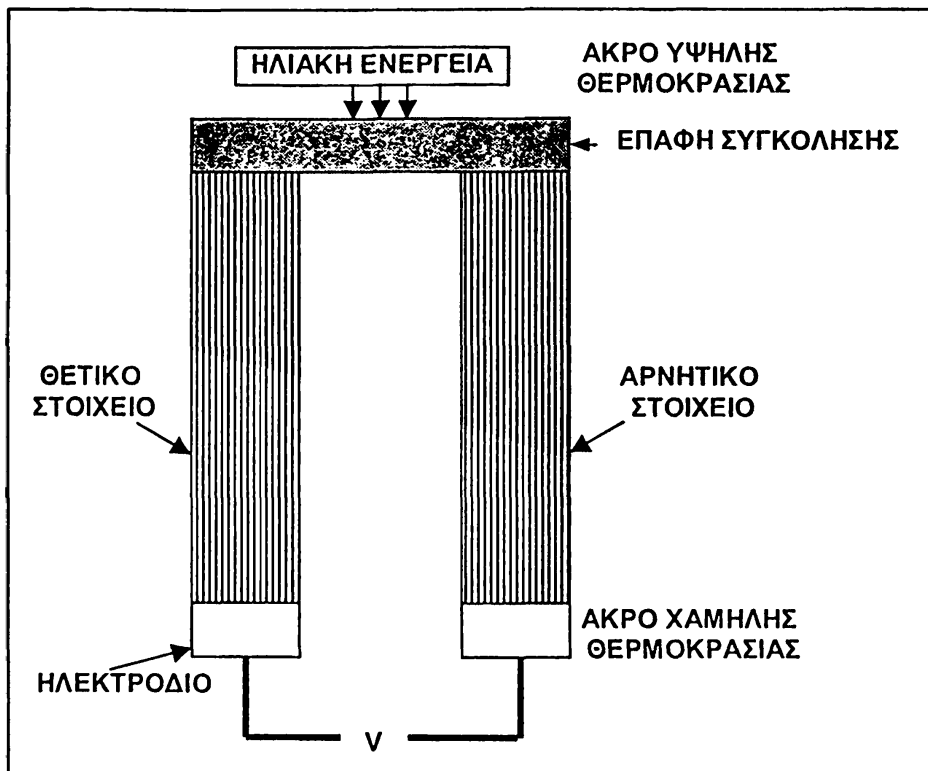
αρνητικά φορτία. Συγκεκριμένα κάθε φωτόνιο ελευθερώνει ένα ζεύγος φορτίων ένα ηλεκτρόνιο και μια οπή ανεξάρτητα από το πόσο η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια του χάσματος.



Σχήμα 3.14: Φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Η μεγαλύτερη ηλεκτρική μετατροπή γίνεται για μήκη κύματος φωτός γύρω στα 0,7 μm (7.000 Å) που είναι κοντά στο μήκος κύματος μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας (0,6 μm). Οι μετρήσεις δείχνουν ότι λόγω της ανικανότητας φωτονίων μεγάλου μήκους κύματος και της μικρής αποδοτικότητας φωτονίων μικρού μήκους κύματος μόνο το 45% από το ηλιακό φως χρησιμοποιείται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Από αυτό το ποσοστό μόνο το μισό αξιοποιείται σαν ηλεκτρική ενέργεια. Αν συνυπολογιστούν και οι απώλειες φορτίων λόγω αλληλοανίρεσης, οι απώλειες φωτός λόγω ανάκλασης και οι απώλειες ρεύματος, ο συντελεστής απόδοσης ενός ηλιακού στοιχείου κυμαίνεται γύρω στα 15%.

Στα θερμοηλεκτρικά στοιχεία το ρεύμα δημιουργείται σαν αποτέλεσμα ενός δυναμικού επαφής που εμφανίζεται στην επιφάνεια ένωσης δύο μετάλλων όταν θερμανθούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Η δυνατότητα εμφάνισης ενός τέτοιου δυναμικού δίνεται από τον συντελεστή α του Seebeck. Όλα τα μέταλλα έχουν ένα τέτοιον συντελεστή και η καλή επιλογή δύο μετάλλων μπορεί να αξιοποιήσει σωστά αυτό το φαινόμενο.



Σχήμα 3.15: Θερμοηλεκτρικό στοιχείο.

Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία διαφέρουν από τα ηλιακά στοιχεία στο ότι πρέπει να αναπτυχθούν μεγάλες θερμοκρασίες στην διαχωριστική τους επιφάνεια και επομένως χρειάζονται συγκεντρωτικούς καθρέφτες για αξιοποιήσιμη αποδοτικότητα. Η κατασκευή ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου φαίνεται στο Σχήμα 3.15. Από το ένα μέρος χρησιμοποιείται ένα μέταλλο με αρνητικό συντελεστή Seebeck από το άλλο μέρος ένα μέταλλο με θετικό συντελεστή Seebeck ώστε να μπορεί να σχηματιστεί μεγάλη διαφορά δυναμικού.

Τα δύο μέταλλα στερεώνονται πάνω σε μια πλάκα από την οποία μεταδίδεται η θερμότητα πάνω σ' αυτά. Είναι προφανές ότι η πλάκα πρέπει να έχει καλή θερμική αγωγιμότητα. Στα ασύνδετα άκρα των μετάλλων προσκολλούνται τα ηλεκτρόδια που απάγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Ο συντελεστής απόδοσης ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου δίνεται από τον τύπο

$$\eta_{\max} = \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2} \right) \left(\frac{R - 1}{R + \frac{T_2}{T_1}} \right) \quad (22)$$

όπου R είναι ο λόγος της εξωτερικής προς την εσωτερική αντίσταση Ohm. Είναι προφανές ότι ο συντελεστής απόδοσης περιορίζεται από τον κύκλο Carnot και από

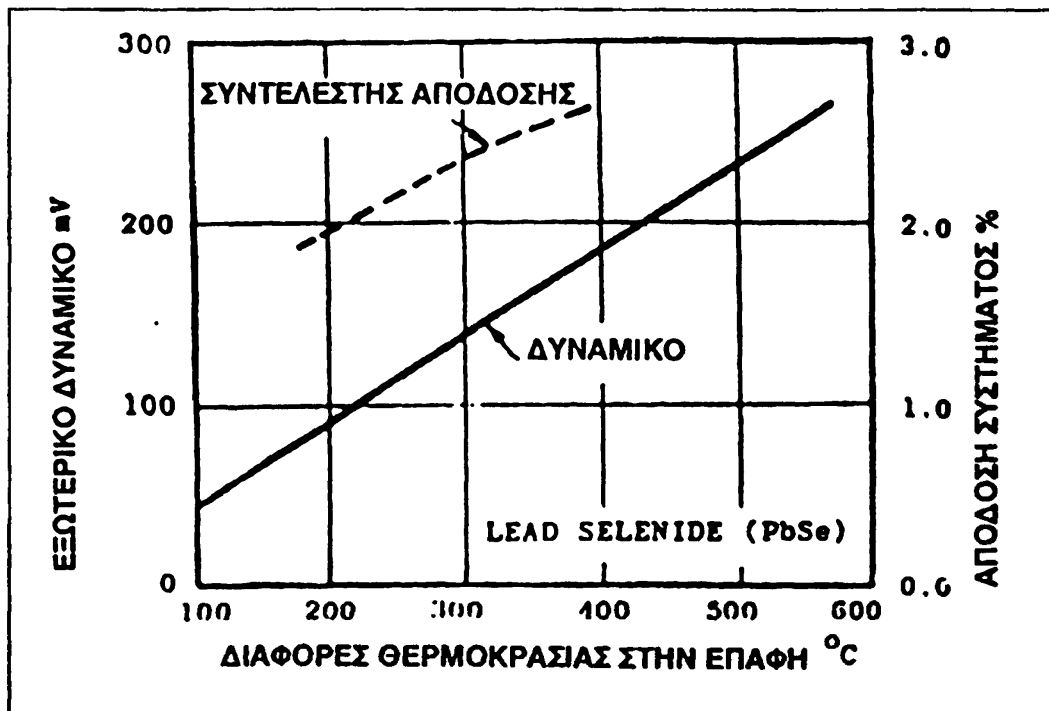


το φαινόμενο Joule. Ένας απλός τύπος που χρησιμοποιείται και στην πράξη για τον συντελεστή απόδοσης εξαρτάται από τον συντελεστή Seebeck

$$\eta_{\max} = \frac{\eta_c (R-1)}{\left(\frac{\alpha (R+1)}{\alpha' - \eta_c (R-1)} \right)} \quad (23)$$

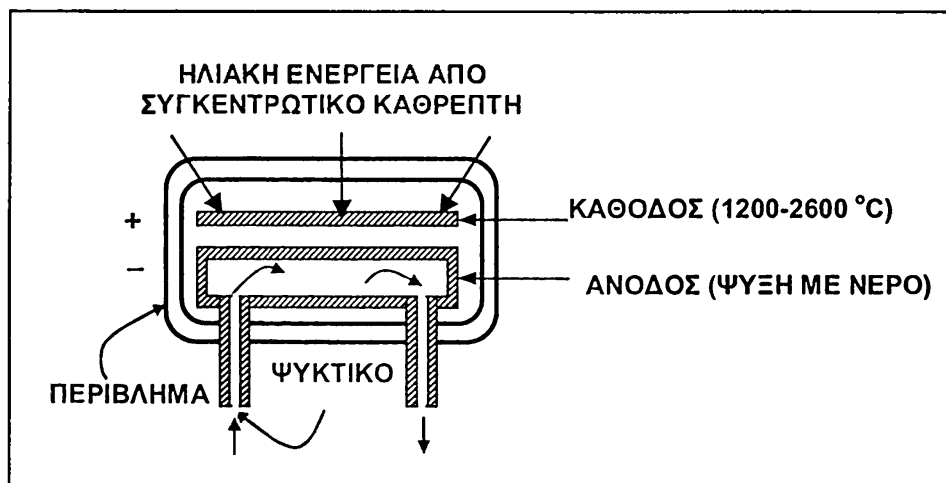
όπου η_c είναι ο συντελεστής Carnot και α' είναι ένας συντελεστής για την θερμαινόμενη επαφή. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.16 η απόδοση ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου είναι αρκετά μικρή και γι αυτό χρησιμοποιούνται πολλά μαζί σε σειρά ή παράλληλα. Σ' αυτές τις περιπτώσεις όμως παρουσιάζονται αρκετά προβλήματα στις συνδέσεις τους επειδή έχουν διαφορετικούς συντελεστές διαστολής.

Τέλος το θερμοϊονικό στοιχείο στηρίζεται στην αρχή της ηλεκτρονικής λυχνίας. Το βασικό πρόβλημα κι εδώ είναι η αναγκαία ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιών 2.000~2.700 °C που χρειάζεται για την παραγωγή ηλεκτρονίων στην κάθοδο. Αυτές οι θερμοκρασίες μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο με συγκεντρωτικούς καθρέπτες μεγάλης ακρίβειας. Ένα άλλο πρόβλημα είναι η απόσταση ανόδου - καθόδου.



Σχήμα 3.16: Απόδοση θερμοηλεκτρικού στοιχείου.





Σχήμα 3.17: Διάταξη θερμοϊονικού στοιχείου.

Από την μια μεριά η απόσταση αυτή πρέπει να είναι πολύ μικρή για να μην σχηματίζεται νέφος φορτίου στο διάκενο, από την άλλη πρέπει να είναι μεγάλη ώστε να μπορεί να αναπτυχθεί μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των. Ένα πρότυπο θερμοϊονικού στοιχείου φαίνεται στο Σχήμα 3.17. Ο συντελεστής απόδοσής του κυμαίνεται γύρω στα 4% για θερμοκρασία λειτουργίας 2.500°C. Λόγω της μικρής αποδοτικότητας και των άλλων τεχνολογικών προβλημάτων το θερμοϊονικό στοιχείο δεν έχει αξιοποιηθεί αρκετά στις εφαρμογές.

3.7 Ηλιακές λίμνες

Σε μια ομάδα λιμνών στην Ουγγαρία παρατηρήθηκε το 1905 το φαινόμενο μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του πυθμένα (50 °C σε βάθος 1,3 m) και της επιφάνειας (20 °C). Στις έρευνες που έγιναν διαπιστώθηκε ότι οι λίμνες αυτές είχαν μια διαβάθμιση όσον αφορά την περιεκτικότητά τους σε αλάτι με διαφορετικές διαστρωματώσεις συγκεντρωτικότητας. Άλλες τέτοιες λίμνες παρατηρήθηκαν στην Washington με θερμοκρασίες 50 °C σε βάθος 2 m στην Ανταρκτική με 25 °C στον πυθμένα και -20 °C στην επιφάνεια και στο Ισραήλ.

Από τις μελέτες που έγιναν εξηγήθηκε το φαινόμενο αυτό σαν αποτέλεσμα της διαφορετικής πυκνότητας του νερού σε ορισμένα στρώματα που εμποδίζουν την δημιουργία ανοδικών ρευμάτων προς την επιφάνεια. Έτσι η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας δημιουργεί αύξηση θερμοκρασίας και επομένως θέρμανση του νερού. Το νερό όμως αυτό κρατά την θερμοκρασία του γιατί λόγω των διαστρωματώσεων του αλατιού δεν δημιουργούνται ανοδικά ρεύματα που θα είχαν σαν αποτέλεσμα την μεταφορά του προς την επιφάνεια και συνεπώς την πτώση της θερμοκρασίας του λόγω εξάτμισης, μεταφοράς, ακτινοβολίας και αγωγής.

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί για την δημιουργία ηλιακών λιμνών ή δεξαμενών:

Κατασκευάζεται μια δεξαμενή το βάθος και οι διαστάσεις της οποίας εξαρτώνται



από το ποσό ενέργειας προς αποθήκευση. Ο πυθμένας βάφεται μαύρος για καλή απορροφητικότητα και τα πλευρικά τοιχώματα μονώνονται για να μην υπάρχουν απώλειες θερμότητας από αυτά. Μετά η δεξαμενή γεμίζεται με νερό και διάλυμα αλατιού, έτσι που σε κάποιο βάθος να σχηματιστεί μια διαχωριστική επιφάνεια.

Για τα κατώτερα στρώματα χρησιμοποιείται πυκνό διάλυμα πυκνότητας 30% ενώ για τα ανώτερα στρώματα χρησιμοποιούνται αραιότερα διαλύματα. Έτσι σχηματίζεται μια μονωτική ζώνη που εμποδίζει την δημιουργία ανοδικού ρεύματος προς την επιφάνεια. Υπολογίζεται ότι στα ανώτερα στρώματα για την δημιουργία μονωτικής ζώνης αρκούν 8 στρώματα αραιότερης πυκνότητας ανά μέτρο. Κάτω από αυτήν την ζώνη υπάρχει η ζώνη μεγάλης πυκνότητας ή ζώνη μεταφοράς. Επειδή δεν υπάρχουν ανοδικά ρεύματα μέχρι την επιφάνεια η θερμοκρασία στην ζώνη μεταφοράς ανεβαίνει με την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και παραμένει σταθερά. Έτσι μεταξύ της επιφάνειας και του πυθμένα της δεξαμενής υπάρχει μια διαφορά θερμοκρασίας που μπορεί να αξιοποιηθεί.

Είναι προφανές ότι το αλάτι θα διαχέεται συνεχώς προς την επιφάνεια και επομένως θα πρέπει να αντικαθίσταται στην ζώνη μεταφοράς. Αυτό όμως πρέπει να γίνεται με προσοχή ώστε να μην ανακατεύονται τα στρώματα. Το διάλυμα συνήθως ρίχνεται από ειδικό διαχυτή κατασκευασμένο από δύο επίπεδες επιφάνειες στο κέντρο των οποίων καταλήγει ο σωλήνας γεμίσματος. Έτσι η ροή του διαλύματος γίνεται οριζόντια και δεν υπάρχει ανάμιξη των στρωμάτων. Πέρα από την σωστή κατασκευή για την καλή λειτουργία της λίμνης χρειάζεται και αρκετή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Είναι γνωστό ότι η απορρόφηση του ηλιακού φάσματος από το νερό διαφέρει ανάλογα με το μήκος κύματος του φωτός. Για παράδειγμα το μέρος του φάσματος μεταξύ 0,3 και 0,6 μm δεν απορροφάται στα πρώτα μέτρα νερού ενώ μήκη κύματος $\lambda > 0,6$ μm απορροφώνται σε μερικά cm. Έτσι αυτά τα μήκη δεν προσφέρουν στην θέρμανση της λίμνης.

Γενικά η ακτινοβολία που περνάει το βάθος του 1 m είναι περίπου το 35% της συνολικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην λίμνη και αυτό το ποσό είναι και το ανώτερο όριο στην θερμική απόδοσή της. Προσεγγιστικά είναι δυνατόν να εκφραστεί η απορρόφηση σαν άθροισμα εκθετικών όρων με διαφορετικούς συντελεστές. Έτσι για την απορρόφηση της ηλιακής ροής σαν συνάρτηση του βάθους μπορούμε να γράψουμε

$$I(x) = (1-r)I_0 \sum_{j=1}^4 \eta_j e^{-\mu_j x} \quad (24)$$

όπου I_0 είναι η ένταση της ηλιακής ροής πάνω στην επιφάνεια της λίμνης και r συντελεστής ανάκλασης. Οι σταθερές η_j και μ_j δίνονται στον Πίνακα 3.1 και εκφράζουν αντίστοιχα την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας σε σχέση με την πυκνότητα και το βάθος της δεξαμενής.



Πίνακας 3.1: Αριθμητικές τιμές των συντελεστών η_i της εξίσωσης (24).

$n_1 = 0,237$	$\mu_1 = 0,32 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$	$\lambda_1 = 0,2 - 0,6 \text{ }\mu\text{m}$
$n_2 = 0,193$	$\mu_2 = 4,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$	$\lambda_2 = 0,6 - 0,75 \text{ }\mu\text{m}$
$n_3 = 0,167$	$\mu_3 = 3,0 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$	$\lambda_3 = 0,75 - 0,9 \text{ }\mu\text{m}$
$n_4 = 0,179$	$\mu_4 = 3,5 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$	$\lambda_4 = 0,9 - 1,2 \text{ }\mu\text{m}$

Είναι φανερό ότι οι συντελεστές η_i εκφράζουν το ποσοστό απορρόφησης σε κάθε περιοχή μήκους κύματος. Επομένως το άθροισμα $\Sigma \eta_i = 77,6\%$ υποδηλώνει ότι το 22,4% της ακτινοβολίας απορροφάται στην επιφάνεια της λίμνης και επομένως δεν προσφέρει τίποτα στην θερμική της απόδοση.

Άλλα προβλήματα που επηρεάζουν την απόδοση των ηλιακών λιμνών είναι : α) Ο κυματισμός στην επιφάνεια που μπορεί να προέλθει από βροχή και δυνατό αέρα. Η επιβάρυνση της λίμνης με διάφορα αντικείμενα όπως χαρτιά, φύλλα, ξύλα κ.λπ. που λόγω της διαφορετικής πυκνότητάς τους επιπλέουν σε διαφορετικά βάθη και επομένως μειώνουν την οπτική της διαπερατότητα.

Η ανάπτυξη μικροοργανισμών ή φυτών που επιδρούν όχι μόνο στην οπτική διαπερατότητα αλλά και στην αύξηση της θερμοκρασίας και γενικά κάθε άλλη επιβάρυνση. Είναι γεγονός ότι τα προβλήματα αυτά δεν είναι σοβαρά και εύκολα μπορούν να υπερνικηθούν αν παρθούν τα κατάλληλα μέσα για την αντιμετώπισή τους. Σαν βασικό πρόβλημα παραμένει το κόστος κατασκευής και ο κατάλληλος τρόπος εκμετάλλευσης. Τελειώνοντας, αναφέρουμε ότι η επιλογή του αλατιού σαν μέσον για την δημιουργία διαστρωμάτων δεν είναι υποχρεωτική. Τώρα διαφαίνεται μια εξέλιξη αντικατάστασής του με παραφίνη, που είναι μεν πιο ακριβή σαν υλικό, χρειάζεται όμως λιγότερη ποσότητα γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μικρότερο αριθμό στρωμάτων.



3.8 Ασκήσεις

1. Να υπολογιστεί ο συντελεστής ανάκλασης $r(\theta_1)$ μιας επιφάνειας γυαλιού για γωνίες $0^\circ \rightarrow 90^\circ$ σε βήματα $\Delta\theta = 20^\circ$. Ο συντελεστής διάθλασης του γυαλιού είναι $n = 1,526$.

Λύση

$$r(\theta_1) \frac{I_r}{I_i} = \frac{1}{2}(r_\perp + r_\parallel) = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right) \quad (1)$$

όταν $\theta_1 = 0$ τότε από τον νόμο του Snell

$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

έχουμε $\sin \theta_2 = 0$; $\theta_2 = 0$;

Από την (1) έχουμε για το

$$\sin^2(\theta_2 - \theta_1) = (\sin \theta_2 \cos \theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_2)^2$$

$$\sin^2(\theta_2 + \theta_1) = (\sin \theta_2 \cos \theta_1 + \sin \theta_1 \cos \theta_2)^2$$

$$r_\perp = \left(\frac{\sin(\theta_2 - \theta_1)}{\sin(\theta_2 + \theta_1)} \right)^2 = \left(\frac{\cos \theta_1 - \cos \theta_2 \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2 \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}} \right)^2 = \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2$$

Για τον ίδιο λόγο

$$r_\parallel = \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2 \text{ οπότε } r(0) = r_0 = \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2$$

Παρατηρούμε ότι για $\theta_1 = 0$; η συνεισφορά $r_\perp = r_\parallel$

Με τον ίδιο τρόπο βρίσκουμε ότι για

$$\theta_1 = 60^\circ; \sin \theta_2 = \frac{\sin \theta_1}{n} = \frac{\sqrt{3}/2}{1,526} = \frac{r(3)}{3,052};$$

$$\theta_2 = 34,577$$



$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} = 0,1855 \quad r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} = 0,0014$$

και επομένως $r(60^\circ) = \frac{1}{2}(r_{\perp} + r_{\parallel}) = 0,0935$

$$\theta_1 = 90^\circ; \sin \theta_2 = \frac{1}{1,526}; \theta_2 = 40,943$$

ΟΠΟΤΕ

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} = \left(\frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_2} \right)^2 = 1$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} = \left(\frac{-\cos \theta_2}{-\cos \theta_2} \right)^2 = r(90^\circ) = \frac{1}{2}(r_{\perp} + r_{\parallel}) = 1$$

Με τον ίδιο τρόπο σχηματίζουμε και τις ενδιάμεσες τιμές και γράφουμε τον πίνακα

θ_1	θ_2	$r_{\perp}$	$r_{\parallel}$	$r(\theta_1)$
0	0	0,0434	0,0434	0,0434
20	12,952	0,0509	0,0364	0,0436
40	24,912	0,0826	0,0159	0,0493
60	34,577	0,1855	0,0014	0,0935
80	40,192	0,5486	0,2351	0,3919
90	40,943	1,00	1,00	1,000

Είναι προφανές ότι υπάρχουν ορισμένες χαρακτηριστικές τιμές στις οποίες συμβαίνουν σημαντικές μεταβολές στο $r(\theta_1)$. Για παράδειγμα $(\theta_1 + \theta_2) = 0^\circ$; $(\theta_1 + \theta_2) = 90^\circ$, $(\theta_1 - \theta_2) = 0^\circ$, $(\theta_1 - \theta_2) = 90^\circ$. Η $(\theta_1 - \theta_2) = 0^\circ$ και η $(\theta_1 + \theta_2) = 0^\circ$ δίνουν το αρχικό σημείο. Η $(\theta_1 - \theta_2) = 90^\circ$ θα είχε σαν αποτέλεσμα $\tan(\theta_1 - \theta_2) \rightarrow \infty$ και επομένως. Επειδή όμως στην πράξη η $\theta_1 \leq 90^\circ$, είναι και $\theta_1 - \theta_2 < 90^\circ$ και έτσι αποκλείεται η περίπτωση να γίνει ο συντελεστής διάθλασης άπειρος. Αντίθετα η περίπτωση $\theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$ είναι πιθανή. Σ' αυτή την περίπτωση έχουμε

$$\tan(\theta_1 + \theta_2) = \tan(90^\circ) = \infty \text{ και } r_{\parallel} = 0^\circ$$



$$\begin{aligned} \text{ή} \\ \cos(\theta_1 + \theta_2) &= \cos \theta_2 \cos \theta_1 - \sin \theta_2 \sin \theta_1 = \cos(90^\circ) = 0 \\ \tan \theta_1 &= \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} = \frac{\sin \theta_1}{\cos(90 - \theta_2)} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_1} = 1 \end{aligned}$$

$\theta_1 = \arctan(1)$ (γωνία Brewster)

που δίνει την τιμή της γωνίας θ_1 όταν $n = 0$. Είναι φανερό ότι η γωνία Brewster δεν είναι τίποτα άλλο από μια γωνία που εκφράζει τις χαρακτηριστικές ιδιότητες του γυαλιού. Σ' αυτή την γωνία υπάρχει μόνο ένας βαθμός πόλωσης, η κάθετη πόλωση $r_{\perp} \neq 0$ ενώ $r_{\parallel} = 0$.

2. Να υπολογισθεί η διαπερατότητα ενός και δύο παραλλήλων γυάλινων καλυμμάτων ενός επίπεδου συλλέκτη. Εάν ο συντελεστής διαθλάσεως είναι $n = 1,526$ οι γωνίες πρόσπτωσης $\theta_1 = 0^\circ$ και 60° και ο συντελεστής απόσβεσης $k = 0 \text{ (m}^{-1}\text{)}$.

Λύση

Επειδή ο συντελεστής απόσβεσης είναι $k = 0$ έχουμε ότι ο οπτικός δρόμος είναι $\lambda = k/\cos \theta_2 = 0$ οπότε

$$T_o = e^{-\lambda x} = e^{-0,0x} = 1 \quad \text{άρα} \quad T = T_r, T_a = T_r$$

$$T_r(0^\circ) = \frac{1-r(0^\circ)}{1+r(0^\circ)} = \frac{1-0,0434}{1+0,0434} = 0,917 \quad T_r(0^\circ) = 91,7\%$$

$$T_r(60^\circ) = \frac{1}{2} \left[\frac{1-r_{\perp}(60^\circ)}{1+r_{\perp}(60^\circ)} + \frac{1-r_{\parallel}(60^\circ)}{1+r_{\parallel}(60^\circ)} \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{1-0,1855}{1,1855} + \frac{1-0,0014}{1,0014} \right]$$

$$T_r(60^\circ) = 0,842 = 84,2\%$$

Για δύο καλύμματα, με εφαρμογή της γενικής σχέσης (13) για $N = 3$, έχουμε

$$T_2(60^\circ) = \frac{1}{2} \left[\frac{1-r(0^\circ)}{1+3r(0^\circ)} + \frac{1-0,00434}{1+0,1302} \right] = 0,846 = 84,6\%$$

$$T_2(60^\circ) = \frac{1}{2} \left[\frac{1-r_{\perp}}{1+3r_{\perp}} + \frac{1-r_{\parallel}}{1+3r_{\parallel}} \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{1-0,1855}{1+3 \times 0,1855} + \frac{1-0,0935}{1+3 \times 0,1855} \right]$$



$$\tau_r(60^\circ) = \frac{1}{2} \left[\frac{1-0,1855}{1+3 \times 0,1855} + \frac{1-0,0935}{1+3 \times 0,1855} \right]$$

3. Για την γωνία των 60° του προηγούμενου προβλήματος να υπολογιστούν, η διαπερατότητα τ_i , η ανακλαστικότητα ρ_i και οι απορροφητικότητα α_i . Το γυάλινο σκέπασμα έχει πάχος $2,5 \text{ mm}$ και συντελεστή απόσβεσης $3,0 \times 10^{-3} (\text{mm}^{-1})$.

Λύση

$$\eta = 1,526 ; \eta = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} ; \theta_1 = 60^\circ$$

$$\sin \theta_2 = \sin \theta_1 = \frac{\sin \theta_1}{\eta} = \frac{\sqrt{3}/2}{1,52} \rightarrow \theta_2 = 34,577 \quad \text{ο οπτικός δρόμος}$$

$$\lambda = \frac{k}{\cos \theta_2} = \frac{3 \times 10^{-3}}{\cos(34,577)}$$

$$\tau_a = e^{-0,089} = 0,915 = 91,5\%$$

Από το προηγούμενο πρόβλημα $\tau_r(60^\circ) = 0,842$ άρα

$$\tau = \tau_r \cdot \tau_a = 0,842 \times 0,915 = 0,77 \rightarrow 77\%$$

Η ακτινοβολία που απορροφάται δίνεται από

$$\alpha = 1 - \tau_a = 1 - 0,915 = 0,085 \rightarrow 8,5\%$$

Απορρόφηση από το ίδιο το γυαλί και η ανακλαστικότητα

$$\rho = 1 - \alpha - \tau = 1 - 0,085 - 0,77 = 0,145 = 14,5\% \text{ Ανάκλαση από το γυαλί}$$

Δηλαδή από την προσπίπτουσα ακτινοβολία 77% περνά το γυαλί. Από τα 23% που δεν το διαπερνούν το 8,5% απορροφάται ενώ το 14,5% ανακλάται. Για $N > 1$ ακολουθείται η ίδια διαδικασία μόνο που τώρα το $\tau_r = f(N)$.

4. Ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης επιφάνειας $A = 1,5 \text{ m}^2$ και κλίσης σε οριζόντιο επίπεδο $\beta = 45^\circ$ δέχεται τις μεσημβρινές ώρες άμεση ακτινοβολία $I_d = 1,8 \text{ MJ/m}^2$ και έμμεση $I_s = 0,4 \text{ MJ/m}^2$ την ώρα. Αν η γωνία πρόσπτωσης τις μεσημβρινές ώρες είναι $\theta_1 = 40^\circ$ και οι συντελεστές $R_d = 2,4$ και $g = 0,6$ να υπολογιστεί η ενέργεια που απορροφά ο συλλέκτης την ώρα.



Λύση

Για τον ολικό συντελεστή διαπερατότητας του γυάλινου καλύμματος έχουμε $\tau = \tau_r \cdot \tau_a$. Για γυαλί πάχους 2,5 (mm) με συντελεστή διάθλασης $n = 1,526$ και συντελεστή απόσβεσης $k = 3 \times 10^{-3}$ (mm⁻¹), έχουμε από το προηγούμενο πρόβλημα

$$\theta_2 = \arcsin(\sin 40^\circ / 1,526) = 24,912^\circ$$

οπτικός δρόμος

$$\lambda = \frac{k}{\cos \theta_2} = \frac{3 \times 10^{-3}}{\cos(34,577)} \quad \tau_a = e^{-k\lambda} = \exp\left(\frac{2,5 \times 3 \times 10^{-3}}{\cos(24,912)}\right) = 0,92$$

$$\tau_r(40^\circ) = \frac{1}{2} \left[\frac{1-0,0826}{1+0,0826} + \frac{1-0,0159}{1+0,0159} \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{0,9174}{1,0826} + \frac{0,9841}{1,0159} \right]$$

$$\tau_r(40^\circ) = \frac{1}{2} [0,843 + 0,97] = 0,818$$

$$\text{οπότε } \tau = \tau_r \tau_a = 0,752$$

Εάν υποθέσουμε ότι

$$q_o = \tau \left[I_d R_d + I_s \left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) + g(I_d + I_s) \left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) \right] =$$

$$q_o = 0,752 \left[2,4 \times 1,8 + 0,4 \left(\frac{1+\sqrt{2/2}}{2} \right) + 0,6 (1,8 + 0,4) \left(\frac{1+\sqrt{2/2}}{2} \right) \right]$$

$$q_o = 0,752 [4,32 + 0,34 + 0,19] \text{ (MJ/m}^2\text{)/h}$$

$$q_o = 3,65 \text{ MJ/m}^2\text{h} \quad \text{και} \quad Q = 3,65 \times 1,5 = 5,48 \text{ MJ/h}$$

Από το πιο πάνω αποτέλεσμα, είναι φανερό ότι εάν παίρναμε το μέρος της ενέργειας που οφείλεται μόνο στην άμεση ακτινοβολία θα είχαμε

$$\overline{q_o} = 0,752 \times 4,32 = 3,25 \text{ MJ/m}^2\text{h}$$

οπότε το ηλίκιο

$$\frac{\overline{q_o}}{q_o} = 0,89 \rightarrow 89\%$$



που δίνει και το λάθος που κάνουμε αν πάρουμε μόνο την άμεση ακτινοβολία. Αν είναι επιθυμητός ένας πιο ακριβής προσδιορισμός τότε το $\tau = \tau_r \cdot \tau_a$ θα έπρεπε να αντικατασταθεί με

$$\tau_{ολ} = \tau_{α_m}$$

όπου α_m είναι η απορροφητικότητα του συλλέκτη στο ορατό και κοντινό υπέρυθρο.

5. Να λυθεί το πιο πάνω πρόβλημα υπολογίζοντας όμως τώρα ότι η μαύρη απορροφητική επιφάνεια έχει συντελεστή απορρόφησης $\alpha_s = 0,9$.

Λύση

Αυτό που αλλάζει στο προηγούμενο πρόβλημα είναι ο συντελεστής τ . Τώρα θα έχουμε

$$\tau_t = \tau_r \tau_a \tau_m \text{ όπου}$$

$$\tau_m = \alpha_s / [1 - (1 - \alpha_s) \rho_m]$$

Υποθέτουμε ότι η ανακλαστικότητα ρ_m του καλύμματος από την κάτω πλευρά δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση (22):

$$\rho_m = \rho = \tau_a - \tau$$

Από το προηγούμενο πρόβλημα έχουμε $\tau = 0,752$, $\tau_a = 0,92$

οπότε $\rho_m = 0,92 - 0,75 = 0,17$ και $\tau_m = 0,9 / [1 - (1 - 0,9)0,17] = 0,9 (1,02) = 0,918$

Πρόσεξε ότι είναι το ίδιο με τον προσεγγιστικό τύπο

$$\tau_m = (1,01) \alpha_s \text{ και } \tau_t = 0,75 \times 0,918 = 0,69$$

Άρα

$$q_o' = \frac{0,69}{0,75} q_o = \frac{0,69}{0,75} 3,65 = 3,36 \text{ MJ/m}^2\text{h}$$



3.9 Προβλήματα

1. Να βρεθεί το πάχος του γυαλιού που καλύπτει έναν ηλιακό συλλέκτη, αν ο δείκτης διάθλασής του είναι $n = 1,525$, ο συντελεστής απόσβεσής του είναι $K = 3,0 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ και η απορροφητικότητα του για γωνία $\theta_1 = 40^\circ$ είναι $\alpha = 3\%$.
2. Σ' ένα ηλιακό συλλέκτη από φθοριούχο πολυβινύλιο πάχους 3 mm και συντελεστή απόσβεσης 5 m^{-1} , η γωνία Brewster είναι $55,407^\circ$. Να βρεθούν η διαπερατότητα τ , η ανακλαστικότητα ρ_x και η απορροφητικότητα α_x του καλύμματος για γωνία πρόσπτωσης $\theta_1 = 60^\circ$.
3. Να υπολογιστεί η ηλιακή ακτινοβολία για μια πρωινή ώρα που απορροφά επίπεδος κεκλιμένος συλλέκτης με κάλυμμα από γυαλί, με βάση τα ακόλουθα δεδομένα: $n = 1,526$, $\beta = 60^\circ$, $K_L = 0,0370$, $\theta_1 = 21^\circ$, $R_d(21^\circ) = 2,21$, $\rho_\theta = 0,7$, α_s (απορροφητικότητα από τη μαύρη πλάκα) $= 0,95$, $I_d = 1,54 \text{ MJ/m}^2$,

$$I_s = 0,27 \text{ MJ/m}^2, \tau_s = \tau_g = \frac{2}{3} T_d$$

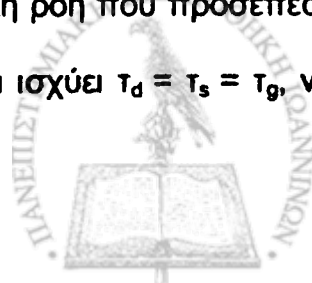
4. Ένας οικολόγος έχει στο σπίτι του ηλιακό θερμοσίφωνα επιφάνειας $1,5 \text{ m}^2$. Τα άλλα στοιχεία της εγκατάστασης είναι:

$$\beta = 45^\circ, R_d = 2,4, g = 0,6, \eta = 1,52, L = 2,5 \text{ mm}, K = 3 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}, \alpha_s = 0,9,$$

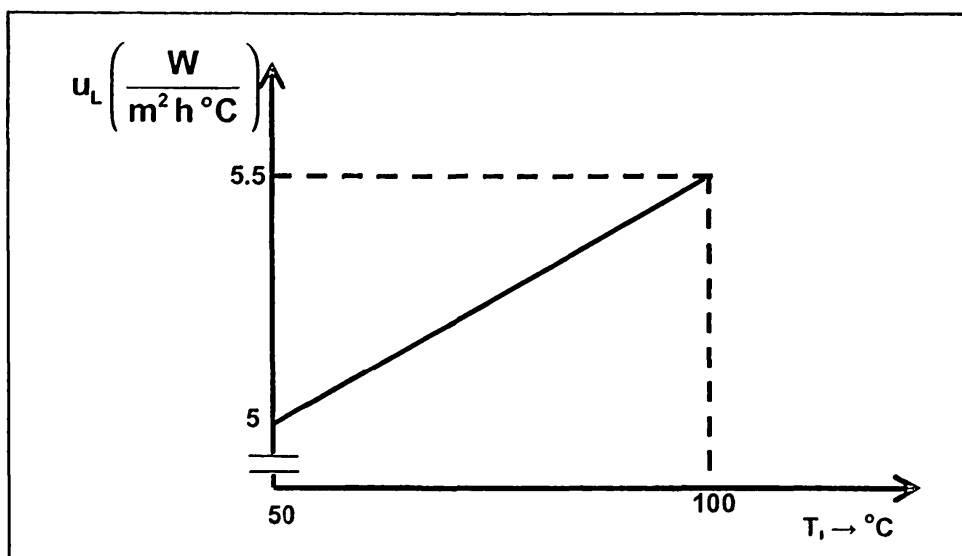
$$I_s = 0,2 I_d, \tau_s = \tau_g = \frac{1}{4} T_d$$

και μέση γωνία πρόσπτωσης για τους 4 καλοκαιρινούς μήνες $\theta_1 = 40^\circ$. Αν η μέση ηλιακή ακτινοβολία είναι 1 Langley/min και η ηλιοφάνεια 600 min την ημέρα, πόσα χρήματα εξοικονομεί, αν η τιμή μιας kWh είναι $0,12 \text{ Ευρώ}$;

5. Επίπεδος συλλέκτης γωνίας κλίσης 60° είναι τοποθετημένος σε μέρος με γεωγραφικό πλάτος 40° Βόρειο και προσανατολισμό προς το Νότο ($\gamma = 0^\circ$). Η άμεση ηλιακή ροή που προσέπεσε σε οριζόντια επιφάνεια στον ίδιο τόπο στις 15 Μαΐου 1993 μια πρωινή ώρα ήταν $1,54 \text{ MJ/m}^2\text{h}$ και η έμμεση ανέρχονταν στο 18% της άμεσης. Το κάλυμμα του συλλέκτη είναι κατασκευασμένο από γυαλί πάχους 4 mm, δείκτη διάθλασης 1,526 και συντελεστή απόσβεσης 4 m^{-1} . Η πλάκα απορρόφησης έχει απορροφητικότητα $\alpha_s = 0,9$.
 - α) Να βρεθεί ο λόγος R_d της ωριαίας άμεσης ηλιακής ροής που προσέπεσε στον παραπάνω συλλέκτη προς την ωριαία άμεση ηλιακή ροή που προσέπεσε σε οριζόντια επιφάνεια την παραπάνω πρωινή ώρα.
 - β) Αν η ανακλαστικότητα του εδάφους είναι $g = 0,9$ και ισχύει $\tau_d = \tau_s = \tau_g$, να βρεθεί η ωριαία ροή που απορρόφησε η πλάκα.



6. Να βρεθεί κατά πόσο μεταβάλλεται η θερμοκρασία του νερού ενός ηλιακού θερμοσίφωνα χωρητικότητας 120 lt μια μεσημβρινή ώρα μιας τυπικής μέρας του Σεπτεμβρίου με βάση τα ακόλουθα δεδομένα: $I_d = 1,8 \text{ MJ/m}^2$, $I_s = 0,4 \text{ MJ/m}^2$, $\beta = 45^\circ$, $R_d = 1,5$, $\tau_d = \tau_s = \tau_g = 0,9$, $g = 0,9$, $A = 4 \text{ m}^2$, $f = 1$, $u_L(T_i - T_a) = 0,98 \text{ MJ/m}^2\text{h}$. Ο συντελεστής απωλειών του εναλλάκτη/συλλέκτη του δοχείου αποθήκευσης είναι 0,1.
7. Ένας ηλιακός συλλέκτης με κινούμενο ρευστό (50% νερό, 50% προπυλένιο) με σημείο βρασμού $T = 146^\circ\text{C}$ δέχεται ολική ακτινοβολία $I_t = 1.150 \text{ W/m}^2\text{h}$ και έχει συντελεστή απορρόφησης $\alpha_o = 0,78$. Αν ξαφνικά πάθει βλάβη ο κυκλοφορητής θα βράσει το ρευστό του συλλέκτη; Ο ολικός συντελεστής απωλειών την ώρα δίνεται από την παρακάτω καμπύλη και $T_a = 38^\circ\text{C}$.



8. Ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης επιφανείας $A = 2 \text{ m}^2$ και χωρητικότητας 5 λίτρων νερού, δεσμεύει ηλιακή ροή $I = 50 \text{ cal/cm}^2\text{h}$ μεταξύ 08:00-09:00 το πρωί της 18^{ης} Σεπτεμβρίου και χρειάζεται ενέργεια $q_{oi} = 5 \text{ cal/cm}^2$ για να φθάσει στη θερμοκρασία λειτουργίας του T_i από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_a = 10^\circ\text{C}$. Αν η οπτική απόδοση του συλλέκτη είναι $\eta_o = 0,5$, ο ρυθμός απώλειας $u_L = 1,5 \text{ cal/cm}^2\text{h}^\circ\text{C}$ και ο συντελεστής απόδοσης του εναλλάκτη $f = 1$ πριν αρχίσει η λειτουργία και $f = 0,5$ κατά τη διάρκεια λειτουργίας, να βρεθούν:
- Η θερμοκρασία λειτουργίας T_i
 - Μετά από πόσο χρόνο θα φτάσει σ' αυτήν;
 - Η θερμοκρασία στο θερμοσίφωνα (120 lt νερό) μετά μια ώρα.
 - Σας φαίνεται λογικό το αποτέλεσμα της γ; Γιατί ;
9. Η ηλιακή ροή που δέχεται ένας ηλιακός τοίχος Trombe στις 3 μεσημεριανές ώρες (12:00-15:00) είναι 1 Langley/min. Ποια πρέπει να είναι η επιφάνειά του έτσι ώστε να μπορεί να αυξήσει κατά 1°C τη θερμοκρασία ενός χώρου εμβαδού



82 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

20 m² και ύψους 3 m. Υποθέστε ότι ο χώρος αυτός δεν έχει θερμικές απώλειες και ότι οι μέσες τιμές της πυκνότητας και της θερμοχωρητικότητάς του είναι $\rho = 10 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ και $c = 2 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$.

10. Ένα φωτοστοιχείο δέχεται ηλιακή ροή 100 mW/cm^2 . Όταν βραχυκυκλώνεται δίνει ρεύμα $I_0 = 1 \text{ Ampere}$ και όταν είναι σε ανοικτό κύκλωμα δίνει τάση $V_0 = 0,866 \text{ Volt}$. Το ρεύμα συνδέεται με την τάση με τη σχέση $I = (\alpha - \beta V^2)$, όπου α και β προσδιοριστέες σταθερές. Ποια πρέπει να είναι η επιφάνειά του, ώστε να έχει μέγιστο συντελεστή απόδοσης $\eta_{\max} = 5.2\%$.

11. Μια ηλιακή λίμνη έχει βάθος 2 m και εμβαδόν 10 m^2 . Η ένταση της ηλιακής ροής είναι 1 Langley/min και το μήκος κύματος $\lambda < 0,8 \text{ }\mu\text{m}$. Όταν υπάρχει ηλιοφάνεια 500 min την ημέρα, ποια είναι η μέγιστη θεωρητική ηλιοφάνεια της λίμνης; (ακτινοβολία που περνά το 1 m). Ποια είναι η κατανομή της ενέργειας που απορροφά σαν συνάρτηση του βάθους σε βήματα των 50 cm; Υποθέστε $\theta_1 = 40^\circ$ και $\eta = 1,33$

$n_1 = 0,234$	$\mu_1 = 0,32 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$	$\lambda_1 = 0,2 - 0,6 \text{ }\mu\text{m}$
$n_2 = 0,193$	$\mu_2 = 4,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$	$\lambda_2 = 0,6 - 0,75 \text{ }\mu\text{m}$
$n_3 = 0,167$	$\mu_3 = 3,9 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$	$\lambda_3 = 0,75 - 0,9 \text{ }\mu\text{m}$
$n_4 = 0,179$	$\mu_4 = 3,5 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$	$\lambda_4 = 0,9 - 1,2 \text{ }\mu\text{m}$

12. Για ποιες θερμοκρασίες εξόδου T_2 θα είχαμε σε ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο με δοσμένη θερμοκρασία εισόδου T_1 και συντελεστή (εξωτ./εσωτ. αντίστασης) $R = 2$ έναν συντελεστή απόδοσης $\eta_{\max} = 12,5\%$. Εξήγησε το αποτέλεσμα σου.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ



12-11-53

TO: SAC, NEW YORK
FROM: SAC, NEW YORK
SUBJECT: [illegible]

RE: [illegible]
[illegible]

ALL INFORMATION CONTAINED
HEREIN IS UNCLASSIFIED
DATE 12-11-53 BY [illegible]



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

4.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια είδαμε ότι η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε μια άλλη μορφή ενέργειας στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται μέσω του θερμικού κύκλου Carnot και επομένως υπάρχουν περιορισμοί στην απόδοση μετατροπής της σε χρήσιμη ενέργεια.

Ένας τρόπος αποφυγής του θερμικού κύκλου είναι η μετατροπή με φωτοχημικές αντιδράσεις που χρησιμοποιούν απευθείας το ηλιακό φως και όχι τη θερμότητα που προέρχεται από αυτό. Φαινομενικά μια τέτοια μετατροπή φαίνεται απλή και επιπλέον παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι τα παράγωγά της μπορούν ν' αποθηκευτούν για να χρησιμοποιηθούν αργότερα. Στην πραγματικότητα όμως τα πράγματα είναι πιο δύσκολα από ότι φαίνονται. Πρώτα, είναι αρκετά δύσκολο να βρει κανείς κατάλληλες φωτοχημικές αντιδράσεις. Δεύτερο, οι περισσότερες από αυτές αντιδρούν μόνο στο υπεριώδες και στο ορατό μέρος του ηλιακού φωτός, επειδή το φως μεγαλύτερου μήκους κύματος δεν είναι αρκετά ενεργητικό για τη δημιουργία χημικής αντίδρασης. Έτσι σχεδόν λιγότερη από τη μισή ηλιακή ακτινοβολία είναι αξιοποιήσιμη και στην πράξη οι περισσότερες αντιδράσεις αξιοποιούν λιγότερο και από το μισό αυτού του ποσού.

Όταν η δέσμη ηλιακού φωτός προσπέσει πάνω σ' έναν αριθμό μορίων τότε



ορισμένα μήκη κύματος απορροφώνται από τα μόρια τα οποία αρχίζουν ν' αντιδρούν μεταξύ τους ανάλογα με το μήκος κύματος που έχουν απορροφήσει. Μπορεί λοιπόν να υπάρξει αύξηση της θερμοκρασίας λόγω συγκρούσεων των μορίων, να υπάρξει διάσπαση του χημικού δεσμού των, διέγερση με μετατόπιση ενός ηλεκτρονίου και αποδιέργεση με την εκπομπή άλλου μήκους κύματος και ιονισμός. Για παράδειγμα η απορρόφηση του ερυθρού έχει σαν αποτέλεσμα την μετακίνηση του ατόμου μέσα στο μόριο ή την περιστροφή του μορίου. Η απορρόφηση του υπεριώδους ή του ορατού φωτός έχει σαν αποτέλεσμα τη μετατόπιση των ηλεκτρονίων και επομένως παρέχει τη δυνατότητα χημικής αντίδρασης. Από το ηλιακό φως επομένως τα χρήσιμα μήκη κύματος που παρέχουν αρκετή ενέργεια για τη μετατόπιση των ηλεκτρονίων κυμαίνονται από 0,3 μέχρι 0,8 μm . Για τον προσδιορισμό του είδους της χημικής αντίδρασης είναι επομένως αναγκαίο να είναι γνωστό το ποσό της ενέργειας που απορροφά το σύστημα.

Ένα σπουδαίο μέγεθος για τη μελέτη και αξιολόγηση των φωτοχημικών αντιδράσεων είναι η κβαντική απόδοση Φ που ορίζεται σαν το πηλίκο του αριθμού μορίων που αντιδρούν δια του αριθμού των φωτονίων που απορροφούνται

$$\Phi = \frac{\text{Μορια που αντιδρουν}}{\text{Φωτονία που απορροφούνται}}$$

Είναι φανερό ότι όπως δεν μπορεί να υπάρξει χημική αντίδραση χωρίς ηλιακό φως έτσι δεν μπορεί να υπάρξει χημική αντίδραση όταν τα προσπίπτοντα μήκη κύματος δεν είναι ικανά να ενεργοποιήσουν ένα μόριο. Αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι ένα φωτόνιο μπορεί να ενεργοποιήσει μόνο ένα μόριο δείχνει τη σπουδαιότητα της ποσότητας Φ που μπορεί να διαφέρει κατά πολύ στις διαφορετικές αντιδράσεις. Έτσι αν Φ είναι μικρό (< 1) έχουμε απορρόφηση φωτός όχι όμως και αντιδράσεις. Αντίθετα αν Φ είναι πολύ μεγάλο ($>> 1$) τότε έχουμε το φαινόμενο των αλυσιδωτών θερμικών αντιδράσεων οι οποίες ακολουθούν τη φωτοχημική αντίδραση και συμπεριλαμβάνουν πολλά μόρια.

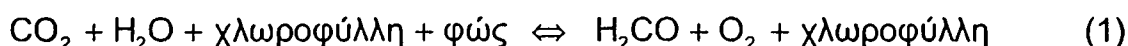
Σαν παράδειγμα αναφέρουμε δυο φωτοχημικές αντιδράσεις με πολύ διαφορετικές τιμές του Φ . Η χημική διάσπαση του υδροϊωδίου με υπεριώδες φως που έχει $\Phi = 1$ και η εκρηκτική αντίδραση υδρογόνου με χλώριο για την παραγωγή υδροχλωρίου που έχει $\Phi = 10^6$. Σήμερα, οι βασικές αρχές που διέπουν τις φωτοχημικές αντιδράσεις όπως θερμοδυναμική, χημική κινητική, και φωτοχημεία είναι αρκετά γνωστές. Χρειάζεται όμως ακόμα αρκετή έρευνα για την πρακτική εφαρμογή τους. Ιδιαίτερα χρειάζονται μελέτες για την αύξηση της παραγωγικότητας των φωτοχημικών αντιδράσεων επειδή είναι ακόμα αρκετά μικρή και διαφέρει κατά πολύ από τις θεωρητικές μελέτες. Από θεωρητική άποψη υπολογίζεται ότι για ξηρή βιομάζα μπορεί να φτάσει στους 3,6 τόνους υλικού την ημέρα ανά εκτάριο. Στην πράξη όμως δεν είναι γνωστή καμιά φωτοχημική αντίδραση που να έχει μια τέτοια παραγωγικότητα. Μια από τις πιο διαδεδομένες φωτοχημικές αντιδράσεις η φωτοσύνθεση που θα δούμε στην επόμενη παράγραφο έχει μια παραγωγή γύρω στους 2-3 τόνους υλικού το χρόνο ανά εκτάριο.



4.2 Φωτοσύνθεση

Ο πιο κατάλληλος τρόπος αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας είναι η μέθοδος που ανέπτυξε η ίδια η φύση πριν από δύο σχεδόν δισεκατομμύρια χρόνια. Η φωτοσύνθεση, δηλαδή η διαδικασία κατά την οποία το φυτό συλλαμβάνει την ηλιακή ενέργεια μέσω της χλωροφύλλης του και την χρησιμοποιεί για να μετατρέψει το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας σε σάκχαρο.

Η φωτοσύνθεση είναι επίσης η χημική αντίδραση με την οποία παράγονται οι τροφές και τα καύσιμα, αυτά δηλαδή για τα οποία συνοπτικά χρησιμοποιούμε το όνομα βιομάζα. Η διαδικασία της αντίδρασης αυτής είναι αρκετά πολύπλοκη μπορεί όμως προσεγγιστικά ν' απλοποιηθεί στην εξίσωση



που περιλαμβάνει σε ορισμένη αναλογία τα στοιχεία C, H, O και τη βάση H_2CO από την οποία παράγονται οι σπουδαιότεροι υδρογοναθρακες $(\text{H}_2\text{CO})_x$. Υπάρχουν βέβαια και άλλες δευτερεύουσες αντιδράσεις ελεγχόμενες από ένζυμα που ακολουθούν αυτές όμως δίνουν λίπη και πρωτεΐνες που δεν παίζουν άμεσο ρόλο στη διαδικασία παραγωγής $(\text{H}_2\text{CO})_x$ η οποία είναι η βάση για την παραγωγή βιομάζας.

Επιφανειακά φαίνεται λοιπόν ότι θα μπορούσαμε ν' αποσπάσουμε μεγάλες ποσότητες ηλιακής ενέργειας έμμεσα χρησιμοποιώντας τα φυτά. Η πραγματικότητα είναι διαφορετική, η μεγαλύτερη δυσκολία είναι ότι τα περισσότερα φυτά αξιοποιούν λιγότερο από το 1% της ολικής ηλιακής ενέργειας που πέφτει πάνω στα φύλλα τους. Αυτό γίνεται γιατί η ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα είναι περιορισμένη (~0,03%) και επομένως όσο καλό να είναι το έδαφος και όση ηλιοφάνεια και να έχουμε δεν μπορούμε να κάνουμε περισσότερες χημικές αντιδράσεις από αυτές που επιτρέπει το ποσό αυτό του διοξειδίου του άνθρακα.

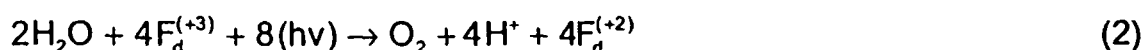
Εδώ δεν θ' ασχοληθούμε αναλυτικά με τη διαδικασία της χημικής αντίδρασης όμως για καλύτερη κατανόηση θα δώσουμε μια συνοπτική περιγραφή της. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και το νερό (H_2O) απορροφούν το ηλιακό φως στο υπεριώδες και κοντά στο ερυθρό και είναι σχεδόν αδρανή στο ορατό. Η πράσινη χλωροφύλλη απορροφά το ορατό ($\lambda < 0,68 \mu\text{m}$) και ενεργοποιείται. Αυτή η ενέργεια μεταφέρεται στο νερό που απελευθερώνει ένα άτομο του υδρογόνου που αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα.

Είναι γνωστό ότι η χημική αυτή αντίδραση είναι δύσκολη και δεν γίνεται με τη διάσπαση του νερού σε $1/2 \text{O}_2 + \text{H}_2$ αλλά μέσω της διέγερσης της χλωροφύλλης η οποία μεταβιβάζει και επαναπροσλαμβάνει ένα ηλεκτρόνιο με κβαντική απόδοση $\Phi = 1$. Η μεταβίβαση των ηλεκτρονίων γίνεται σ' ένα ειδικό μέρος που γίνονται οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής και ονομάζεται κέντρο φωτοαντίδρασης. Υπολογίζεται ότι για κάθε 500 μόρια χλωροφύλλης υπάρχει ένα τέτοιο κέντρο. Από ενεργειακή



άποψη η ενέργεια που χρειάζεται για την παραγωγή 1 γραμμομορίου H_2CO είναι 112 kcal/mole. Επειδή η ενέργεια ερυθρού φωτός που πέφτει στο νερό είναι περίπου 40 kcal/mole, χρειάζονται τουλάχιστον 3 ερυθρά ή 2 μπλε φωτόνια που θα δρουν ταυτόχρονα για να δώσουν την απαιτούμενη ενέργεια. Στην πράξη όμως δεν συμβαίνει να δρουν πάνω σε ένα μόριο 2 φωτόνια γιατί το μόριο αποδιεγείρεται γρήγορα πριν πέσει πάνω του το άλλο φωτόνιο και έτσι η ενέργεια που υπολείπεται μεταφέρεται μέσω των ηλεκτρονίων.

Γενικά για κάθε μόριο παραγόμενου οξυγόνου πρέπει να οξειδωθούν 2 μόρια H_2O και επομένως χρειάζεται η μεταφορά 4 ηλεκτρονίων. Με δεδομένο ότι απαιτούνται 2 φωτόνια για κάθε ηλεκτρόνιο (διπλή αντίδραση) θα χρειαστούν συνολικά 8 φωτόνια. Η χλωροφύλλη μεταβιβάζει και επαναλαμβάνει ηλεκτρόνια. Από άποψη φωτοχημείας η μεταφορά ηλεκτρονίων γίνεται από το μεταφορέα Ferredoxin (Fd^{+3}) στην ακόλουθη αντίδραση



Στο οξυγόνο αυξάνεται ο αριθμός οξείδωσης από -2 σε 0 (οξείδωση) ενώ στο Fd ελαττώνεται από +3 σε +2 (αναγωγή). Είναι προφανές ότι η ανάπτυξη αντιδράσεων που θα παράγουν το H_2 αντικαθιστώντας την εξίσωση (2) θα είχαν σημαντικά αποτελέσματα στην παραγωγή βιομάζας. Από εργαστηριακές μελέτες με διακοπτόμενο ρεύμα φαίνεται ότι ο ρυθμός φωτοσύνθεσης εξαρτάται από την ένταση του φωτός. Από μελέτες με το έντονο φως φαίνεται ότι ο ρυθμός παραγωγής εξαρτάται από το ρυθμό μεταφοράς του CO_2 στη θέση που γίνεται η αντίδραση. Επίσης η θερμοκρασία επηρεάζει τις θερμικές αντιδράσεις που ακολουθούν τις φωτοχημικές, οι οποίες μπορούν να γίνουν και απουσία φωτός.

Οι συντελεστές απόδοσης με μονοχρωματικό φως σε χλωρέλλα είναι περίπου 1 γραμμομόριο CH_2O για 8 φωτόνια οπότε προκύπτει ένας συντελεστής απόδοσης

$$\eta = \frac{112 \text{ kcal/mol}}{40,0 \times 8 \text{ kcal/mol}} = 30\%$$

Ένας τέτοιος συντελεστής απόδοσης δεν έχει όμως βρεθεί στην πράξη. Από το ηλιακό φως, χρησιμοποιείται στην φωτοσύνθεση μόνο ένα μικρό μέρος που αντιστοιχεί στην περιοχή 0,4 – 0,7 μm (περιοχή απορρόφησης της χλωροφύλλης). Το υπόλοιπο μέρος του φάσματος δεν είναι κατάλληλο για τη δημιουργία φωτοαντίδρασης. Γενικά μόνο το 40% της ηλιακής ακτινοβολίας έχει αρκετή ενέργεια για φωτοαντιδράσεις και αν αφαιρέσει κανένας απώλειες από σκεδάσεις και από άλλους λόγους παραμένει ένα ποσό γύρω στο 35% που είναι διαθέσιμο αποκλειστικά για τη φωτοσυνθετική διαδικασία. Αλλά και αυτό το ποσό δεν χρησιμοποιείται ολόκληρο στις φωτοαντιδράσεις. Ένα μέρος του ποσού αυτού, μετατρέπεται σε θερμότητα και διέγερση των μορίων. Έτσι μόνο το 28%, χρησιμοποιείται για φωτοαντιδράσεις, ένα μέρος είναι αναγκαίο για τη φυσική λειτουργία των φυτών και ένα άλλο μέρος του υπολοίπου καταναλώνεται σε οπισθοδρομικές αντιδράσεις που παράγουν CO_2 από CH_2O . Υπολογίζεται ότι το



τελευταίο ποσοστό ανέρχεται στο 35% του διαθέσιμου μέρους του φάσματος. Έτσι η τελική φωτοσυνθετική απόδοση είναι περίπου $\eta = 35\% \times 28\% \times 65\%$.

Στη γεωργική παραγωγή ο συντελεστής απόδοσης είναι ακόμα μικρότερος. Σε ζώνες με μέτριες θερμοκρασίες η παραγωγή ξηρού οργανικού υλικού ανέρχεται σε $1 \sim 2 \text{ kg/m}^2$ και έχει ένα συντελεστή μετατροπής ηλιακού φωτός γύρω στο 0,2%. Αυτός ο μικρός συντελεστής οφείλεται κύρια στο ότι ο χρόνος καλλιέργειας είναι περίπου το 1/3 του ολικού χρόνου, το CO_2 είναι περίπου 100 φορές λιγότερο στην ατμόσφαιρα από ότι στο εργαστήριο (0,03% έναντι 3%) και στο ότι η ένταση του ηλιακού φωτός κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας είναι αρκετά ισχυρή οπότε η φωτοσυνθετική διαδικασία δεν είναι αποδοτική γιατί οι θερμικές αντιδράσεις δεν μπορούν να παρακολουθήσουν τις φωτοχημικές αντιδράσεις. Φαίνεται ότι για την αύξηση της αποδοτικότητας θα πρέπει να καλλιεργηθούν ένζυμα που να επισπεύδουν τη διαδικασία των θερμικών αντιδράσεων ώστε να μπορούν αυτές να παρακολουθούν τις φωτοσυνθετικές αντιδράσεις σε έντονο ηλιακό φως. Πρέπει επίσης να εξευρεθούν πιο εύκολοι και πιο οικονομικοί τρόποι παραγωγής CO_2 και ν' αναπτυχθούν καλλιέργειες ειδικών φυτών με μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε έντονο ηλιακό φως και μεγαλύτερη συγκέντρωση σε CO_2 .



4.3 Βιομάζα

4.3.1 Πηγές και παραγωγή

Λόγω της μεγάλης διαφοράς σε αποδοτικότητα μεταξύ των φυτών που παράγονται στο εργαστήριο και αυτών που παράγονται σε γεωργικές καλλιέργειες έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για την ανάπτυξη ειδικών φυτών καλύτερης αποδοτικότητας. Ορισμένα τέτοια φυτά, όπως το σόργο και το ζαχαροκάλαμο έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερά μια υψηλή συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα γύρω από τη χλωροφύλλη τους. Υπολογίζονται ότι μπορούν να μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια δέκα φορές αποτελεσματικότερα από άλλα φυτά. Χρειάζονται όμως αρκετά καλή καλλιεργήσιμη γη και η χρησιμοποίηση της γης αυτής για παραγωγή ενέργειας και όχι για παραγωγή τροφής δεν θα ήταν σωστή. Μια εναλλακτική λύση θα ήταν τα φύκια (Algae) που θα μπορούσαν να φυτευτούν σε λιγότερο γόνιμες περιοχές και να διατηρηθούν κάτω από πλαστικά καλύμματα ώστε να εμπλουτίζεται τεχνητά το διοξείδιο του άνθρακα. Από τα φύκια θα μπορούσαν να παραχθούν πρωτεΐνες για τροφή και μεθάνιο από τα υπολείμματα. Από εργαστηριακές μελέτες φαίνεται πιθανή μια παραγωγή πρωτεΐνης 2,5 τόνων ανά στρέμμα. Ένας άλλος τρόπος καλλιέργειας θα ήταν σε μικρές λίμνες ή σε πλαστικά δοχεία με κατάλληλη λίπανση και παροχή CO_2 . Σ' αυτή την περίπτωση η αποδοτικότητα μπορεί να γίνει 20 φορές μεγαλύτερη από αυτήν της γεωργικής καλλιέργειας. Όμως το ενεργειακό κόστος των λιπασμάτων, των μηχανημάτων καλλιέργειας και συλλογής είναι αρκετά υψηλό ώστε η παραγωγή αυτής της βιομάζας να θεωρείται αντιοικονομική για χρησιμοποίηση σαν καύσιμο και οικονομική για χρησιμοποίηση σαν τροφή και χημικές ουσίες. Για μαζική παραγωγή φυκιών επίσης παρουσιάζονται δυσκολίες στον έλεγχο της θερμοκρασίας στην τροφοδότηση με CO_2 και στην συλλογή. Πειράματα τώρα γίνονται με είδη φυκιών που ευδοκιμούν σε πηγές με ζεστό νερό. Η έρευνα δείχνει ότι υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου στο ποσοστό του λίπους, των υδατανθράκων και των πρωτεϊνών ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τροφές.

Εντατικές προσπάθειες επίσης γίνονται για την καλλιέργεια δένδρων ή υψηλών θάμνων. Αυτά παρουσιάζουν λιγότερη αποδοτικότητα από τα φύκια είναι πιο εύκολα όμως στη συλλογή. Ένα τέτοιο φυτό είναι το καλαμπόκι. Ένα άλλο φυτό που αναπτύσσεται πολύ γρήγορα σε τροπικές χώρες είναι ο Υάκινθος. Μπορεί να προσφέρει σημαντικές ποσότητες τροφής και Σελουλόζης και είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και σαν καύσιμο. Τέτοια χαρακτηριστικά έχει επίσης το φυτό *alfa-alfa* που μπορεί να παράγει πρωτεΐνες υψηλής τροφικής ποιότητας καθώς και καύσιμα. Όμως επειδή φαίνεται ότι σε τέτοια φυτά η μετατροπή σε πρωτεΐνες είναι πιο αποδοτική από ότι όταν γίνεται μέσα από τον κύκλο των ζώων που δίνουν περίπου το 20% του γεωργικού προϊόντος που καταναλώνουν και αξιοποιούν μόνο μερικά χιλιοστά του ηλιακού φωτός, είναι πιθανόν τα φυτά αυτά να εξελιχθούν σε "φυτείες πρωτεΐνης" παρά σε φυτείες ενέργειας.

Πειραματισμοί επίσης γίνονται με φυλλοβόλα πλατύφυλλα δέντρα και ιδιαίτερα με υβρίδια από λεύκες που ξαναβλασταίνουν από τη ρίζα μετά το κόψιμο.



Υπολογίζεται ότι σ' ένα έδαφος οριακής απόδοσης θα μπορούσαν να καλλιεργηθούν 90 δέντρα ανά στρέμμα με μια ενεργειακή απόδοση γύρω στα 30×10^6 Btu. Γενικά όμως η καλλιέργεια ειδικών φυτών δεν είναι εύκολη. Η φωτοσυνθετική τους απόδοση εξαρτάται από το βιοχημικό τους κύκλο και χαρακτηρίζεται από το αν αυτός περιλαμβάνει 3 ή 4 άτομα άνθρακα. Η φωτοσυνθετική απόδοση είναι μεγαλύτερη στα φυτά με βιοχημικούς κύκλους 4-ατόμων για έναν επιπλέον λόγο ότι τα φυτά αυτά δεν παρουσιάζουν φωτοδιαπνοή. (Αντίστροφη αντίδραση παραγωγής CO_2 από CH_2O και κατανάλωση του άνθρακα).

Από άποψη παραγωγής βιομάζας τα πιο κατάλληλα τέτοια φυτά είναι το χορτάρι της Βερμούδας, το χορτάρι του Σουδάν, το ζαχαροκάλαμο, το καλαμπόκι, η ασφάκα κ.α. Από τα δέντρα τα πιο κατάλληλα είναι αυτά που ανήκουν στο βιολογικό κύκλο των 3-ατόμων άνθρακα. Τα πιο γνωστά είναι ο ευκάλυπτος, η λεύκη, η κλήθρα, η συκομορέα, κ.α. Στον Πίνακα 4.1 δίνεται η απόδοση ενεργειακής μετατροπής για μερικά από αυτά.

Αναφορικά με την ανάπτυξη νέων ποικιλιών φυτών αρκετή έρευνα γίνεται στο πεδίο της Γενετικής Μηχανικής. Όλες οι ποικιλίες φυτών όμως που έχουν εξελιχθεί μέχρι τώρα αποβλέπουν περισσότερο στην ανάπτυξη φυτών για διατροφή παρά για την παραγωγή ενέργειας. Είναι αναγκαίο να γίνει βασική έρευνα πάνω σ' αυτό το πεδίο και να μελετηθούν οι μηχανισμοί ανάπτυξης των φυτών για καλύτερη αξιοποίησή τους. Είτε για απευθείας χρησιμοποίηση σαν καύσιμο υλικό είτε για μετατροπή σε πρωτεΐνες. Στην κατεύθυνση αυτή μπορεί ν' αναπτυχθούν δένδρα ταχείας ανάπτυξης που θα παράγουν καυσόξυλο, ή ξυλεία και πούλπα με αρκετό υπόλοιπο για την παραγωγή υγρών καυσίμων όπως μεθανόλης και αιθανόλης. Επίσης μπορούν να μελετηθούν και να βελτιωθούν οι ποικιλίες φυτών που παράγουν φυτικά έλαια όπως η ελιά, η φιστικιά, το βαμβάκι, το καουτσούκ, το ηλιόλουλουδο, το καλαμπόκι κ.α. που θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για διατροφή είτε για ενεργειακούς σκοπούς.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης τα φυτά που έχουν σημαντικές ποσότητες ζάχαρης (ζαχαροκάλαμο, κασσάβα) για την παραγωγή αιθανόλης. Σχετικά προγράμματα υπάρχουν σε ορισμένες χώρες (Βραζιλία) με ενεργειακές αποδόσεις που κυμαίνονται γύρω στο $0,5 \text{ lt/m}^2$. Οι αποδόσεις αυτές όμως μπορεί να είναι ικανοποιητικές για χώρες με μεγάλες εκτάσεις όπως η Βραζιλία, είναι όμως σχεδόν απαγορευτικές για χώρες με περιορισμένες καλλιεργήσιμες εκτάσεις που προορίζονται κύρια για την παραγωγή τροφής.



Πίνακας 4.1: Ενεργειακή απόδοση φυτών.

Είδος φυτού	Συντελεστής ενεργειακής μετατροπής, η (%)
Alfa-alfa	0,75
Καλαμπόκι	0,80
Ζαχαρότευτλα	0,85
Γρασίδι του Σουδάν	0,90
Ευκάλυπτος	1,40
Φύκια	1,60
Ζαχαροκάλαμο	2,80

Διαφαίνεται επίσης η δυνατότητα αξιοποίησης της φωτοσύνθεσης στους ωκεανούς. Ένα πρωτότυπο πείραμα γίνεται σήμερα στο νησί Σαν Κλεμέντε στην ακτή της Καλιφόρνιας. Σε μια επιφάνεια 28 στρεμμάτων καλλιεργούνται φύκια της οικογένειας φαιοφύκη από τα οποία μπορεί να εξαχθούν χημικές ουσίες για την παραγωγή υλικών που παρασκευάζονται με ειδική επεξεργασία από το κάρβουνο ή το πετρέλαιο. Τέτοια υλικά είναι κεριά, λιπάσματα, διαλυτικές ουσίες, βαφές, λιπαντικά καύσιμα, καθώς και πρώτες ύλες για την κατασκευή πλαστικών και τεχνητών νημάτων. Τα φύκια αυτά φυτεύονται σε σχεδίες που διατηρούνται 13 περίπου μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το ψυχρό νερό του βυθού που είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά ανεβαίνει με άντληση στις σχεδίες και διαποτίζοντας τα φύκια συμβάλλει στην ταχεία ανάπτυξή τους. Είναι φανερό ότι αν το πείραμα αυτό είναι επιτυχές θα έχει τεράστια σημασία για την παραγωγή βιομάζας δεδομένου ότι ένα μεγάλο μέρος της συνολικής θαλάσσιας επιφάνειας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί γι' αυτό το σκοπό.

Όπως θα δούμε παρακάτω μια άλλη σημαντική πηγή βιομάζας είναι επίσης τα περιττώματα και τα σκουπίδια. Σε πολλά μέρη, και πιο παλιά και στην Ελλάδα, περιττώματα ζώων χρησιμοποιούνταν για καύση και για παραγωγή μεθανίου. Τα σκουπίδια των πόλεων θα μπορούσαν να διαχωριστούν και ορισμένα από αυτά όπως το χαρτί, το γυαλί, τα μέταλλα και μερικά πλαστικά να επανακυκλωθούν ενώ τα υπόλοιπα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ενεργειακά. Η μέση τιμή του ενεργειακού περιεχομένου τους κυμαίνεται γύρω στα 1.500 kcal/kg και στο βαθμό που η χρησιμοποίησή τους συνεπάγεται και τη λύση άλλων προβλημάτων όπως ρύπανση του εδάφους, ρύπανση του αέρα, κ.λπ. η τιμή αυτή φαίνεται ευνοϊκή για οικονομική εκμετάλλευση.



4.3.2 Επεξεργασία

Είναι φανερό ότι για την αξιοποίηση της βιομάζας για ενεργειακούς σκοπούς πέρα από την ανάπτυξη κατάλληλων φυτών και δένδρων χρειάζεται και παράλληλη ανάπτυξη τεχνολογιών για τη μετατροπή της οργανικής πρώτης ύλης σε υποπροϊόντα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενεργειακούς σκοπούς. Η ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών είναι αντικείμενο μελέτης της βιοχημείας που αναπτύσσεται γρήγορα τα τελευταία χρόνια. Από την άποψη αυτή η επεξεργασία της βιομάζας μπορεί να ταξινομηθεί σε δυο κατευθύνσεις: Στην υγρή επεξεργασία και στην ξηρή επεξεργασία. Στην πρώτη συγκαταλέγονται η αλκοολική ζύμωση η χώνευση και η χημική αναγωγή που παράγουν αντίστοιχα αιθάνιο, μεθάνιο και υγρά καύσιμα. Στη δεύτερη επεξεργασία έχουμε την πυρόλυση και την αεριοποίηση στις οποίες παράγονται αέρια καύσιμα, αμμωνία και άλλα υποκατάστατα του φυσικού αερίου

Για τα φυτά και τα δέντρα το βολικότερο σύστημα θα ήταν η αποσύνθεση μέσα σε αεροστεγείς δεξαμενές. Οι μικροοργανισμοί θα μετέτρεπαν την κυτταρίνη και τους υδατάνθρακες του φυτού σε μεθάνιο και το υπόλοιπο που θα έμενε θα ήταν λίπασμα. Ένα παρεμφερές πρόγραμμα απόσπασης ενέργειας από τα φυτά έχει αναπτυχθεί στον Αμερικάνικο στρατό. Βασίζεται σε μελέτες που έγιναν για την καταπολέμηση μικροοργανισμών που αποσυνθέτουν την κυτταρίνη της στολής και του οπλισμού. Στις μελέτες αυτές εντοπίστηκαν 13.000 μικροοργανισμοί που καταστρέφουν την κυτταρίνη. Ένας από αυτούς ήταν και ο γνωστός μύκητας *Trichoderma Viride* που είχε ανακαλυφθεί σε μια στρατιωτική ζώνη στην Ζούγκλα της Νέας Γουϊνέας κατά το δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο. Ο μικροοργανισμός αυτός μπορεί ν' αποσυνθέτει και τις πιο ανθεκτικές μορφές κυτταρίνης σε γλυκόζη η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βάση για χημικές διεργασίες. Τέλος ο καλύτερος τρόπος εκμετάλλευσης της φωτοσύνθεσης θα ήταν η μετατροπή της σε ηλεκτρενέργεια, είτε απευθείας με τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος, είτε μέσω της παραγωγής υδρογόνου. Ο τρόπος αυτός όμως δεν φαίνεται πραγματοποιήσιμος στα επόμενα χρόνια.

4.4 Απορρίμματα - Βιομάζα

Τα απορρίμματα αποτελούν μια νέα πηγή ενέργειας - εγχώρια και ανανεώσιμη βέβαια - που δημιούργησε η ανάγκη/δυνατότητα εκμετάλλευσης τους από τη συνδυασμένη ανάγκη να λυθεί το κοινωνικό πρόβλημα της διάθεσης και καταστροφής τους. Η καύση δηλαδή, των απορριμμάτων των πόλεων μαζί με τα διάφορα άλλα παραμελημένα υπολείμματα φυτικά/ ζωικά, μπορεί να συνδυαστεί με την ανάκτηση θερμικής ενέργειας (για την παραγωγή ηλεκτρενέργειας, τη θέρμανση - ψύξη μιας πόλεως/περιοχής, την παροχή ατμού σε βιομηχανικές περιοχές κ.α.).

Από σχετικές έρευνες διαπιστώθηκε, ότι το 55% μπορεί να δώσει ενέργεια με καύση, το 60% μπορεί να λιπασματοποιηθεί και το 45% μπορεί να χρησιμοποιηθεί



για την ανάκτηση υλικών (χαρτιά, μέταλλα, γυαλιά κ.α.). Η καύση των απορριμμάτων μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- α) -μετά από προηγούμενη κατάλληλη επεξεργασία και στη συνέχεια καύση σε λέβητες στερεών καυσίμων.
- β) -μετά από προηγούμενη μετατροπή τους σε αέρια καύσιμα (μεθάνιο, κατά ένα μεγάλο ποσοστό 60%), μέσω μιας ειδικής διεργασίας του σωρού των απορριμμάτων - φυτών - δένδρων - ζωικών υπολειμμάτων σε αναερόβιο ζύμωση - αποσύνθεση - χώνευση, υπό συνθήκες προσφερόμενης θερμοκρασίας, υγρασίας, βακτηρίων (παραγωγή βιομάζας), και στη συνέχεια την καύση του αερίου μεθανίου σε αεροστρόβιλους (σε θερμοκρασίες πάνω από 350 °C).

1. Με την πρώτη μέθοδο η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί είναι της τάξεως 1.300÷2.000 kcal/kg (υγρασία 56%, τέφρα 10%), -πολύ χαμηλή συγκριτικά με τις άλλες πηγές ενέργειας αλλά συγκρίσιμη οπωσδήποτε και βέβαια εκμεταλλεύσιμη όταν η καύση των απορριμμάτων συνδυάζεται με την επιβαλλόμενη ανάγκη της εξαφάνισής τους. Εδώ πρέπει να σημειωθεί, ότι η δια της καύσεώς τους δαπάνη εξαφάνισης τους είναι περίπου 10πλάσια÷40πλάσια της δαπάνης για την ταφή τους, όπου εξάλλου δεν απαιτείται αξιόλογος εξοπλισμός και εγκαταστάσεις. Το αποτέλεσμα βελτιώνεται κατά πολύ, αν μεσολαβήσει κάποια ειδική επεξεργασία ή ενισχυθεί η καύση των απορριμμάτων από κάποιο άλλο καύσιμο (συνήθως, λιγνίτη, πετρέλαιο), περιορίζοντας την αρνητική επίδραση από την ανομοιογένειά τους. Έτσι, με μια συνδυασμένη συμμετοχή του λιγνίτη στο ποσοστό γύρω στα 25 %, είναι δυνατό να τετραπλασιαστεί η παραγωγή ηλεκτρενέργειας, σε τρόπο ώστε η λειτουργία της εγκατάστασης αυτής συνολικά να αποβεί κερδοφόρος. Θα έχουμε δηλαδή, τους ακόλουθους δύο τρόπους καύσης απορριμμάτων με σύγχρονη παραγωγή ηλεκτρενέργειας:

- Μονάδες καύσης απορριμμάτων, αποκλειστικά,
- Μονάδες καύσης απορριμμάτων με παράλληλη/ συνδυασμένη καύση άλλων καυσίμων (λιγνίτη, πετρέλαιο, μεθάνιο από απορρίμματα), ή και αποβλήτων (λάσπης διαφόρων λυμάτων).

Από σχετικές παρατηρήσεις, στις μονάδες καύσης της πρώτης περίπτωσης διαπιστώθηκε, ότι από την καύση 1T απορριμμάτων ανά ώρα (υπό συνήθεις σύγχρονες συνθήκες) μπορεί να παραχθούν δύο τόνοι υπέρθερμου ατμού (θερμοκρασίας 350÷400 °C, και πίεσης 3.540 kg/cm²), που μπορούν να παράγουν 400÷500 kWh ηλεκτρενέργειας - υπό τη συνήθη μορφή μιας ατμοηλεκτρικής μονάδας με μέσο συντελεστή χρησιμοποίησης 6.000 ώρες/έτος. Οι Μονάδες αυτές όμως, συνήθως είναι ελλειμματικές και σαν τέτοιες καλύπτονται επιδοτούμενες από κρατικούς φορείς, ή από τους ΟΤΑ.

Ο τρόπος αυτός εκμετάλλευσης των απορριμμάτων, εφαρμόζεται σε πολλές χώρες της Δυτικής Ευρώπης και Αμερικής. Στη Γερμανία το 1975 λειτουργούσαν πάνω από 22 τέτοιες Μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, το ίδιο στην Ελβετία, στο UK, στη Γαλλία, κ.λπ. παράγοντας αξιόλογες ποσότητες ηλεκτρενέργειας ή μαζί και ατμό για θέρμανση/κίνηση - σε συνδυασμένη ή αμιγή βάση - συμβάλλοντας ταυτόχρονα



και στη λύση του ολοένα οξυνόμενου κοινωνικού προβλήματος της διάθεσης-εξαφάνισης των απορριμμάτων.

Για παράδειγμα, για μια δυνατότητα διάθεσης απορριμμάτων 1 kt/day με θερμογόνο δύναμη $1.500 \div 2.400$ kcal/kg, που εξασφαλίζεται από συνήθη σύνθεση και με μια βιολογική αποσύνθεση 50%, μπορεί να καλυφθούν οι ανάγκες μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής 40 MW. Με την υποβοήθηση της καύσης των απορριμμάτων με ένα ακόμα καύσιμο (π.χ. λιγνίτη), ο συντελεστής οικονομικής εκμετάλλευσης της Μονάδας αυτής βελτιώνεται όπως αναφέραμε σημαντικά. Έτσι, ενδεικτικά για την αναφερόμενη δυναμικότητα απορριμμάτων, για ένα μίγμα 20% + 80% (απορρίμματα + λιγνίτης, με τη συνήθη περίπτωση θερμογόνο δύναμη των $2.500 \div 3.000$ kcal/kg), η παραγόμενη ηλεκτρενέργεια μπορεί να τετραπλασιασθεί κατά μέσο όρο, καλύπτοντας λειτουργικά τις ανάγκες λειτουργίας μιας Μονάδας μέχρι 200 MW. Σαν αποτέλεσμα ή Μονάδα αυτή μπορεί πλέον, να λειτουργεί με κέρδος και χωρίς να επιβαρύνει άλλους φορείς.

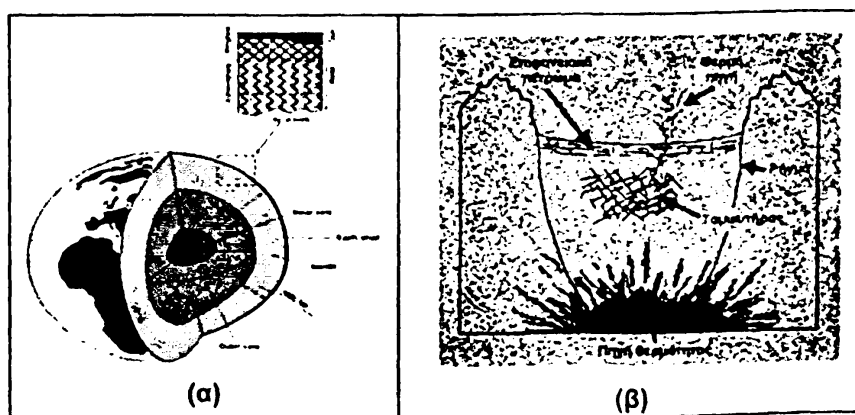
2. Με το δεύτερο τρόπο, κατά τον οποίο πρέπει να προηγηθεί μια σχετικά χρονοβόρα διεργασία των υπολειμμάτων-οργανικών απορριμμάτων, όπως ήδη αναφέρθηκε, η παραγωγή ενέργειας γενικά (ή ηλεκτρενέργειας ειδικότερα) είναι δαπανηρότερη σε σύγκριση με τον πρώτο τρόπο. Αυτό οφείλεται, εκτός των άλλων και στο γεγονός του χαμηλού ποσοστού της αεριομετατροπής, που συγκεκριμένα η παραγωγή του αερίου μεθανίου φτάνει μόνο στο 30% της πρώτης ύλης. Πρέπει επίσης να αναφερθεί, ότι στην περίπτωση που σαν υπόλειμμα διεργασίας ζύμωσης έχουμε τη δημιουργία ποσότητας υγρού αποβλήτου-με άλλους συνεπαγόμενους δαπανηρούς πονοκεφάλους διάθεσής τους (ως προς την προστασία του περιβάλλοντος) - η εφαρμογή του τρόπου αυτού προς τον παρόν οδηγεί σε απαγορευτικά τεχνικοοικονομικά συμπεράσματα. Για το μέλλον, με την πιθανολογούμενη ανάπτυξη οικονομικότερων τεχνολογιών, είναι δυνατόν να δικαιολογηθούν ευνοϊκότερες προοπτικές.



4.5 Γεωθερμία

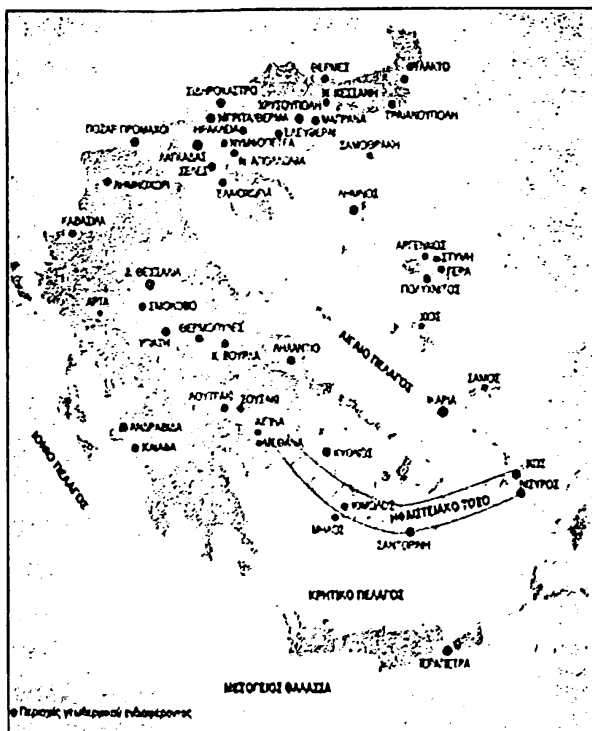
Είναι το φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας (με θερμοκρασία $50+300\text{ }^{\circ}\text{C}$), μέσω κάποιου γεωθερμικού ρευστού (σε μορφή ζεστού νερού ή φυσικού ατμού) από το εσωτερικό της γήινης σφαίρας (σε βάθος από 100 m μέχρι 100 km) προς την επιφάνεια της Γης μετά από κατάλληλες και προηγούμενες τεχνικές εργασίες (γεωτρήσεις κ.λπ.). Οι επιστήμονες υπολογίζουν ότι η Γη σχηματίστηκε πριν από πέντε δισεκατομμύρια έτη, από τη σκόνη και τα αέρια που αποτελούσαν το πρωτογενές ηλιακό σύστημα. Καθώς η νέα Γη ωρίμαζε, η θερμότητα από την πρόσκρουση της ύλης που έπεφτε στην επιφάνειά της, προκαλούσε πρόσθετη τήξη. Τα βαρύτερα υλικά μέταλλα (όπως ο Σίδηρος και ο Χαλκός) βυθίζονταν στον πυρήνα της, ενώ τα ελαφρότερα βραχώδη υλικά σχημάτιζαν τον μανδύα και τον φλοιό της (Σχήμα 4.1α). Φυσικά, τα χημικά ραδιενεργά στοιχεία, όπως ορισμένες μορφές ουρανίου, θορίου κ.α. συγκεντρώθηκαν στο φλοιό της Γης, με αποτέλεσμα η αποσύνθεσή τους να απελευθερώνει θερμότητα. Έτσι η θερμότητα της Γης είναι αποτέλεσμα τόσο της αρχικής θερμότητας των αερίων που τη συνέστησαν, όσο και της αποσύνθεσης των ραδιενεργών στοιχείων στη διάρκεια της ιστορικής ανάπτυξής της επί 4,5 δισεκατομμύρια έτη.

Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας της γης με την απόσταση από την επιφάνειά της ονομάζεται «γεωθερμική βαθμίδα», έχει κανονική τιμή περίπου $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ανά χιλιόμετρο. Το φαινόμενο κατά το οποίο σε μια περιοχή η θερμοκρασία αυτή αυξάνει με ταχύτερο ρυθμό ονομάζεται γεωθερμική ανωμαλία. Για να υφίσταται διαθέσιμο θερμό νερό ή ατμός σε μια πηγή, περιοχή, (αν η θερμοκρασία τους είναι πάνω από $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, τότε σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία ονομάζονται γεωθερμικά ρευστά) πρέπει να υπάρχει κάποιος υπόγειος ταμιευτήρας αποθήκευσής του κοντά σε ένα θερμικό κέντρο, καθώς και μια πηγή θερμότητας (Σχήμα 4.1β). Στην περίπτωση αυτή, το νερό του ταμιευτήρα, που συνήθως είναι βρόχινο νερό που έχει διεισδύσει στους βαθύτερους ορίζοντες της Γης, θερμαίνεται και ανεβαίνει προς την επιφάνεια (γεωθερμικό κοίτασμα) και μπορεί να καλύψει σημαντικές ενεργειακές ανάγκες.



Σχήμα 4.1: (α) Τομή της γης - Ο φλοιός (earth crust), ο μανδύας (mantle) και ο πυρήνας της Γης (inner-outer core). (β) Δομή γεωθερμικού ταμιευτήρα.

Στη χώρα μας, που χαρακτηρίζεται από πρόσφατη ενεργό ηφαιστειακή δραστηριότητα και από τεκτονική σεισμογενή συμπεριφορά, ή ύπαρξη και ο εντοπισμός των γεωθερμικών πεδίων διευκολύνεται πάρα πολύ (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2: Περιοχές γεωθερμικού ενδιαφέροντος στην Ελλάδα. Δυναμικό υψηλής ενθαλπίας εντοπίσθηκε κυρίως κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου του Νοτίου Αιγαίου (Μήλος, Νίσυρος).

Γι' αυτό και ήδη από το 1970, άρχισαν και συνεχίζουν να γίνονται προγραμματισμένες έρευνες σε πολλές περιοχές του ηπειρωτικού και νησιωτικού χώρου (Μήλο, Νίσυρο, Κίμωλο, Λέσβο, Νιγρίτα Σερρών, Ξάνθη/Θράκη, Αιδηψό, Κ. Βούρλα, Θερμοπύλες, Σουσαάκι, Μέθανα, Σαντορίνη κ.α.), με κύριο ερευνητικό φορέα το ΙΓΜΕ (Ίδρυμα Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) και τη ΔΕΗ. Με πρωτοβουλία της ΔΕΗ συντάχθηκε μελέτη για την εκμετάλλευση του γεωθερμικού πεδίου στη Μήλο με πέντε γεωτρήσεις, προβλεπόμενης συνολικής ισχύος 24 MW ενώ οι τρεις πρώτες που ολοκληρώθηκαν ήδη (σε βάθη 1100÷1200 m, 300 °C, 4÷7 bar, γεωθερμικής βαθμίδας 70 °C/100m) είναι ικανότητας 16 MW. Μετά από 8 χρόνια προβλέπεται ότι θα διευρυνθεί τόσο το γεωθερμικό πεδίο, ώστε συνολικά να παρέχει μια ποσότητα γεωθερμικού ρευστού 100÷150 MT/day, ενθαλπίας $h = 500 \text{ kcal/kg}$ και να καταστεί έτσι, ένα από τα μεγαλύτερα κέντρα γεωθερμικής εκμετάλλευσης σ' όλο τον κόσμο. Ταυτόχρονα, άρχισαν να διαφαίνονται ήδη επιτυχείς έρευνες στη Νίσυρο και Σάμο, σε βάθη που κυμαίνονται στα 1,8 km. Έτσι, η ΔΕΗ εκμεταλλεζόμενη τα γεωθερμικά πεδία αυτά για ηλεκτροπαραγωγή, προβλέπει ότι με βάση τις νήσους Σάμο-Νίσυρο να δημιουργήσει ένα σύστημα παραγωγής - διανομής ηλεκτρενέργειας στο Ανατολικό σύμπλεγμα νήσων των Δωδεκανήσων. Δυο μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού από γεωθερμικά ρευστά



λειτουργήσαν για ένα χρονικό διάστημα (1985-1989) στη Μήλο και στη Νίσυρο. Τα γεωθερμικά πεδία της Μήλου και της Νισύρου μπορούν να καλύψουν περισσότερο από 200 MWe για μια χρονική περίοδο 20 ετών.

Από τη Μήλο με την προβλεπόμενη διασύνδεση του εκεί προβλεπόμενου επίσης Γεωθερμοηλεκτρικού Σταθμού (ΓΗΣ) ηλεκτροπαραγωγής, μέσω υποβρυχίου καλωδίου προς το Εθνικό Σύστημα στην ηπειρωτική χώρα (στη θέση ΑΗΣ Αλιβερίου/Εύβοια), προβλέπει τη διοχέτευση προς το Σύστημα υπολογίσιμης γεωθερμικής ηλεκτρενέργειας. Ποσότητες εκμεταλλεύσιμες γεωθερμικού ρευστού, αλλά χαμηλής ενθαλπίας, έχουν εντοπισθεί τελευταία σε μικρότερα βάθη στις περιοχές Νιγρίτα/ Σερρών και Ξάνθης, όπου αναμένεται να παίξουν αποφασιστικό ρόλο τόσο σε γεωργικές εφαρμογές (άρδευση, θερμοκήπια, κ.λπ.), όσο και στη θέρμανση εσωτερικών χώρων (οικιών, βιομηχανιών, νοσοκομείων, σχολείων κ.λπ.).

Παρόμοιες προσπάθειες γίνονται και σε άλλες χώρες (Ιταλία, USA, URSS, Ν. Ζηλανδία, Ιαπωνία, Μεξικό, Βρετανία (τώρα τελευταία), Ισλανδία (όπου η θέρμανση των σπιτιών κατά 50% γίνεται από γεωθερμία), Γαλλία (όπου σε πρώτη φάση προβλέπεται η θέρμανση περίπου 140.000 διαμερισμάτων κατοικιών στο Παρίσι με γεωθερμικό κοίτασμα) κ.α., όπου υπάρχουν το ίδιο αξιόλογες ποσότητες και προοπτικές.

Τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη της τεχνολογίας, παρατηρείται πτώση του κόστους παραγωγής ενέργειας από γεωθερμία. Το κόστος παραγωγής θερμικής ενέργειας από τη γεωθερμία κυμαίνεται μεταξύ 0,003 - 0,023 €/kWh, ενώ το αντίστοιχο κόστος παραγωγής της από συμβατικά καύσιμα (πετρέλαιο, άνθρακα, λιγνίτη, κ.λπ.) είναι περίπου 0,041 €/kWh.

Η γεωθερμική ενέργεια, ανάλογα με τη θερμοκρασία των ρευστών, διακρίνεται σε δύο κατηγορίες:

- χαμηλής θερμοκρασίας ($T < 25 - 90^{\circ}\text{C}$)
- υψηλής θερμοκρασίας ($T > 90^{\circ}\text{C}$)

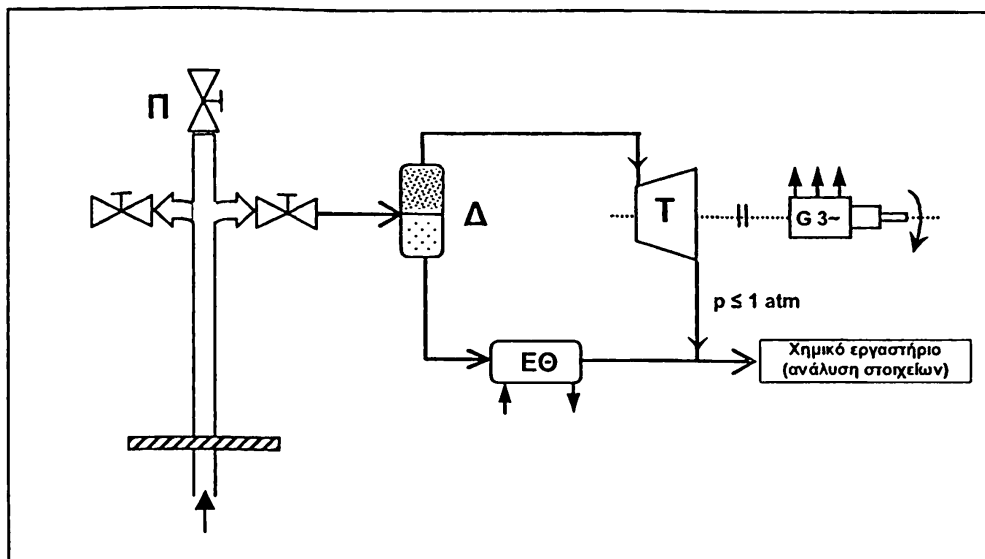
Η γεωθερμική ενέργεια χαμηλής θερμοκρασίας βρίσκει εφαρμογές στη γεωργία, τη γεωργική βιομηχανία, την κτηνοτροφία, την ιχθυοκαλλιέργεια και τη θέρμανση χώρων. Η γεωθερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Για την γεωθερμοηλεκτρική εκμετάλλευση, κύρια εφαρμόζονται τρεις τύποι εγκαταστάσεων (κύκλοι λειτουργίας) που κατατάσσονται στη συνέχεια ανάλογα με το κόστος εγκατάστασης ανά μονάδα εγκατεστημένης παραγόμενης ισχύος σε kW.

Τύπος Α: Γίνεται άμεση χρησιμοποίηση του μέσου γεωθερμίας στην ατμοστροβιλική μονάδα T-G μέσω του διαχωριστή Δ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Ενδείκνυται για ρευστά/μέσα γεωθερμίας με περιεκτικότητα σε αέρια πάνω από 50% και για άμεση κατασκευή-ακόμα και κατά τη μελέτη γεωθερμικού πεδίου. Αυτά σε συνδυασμό, με την προοπτική δυνατότητας μεταφοράς της εγκατάστασης



(απλή, σύντομη και φθηνή κατασκευή χωρίς προσωπικό επιτήρησης - σύστημα αυτόματου ελέγχου με τηλεχειρισμό). Όμως, ο τύπος αυτός εγκατάστασης έχει μικρό βαθμό απόδοσης ~ 20 kg γεωθερμικού μέσου αντιστοιχεί σε παραγωγή ηλεκτρενέργειας 1 kWh. Η κατασκευή τέτοιων μονάδων με ισχύ $1\div 4$ MW ενδείκνυται για την εξυπηρέτηση απομακρυσμένων περιοχών.



Σχήμα 4.3: Ατμοστροβιλική μονάδα T-G τύπου Α.

Τύπος Β: Και κατά τη λειτουργία του τύπου αυτού εγκατάστασης, γίνεται άμεση χρήση του μέσου γεωθερμίας στην ατμοστροβιλική μονάδα T-G, μέσω ενός διαχωριστού πάλι Δ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Ενδείκνυται για τις περιπτώσεις εκμετάλλευσης γεωθερμικού μέσου με περιεκτικότητα σε αέρια μέχρι 10% και διαφέρει ως προς τον προηγούμενο τύπο εγκατάστασης κατά τον συμπυκνωτή Σ μαζί με τον πύργο ψύξης ΠΨ και το συμπιεστή P για συμπίεση - εξαγωγή των αερίων που δεν συμπυκνώνονται στον συμπυκνωτή Σ. Το συμπύκνωμα οδηγείται πάλι με την μη ατμοποιήσιμη ποσότητα του γεωθερμικού μέσου, μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας (ΕΘ) για ανάλυση των χημικών στοιχείων σε χημικά εργαστήρια.

Η απόδοση μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι διπλάσια από αυτή του τύπου Α (10 kg γεωθερμικού μέσου παράγουν ηλεκτρενέργεια 1 kWh), ενώ το κόστος της είναι οπωσδήποτε μεγαλύτερο (υπερδιπλάσιο)-χωρίς να παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα του προηγούμενου τύπου εγκατάστασης.

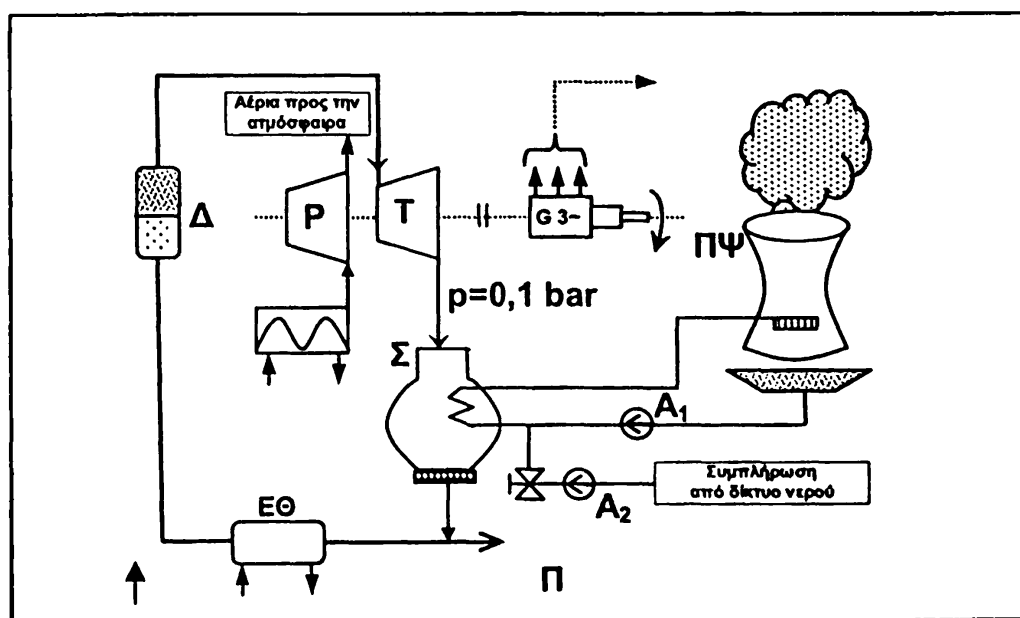
Τύπος Γ: Με το λειτουργικό χαρακτηριστικό, ότι το γεωθερμικό ρευστό/ μέσο δεν χρησιμοποιείται πλέον κατά τρόπο άμεσο στην ατμοστροβιλική μονάδα T-G, παρά μόνο ένα βοηθητικό μέσο (καθαρό ατμοποιημένο νερό) με πίεση $p = 2$ bar, η εγκατάσταση αυτή φαίνεται να είναι όπως στο Σχήμα 4.5. Από την έξοδο του στροβίλου (T), το νερό οδηγείται στο συμπυκνωτή (Σ) με πίεση $p = 0,1$ bar, και στη συνέχεια κλείνει κύκλωμα μέσω του προθερμαντή (Π) και της τροφοδοτικής



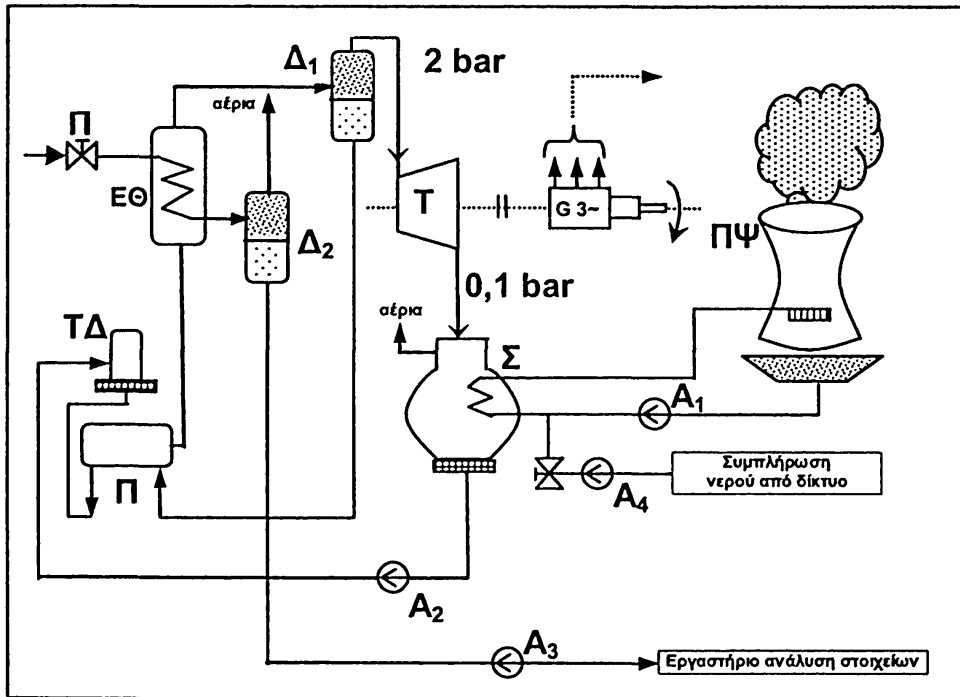
δεξαμενής (ΤΔ), σε τρόπο ώστε πολύ λίγα αέρια να περνούν προς το στρόβιλο. Ο τύπος αυτός της εγκατάστασης ενδείκνυται, για τις ενδιάμεσες περιπτώσεις περιεκτικότητας σε γεωθερμικά αέρια 10+50%. Η εγκατάσταση είναι πολύπλοκη, ή περισσότερο δαπανηρή (στην κατασκευή και λειτουργία), με ενδιάμεση απόδοση (14 kg γεωθερμικού μέσου παράγουν ηλεκτρενέργεια 1 kWh).

Σήμερα, έχουν κυριαρχήσει κύρια οι δυο πρώτοι τύποι εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής που χαρακτηρίζονται σαν εγκαταστάσεις απευθείας εκτόνωσης στην ατμόσφαιρα και εγκαταστάσεις κενού, αντίστοιχα. Από πλευράς συνολικού κόστους κατασκευής οι δεύτερες εγκαταστάσεις κοστίζουν το διπλάσιο.

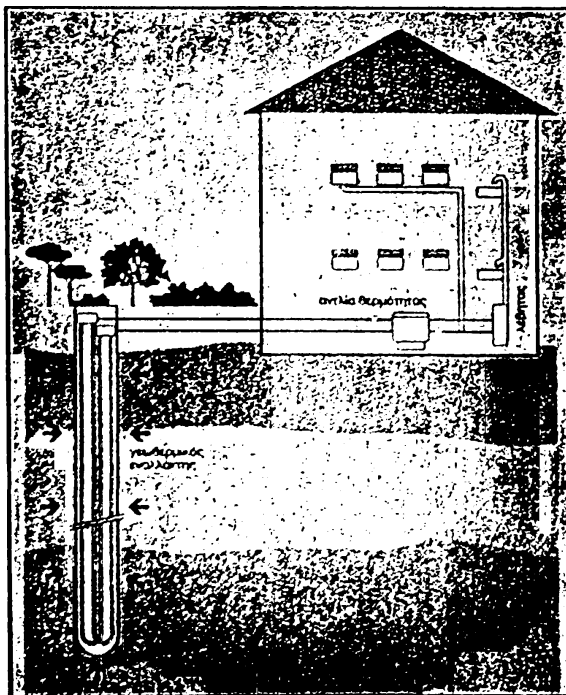
Η αβαθής γεωθερμική ενέργεια ή γεωθερμική ενέργεια ομαλής ενθαλπίας είναι η ενέργεια που εμπεριέχεται στα ανώτερα στρώματα του γήινου υπεδάφους, στα υπόγεια νερά ή πετρώματα, με θερμοκρασίες μικρότερες των 25 °C και σε βάθη μέχρι 150 m (Σχήμα 4.6). Η απομάστευση της ενέργειας αυτής επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός συνδυασμού αντλίας θερμότητας συζευγμένης είτε με υδρογέωτρηση ή πηγάδι (Ground Water Pump System), είτε με γήινο εναλλάκτη θερμότητας (Ground Coupled Heat Pump).



Σχήμα 4.4: Ατμοστροβιλική μονάδα T-G τύπου B.



Σχήμα 4.5: Ατμοστροβιλική μονάδα T-G τύπου Γ.



Σχήμα 4.6: Γεωθερμικό σύστημα θέρμανσης-ψύξης κατοικίας με αντλία θερμότητας και γεωθερμικό εναλλάκτη.

4.6 Υδρογόνο - Κυψέλες καυσίμων

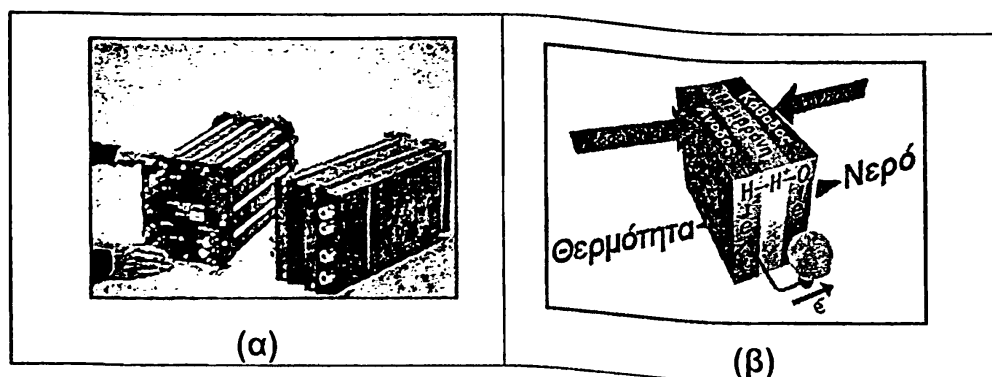
Το υδρογόνο αποτελεί το 90% του σύμπαντος και είναι το ελαφρύτερο αέριο στην φύση. Στη Γη βρίσκεται κυρίως σε ενώσεις όπως το νερό, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο κ.α. Εκτιμάται ότι το υδρογόνο θα αποτελέσει ένα νέο καύσιμο που θα χρησιμοποιούμε στο μέλλον, τόσο στα σπίτια όσο και στα αυτοκίνητα μας. Έχει το πλεονέκτημα όταν «καίγεται» να μην ρυπαίνει την ατμόσφαιρα, αφού παράγει μόνο θερμότητα και νερό.

Το υδρογόνο στο μέλλον θα παράγεται σε μεγάλο ποσοστό από την ηλεκτρόλυση του νερού, δηλ. μια διαδικασία κατά την οποία το νερό διασπάται με χρήση ηλεκτρικού ρεύματος σε υδρογόνο και οξυγόνο. Επομένως, αφού θα παράγεται από το νερό και η χρήση του θα εκλύει νερό, το υδρογόνο θεωρείται πρακτικά ανεξάντλητο. Ο ηλεκτρισμός που απαιτείται για την παραγωγή υδρογόνου από νερό ιδανικά μπορεί να προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (κυρίως άνεμο και ήλιο), ώστε να είναι απόλυτα φιλική προς το περιβάλλον.

Κυψέλη καυσίμου είναι συσκευή μετατροπής ηλεκτροχημικής ενέργειας που κατασκευάσθηκε για πρώτη φορά το έτος 1839 (Σχήμα 4.7α). Η λειτουργία της είναι αντίστροφη από αυτή μιας ηλεκτρολυτικής μονάδας και προσομοιάζει την λειτουργία μιας μπαταρίας, με την διαφορά ότι δεν έχει τον περιορισμό της εξάντλησης του καυσίμου μια και το καύσιμο (υδρογόνο) και το οξειδωτικό (αέρας ή οξυγόνο) εισάγονται συνεχώς στην άνοδο και την κάθοδο και τα προϊόντα (ενέργεια και νερό) απομακρύνονται (Σχήμα 4.7β).

Είναι 2 ή 3 φορές περισσότερη αποδοτική από μία μηχανή εσωτερικής καύσης που μετατρέπει καύσιμο σε ισχύ. Μια κυψέλη καυσίμου παράγει ηλεκτρισμό, νερό και θερμότητα χρησιμοποιώντας χημικό καύσιμο και οξυγόνο του αέρα. Το ιδανικό καύσιμο είναι το υδρογόνο, αν και οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να λειτουργήσουν με πληθώρα χημικών καυσίμων όπως φυσικό αέριο, υγραέριο, βενζίνη, νάφθα, πετρέλαιο, βιοαέριο, μεθανόλη, αιθανόλη ακόμα και πριονίδια (Πίνακας 4.2).





Σχήμα 4.7: (α) Κυψέλες καυσίμου. (β) Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου.

Πίνακας 4.2: Τύποι κυψελών καυσίμου.

Τύπος	Αλκαλικές	Στερεού Πολυμερούς*	Φωσφορικού οξέος	Τετηγμένου ανθρακικού άλατος	Στερεού Οξειδίου
Ακρωνύμιο	AFC	SPFC	PAFC	MPFC	SOFC
Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	60-90	80-100	200	650	800-1000
Απόδοση (%)	35-40	35-60	40-60	45-60	45-60
Ισχύς	10-100 kW	200 mW-500 kW	10 MW	(μελλοντικά)	100 MW (μελλοντικά)
100 MW (μελλοντικά)	Εφαρμογές	Διαστημικές και αμυντικές εφαρμογές, μεταφορές	Παραγωγή ηλεκτρισμού,	συμπαγωγή, μικρές φορητές εφαρμογές, μεταφορές	Παραγωγή ηλεκτρισμού, συμπαγωγή

* Στην κατηγορία αυτή υπάγονται και οι κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων, γνωστές ως PEM (Proton Exchange Fuel Cells).

4.7 Ασκήσεις

1. Να υπολογιστεί η ποσότητα παραγωγής φωτοχημικών προϊόντων ανά εκτάριο (10^4 m^2) την ημέρα, αν υποθέσουμε μοριακό βάρος $gm = 100$, κβαντική απόδοση $\Phi = 1$, φωτοχημική απορροφητικότητα $\alpha = 0,1$ για προσπίπτον φως μέσου μήκους κύματος $0,5 \mu\text{m}$ και 500 min ηλιοφάνεια την ημέρα με μέση ένταση 1 Langley/min .

Λύση

Επιφάνεια

$$S = 1 \text{ ha} \times 10^4 \text{ m}^2/\text{ha} \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{m}^2 = 10^8 \text{ cm}^2$$

Ηλιακή ακτινοβολία

$$I = 500 \text{ min/day} \times 1 \text{ Langley/min} = 500 \text{ cal/cm}^2 \text{ day}$$

Ολική ηλιακή ακτινοβολία

$$I_t = I \cdot S = 500 \text{ cal/cm}^2 \text{ day} \times 10^8 \text{ cm}^2 \times 4,18 \times 10^7 \text{ erg/cal} = 2,09 \times 10^{18} \text{ erg/day}$$

Από αυτό απορροφάται το $\alpha = 0,1$ άρα το ωφέλιμο ποσό είναι

$$I_t^a = 0,1 \times I_t = 2,09 \times 10^{17} \text{ erg/day}$$

Η ενέργεια του φωτονίου είναι $\epsilon = h \nu = (hc/\lambda)$ με $h = 6,5 \times 10^{-27} \text{ erg.sec}$ άρα

$$\epsilon = 6,5 \times 10^{-27} \text{ ergsec} \times \frac{3 \times 10^{10} \text{ cmsec}^{-1}}{0,5 \times 10^{-6} \text{ m}} = 3,9 \times 10^{-12} \text{ erg/photon}$$

Άρα τα φωτόνια που έχουμε στη διάθεσή μας για τη φωτοσύνθεση θα είναι

$$N = \frac{I_t^a}{\epsilon} = \frac{2,09 \times 10^{17} \text{ erg/day}}{3,9 \times 10^{-12} \text{ erg/photon}} = 0,5 \times 10^{29} \text{ photon/day}$$

Επειδή η κβαντική απόδοση $\Phi = 1$ θα έχουμε την παραγωγή μορίων υλικού

$$P = N\Phi = 0,5 \times 10^{29} \frac{\text{photons}}{\text{day}} \frac{\text{molecules}}{\text{photons}} = 0,5 \times 10^{29} \frac{\text{molecules}}{\text{day}}$$

φωτοχημικού προϊόντος.

Επειδή υπάρχουν $6 \times 10^{23} \text{ Molecules/Mole}$ (αριθμός Avogadro) θα έχουμε την παραγωγή

$$P = M = \frac{0,5 \times 10^{29} \text{ (m/day)}}{6 \times 10^{23} \text{ (m/Moles)}} = 0,83 \times 10^5 \left(\frac{\text{Moles}}{\text{day}} \right)$$

Αν 1 mole έχει βάρος 100 g τότε το βάρος της παραγόμενης βιομάζας θα είναι $G = 0,83 \times 10^5 \text{ mole/day} \cdot 100 \text{ g/mole} = 0,83 \times 10^7 \text{ g/day} = 8,3 \text{ τόνους/ημέρα}$ ανά εκτάριο (πολύ ψηλό).

Η φωτοσύνθεση στη γεωργία παράγει περίπου 2 ~ 3 τόνους ξηρού υλικού ανά εκτάριο, το χρόνο.

2. Να υπολογιστεί το ποσό της βιομάζας (σε kg) και η καλλιεργήσιμη έκταση (σε ha) που χρειάζεται ένα εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρισμού ισχύος 50 MW σ' ένα χρόνο. Το ενεργειακό περιεχόμενο της βιομάζας ξύλου είναι 3.750 Kcal/kg και η παραγωγή βιομάζας $2,0 \times 10^3 \text{ kg/ha}$.

Λύση

Η ηλεκτρενέργεια σε (kWh) που παράγει το χρόνο ένα εργοστάσιο των 50 MW είναι

$$E_{el} = 50 \times 10^3 \text{ kW} \times 365 \text{ days} \times 24 \text{ hours} = 219 \times 10^6 \text{ kWh/year}$$

Αν υποθέσουμε ένα συντελεστή μετατροπής θερμικής/ηλεκτρενέργειας $\eta = 25\%$ τότε η θερμική ενέργεια που χρειαζόμαστε για το εργοστάσιο, θα είναι

$$E_{th} = \frac{219 \times 10^6 \times 100}{25} \text{ kWh/year} = 876 \times 10^6 \text{ kWh/year}$$

$$\begin{aligned} &= 876 \times 10^6 \text{ kWh/year} \\ &= 876 \times 10^6 \text{ kWh/year} \times 8,5 \times 10^2 \text{ kcal/kWh} = \\ &= 7,5 \times 10^{11} \text{ kcal/year} \end{aligned}$$

Αν αυτή η ενέργεια παραχθεί από ξύλο με θερμαντική περιεκτικότητα 3.750 kcal/kg τότε το ποσό βιομάζας που θα χρειαστεί είναι

$$p = \frac{7,5 \times 10^{11} \text{ kcal/year}}{3,75 \times 10^3 \text{ kcal/kg}} = 2 \times 10^8 \text{ kg/year}$$

Αν η παραγωγή βιομάζας είναι $2,0 \times 10^3 \text{ Kg/ha}$ τότε η απαιτούμενη έκταση για καλλιέργεια θα είναι

$$S = \frac{2 \times 10^8 \text{ kcal/year}}{2 \times 10^3 \text{ kg/ha}} = 1 \times 10^5 \text{ ha/year}$$



106 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

$$S = 1 \times 10^5 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{year} = 1 \times 10^9 (10^{-3})^2 (\text{km})^2/\text{year}$$

$$S = 1.000 (\text{km})^2/\text{year}$$

Και αν υποθέσουμε μια συχνότητα κοπής των δένδρων 30 χρόνια τότε η συνολική απαιτούμενη επιφάνεια θα είναι

$$S = 30 \times 1.000 = 30.000 \text{ km}^2$$

Μια απαγορευτική έκταση για την Ελλάδα.



7. Προβλήματα

1. Το ποσό της ηλιακής ενέργειας που χρησιμοποιείται στη φωτοσύνθεση ανέρχεται σε $8,0 \times 10^{14}$ kWh το χρόνο. Αν η ολική πρωτογενής παραγωγή βιομάζας το χρόνο είναι 10^{11} kg άνθρακα (1 kg C ισοδυναμεί με $418 \times 10^6 \text{ J}$) ποιο ποσοστό ενέργειας μετατρέπεται σε χημική ενέργεια;
2. Η τελική απόδοση της παραγωγής βιομάζας ζαχαροκάλαμου είναι 2,5%. Η απόδοση όμως της φωτοσύνθεσης για φως μήκους κύματος $5 \times 10^{-5} \text{ cm}$ είναι 10 φορές μεγαλύτερη. Αν για την παραγωγή ενός γραμμομορίου H_2CO χρειάζονται 112 Kcal. να βρεθεί ο αριθμός των φωτονίων που χρειάζονται για την παραγωγή ενός μορίου H_2CO . Αν $3/4$ από τα παραπάνω φωτόνια χρησιμοποιούνταν για θέρμανση και τα υπόλοιπα για τις φωτοχημικές αντιδράσεις ποια θα ήταν η κβαντική απόδοση της φωτοσύνθεσης;
3. Ένας κηπουρός καλύπτει τις ηλεκτροενεργειακές ημερήσιες ανάγκες του θερμοκηπίου του με ηλεκτρογεννήτρια 30 kW. Η ενέργεια αυτή παράγεται από θερμικό εργοστάσιο κατανάλωσης βιομάζας (H_2CO), ενθαλπίας 3.600 Kcal/ kg. Αν η κατανάλωση CO_2 για την απαραίτητη ποσότητα βιομάζας είναι 40 kg ανά ώρα και η μέση ημερήσια ηλιοφάνεια 500 min, ποιο είναι ο συντελεστής απόδοσης της θερμικής μονάδας;



The first part of the paper is devoted to a discussion of the general theory of the problem. It is shown that the problem is equivalent to a certain boundary value problem for a second order elliptic equation. The second part of the paper is devoted to a discussion of the numerical solution of the problem. It is shown that the problem can be solved by the method of finite differences.

The third part of the paper is devoted to a discussion of the stability of the numerical solution. It is shown that the numerical solution is stable if the step size is chosen sufficiently small. The fourth part of the paper is devoted to a discussion of the convergence of the numerical solution. It is shown that the numerical solution converges to the exact solution if the step size is chosen sufficiently small.

The fifth part of the paper is devoted to a discussion of the error of the numerical solution. It is shown that the error of the numerical solution is of order $O(h^2)$ if the step size is chosen sufficiently small. The sixth part of the paper is devoted to a discussion of the application of the numerical solution to the problem of the motion of a particle in a magnetic field.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

5.1 Γενικά

1. Εισαγωγή

Η αιολική ενέργεια είναι μια έμμεση μορφή της ηλιακής ενέργειας. Δημιουργείται από την κίνηση αερίων μαζών την οποία επιβάλλει η διαφορά πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατεί στην ατμόσφαιρα λόγω διαφορετικής απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Είναι λοιπόν μια μορφή κινητικής ενέργειας και έχει χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο από πολύ παλιά. Αρχικά είχε χρησιμοποιηθεί για την κίνηση των πλοίων και αργότερα για την άντληση νερού και το άλεσμα σιτηρών με την βοήθεια των ανεμόμυλων. Οι αρχαιότεροι ανεμόμυλοι (κατακόρυφου άξονα) κατασκευάστηκαν στην Περσία τον 6^ο έως τον 9^ο αιώνα μ.Χ., ενώ η πρώτη γραπτή αναφορά γίνεται στην Κίνα το 13^ο αιώνα μ.Χ.

Από τις πιο πρώτες αναφορές χρησιμοποίησης αιολικής ενέργειας έχουμε την αναφορά στην Ομηρική Οδύσσεια, τους "Ασκούς του Αιόλου", από όπου και το όνομα αιολική ενέργεια. Κατά την Ελληνική μυθολογία ο Ζεός είχε ορίσει ειδικό «διαχειριστή» των ανέμων, τον Αίολο, ο οποίος τους κατηύθυνε από τη μυθική νήσο του, την Αιολία. Βοηθοί του ήταν: Βορέας, Καικίας, Απηλιώτης, Εύρος, Νότος, Λιψ, Ζέφυρος, Σκίρων.



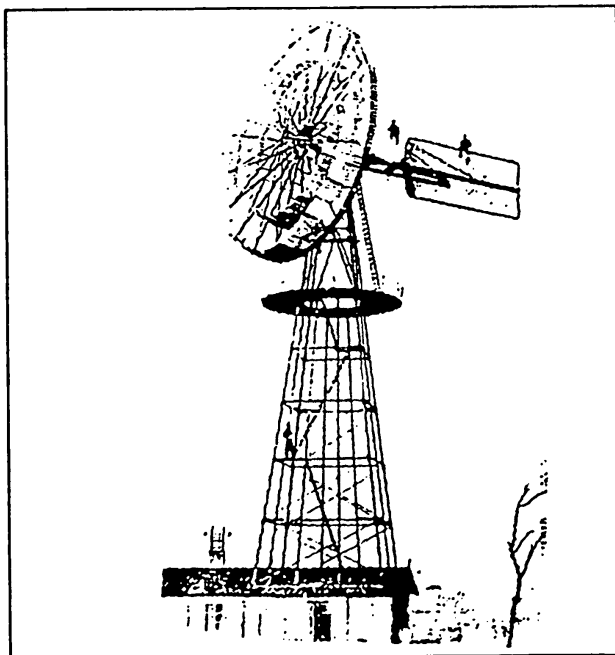
Υπολογίζεται ότι το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε αιολική είναι γύρω στο 1 - 2%. Το ποσό αυτό με τα σημερινά δεδομένα αντιπροσωπεύει περίπου μια ποσότητα ενέργειας 80 φορές μεγαλύτερη από την σημερινή παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας. Θεωρητικά, λοιπόν αν μπορούσαμε να χαλιναγωγήσουμε τους ανέμους θα είχαμε ανεξάντλητες πηγές ενέργειας. Στην πράξη όμως οι άνεμοι εξαρτώνται από πολυάριθμους παράγοντες όπως π.χ. οι εποχές του έτους, το κλίμα, η συγκεκριμένη τοπογραφία κ.τ.λ. και επομένως είναι τρομερά ευμετάβλητοι. Έτσι θα μπορούσαν να παίξουν βοηθητικό ρόλο σε ένα σύστημα ενέργειας δεν θα μπορούσαν όμως από μόνοι τους να συντηρήσουν ένα μεγάλο αυτοτελές ενεργειακό σύστημα.

5.2 Ιστορική ανασκόπηση

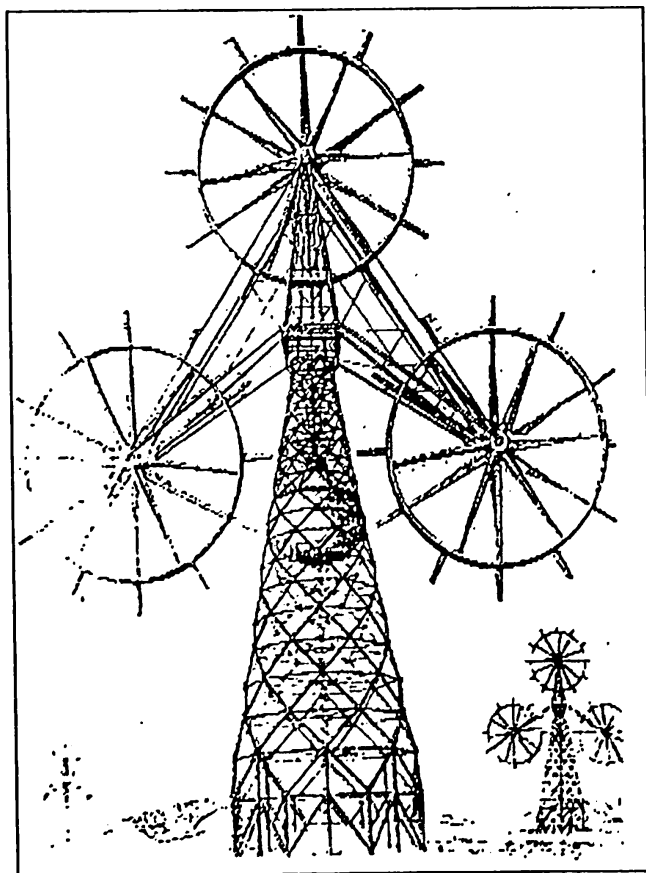
Η χρησιμοποίηση της αιολικής ενέργειας για την κίνηση καραβιών είναι γνωστή μας από τα πολύ παλιά χρόνια. Ίσως το κλασσικό παράδειγμα της θυσίας της Ιφιγένειας για τον εξευμενισμό του Αιόλου να μην είναι το πρώτο. Μια πιο εξελιγμένη μορφή χρησιμοποίησης της αιολικής ενέργειας στην αρχαιότητα ήταν η άρδευση της πεδιάδας της Μεσοποταμίας γύρω στον 7^ο π.Χ. αιώνα με ανεμόμυλους. Στον 3^ο π.Χ. αιώνα ο σχεδιασμός ενός ανεμόμυλου οριζόντιου άξονα με 4 πτερύγια αναφέρεται στον Ήρωνα τον Αλεξανδρέα. Το ίδιο χρονικό διάστημα στην Κίνα, στην Αίγυπτο και στην Ανατολική Μεσόγειο αναπτύσσονται ανεμόμυλοι κατακόρυφου και οριζόντιου άξονα. Στην Ευρώπη αρχικά εμφανίστηκαν γύρω στον Μεσαίωνα στην Ισπανία, την Πορτογαλία, την Γαλλία και την Ιταλία και αργότερα στην Αγγλία, την Ολλανδία και τη Γερμανία. Κατά τον 18^ο αιώνα στην Ευρώπη ήταν εγκατεστημένοι περίπου 20.000 ανεμόμυλοι με μια μέση ισχύ των 20 kW ο καθένας. Οι μεγαλύτεροι ανεμόμυλοι αρχίζουν να μπαίνουν σε λειτουργία την εκατονταετία 1840-1940. Θαυμαστή ανάπτυξη είχε γίνει στην Δανία το 1910 με συνολική αιολική ισχύ 200 MW. Ο κύριος τύπος είναι ο Ευρωπαϊκός ανεμόμυλος οριζοντίου άξονα με πολλά πτερύγια που ονομάζεται και Αμερικανικός κατασκευάστηκε σε πολλές μονάδες (6×10^6) στις ΗΠΑ. Τα σχέδια του ανεμόμυλου αυτού δημοσιεύτηκαν στη Λειψία το 1724. Το Σχήμα 5.1 δείχνει έναν μεγάλο Ευρωπαϊκό ανεμόμυλο του 1905.

Ο πρώτος ανεμόμυλος για παραγωγή ηλεκτρισμού κατασκευάστηκε το 1888 στο Cleveland του Ohio. Είχε διάμετρο φτερωτής (πτερυγίου) 17 μέτρα και ισχύ 12 kW.





Σχήμα 5.1: Ευρωπαϊκός ανεμόμυλος γύρω στα 1905.

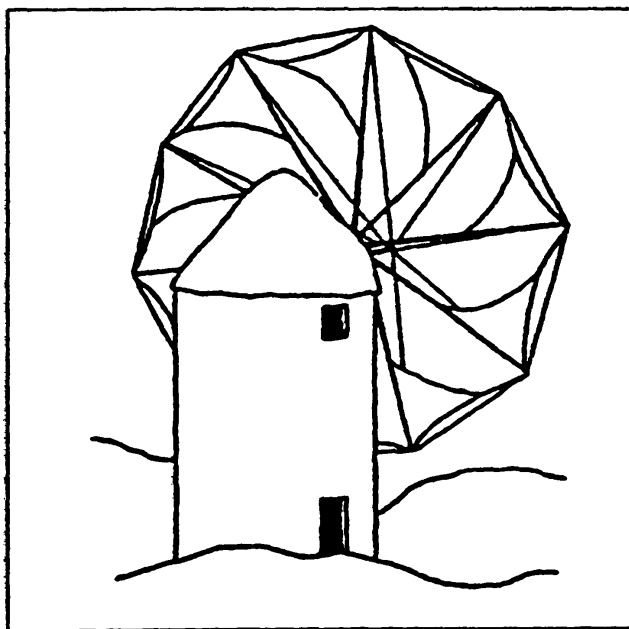


Σχήμα 5.2: Ο 75 MW ανεμόμυλος του προγράμματος Honnef (Γερμανία, 1932).

Στους νεώτερους χρόνους μεγαλύτεροι ανεμόμυλοι κατασκευάστηκαν στην Ρωσία το 1931 (100 kW) στις ΗΠΑ μεταξύ 1941-45 (1,2 MW) και στη Γαλλία 1958-62 (1 MW). Το πιο σπουδαίο πρόγραμμα κατασκευής ανεμόμυλων εκπονήθηκε στη Γερμανία πριν από το Δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο. Το πρόγραμμα αυτό ονομάστηκε Hohnel και προέβλεπε την κατασκευή αρκετών ανεμόμυλων με υψηλούς πύργους μέχρι 300 m με τρεις ή πέντε ρόδες. Η διάμετρος κάθε ρόδας ήταν περίπου 160 m. Η τρίροδη μονάδα είχε την δυνατότητα να περιστρέφεται στο οριζόντιο επίπεδο σε μεγάλες ταχύτητες και να αποδίδει ενέργεια 75 MW. Μικρότερα μοντέλα αυτού του προγράμματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2 κατασκευάστηκαν αυτή την εποχή με ρόδες διαμέτρου 50 m. Καταστράφηκαν όμως κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Ένα παρόμοιο πρόγραμμα έχει προταθεί και σήμερα στις ΗΠΑ από την Εταιρεία Heronimus.

Στον Ελληνικό χώρο η χρησιμοποίηση ανεμόμυλων άρχισε στα ανατολικά και κύρια στα νησιά Χίο, Ρόδο, Κρήτη, Κυκλάδες κ.λπ. Διακρίνουμε εδώ πέτρινους ανεμόμυλους με οριζόντιο άξονα και πάνινα πτερύγια (Σχήμα 5.3) καθώς και ανεμόμυλους με κατακόρυφο άξονα. Ιδιαίτερα στην Κρήτη στις αρχές του 20^{ου} αιώνα χρησιμοποιήθηκαν πολύ για αρδευτικούς σκοπούς. Το 1960 υπήρχαν 10.000 ανεμόμυλοι στο οροπέδιο Λασιθίου, 2.500 στην υπόλοιπη Κρήτη και 600 στη Ρόδο. Κατά μέσο όρο ο καθένας από αυτούς αντλεί γύρω στα 40 m³ νερού την ημέρα.

Τα τελευταία χρόνια οι ανεμόμυλοι εξελίχθηκαν σε αιολικές μηχανές (ανεμογεννήτριες) οι οποίες μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική με ηλεκτρογεννήτριες. Ο αρχικός και πιο διαδεδομένος τύπος των μηχανών αυτών ονομάζεται Darrieus από τον Γάλλο πρωτοκατασκευαστή του και έχει εξελιχθεί σε διάφορες παραλλαγές όπως θα δούμε αργότερα.



Σχήμα 5.3: Συνήθης Ελληνικός τύπος ανεμόμυλου.



5.3 Κινητική ενέργεια του ανέμου

Για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε όσο το δυνατό πληρέστερα το αιολικό δυναμικό της περιοχής, δηλαδή την τοπική και χρονική κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου σ' αυτήν. Η εξέλιξη της Μετεωρολογίας μας δίνει σήμερα τη δυνατότητα να μελετήσουμε με ακρίβεια τη γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία. Είναι φανερό ότι περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στον Ισημερινό παρά στους πόλους. Έτσι ο αέρας στον Ισημερινό ανυψώνεται και κινείται προς τους πόλους ενώ ψυχροί επιφανειακοί άνεμοι έρχονται από τους πόλους προς τον Ισημερινό. Η διεύθυνση λοιπόν της κυκλοφορίας των αερίων μαζών θα ήταν πάνω σε κατακόρυφο επίπεδο (κατά μήκος των μεσημβρινών) αν δεν περιστρέφετο η γη γύρω από τον άξονά της.

Επειδή η γη περιστρέφεται εκ Δυσμών προς Ανατολάς, η δύναμη Coriolis εκτρέπει τον ψυχρό επιφανειακό αέρα προς τα Δυτικά, ενώ ο θερμός αέρας της ανώτερης ατμόσφαιρας παρακλίνει προς τα Ανατολικά. Δημιουργούνται λοιπόν ζώνες χαμηλής και υψηλής πίεσης. Στην πραγματικότητα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4 σε κάθε ημισφαίριο δημιουργούνται 3 διαφορετικές κυψελίδες κυκλοφορίας. Διακρίνονται οι κυψελίδες κυκλοφορίας Hadley κοντά στον ισημερινό και οι κυψελίδες Ferrel των μέσων γεωγραφικών πλατών. Στην επιφάνεια, επικρατούν Βορειοανατολικοί άνεμοι σε γεωγραφικά πλάτη $0 - 30^\circ$ Β, Δυτικοί στα μέσα πλάτη ($30^\circ - 60^\circ$ Β) και Βορειοανατολικοί κοντά στον Βόρειο Πόλο. Η περιοχή σύγκλισης των αληγών και των ανταληγών ανέμων του Βορείου και Νοτίου ημισφαιρίου, ονομάζεται ενδοτροπική ζώνη σύγκλισης (intertropical convergence zone, ITCZ).

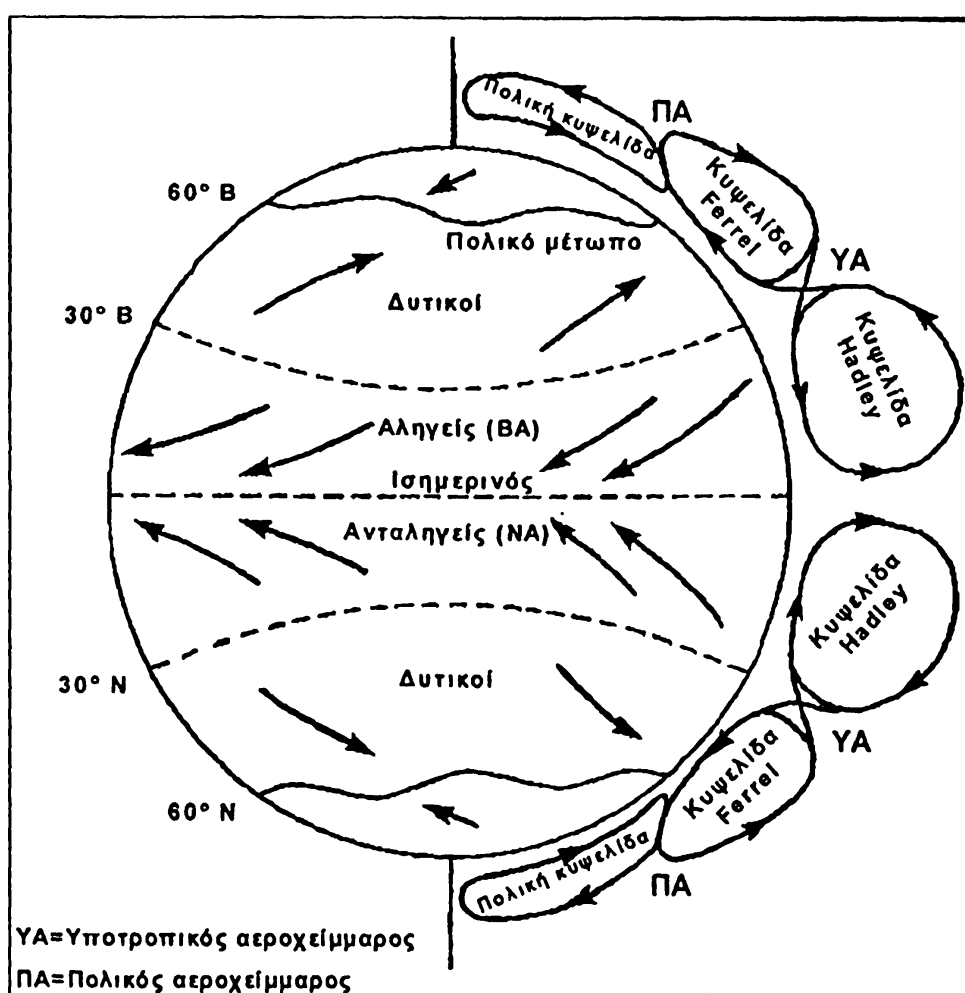
Διαφορές της πίεσης (Δp) μεταξύ δυο περιοχών που βρίσκονται σε απόσταση (Δx) μεταξύ τους (π.χ. τροπικός-πόλος, ξηρά-θάλασσα, κ.λπ.) προκαλούν την κίνηση της ατμόσφαιρας κάτω από την επίδραση του πεδίου βαρύτητας. Το αποτέλεσμα αυτής της κίνησης είναι ο άνεμος. Οι διαφορές στην πίεση προκαλούνται από την διαφορετική (διαφορική) θέρμανση των περιοχών αυτών. Η ένταση συνεπώς του ανέμου θα πρέπει να σχετίζεται με την οριζόντια βαθμίδα της πίεσης $\Delta p / \Delta x$ (βαροβαθμίδα) μεταξύ των περιοχών. Το πεδίο της ατμοσφαιρικής πίεσης είναι το πλέον περιγραφικό και παραστατικό για τα ατμοσφαιρικά συστήματα ή τις ατμοσφαιρικές διαταραχές.

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας και της υγρασίας με το ύψος στην ατμόσφαιρα προκαλούν μεταβολή στην πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα. Ως εκ τούτου πεπερασμένος όγκος (δείγμα) ατμοσφαιρικού αέρα κατά την διάρκεια ανοδικών ή καθοδικών κινήσεων συναντά περιοχές διαφορετικής πυκνότητας. Λόγω της παρουσίας του γήινου πεδίου βαρύτητας επενεργεί στο αέριο δείγμα δύναμη άνωσης με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της κατακόρυφης κίνησης. Στην περίπτωση που η κίνηση είναι επιταχυνόμενη το περιβάλλον χαρακτηρίζεται ασταθές (unstable). Όταν η κίνηση επιβραδύνεται, το αέριο δείγμα έχει την τάση να επιστρέψει στην αρχική του θέση και το περιβάλλον χαρακτηρίζεται ευσταθές (stable). Η απουσία δύναμης άνωσης περιγράφει την περίπτωση ουδέτερου (neutral) περιβάλλοντος.



Γενικά, η δύναμη άνωσης ανά μονάδα μάζας, δηλαδή η επιτάχυνση λόγω άνωσης που εξασκείται σε αέριο δείγμα, μεταβάλλεται μετά του ύψους και εξαρτάται από την θερμική στρωμάτωση της ατμόσφαιρας. Συμπερασματικά, οι κατακόρυφες κινήσεις εντός της ατμόσφαιρας ενισχύονται σε ασταθές περιβάλλον, ενώ αντίθετα περιορίζονται σε ευσταθές.

Στον άνεμο διακρίνουμε δύο στοιχεία, τη διεύθυνση και την έντασή του. Η διεύθυνση είναι το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος ενώ η έντασή του εκφράζεται είτε με την ταχύτητά του είτε με την πίεση την οποία ασκεί στην επιφάνεια των σωμάτων. Μεταξύ πίεσης και ταχύτητας υπάρχει μία απλή σχέση, η πίεση είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της ταχύτητας, $P = c V^2$.



Σχήμα 5.4: Κυψελίδες κυκλοφορίας (Hadley, Ferrel και πολική). Θεωρητική επιφανειακή και κατακόρυφη κυκλοφορία της ατμόσφαιρας ομοιογενούς και ομοιόμορφης γης.

Σαν γενικός κανόνας ισχύει ότι η καλύτερη θέση πρέπει να έχει την καλύτερη ποιότητα ανέμου. Η ποιότητα όμως αυτή εξαρτάται από την ταχύτητα και την διεύθυνσή του, και την τύρβωση που μπορεί να υπάρχει στην περιοχή και επίσης την κατανομή του, δηλαδή την μεταβολή της ταχύτητάς του με το ύψος. Είναι

φανερό ότι η ταχύτητά του ανέμου μπορεί να παρουσιάσει μεταβολές σε ελάχιστο χρονικό διάστημα, από ένα δευτερόλεπτο μέχρι μια ώρα) όχι μόνο ως προς την διεύθυνσή της αλλά και ως προς το μέτρο της. Μια συνεχής ροή ανέμου με σταθερή ταχύτητα θα ήταν η ιδανική περίπτωση. Στην πράξη έχουμε ταχύτητες μικρές που δεν είναι ικανές να κινήσουν την φτερωτή (πτερύγιο) και ταχύτητες μεγάλες οι οποίες μπορεί να την καταστρέψουν. Το ενδιαμέσο φάσμα τιμών είναι το φάσμα λειτουργίας. Από κατασκευαστική άποψη μεγάλο ρόλο παίζει ο προσδιορισμός της μέγιστης ταχύτητας γιατί από αυτή εξαρτάται ο υπολογισμός της αντοχής των τμημάτων της. Έτσι πριν την εγκατάσταση μιας αιολικής μηχανής σε μια περιοχή επιβάλλεται η μελέτη και ο προσδιορισμός των μεγίστων και των ελαχίστων ημερησίων τιμών για μια σειρά χρόνια, για να οριστεί η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου και η μέση ταχύτητα μιας χρονοσειράς (για παράδειγμα 10 χρόνια). Οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι υπάρχει μια μεταβλητότητα της μέσης τιμής η οποία έχει τοπικό χαρακτήρα. Παρότι η μέση τιμή είναι ένα σπουδαίο μέγεθος για την μελέτη της κυκλοφορίας του ανέμου και επομένως της εγκατάστασης μιας αιολικής μηχανής σε μια θέση υπάρχουν και άλλα σπουδαία μεγέθη που πρέπει να προσδιοριστούν. Τέτοια είναι η ημερησία και η εποχιακή μεταβλητότητα καθώς και η μεταβολή του ανέμου σαν συνάρτηση του υψόμετρου της τοποθεσίας. Η μέση εποχιακή ταχύτητα μεταβάλλεται λίγο χωρίς να παρουσιάζει μια συγκεκριμένη ιδιομορφία όπως π.χ. η ηλιοφάνεια ή η θερμοκρασία που παρουσιάζουν ελάχιστα και μέγιστα.

Στον Ελληνικό χώρο οι άνεμοι είναι ασθενέστεροι την Άνοιξη και ισχυρότεροι τον Χειμώνα ενώ οι ταχύτητές τους είναι μεγαλύτερες κατά τις πρώτες απογευματινές ώρες. Πρέπει όμως να εκτιμάται και ο τοπικός χαρακτήρας γιατί οι ταχύτητες του ανέμου επηρεάζονται από τοπικούς ανέμους, από απόγειες θαλασσινές αύρες και από αύρες βουνών και κοιλάδων.

Η εξάρτηση της ταχύτητας του ανέμου από το υψόμετρο μιας τοποθεσίας είναι εξ ίσου σημαντική για την μελέτη του αιολικού δυναμικού. Υπάρχουν γενικά μοντέλα υπολογισμού που παίρνουν υπ' όψιν τους την τραχύτητα του εδάφους (πεδιάδες με χλόη, δένδρα, λόφοι κ.λπ.) τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και το πάχος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (50 - 2.000 m πάνω από τη γη). Γενικά βρίσκεται ότι η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος. Στο πιο απλό μοντέλο περιγραφής (εκθετικός νόμος), η αύξηση περιγράφεται από την σχέση

$$\frac{u(z_1)}{u(z_2)} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^m \quad (1)$$

που δίνει την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z_2 αν είναι γνωστή η ταχύτητά του σε ύψος z_1 (και αντίστροφα). Η αριθμητική τιμή του εκθέτη m εξαρτάται από την ευστάθεια της ατμόσφαιρας, δηλαδή την μεταβολή της θερμοκρασίας με το ύψος, και από το μήκος τραχύτητας του εδάφους που είναι ανάλογο του μέσου ύψους των στοιχείων της επιφάνειας (δένδρα, λόφοι, κατασκευές, κ.λπ.). Συνήθως χρησιμοποιείται η τιμή 0,14.



Ένα πιο πολύπλοκο μοντέλο που παίρνει υπ' όψη του με μεγαλύτερη ακρίβεια τις παραμέτρους αυτές, είναι το λογαριθμικό μοντέλο που για μια ουδέτερη ατμόσφαιρα εκφράζεται από την σχέση

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z + z_0 - d}{z_0} \right) \quad (2)$$

όπου k είναι η σταθερά Κάρμαν ($k \approx 0,4$), d είναι το μηδενικό σημείο στο προφίλ ταχυτήτων, δηλαδή το ύψος στο οποίο η ταχύτητα του ανέμου αρχίζει να είναι διάφορη του μηδενός και z_0 είναι το μήκος τραχύτητας του εδάφους. Για πυκνές καλλιέργειες και ομοιόμορφες επιφάνειες

$$d = 0,64h$$

και

$$z_0 = 0,13h$$

όπου h είναι το μέσο ύψος των εμποδίων. Η παράμετρος u_* έχει διαστάσεις ταχύτητας και ονομάζεται ταχύτητα τριβής. Τυπικές τιμές της είναι γύρω στα $0,5 \text{ m s}^{-1}$. Συνήθως, υπολογίζεται πειραματικά από τη σχέση (2), θα μπορούσε όμως να εκφραστεί και σαν συνάρτηση της πυκνότητας του αέρα ρ και του συντελεστή εσωτερικής τριβής, δηλαδή μέσω της σχέσης

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (3)$$

όπου

$$\tau = \rho \frac{du}{dz}$$

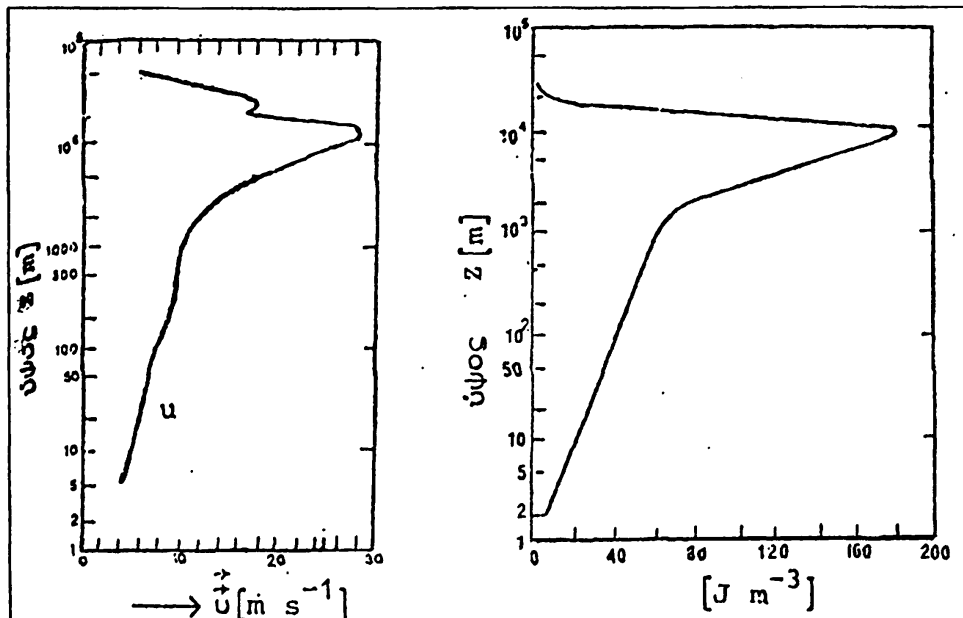
Η σχέση (2) που ισχύει για μια ουδέτερη ατμόσφαιρα, δηλαδή όταν $dT/dz = \text{σταθερό} = \text{με την αδιαβατική θερμοβαθμίδα} = (-g/c_p)$ πρέπει να διορθωθεί όταν το προφίλ της θερμοκρασίας δεν είναι ουδέτερο. Ένα τυπικό προφίλ ταχύτητας ανέμου δίνεται στο Σχήμα 5.5, σαν συνάρτηση του ύψους. Η ταχύτητα παρουσιάζει ένα μέγιστο γύρω στα 10 km από το οποίο μπορεί να υπολογιστεί και η μέγιστη πυκνότητα αιολικής ενέργειας.

Η ταχύτητα του ανέμου είναι χωροχρονικά μεταβαλλόμενο μέγεθος. Για το λόγο αυτό γίνονται συνεχείς μετρήσεις σε Μετεωρολογικούς σταθμούς και συντάσσονται χάρτες στους οποίους απεικονίζονται οι περιοχές με μηνιαίες μέσες ταχύτητες που υπερβαίνουν συγκεκριμένα όρια. Από τους χάρτες φαίνεται ότι η χώρα μας διαθέτει πολλές περιοχές με άφθονο αιολικό δυναμικό. Ιδιαίτερα τα νησιά, πολλές



παράκτιες περιοχές και ορισμένα οροπέδια παρέχουν εξαιρετικές δυνατότητες εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας (Πίνακας 5.1).

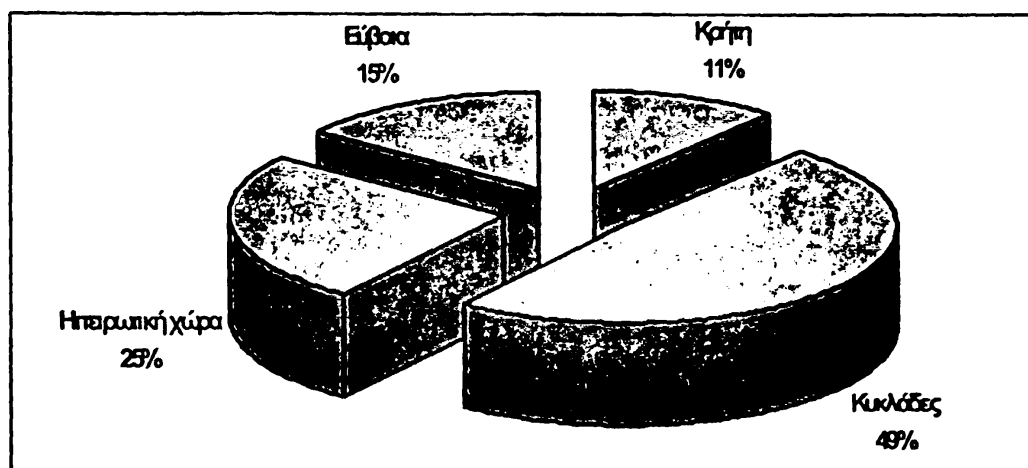
Τα αποτελέσματα σχετικής έρευνας της ΔΕΗ, για την καταγραφή του αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα, δείχνουν την δυνατότητα κάλυψης 6,46 TWh/year από αιολική ενέργεια που αντιπροσωπεύει ποσοστό 16% των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.5: Τυπικό προφίλ ταχύτητας ανέμου και πυκνότητα αιολικής ενέργειας.

Πίνακας 5.1: Μέσες ετήσιες τιμές ταχύτητας του ανέμου από μετρήσεις της ΔΕΗ την περίοδο 1980-90.

Τοποθεσία	Μέση ετήσια ταχύτητα (m/s)
Άνδρος	9,7
Τήνος	9,5
Σύρος	8,1
Κρήτη	8,1
Λέσβος	8,7
Σάμος	10,4
Εύβοια	9,2
Σαμοθράκη	6,6



Σχήμα 5.6: Κατανομή (%) του αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα.

5.4 Αιολική ενέργεια

Όταν γνωρίζουμε την στιγμιαία ή τη μέση ταχύτητα του ανέμου τότε μπορούμε να βρούμε την ενέργεια που περικλείει ο άνεμος. Από την Μηχανική ξέρουμε ότι η κινητική ενέργεια E_k που έχει μια μάζα $\Delta m = \rho \Delta V$ που κινείται με ταχύτητα u είναι

$$E_k = \frac{1}{2} \Delta m u^2 \quad (4)$$

Στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας, ο όγκος ΔV ισούται με το γινόμενο της κάθετης επιφάνειας S που διαπερνά η αέρια μάζα επί την ταχύτητα u στο χρόνο Δt , άρα

$$\Delta V = Su \Delta t \quad (5)$$

Από τις σχέσεις (4) και (5) βρίσκουμε την κινητική ενέργεια και την ισχύ του ανέμου

$$E_k = \frac{1}{2} \rho S u^3 \Delta t \quad (6)$$

και

$$P = \frac{1}{2} \rho S u^3 \quad (7)$$

Η πυκνότητα (ρ) του ατμοσφαιρικού αέρα μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση

$$\rho = 1,255 \left(\frac{288,15}{T} \right) \left(\frac{p}{1013,3} \right) [\text{kg/m}^3] \quad (8)$$



όπου p είναι η ατμοσφαιρική πίεση σε (mb) και T η θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{K}$. Στην πράξη η πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα θεωρείται σταθερή και παίρνει την τιμή $\rho = 1,295 \text{ kg/m}^3$.

Η σχέση (7) είναι σημαντική γιατί δείχνει ότι η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας και ανάλογη της επιφάνειας πρόσπτωσης. Έτσι αν διπλασιαστεί η ταχύτητά του οκταπλασιάζεται η ισχύς του. Επίσης, επειδή σε μια αιολική μηχανή η επιφάνεια S που σαρώνει η φτερωτή είναι πR^2 , όπου R είναι η ακτίνα της φτερωτής, τετραπλασιάζεται η ισχύς της μηχανής όταν διπλασιαστεί η ακτίνα της φτερωτής.

Για τον προσδιορισμό της εξίσωσης (7) υποθέσαμε ότι η ταχύτητα u δεν μεταβάλλεται αισθητά σαν συνάρτηση του χρόνου. Δηλαδή η τιμή της ταχύτητας u κατά την διάρκεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας δεν απέχει πολύ από τη μέση τιμή της. Όταν αυτή η υπόθεση δεν ισχύει, όταν δηλαδή η ταχύτητα u αλλάζει αισθητά στο χρονικό διάστημα $t_0, t_0 + \tau$ λειτουργίας τότε η ισχύς δίνεται από τη σχέση

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+\tau} \rho S u^3 dt \quad (9)$$

όπου u τώρα θα είναι η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου. Επίσης σε περίπτωση μη κάθετης πρόσπτωσης είναι προφανές ότι η επιφάνεια S πρέπει να αντικατασταθεί από την ενεργό επιφάνεια $S \cos \theta$ όπου θ είναι η γωνία της ταχύτητας u με την κάθετο στην επιφάνεια S .

5.5 Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς του ανέμου - Όριο Betz

Είναι φανερό ότι μια αιολική μηχανή δεν μπορεί να δεσμεύσει όλη την κινητική ενέργεια του ανέμου γιατί τότε η μάζα του αέρα που διαπερνά την φτερωτή θα είχε μηδενική ταχύτητα. Το μέγιστο ποσό της κινητικής ενέργειας του ανέμου που μπορεί να δεσμεύσει μια ιδανική αιολική μηχανή λέγεται όριο Betz (από τον A. Betz). Ο υπολογισμός του δεν είναι δύσκολος και στηρίζεται σε δύο βασικές υποθέσεις: α) Οι συνθήκες γύρω από την φτερωτή είναι ομοιόμορφες και β) η ταχύτητα του αέρα είναι αξονική, πριν και μετά από την φτερωτή.

Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται μια ιδανική αιολική μηχανή που ικανοποιεί τις δύο πιο πάνω υποθέσεις. Στα σημεία (1) και (2) και επάνω στην φτερωτή δίνονται οι αντίστοιχες ταχύτητες και πιέσεις του ανέμου u_1, u_2, u και p_1, p_2, p καθώς και οι αντίστοιχες διατομές μέσα από τις οποίες περνάει ο άνεμος. Εφόσον παραδεχόμαστε ομοιόμορφες συνθήκες, η πίεση αρκετά μπροστά από την φτερωτή είναι η ίδια με την πίεση αρκετά μακριά πίσω από αυτή. Δηλαδή $p_1 = p_2 = p$. Επειδή το ρευστό είναι ασυμπίεστο, σύμφωνα με το νόμο του Bernoulli πρέπει



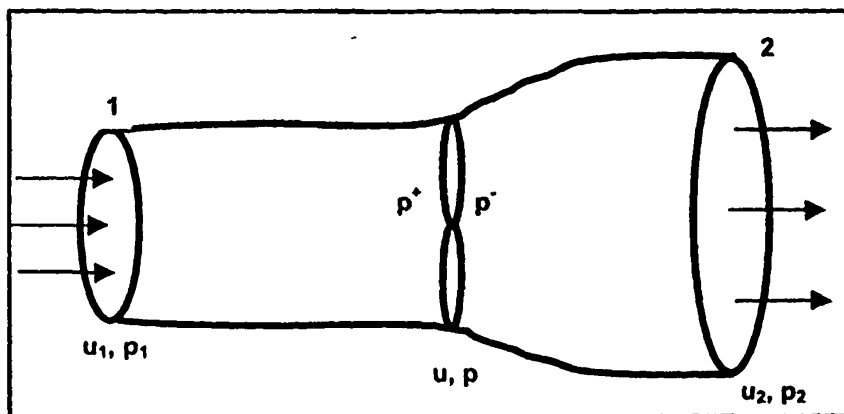
σε μια φλέβα ανέμου το άθροισμα της στατικής και της δυναμικής πίεσης να είναι σταθερό έτσι

$$p_{\text{στ}} + p_{\text{δυν}} = p_t = \text{σταθ.} \quad (10)$$

Επομένως αν ονομάσουμε με p^+ και p^- αντίστοιχα τις πιέσεις αμέσως μπροστά και αμέσως πίσω από την φτερωτή τότε σύμφωνα με την εξίσωση (10) θα έχουμε:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 = p^+ + \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (12)$$

$$p_2 + \frac{1}{2} \rho u_2^2 = p^- + \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (13)$$



Σχήμα 5.7: Ιδανική αιολική μηχανή.

Από τις εξισώσεις (12) και (13) προκύπτει ότι η πίεση αυξάνει αμέσως πριν από την φτερωτή και ελαττώνεται αμέσως μετά από αυτή, δηλαδή όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζει μια ασυνέχεια πάνω στη φτερωτή λόγω του ότι $u_1 > u_2$. Επίσης φαίνεται ότι $S_1 < S < S_2$, δηλαδή ότι οι διατομές του σωλήνα ροής στα σημεία (1) και (2) και στη φτερωτή είναι όπως σχεδιάστηκαν στο Σχήμα 5.7. Η δύναμη που ασκεί ο άνεμος πάνω στη φτερωτή θα είναι

$$F = (p^+ - p^-)S = \frac{1}{2} \rho (u_1^2 - u_2^2)S \quad (14)$$

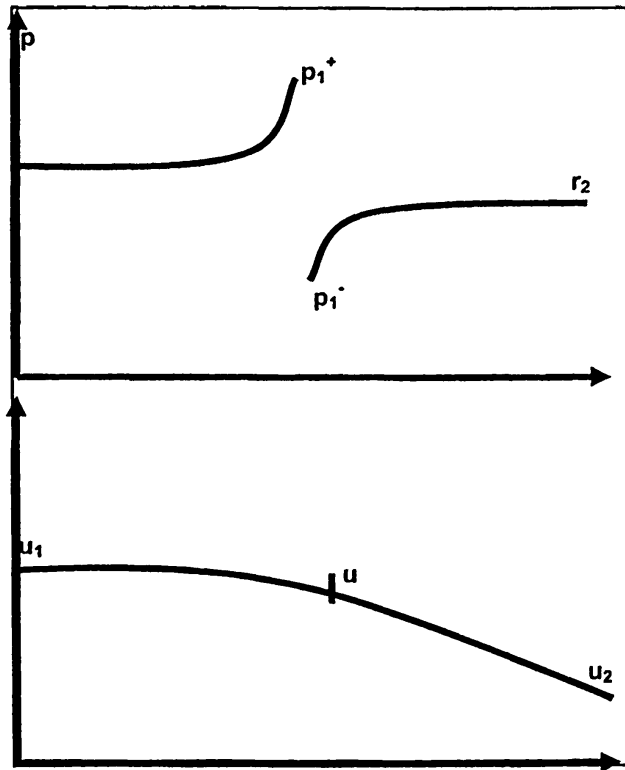
Η δύναμη αυτή πρέπει να είναι ίση με την μεταβολή της ορμής (J) που μεταφέρει η ποσότητα μάζας ανέμου Δm που διαπερνά την φτερωτή σε χρόνο Δt δηλαδή

$$F = \frac{\Delta J}{\Delta t} = \frac{\Delta m}{\Delta t} (u_1 - u_2) = \rho u S (u_1 - u_2) \quad (15)$$



Εξισώνοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις βρίσκουμε ότι

$$u = \frac{(u_1 + u_2)}{2} \quad (16)$$



Σχήμα 5.8: Ασυνέχεια της πίεσης πάνω στην φτερωτή.

δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή της φτερωτής είναι ίση με το ημιάθροισμα των ταχυτήτων u_1 και u_2 . Από την άλλη μεριά ξέρουμε ότι η ταχύτητα u είναι μικρότερη της u_1 , $u < u_1$ γιατί διαφορετικά δεν θα δεσμευόταν κινητική ενέργεια του ανέμου. (Για $u = u_1$, από την εξίσωση (16) προκύπτει $u_1 = u = u_2$. Έτσι μπορούμε να εκφράσουμε το u σαν συνάρτηση της u_1

$$u = u_1(1 - \alpha) \quad (17)$$

όπου α είναι ένας αδιάστατος συντελεστής. Είναι προφανές από την εξίσωση (16) και την εξίσωση (17) ότι

$$\alpha = \frac{u_1 - u_2}{2u_1} \quad (18)$$

οπότε προκύπτουν δύο όρια για το α . Το μικρότερο $\alpha = 0$, όταν $u_1 = u_2 = u$ και το μεγαλύτερο $\alpha = (1/2)$, όταν $u_2 = 0$. Επομένως το α παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1/2, δηλαδή



$$0 < \alpha < \frac{1}{2} \quad (19)$$

Από την εξίσωση (14) έχουμε για την ισχύ μιας ιδανικής αιολικής μηχανής

$$P = F u = \frac{1}{2} \rho (u_1^2 - u_2^2) u S \quad (20)$$

Με τη βοήθεια των εξισώσεων (16 - 18), η εξίσωση (20) μπορεί να γραφεί σαν

$$P = 2 S \rho u_1^3 \alpha (1 - \alpha) \quad (21)$$

Επειδή u_1 είναι σταθερά, η μόνη μεταβλητή στην εξίσωση (21) είναι η παράμετρος α . Έτσι μπορούμε να βρούμε την μέγιστη τιμή της W διαφορίζοντας ως προς α

$$\frac{dP}{d\alpha} = 0 = 2 S \rho u_1^3 (\alpha - 1) \left(\alpha - \frac{1}{3} \right) = 0$$

Από την διαφορίση προκύπτουν δύο λύσεις. Η $\alpha = 1$ και η $\alpha = 1/3$. Η $\alpha = 1$ απορρίπτεται λόγω της εξίσωσης (19). Έτσι $\alpha = 1/3$ και η μέγιστη ισχύς ιδανικής αιολικής μηχανικής, η οποία ονομάζεται και όριο Betz γίνεται

$$P_{\max} = \frac{8}{27} S \rho u_1^3 = \left(\frac{16}{27} \right) \left(\frac{1}{2} \right) S \rho u_1^3 = C_p P \quad (22)$$

όπου P είναι ισχύς του ανέμου και $C_p = 16/27$ είναι ο συντελεστής μέγιστης ισχύος ή συντελεστής Betz. Από την εξίσωση (17) προκύπτει η τιμή της ταχύτητας του ανέμου επάνω στη φτερωτή για την οποία η ισχύς γίνεται μέγιστη :

$$u = \left(\frac{1}{2} \right) \left(u_1 + \frac{u_1}{3} \right) = \frac{2}{3} u_1 \quad (23)$$

Έρα στην μέγιστη απόδοση η ταχύτητα του ανέμου στην φτερωτή πέφτει στα $2/3$ της αρχικής του ταχύτητας. Είναι φανερό ότι ο συντελεστής θα είναι μικρότερος από το όριο Betz λόγω άλλων απωλειών που εμφανίζονται στις πραγματικές αιολικές μηχανές. Ακόμη μικρότερη είναι η διαθέσιμη αιολική ενέργεια γιατί στην πραγματικότητα η αιολική μηχανή δεν μπορεί να απορροφήσει όλη την διαθέσιμη ενέργεια του ανέμου. Αυτό οφείλεται όχι μόνο στο ότι πρέπει $u_2 > 0$ αλλά και στο ότι η ίδια η φτερωτή εκτρέπει ένα μέρος της μάζας του αέρα που την προσεγγίζει. Έτσι στην πραγματικότητα η μάζα αέρα που διαπερνά τη φτερωτή είναι μικρότερη από αυτή που συμπεριλάβαμε στην παραπάνω μελέτη.



5.6 Απόδοση αιολικών μηχανών

Στην προηγούμενη παράγραφο είδαμε ότι η μέγιστη ισχύς μιας ιδανικής αιολικής μηχανής ισούται με τα 16/27 της ισχύος του ανέμου. Στην πραγματικότητα αυτή είναι πολύ μικρότερη και εξαρτάται από τον τύπο της μηχανής και τον λόγο της περιστροφικής ταχύτητας της φτερωτής προς την αξονική ταχύτητα του ανέμου πάνω στη φτερωτή

$$\lambda = \frac{\omega R}{u} \quad (\text{tip speed ratio})$$

όπου R είναι η ακτίνα της φτερωτής. Πέρα όμως από αυτό η απόδοση μιας αιολικής μηχανής εξαρτάται και από την απόδοση καθενός από τα στοιχεία που την απαρτίζουν. Για μια αιολική μηχανή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για παράδειγμα, η ολική απόδοση θα εξαρτάται από τις αποδόσεις του πολλαπλασιαστή (η_1), της γεννήτριας (η_2) και των συσσωρευτών (η_3). Έτσι η τελική απόδοση της αιολικής μηχανής θα είναι

$$P_M = c_p \eta_1 \eta_2 \eta_3 P$$

και η αντίστοιχη ετήσια αιολική ενέργεια

$$E = P_M T$$

Γενικά, η μέγιστη ισχύς μιας αιολικής μηχανής οριζοντίου άξονα είναι γύρω στα 27% της μέγιστης διαθέσιμης αιολικής ισχύος. Ενώ ενός κατακόρυφου άξονα είναι γύρω στα 21%. Στον υπολογισμό του συντελεστή ισχύος πρέπει βέβαια να συνεκτιμηθεί και το ότι η απόδοση μεταβάλλεται στα διάφορα πεδία ταχυτήτων του ανέμου και ιδιαίτερα στις τρεις διαφορετικές χαρακτηριστικές τιμές, την ταχύτητα έναρξης u_0 , την ταχύτητα λειτουργίας u_R και στην ταχύτητα αποκοπής u_e .

Η ταχύτητα έναρξης προσδιορίζεται από την ελάχιστη ταχύτητα που πρέπει να έχει ο άνεμος ώστε η ενέργεια που μεταδίδει στην φτερωτή να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια τριβής. Έτσι για ταχύτητα $u < u_0$ δεν έχουμε αξιοποίηση της ισχύος του ανέμου.

Όταν η τιμή της ταχύτητας του ανέμου ξεπερνάει την u_0 τότε έχουμε μια συνεχή αύξηση της ισχύος της μηχανής μέχρι μιας ταχύτητας u_R , πέρα από την οποία ενεργοποιείται κάποιο σύστημα που κρατάει την ισχύ της μηχανής σταθερά. Η ταχύτητα αυτή λέγεται ονομαστική ταχύτητα και η αντίστοιχη ισχύς ονομαστική ισχύς. Τέλος όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ μεγάλη $u > u_e$ η μηχανή τίθεται εκτός λειτουργίας για λόγους ασφάλειας. Η ταχύτητα u_e λέγεται ταχύτητα αποκοπής και υποδηλώνει ότι για ταχύτητες του ανέμου $u > u_e$ η ισχύς του ανέμου είναι αναξιοποίητη. Γενικά καμιά μηχανή δεν εργάζεται στην ονομαστική της ισχύ και ειδικά οι αιολικές μηχανές εργάζονται σε πολύ χαμηλότερη ισχύ λόγω της αλλαγής



των ταχυτήτων του ανέμου. Από διάφορες μελέτες συνάγεται το συμπέρασμα ότι η παραγόμενη από μια αιολική μηχανή ενέργεια μεγιστοποιείται για ταχύτητες

$$u_R = 1,9\bar{u}$$

όπου $\bar{u}$ είναι η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου στη θέση εγκατάστασης. Η δε ταχύτητα έναρξης μπορεί να δοθεί από την σχέση

$$u_o = \frac{8P_o}{\rho C_p D^2}$$

όπου P_o είναι η ισχύς που χάνεται για ταχύτητες $u < u_o$. Έχει επίσης υπολογιστεί ότι $P_o/P_R = 0,1$, ενώ οι συνηθισμένες ταχύτητες αποκοπής u_o κυμαίνονται μεταξύ 22 και 28 m/s.

5.7 Τύποι αιολικών μηχανών

Είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο ότι ένα σπουδαίο χαρακτηριστικό των αιολικών μηχανών είναι ο συντελεστής απόδοσης, ο οποίος εξαρτάται από το λόγο, λ , της ταχύτητας της φτερωτής δια της ταχύτητας του ανέμου. Έτσι από την τιμή της λ θα εξαρτάται και ο αριθμός των πτερυγίων της μηχανής. Υπολογίζεται ότι για $\lambda = 1$ θα πρέπει η μηχανή να διαθέτει από 8-24 πτερύγια, για $\lambda = 2$, 6 έως 12 πτερύγια, για $\lambda = 3$, για 3 έως 6 πτερύγια και για $\lambda = 4$, για 2 έως 4 πτερύγια. Για τιμές $\lambda > 5$, για 2 έως 3 πτερύγια είναι αρκετά. Η κύρια ταξινόμηση των αιολικών μηχανών δεν γίνεται όμως από τον αριθμό των πτερυγίων αλλά από την διεύθυνση του άξονα περιστροφής. Έτσι διακρίνουμε δύο κύριους τύπους αιολικών μηχανών: α) αυτές με οριζόντιο άξονα περιστροφής και β) αυτές με κατακόρυφο. Όλοι σχεδόν οι παραδοσιακοί ανεμόμυλοι ήταν οριζοντίου άξονα τα πτερά τους είχαν μήκος 5 έως 15 m και πλάτος ίσο με το 1/5 του μήκους. Είχαν γωνιακές ταχύτητες από 10 έως 40 στροφές/μήν και λ γύρω στα 2,5. Σήμερα έχουν σχεδόν εξαφανισθεί. Υπάρχουν μόνο σε πολύ περιορισμένη κλίμακα στα νησιά του Αιγαίου, στην Βόρεια Θάλασσα και την Βαλτική. Συνήθως είχαν 3 ή 4 πτερύγια όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9, εκτός από τον πέτρινο τύπο (Σχήμα 5.3) που είχε περισσότερα.

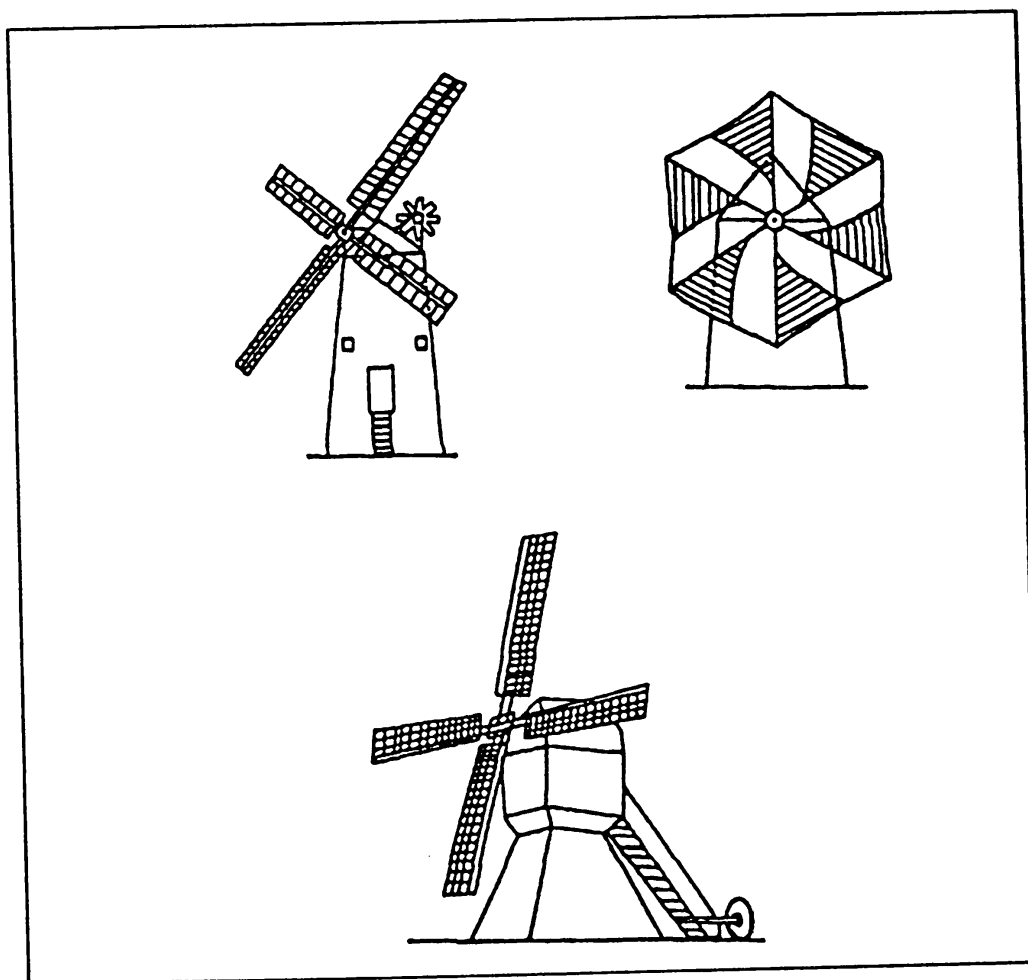
Εκτός από την παράμετρο λ μια άλλη πολύ χρήσιμη παράμετρος είναι η στιβαρότητα (solidity) που είναι ο λόγος του εμβαδού όλων των πτερυγίων προς το εμβαδόν του κύκλου που περιγράφουν τα πτερύγια

$$\sigma = \frac{n c R}{\pi R^2} = \frac{n C}{\pi R}$$

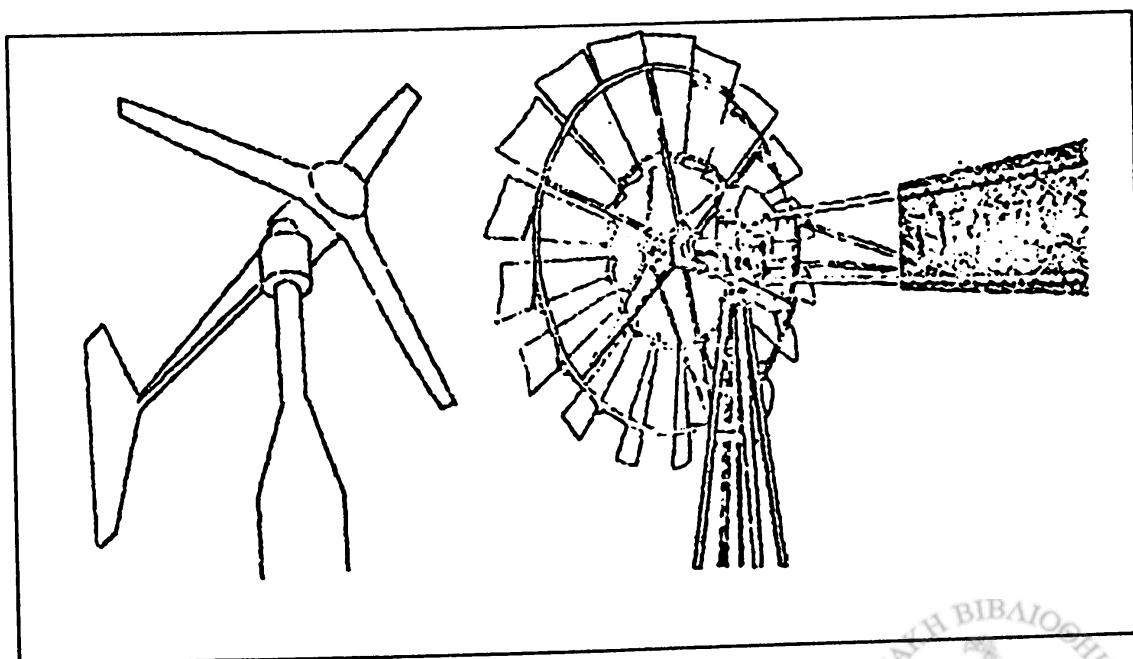


όπου C είναι η μέση χορδή και n ο αριθμός των πτερυγίων. Είναι φανερό ότι οι ανεμόμυλοι που έχουν μικρή στιβαρότητα είναι πολύ γρήγοροι είναι όμως και αρκετά ευπαθείς. Χρειάζονται διέγερση για να ξεκινήσουν επειδή για μικρές ταχύτητες περιστροφής αναπτύσσουν μικρές ροπές. Οι ανεμόμυλοι αυτοί έχουν καλές αποδόσεις και είναι οι πιο διαδεδομένοι σήμερα για ηλεκτροπαραγωγή. Ένας συνήθης τέτοιος τύπος δίνεται στο Σχήμα 5.10. Στο Σχήμα 5.10 δίνεται επίσης και ο αμερικάνικος ανεμόμυλος μια παραλλαγή του οποίου είδαμε και στο Σχήμα 5.2. Έχει μεγάλη στιβαρότητα, είναι αργόστροφος, εύκολος στην κατασκευή και χρησιμοποιείται κυρίως για άρδευση. Η συνήθης διάμετρος του είναι από 6 έως 8 m και η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας 2-3 m/s. Δεν αποδίδει μεγάλη ισχύ λόγω της χαμηλής ταχύτητας που αναπτύσσει και του μεγάλου βάρους του. Άλλοι τύποι αιολικών μηχανών οριζοντίου άξονα στις οποίες έχουν γίνει μελέτες είναι η μονόπτερη η οποία αποτελείται από ένα πτερύγιο ή μια ακτίνα πτερυγίου και ένα αντίβαρο και η αιολική μηχανή με χωνί διάχυσης Σχήμα 5.11. Η μονόπτερη είναι αρκετά απλή αλλά εμφανίζει σημαντικές δονήσεις. Η μηχανή με χωνί διάχυσης έχει το πλεονέκτημα να αυξάνει τη σχετική ταχύτητα του ανέμου σχεδόν κατά 50% και επομένως την ισχύ της κατά 3,5. Δεν χρησιμοποιείται όμως συχνά γιατί δεν περιστρέφεται εύκολα όταν αλλάζει η διεύθυνση του ανέμου. Μια παραλλαγή της μηχανής αυτής που έχει γνωρίσει επιτυχία φαίνεται επίσης στο Σχήμα 5.11. Οι εγκάρσιες τομές στα άκρα των πτερυγίων της δίνουν την δυνατότητα προσανατολισμού στις διευθύνσεις του ανέμου. Γενικά για όλες τις μηχανές οριζοντίου άξονα πρέπει να γίνει ουσιαστική μελέτη του σχεδιασμού της φτερωτής (αριθμός πτερυγίων, πλάτος, αεροτομία κ.λπ.) του προσανατολισμού της, (αυτοματισμός σχετικά με τις ταχύτητες έναρξης και λειτουργίας και διεύθυνσης του ανέμου) και του ύψους του άξονά της από το έδαφος που είναι συνάρτηση της τραχύτητας του εδάφους.



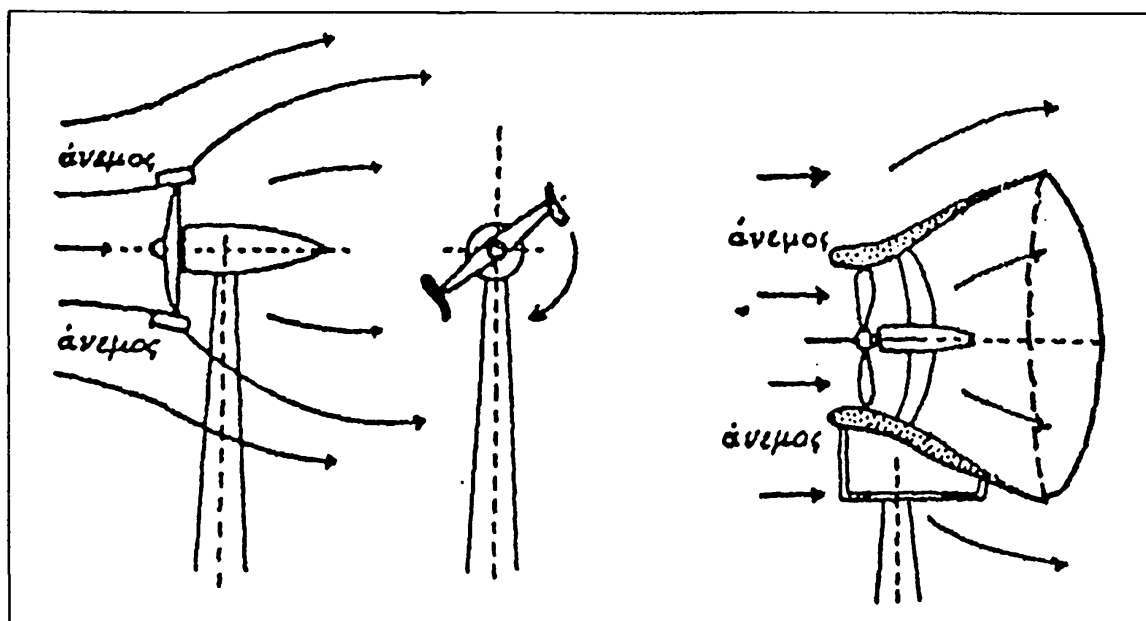


Σχήμα 5.9: Παραδοσιακοί ανεμόμυλοι.

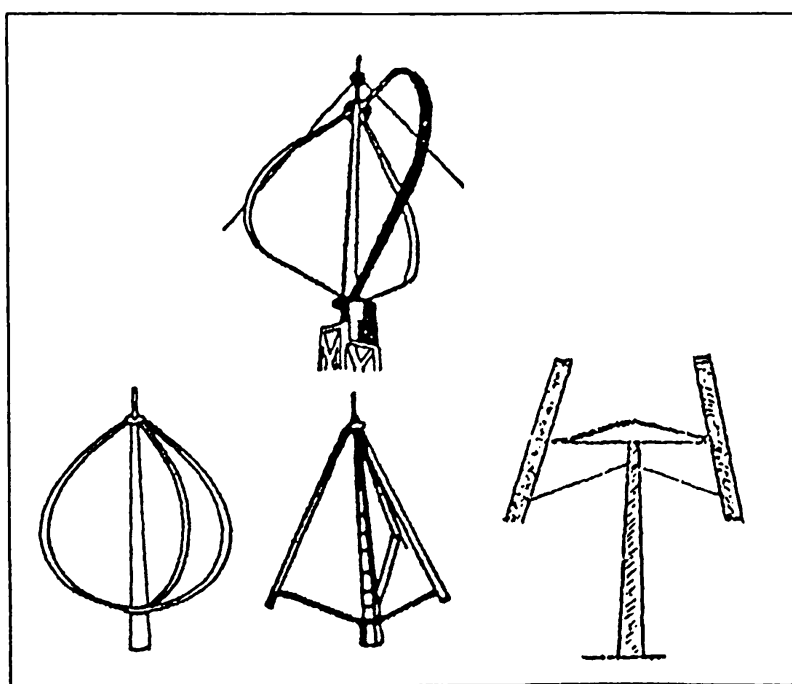


Σχήμα 5.10: Ανεμόμυλοι με μικρή και μεγάλη στιβαρότητα.

Ανεμόμυλοι κατακόρυφου άξονα λέγεται ότι πρωτοεμφανίστηκαν τον 7^ο π.Χ. αιώνα. Ο γνωστότερος είναι ο ανεμόμυλος Darrieus. Έχει μικρή στιβαρότητα είναι πολύστροφος και έχει μεγάλο συντελεστή ισχύος. Είναι κατάλληλος για ηλεκτροπαραγωγή, δεν ξεκινά μόνος του και έχει εξελιχθεί σε διάφορες παραλλαγές με κυλινδρική, τριγωνική, σφαιρική ή παραβολική επιφάνεια σάρωσης (Σχήμα 5.12).



Σχήμα 5.11: Αιολικές μηχανές με χωνί διάχυσης.



Σχήμα 5.12: Αιολικές μηχανές τύπου Darrieus.

Ο συντελεστής ισχύος του είναι

$$C_p = C_m \lambda$$

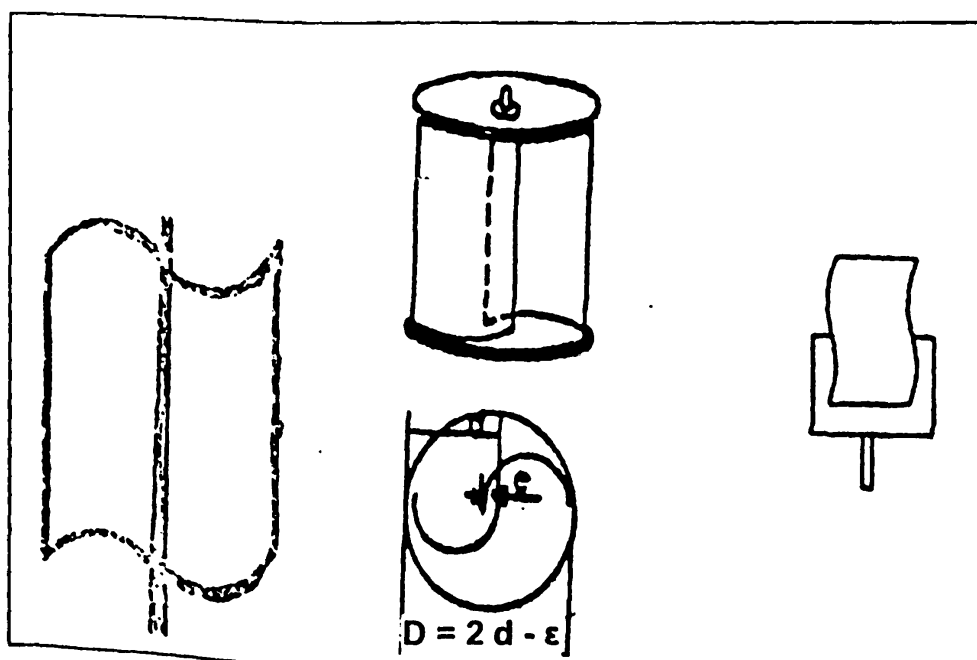
όπου C_m είναι ο συντελεστής ροπής του συστήματος. Από πειραματικές μελέτες φαίνεται ότι $C_p = 0,25$ και

$$\lambda = \frac{5R}{lf}$$

όπου l είναι το μήκος της χορδής των περυγίων, R η ακτίνα περιστροφής και f μια σταθερά που εξαρτάται από την γεωμετρία του συστήματος.

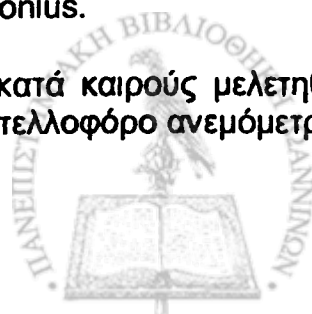
Μια άλλη συνήθης αιολική μηχανή με κατακόρυφο άξονα είναι η μηχανή τύπου Savonius που προτάθηκε από τον Φιλανδό μηχανικό S. Savonius το 1924 και κατασκευάστηκε το 1929. Η φτερωτή του αποτελείται από δύο ημικυλίνδρους που είναι τοποθετημένοι έκκεντρα όπως στο Σχήμα 5.13. Στην κατασκευή του παίζει σπουδαίο ρόλο, ο λόγος $r = \epsilon/d$ της εκκεντρότητας ϵ προς τη διάμετρο της βάσης του ημικυλίνδρου d .

Ο αρχικός τύπος είχε $\epsilon/d = 1/3$ με μέγιστη απόδοση για τιμές του λ , $0,9 < \lambda < \omega R/V$ με επιφάνεια σάρωσης $s = h(2d - \epsilon)$.

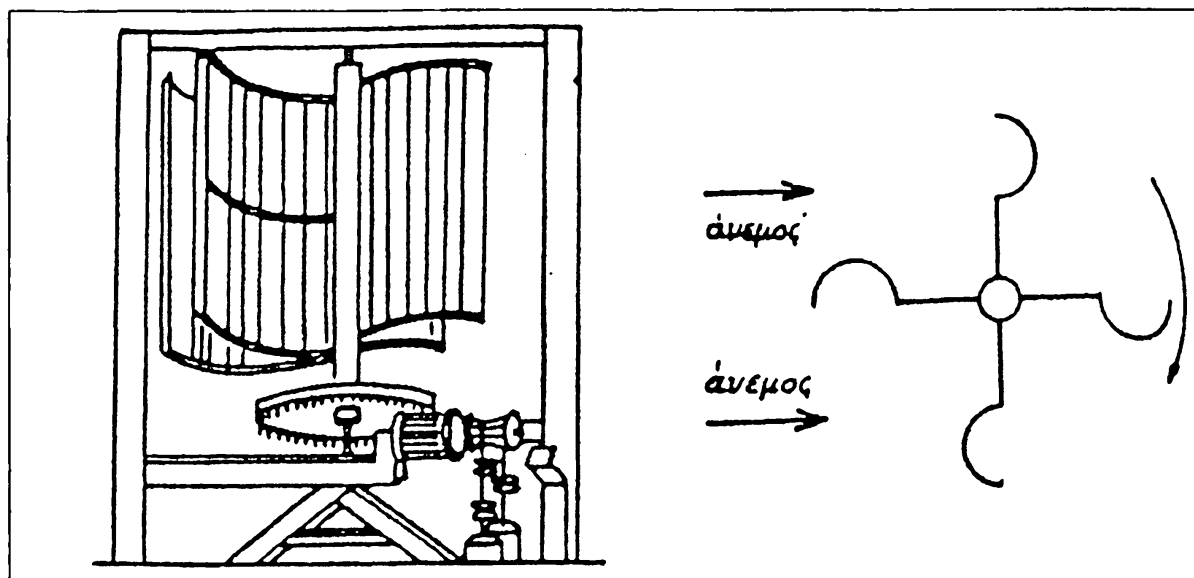


Σχήμα 5.13: Αιολικές μηχανές τύπου Savonius.

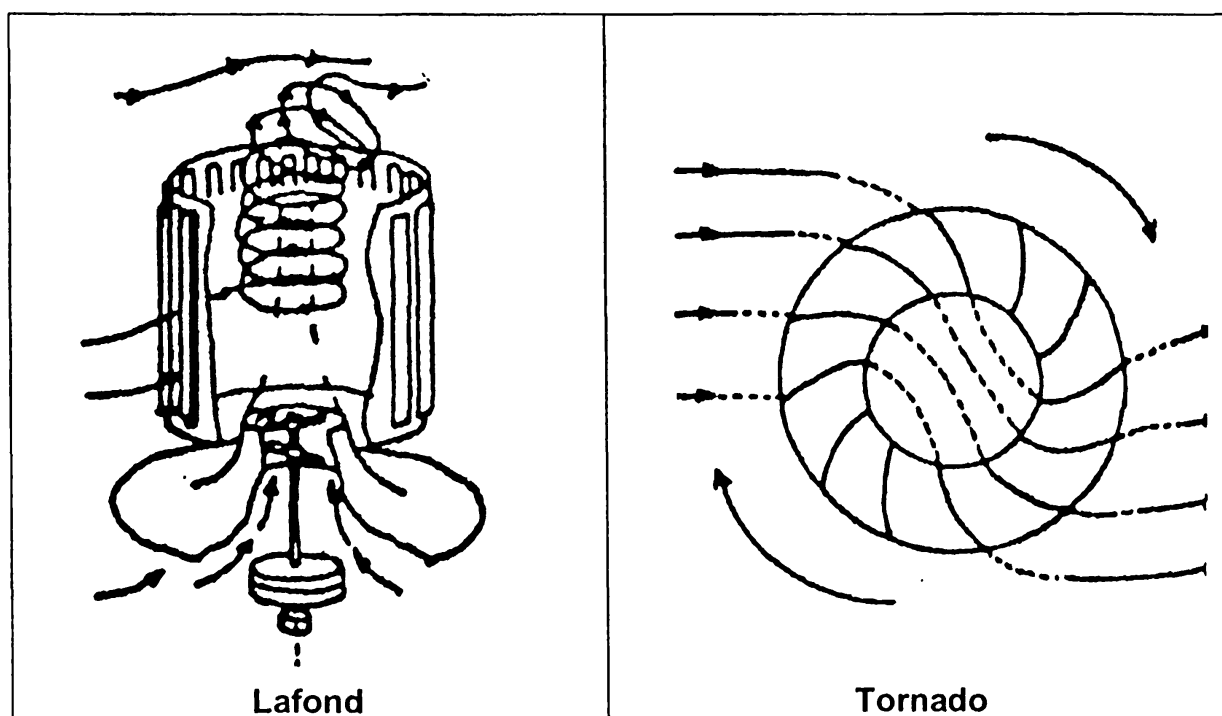
Άλλες αιολικές μηχανές κατακόρυφου άξονα που έχουν κατά καιρούς μελετηθεί άλλα μέχρι τώρα δεν έχουν βρει ευρεία χρήση είναι: Το κυττελλοφόρο ανεμόμετρο,



το πανεμόνιο ή μηχανή Lafond και οι μηχανές τύπου Tornado (Σχήματα 5.14 και 5.15).



Σχήμα 5.14: Πανεμόνιο και κυπελλοφόρο ανεμόμετρο.



Σχήμα 5.15: Αιολικές μηχανές Lafond και Tornado.

Το ανεμόμετρο δεν χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας αλλά σαν μετρητής της ταχύτητας του ανέμου. Η λειτουργία του στηρίζεται στο γεγονός ότι ο άνεμος ασκεί δυνάμεις μεγαλύτερες στις κοίλες πλευρές των κυπέλλων από ότι στις κυρτές. Συγκεκριμένα, σ' ένα κοίλο ημισφαίριο ο αεροδυναμικός συντελεστής



είναι 1,35 ενώ σε ένα κυρτό είναι μόνο 0,35. Το πανεμόνιο φαίνεται να είναι ο παλαιότερος τύπος αιολικών μηχανών και πρωτοχρησιμοποιήθηκε στην Περσία. Έχει ημικυλινδρικά πτερύγια, είναι αργόστροφη μηχανή και έχει μικρό συντελεστή ισχύος. Ένας συνδυασμός των δύο παραπάνω μηχανών έχει βρεθεί στον Καναδά με κωνικά πτερύγια. Επίσης μια άλλη εξέλιξη του πανεμονίου είναι οι προφυλαγμένες μηχανές, που περιορίζουν τις δυνάμεις του ανέμου πάνω στα πτερύγια που κινούνται στα προσήνεμα γιατί τα μισά πτερύγια βρίσκονται πάντοτε στην σκιά της μισής κυλινδρικής επιφάνειας. Οι αποδόσεις του τύπου αυτού δεν είναι αρκετά μεγάλες και οι μέγιστες τιμές τους είναι για λ μεταξύ 0,2 και 0,6.

Η μηχανή του Lafond είναι εξέλιξη του ανεμόμετρου. Στον τύπο αυτό της αιολικής μηχανής έχουμε την μέγιστη παραγόμενη ισχύ για τιμές της παραμέτρου λ μεταξύ 0,4 και 0,9. Είναι πολύπτερη μηχανή με ταχύτητα έναρξης λειτουργίας γύρω στα 2,5 m/s.

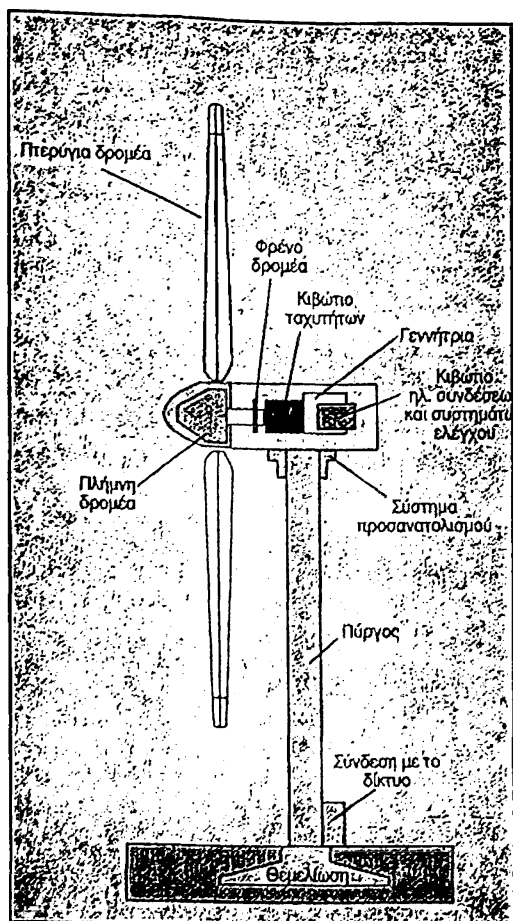
Στις μηχανές τύπου "Tornado", ο άνεμος μπαίνει από σχισμές που υπάρχουν στην παράπλευρη επιφάνεια ενός κυλίνδρου. Στο εσωτερικό του κυλίνδρου δημιουργείται περιστροφική κίνηση του αέρα, με επακόλουθο την εμφάνιση υποπίεσης. Έτσι εισροφάται αέρας από τη βάση του κυλίνδρου, κινώντας μια ηλεκτρογεννήτρια που υπάρχει στη βάση του. Ο τύπος αυτός βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο και χρησιμοποιείται για την απομάστευση ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα.

Στην αγορά έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα με δύο ή τρία πτερύγια, σε ποσοστό πάνω από 95% (Σχήμα 5.16). Οι τυπικές διαστάσεις μιας ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 500 kW είναι: διάμετρος δρομέα 40 m και ύψος 40 - 50 m, ενώ οι διαστάσεις μιας ανεμογεννήτριας 1 MW είναι 55 m και 50 - 60 m αντίστοιχα. Μια τυπική ανεμογεννήτρια αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- το δρομέα, που αποτελείται από 2 - 3 πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα
- το σύστημα μετάδοσης της κίνησης
- την ηλεκτρογεννήτρια, σύγχρονη ή επαγωγική
- το σύστημα προσανατολισμού
- τον πύργο (σωληνωτό ή δικτυωτό)
- τον ηλεκτρικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες παράγουν 180 φορές περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια και με υποδιπλάσιο κόστος ανά kWh, από τις αντίστοιχες 20 έτη πριν.





Σχήμα 5.16: Τομή ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα.

5.8 Αιολική ενέργεια και περιβάλλον

Σίγουρα υπάρχουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον από την εγκατάσταση ανεμογεννητριών. Αυτές όμως είναι σχετικά μικρές. Οι κυριότερες από τις επιπτώσεις αυτές είναι επιπτώσεις στην αισθητική του περιβάλλοντος χώρου.

Έχει δημιουργηθεί η εικόνα ότι οι ανεμογεννήτριες απειλούν την πανίδα. Συμβαίνουν προσπτώσεις πουλιών στα φτερά των αιολικών μηχανών, και τουλάχιστον στη χώρα μας που είναι πέρασμα αποδημητικών πουλιών θα πρέπει να αποφεύγεται η εγκατάσταση αιολικών μηχανών σε σημεία που χαρακτηρίζονται σαν νυκτερινά περάσματα πουλιών. Μελέτες που διεξήχθησαν στην Ευρωπαϊκή Ένωση από ανεξάρτητους φορείς δείχνουν ότι για κάθε 10.000 θανάτους πουλιών, λιγότερο από ένας (1) προκαλείται από τις ανεμογεννήτριες. Συγκριτικά οι γάτες προκαλούν 1.000 θανάτους και οι συγκρούσεις με κτίρια ή παράθυρα 5.500 θανάτους. Άλλωστε τα πτερύγια των ανεμογεννητριών περιστρέφονται τόσο αργά που κάτω από φυσιολογικές συνθήκες ένα πουλί μπορεί να τα αποφύγει πάρα πολύ εύκολα.

Ένα άλλο ζήτημα είναι η ηχορύπανση και οι ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις.



Σύμφωνα με μελέτες το επίπεδο ηχητικής πίεσης από μία σύγχρονη ανεμογεννήτρια δεν ξεπερνά τα 50 - 60 dB στα 40 m, δηλαδή το επίπεδο της κανονικής ομιλίας. Για ένα σπίτι 500 μέτρα μακριά από μία ανεμογεννήτρια, όταν ο άνεμος φυσάει από την ανεμογεννήτρια προς το σπίτι, τότε το επίπεδο ηχητικής πίεσης θα είναι περίπου 35 dB, όσο ο θόρυβος μέσα σε ένα ήσυχο σπίτι, δηλαδή πρακτικά η ανεμογεννήτρια δεν θα ακούγεται καν. Επίσης έχει παρατηρηθεί διαταραχή στη λήψη σημάτων ραδιοφώνου και τηλεόρασης στη γειτονία των αιολικών μηχανών λόγω ανάκλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πάνω στα πτερύγια της φτερωτής. Γίνονται για το σκοπό αυτό έρευνες για την επίλυση του προβλήματος. Σήμερα το πρόβλημα αντιμετωπίζεται είτε με την εγκατάσταση των αιολικών μηχανών μακριά από οικισμούς, είτε με την κατασκευή των πτερυγίων από υαλοβάμβακα.

Τέλος, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η αισθητική αλλοίωση του περιβάλλοντος από την εγκατάσταση αιολικών μηχανών είναι πολύ μικρότερη από την αλλοίωση που προκαλούν οι κολώνες μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος, οι αναμεταδότες και οι κεραίες κινητής τηλεφωνίας. Άλλωστε γίνονται προσπάθειες ώστε, οι σύγχρονες αιολικές μηχανές να είναι αισθητικά αποδεκτές.



5.9 Ασκήσεις

1. Αιολική μηχανή με ακτίνα πτερυγίων $R = 1 \text{ m}$ περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα $\omega = 50 \text{ sec}^{-1}$ και έχει λόγο $\lambda = 2$. Να βρεθεί η ταχύτητα και η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς του ανέμου.

Λύση

Ο λόγος λ της μηχανής ορίζεται από τη σχέση

$$\lambda = \frac{\omega R}{u}$$

όπου u η ταχύτητα του ανέμου πάνω στην φτερωτή. Η ταχύτητα του ανέμου (μακριά από τη φτερωτή) είναι

$$u_1 = \frac{3}{2} u = \frac{3}{2} \frac{\omega R}{\lambda} = 1,25 \times \frac{50 \text{ sec} \times 1 \text{ m}}{2} = 31,25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

και επομένως

$$\begin{aligned} W_{\max} &= \frac{8}{27} \rho \pi R^2 u_1^3 = \rho \pi R^2 \left(\frac{\omega R}{\lambda} \right)^3 = \rho \pi \left(\frac{\omega}{\lambda} \right)^3 R^5 \\ &= 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 3,19 \times (25 \text{ sec}^{-1})^3 \times 1 \text{ m}^5 = 6,33 \times 10^4 \text{ W} \end{aligned}$$

2. Η φτερωτή μιας αιολικής μηχανής, μάζας $0,385 \text{ Kg}$ και ακτίνας πτερυγίων 1 m δεσμεύει το 50% της κινητικής ενέργειας του ανέμου που αντιστοιχεί στο όριο Betz σε 1 sec . Αν η μέση ταχύτητα του ανέμου στην φτερωτή είναι $u = 10 \text{ m/s}$, με ποια γωνιακή ταχύτητα περιστρέφεται η φτερωτή; Ποια είναι η ηλεκτρική ενέργεια αν ο συντελεστής μετατροπής είναι 25%;

Λύση

$$\text{Όριο Betz : } W_{\max} = \pi R_{\pi}^2 \rho u^3$$

$$\text{Κινητική ενέργεια του ανέμου στο όριο Betz : } T_{\alpha} = (W_{\max})t$$

$$\text{Κινητική ενέργεια φτερωτής : } T_{\pi} = \frac{1}{2} m_{\pi} u_{\pi}^2 = \frac{1}{2} m_{\pi} \omega_{\pi}^2 R_{\pi}^2$$

Σύμφωνα με την άσκηση, θα πρέπει να ισχύει



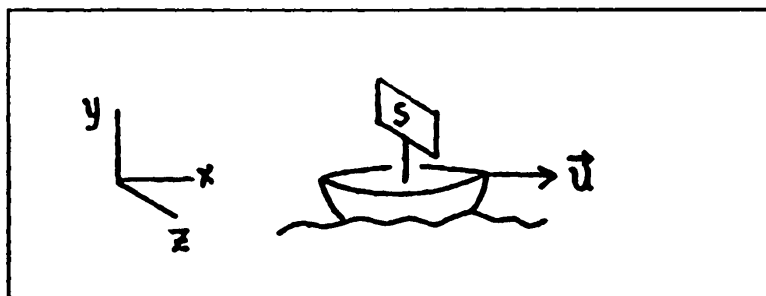
$$\frac{T_{\pi}}{T_{\alpha}} = \frac{1}{2} \Rightarrow \omega_{\pi} = \left(\frac{\pi \rho u^3 t}{m} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= (10^4 \text{ sec}^{-2})^{1/2} = 10^2 \text{ sec}^{-1}$$

Ηλεκτρική ενέργεια : $P_{\eta\lambda} = 0,25 \times \frac{1}{2} m_{\pi} \omega_{\pi}^2 R_{\pi}^2$

$$E_{\eta\lambda} = 0,125 \times 0,385 \text{ kg} \times 10^{-4} \text{ sec}^2 \times 1 \text{ m}^2 = 0,481 \text{ kJ} = 481 \text{ J}$$

3. Η ταχύτητα του ιστιοφόρου του σχήματος είναι $u_r = u \hat{e}_x$ και του ανέμου $v_r = v \hat{e}_x$. Η επιφάνεια του επίπεδου ιστίου είναι προσανατολισμένη κάθετα στη διεύθυνση κίνησης. Να βρεθούν:
- α) Η δύναμη που εξασκείται πάνω στο ιστίο και η παραγόμενη ισχύς.
 β) Η ταχύτητα του ιστιοφόρου για την οποία η ισχύς του γίνεται μέγιστη.



Δίνεται η επιφάνεια ιστίου S .

Λύση

α) Για το σύστημα αναφοράς του ιστιοφόρου ο άνεμος κινείται με ταχύτητα

$$w = v_r - u_r = (v - u) \hat{e}_x$$

$$\text{Δυναμική πίεση : } P = \frac{1}{2} \rho w^2 = \frac{1}{2} \rho (v - u)^2$$

$$\text{Δύναμη πάνω στο ιστίο : } F_r = P S \hat{e}_x = \frac{1}{2} \rho (v - u)^2 S \hat{e}_x$$

$$\text{Ισχύς : } W = F_r \cdot u_r = \frac{1}{2} \rho (v - u)^2 u S$$

β) Εκφράζοντας την ταχύτητα του ιστιοφόρου σαν συνάρτηση της ταχύτητας



του πλοίου :

$$u = \alpha v ,$$

με α μια προσδιοριστέα παράμετρο,

Για να πάρει η ισχύς ακρότατη τιμή θα πρέπει

$$\frac{dW}{dQ} = 0 \Rightarrow 2(1-\alpha)(-\alpha) + (1-\alpha)^2 \Rightarrow (1-\alpha)(1-3\alpha) = 0 \Rightarrow$$

$$\alpha = 1 \text{ (η ισχύς μηδενίζεται) ή } \alpha = 1/3$$

Ταχύτητα για την οποία η ισχύς γίνεται μέγιστη : $u = \frac{v}{3}$

$$\text{Μεγίστη πίεση : } p_{\max} = \left(\frac{1}{2}\right) \rho \left(\frac{4}{9}\right) v^2$$

$$\text{Μεγίστη ισχύς : } I_{\max} = \left(\frac{1}{2}\right) \rho \left(\frac{4}{9}\right) v^2 \left(\frac{1}{3}\right) u S = \frac{2}{27} \rho u^2 S$$



5.10 Προβλήματα

1. Αιολική μηχανή 4 πτερυγίων με μέση χορδή 0,4 m, λόγο $\lambda = 3$ και στιβαρότητα $\sigma = 0,25$ περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα $\omega = 10 \text{ sec}^{-1}$. Πόση είναι η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς του ανέμου; Κατά πόσο θα μεταβληθεί η ισχύς αυτή αν ο άξονας περιστροφής της μηχανής στραφεί κατά 60° ως προς τη διεύθυνση διάδοσης του ανέμου;
2. Να βρεθεί η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ιδανικής αιολικής μηχανής συνολικής μάζας $m = 4 \text{ kg}$ και ακτίνας $R = 1,5 \text{ m}$ όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι $u_a = 10 \text{ m/s}$. Πόσος είναι ο λόγος λ της μηχανής; Δίνεται ότι η ενέργεια περιστροφής της μηχανής αντιστοιχεί σε δέσμευση της μέγιστης ισχύος του ανέμου για χρόνο μιας περιόδου.
Υπόδειξη: Θεωρείστε την φτερωτή σαν ομογενή περιστρεφόμενο δίσκο μάζας m .
3. Ένας γεωργός αρδεύει κάθε μέρα μια περιοχή αντλώντας 3.600 lt νερού σε ύψος 10 m με ηλεκτραντλία απόδοσης 50%, πληρώνοντας 0,06 € την kWh. Στην περιοχή του υπάρχει αιολικό δυναμικό ταχύτητας $u_1 = 10 \text{ m/s}$ για 10 ώρες την ημέρα. Θα του συνιστούσατε να αντικαταστήσει την ηλεκτραντλία με μια από τις παρακάτω ανεμογεννήτριες; (S = επιφάνεια φτερωτής, t = χρόνος ζωής, κ = κόστος). Αν ναι, με ποια από αυτές;

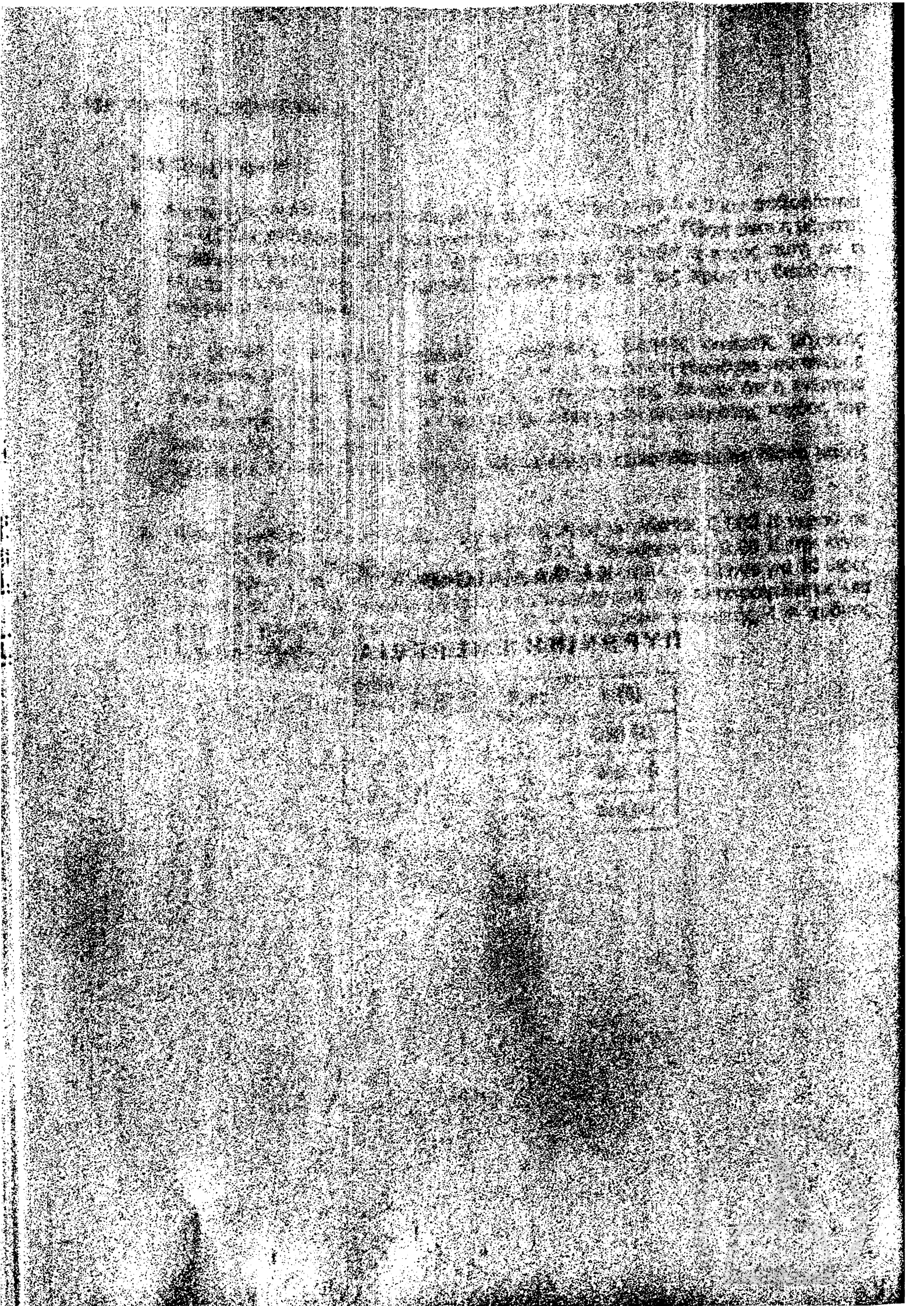
α/α	$S \text{ (m}^2\text{)}$	$T(u)$	$\kappa \text{ (€)}$
1	10	3	880,00
2	8	6	1055,00
3	6	10	740,00



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ





$$E_0 = m_e = \frac{8,2 \times 10^{-14} \text{ J}}{1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}} = 0,511 \text{ MeV}$$

Ενώ από τις αντίστοιχες μάζες του πρωτονίου και του νετρονίου έχουμε τις ισοδύναμες ενέργειες

$$E_p = 1.836,11 m_e = 938,252 \text{ MeV}, E_n = 1838,65 m_e = 939,55 \text{ MeV}$$

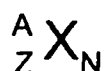
Από τις παραπάνω σχέσεις γίνεται φανερό ότι μπορούμε να πάρουμε τεράστια ποσά ενέργειας από τη μετατροπή μάζας σε ενέργεια. Τέτοιοι μηχανισμοί μετατροπής είναι η σχάση και η σύντηξη.

Για να καταλάβουμε τη σπουδαιότητα της μετατροπής θα πάρουμε σαν ένα παράδειγμα τη σχάση ουρανίου που δεν είναι σχετική αποδοτική επειδή από το 1 kg φυσικού ουρανίου που παίρνει μέρος στη σχάση μετατρέπεται (καίγεται) μόνο το 0,71%, της μάζας των αντιδρώντων, δηλαδή τα 0,87 gr, μετατρέπονται σε πυρηνική ενέργεια. Το ποσό αυτό αντιστοιχεί σε μια ενέργεια

$$E = (0,87 \times 10^{-3} \text{ kg}) (3,0 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 7,8 \times 10^{13} \text{ J/kg}$$

που είναι τεράστια αν συγκριθεί με την ενέργεια που παίρνουμε από τα συνήθη υγρά καύσιμα, $E = 5 \times 10^7 \text{ J/kg}$. Έτσι βλέπουμε ότι ένας πυρήνας εμπερικλείει μέσα του τεράστια ποσά ενέργειας που θα μπορούσαν ν' απελευθερωθούν κάτω από κατάλληλες συνθήκες.

Στην πυρηνική φυσική ένας πυρήνας συμβολίζεται με τα γράμματα



όπου X είναι το σύμβολο του στοιχείου στο περιοδικό σύστημα, Z είναι ο αριθμός των πρωτονίων που λέγεται και ατομικός αριθμός και A είναι ο συνολικός αριθμός πρωτονίων και νετρονίων (νουκλεονίων) και λέγεται μαζικός αριθμός. Στη βιβλιογραφία της πυρηνικής ενέργειας ο χαρακτηρισμός των στοιχείων γίνεται συνήθως από το όνομα του στοιχείου και το μαζικό του αριθμό. Για παράδειγμα Sodium-23 και Uranium-235 ή πιο απλά Na-23, U-235. Συνδεδεμένη με την πυρηνική ενέργεια είναι λοιπόν η δομή του πυρήνα γιατί από αυτήν εξαρτάται αν ο πυρήνας είναι σταθερός, αν υπάρχουν ευνοϊκές συνθήκες διάσπασής του και αν απελευθερώνεται ενέργεια κατά την πυρηνική αντίδραση. Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος για την εξέταση της δομής του πυρήνα είναι η ενέργεια σύνδεσής του που σχετίζεται με τις πυρηνικές δυνάμεις που δρουν μεταξύ των νουκλεονίων για να συγκρατούν τον πυρήνα.

Κάθε πυρήνας που είναι σταθερός είναι ελαφρότερος από το άθροισμα των μαζών των νουκλεονίων από τα οποία αποτελείται. Η διαφορά των μαζών αυτών λέγεται



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

6.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με τη θεωρία της ειδικής σχετικότητας η κινητική ενέργεια που έχει ένα σώματιο όταν κινείται με μια ταχύτητα u είναι

$$E_k = (m - m_0)c^2 \quad (1)$$

όπου m_0 είναι η μάζα αδράνειας όταν το σώμα βρίσκεται σε ηρεμία και $m = m_0 / \sqrt{1 - (u/c)^2}$ είναι η μάζα του σώματος όταν κινείται με την ταχύτητα u . Η σπουδαιότητα της εξ. (1) εκτός των άλλων βρίσκεται και στο ότι καταδειχνει την ισοδυναμία μάζας και ενέργειας, δηλαδή το γεγονός ότι η μάζα μπορεί να μετατραπεί σε ενέργεια και η ενέργεια σε μάζα. Έτσι ένα σώμα που βρίσκεται ακίνητο και έχει μάζα m_0 έχει και ενέργεια $E_0 = m_0 c^2$. Αν όμως κινείται τότε έχει ολική ενέργεια $E_t = m c^2$ και επομένως η διαφορά των δυο είναι η κινητική ενέργειά του.

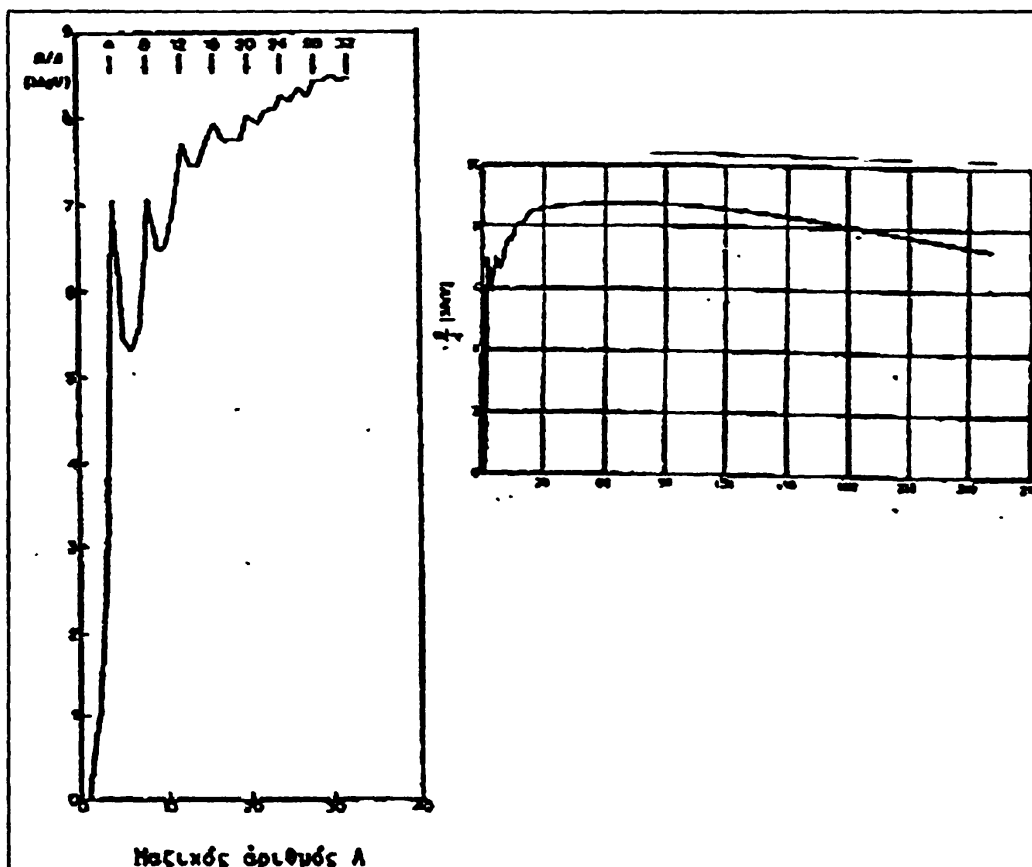
Για παράδειγμα ένα ακίνητο ηλεκτρόνιο έχει ενέργεια

$$E_0 = m_e c^2 = (9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}) (3,0 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 8,2 \times 10^{-14} \text{ J}$$

ή



διάσπασης. Πάνω σ' αυτή την αρχή στηρίζεται η παραγωγή ενέργειας από σχάση. Το αντίθετο συμβαίνει σε ελαφρούς πυρήνες. Κατά τη σύντηξη δυο πυρήνων με μικρούς μαζικούς αριθμούς προέρχεται ένας νέος πυρήνας με μικρότερη μάζα. Επομένως όπως και στη σχάση, έτσι και εδώ απελευθερώνεται ενέργεια, ίση με τη διαφορά μάζας, η οποία εμφανίζεται σαν κινητική ενέργεια των προϊόντων σύντηξης.



Σχήμα 6.1: Μεταβολή της μέσης ενέργειας σύνδεσης ανά νουκλεόνιο ως προς το μαζικό αριθμό A για τους σταθερούς πυρήνες του περιοδικού συστήματος. Η περιοχή $A \leq 32$ δίνεται σε μεγέθυνση στο αριστερό μέρος του σχήματος.

Πάνω σ' αυτές τις δυο αντιδράσεις σχάσης και σύντηξης στηρίζεται η παραγωγή της πυρηνικής ενέργειας στους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε τους μηχανισμούς σχάσης και σύντηξης το ενεργειακό ισοζύγιο, τους πυρηνικούς αντιδραστήρες σχάσης και σύντηξης και ορισμένα από τα προβλήματα που παρουσιάζουν.

6.2 Μηχανισμός σχάσης

Η σύλληψη ενός νετρονίου από έναν βαρύ πυρήνα συνεπάγεται συνήθως τη μετάβαση του πυρήνα σε μια διεγερμένη κατάσταση και την αποδιέγερσή του με την εκπομπή μιας ακτίνας γ . Οι Γερμανοί επιστήμονες Otto Hahn και Fritz

Strassman το 1939 ανακάλυψαν ότι σε μερικούς βαριούς πυρήνες όπως το ουράνιο και το πλουτώνιο μπορεί να συμβεί και ένα άλλο φαινόμενο, η σχάση του πυρήνα σε άλλους πυρήνες. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται στο Σχήμα 6.2. Στο πρώτο και το δεύτερο στάδιο ένα νετρόνιο πλησιάζει τον πυρήνα του U-235 και ενσωματώνεται σ' αυτόν σχηματίζοντας τον πυρήνα U-236 σε μια διεγερμένη κατάσταση. Λόγω της αυξημένης ενέργειάς του ο πυρήνας συμπιέζεται στη μέση του σχηματίζοντας λαιμό, τρίτο στάδιο, και αρχίζει να κάνει ταλαντώσεις μέχρι που ν' αποκοπεί όπως φαίνεται στο τέταρτο στάδιο. Το άθροισμα των μαζών των προϊόντων της σχάσης είναι μικρότερο από τη μάζα του αρχικού πυρήνα (U-235 + n) και η διαφορά μάζας μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των προϊόντων της σχάσης. Όταν η σχάση γίνεται μέσα σ' ένα υλικό τότε τα προϊόντα της σχάσης συγκρούονται με τ' άτομα και τα μόρια του υλικού με αποτέλεσμα τη θέρμανσή του. Αυτή τη θερμική ενέργεια εκμεταλλευόμαστε σ' έναν πυρηνικό αντιδραστήρα. Το πρώτο βήμα της αντίδρασης είναι η σύλληψη ενός αργού νετρονίου ($E_{\text{κιν}} \sim 0,1 \text{ eV}$)

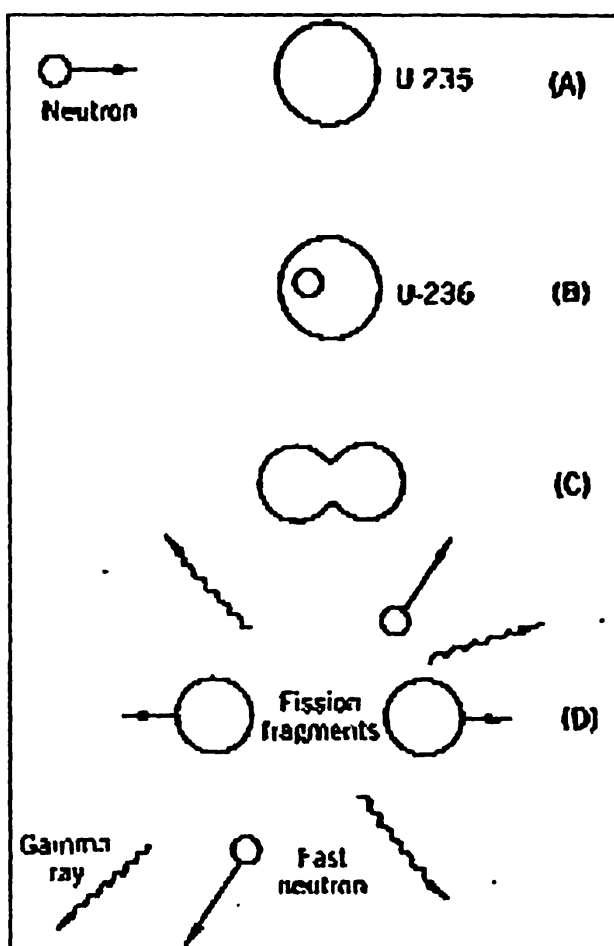


Η ολική μάζα στο πρώτο σκέλος της εξίσωσης (4) είναι

$$235,043943 + 1,008665 = 236,052608 \text{ (amu)}$$

Το U-236 στη βασική του κατάσταση έχει μάζα 236,045943 (amu). Έτσι προκύπτει μια διαφορά $\Delta M = 0,007017 \text{ amu} = 6,5 \text{ MeV}$ που είναι αρκετή να προκαλέσει τη σχάση του πυρήνα. Από τους πυρήνες που υπάρχουν ελεύθεροι στη φύση μόνο το U-235 μπορεί να πάθει σχάση μ' αυτό τον τρόπο. Υπάρχουν όμως και άλλοι δυο τεχνητοί πυρήνες όπως το ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ και το ${}_{92}^{233}\text{U}$ που μπορούν να διασπαστούν με τον ίδιο τρόπο. Οι περισσότεροι άλλοι βαριοί πυρήνες χρειάζονται νετρόνια με πολύ μεγαλύτερες ενέργειες. Για παράδειγμα το U-238 χρειάζεται περίπου 1 MeV ενώ άλλοι πυρήνες χρειάζονται ακόμα μεγαλύτερες ενέργειες. Όπως θα δούμε παρακάτω, η σχάση με γρήγορα και όχι θερμικά νετρόνια έχει το πλεονέκτημα αναπαραγωγής σχάσιμου υλικού.





Σχήμα 6.2: Στάδια πυρηνικής σχάσης.

6.3. Προϊόντα σχάσης και ενεργειακό ισοζύγιο

Στο Σχήμα 6.3 δίνεται το ποσοστό των παραγομένων προϊόντων σχάσης σαν συνάρτηση του μαζικού αριθμού A . Φαίνεται ότι τα προϊόντα σχάσης κυμαίνονται μεταξύ των μαζικών αριθμών 75 και 160, με τις μεγαλύτερες διατομές γύρω από τους μαζικούς αριθμούς 90-100 και 140-150.

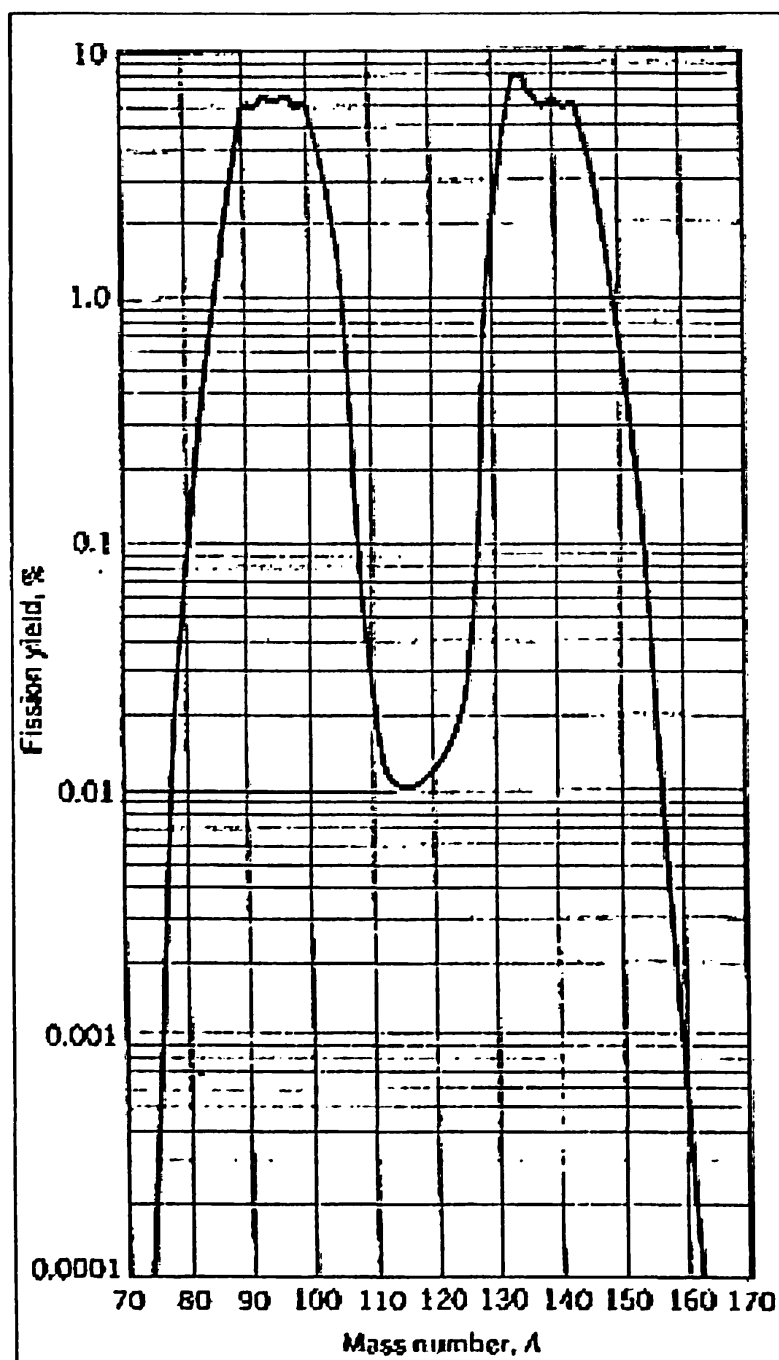
Γενικά για την πυρηνική σχάση του U-235 κατά τη σύλληψη ενός αργού νετρονίου έχουμε



όπου F_1 και F_2 είναι τα χημικά στοιχεία που υποδηλώνουν τις διάφορες δυνατότητες σχάσης. Για παράδειγμα η εξίσωση



δηλώνει ότι τα προϊόντα σχάσης είναι ισότοπα των στοιχείων Kr-90 και Ba-144. Από το Σχήμα 6.3 φαίνεται ότι τα προϊόντα αυτά αντιστοιχούν περίπου στο 6% του συνόλου των προϊόντων σχάσης.



Σχήμα 6.3: Προϊόντα σχάσης σαν συνάρτηση του μαζικού αριθμού A.

Η εμφάνιση των νετρονίων κατά τη σχάση αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη δυνατότητα πρακτικής εκμετάλλευσης της ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τη σχάση. Αν ένα από τα παραγόμενα νετρόνια μετά τη μείωση της αρχικής του ενέργειας έρθει σε επαφή μ' έναν σχάσιμο πυρήνα, παρατηρείται μια αλληλουχία



συμβάντων σχάση-νεutron-σπάση-νεutron ... που ονομάζεται αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης. Ο αριθμός των παραγομένων νεutronίων κυμαίνεται μεταξύ 1 και 7 με πιο πιθανή μέση τιμή γύρω στο 2 με 3 που εξαρτάται από το ισότοπο και την ενέργεια του αρχικού νεutronίου. Κατά τη σχάση του U-235 ο αριθμός νεutronίων είναι γύρω στο $\nu = 2,43$. Στον αριθμό αυτό πρέπει να προστεθεί μια μικρή ποσότητα νεutronίων που προέρχεται από ραδιενεργό αποδιέγερση ορισμένων προϊόντων της σχάσης. Τα νεutronία αυτά παίζουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργία και τον έλεγχο των πυρηνικών αντιδραστήρων. Η μέση ενέργεια όλων των νεutronίων ανέρχεται σε 5 MeV. Συνήθως όταν παράγονται 2,5 νεutronία ανά σχάση η μέση ενέργειά των είναι γύρω στα 2,0 MeV όταν κανείς παρατηρεί πολλά είδη σχάσεων. Γενικά όμως η ενέργεια των νεutronίων κυμαίνεται μεταξύ 0 και 10 MeV με την πιο πιθανή τιμή γύρω στα 0,7 MeV. Από αυτά φαίνεται ότι τα νεutronία που παράγονται από τη σχάση είναι "γρήγορα" (ενεργητικά) ενώ αυτά που χρειαζόμαστε για τη σχάση πρέπει να είναι "αργά" (θερμικής ενέργειας) Έτσι δημιουργείται η ανάγκη της χρησιμοποίησης υλικού που θα μετριάσει την ενέργεια των νεutronίων και θα τα επιβραδύνει στην κατάλληλη ενέργεια. Το υλικό αυτό λέγεται μετριαστής (moderator).

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο στην παραγωγή των νεutronίων είναι η πιθανότητα της αντίδρασης



η οποία ονομάζεται ακτινοβολούσα σύλληψη. Στην αντίδραση αυτή παίρνει μέρος το 15% των απορροφούμενων νεutronίων, ενώ το υπόλοιπο 85% παίρνει μέρος στη σχάση.

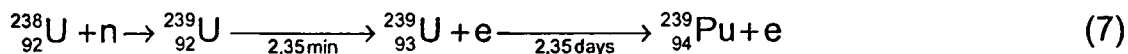
Επομένως ο αριθμός ν_{ef} των παραγομένων νεutronίων (κατά τη σχάση) ανά απορρόφηση είναι μικρότερος από τον αριθμό ν των παραγομένων νεutronίων ανά σχάση. Για παράδειγμα για το U-235 για $\nu = 2,43$ έχουμε

$$\nu_{\text{ef}} = (0,85) \times (2,43) = 2,07$$

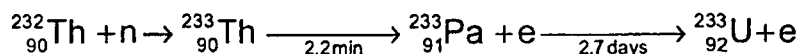
Είναι φανερό ότι για να διατηρηθεί η αλυσιδωτή αντίδραση πρέπει να είναι $\nu > 1$. Η τιμή του ν επομένως παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των αντιδραστήρων γιατί α) μπορεί να έχουμε μεγάλη αύξηση του πληθυσμού των νεutronίων με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να ελέγξουμε το σύστημα β) μπορεί να μην έχουμε αρκετά νεutronία οπότε δεν θα υπάρχει η δυνατότητα αλυσιδωτής αντίδρασης και γ) μπορεί να έχουμε, εκτός από ένα νεutronιο που είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της αλυσιδωτής αντίδρασης, επιπλέον νεutronία που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή νέου σχάσιμου υλικού. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να έχουμε μετατροπή (conversion) κατά την οποία αναπαράγεται μέρος ή όλο το υλικό που καίγεται ή αναπαραγωγή (breeding) όταν παράγεται περισσότερο υλικό από ό,τι καταναλώνεται.



Το γεγονός αυτό είναι σημαντικό για την ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας γιατί ενώ το U-235 βρίσκεται σε ποσοστό 0,7 % στο φυσικό ουράνιο, το U-238 που βρίσκεται σε ποσοστό 99,3 % θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενός άλλου σχάσιμου υλικού του Pu-239 μέσω της αντίδρασης αναπαραγωγής



Ένα άλλο σπουδαίο σχάσιμο υλικό είναι το U-233 που και αυτό μπορούμε να κατασκευάσουμε μέσω της αντίδρασης αναπαραγωγής



Το ποσό της ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τη σχάση υπολογίζεται διαμέσου της εξίσωσης του Einstein από τη διαφορά μάζας του αρχικού πυρήνα και των τελικών προϊόντων. Η ολική ενέργεια από τη σχάση είναι περίπου 200 MeV και διανέμεται ως εξής:

Ενέργεια από τη σχάση U-235

Κινητική ενέργεια προϊόντων	166 MeV
Νετρόνια	5 MeV
Ακτίνες -γ (αρχικές)	7 MeV
Ακτίνες -γ (από μεταπτώσεις)	7 MeV
Σωματία -β	5 MeV
Νετρίνα	10 MeV
Σύνολο	200 MeV (190 MeV διαθέσιμα)

Οι αρχικές ακτίνες γ είναι προϊόν της σχάσης ενώ οι άλλες προέρχονται από μεταπτώσεις. Τα νετρίνα προέρχονται από την ακτινοβολία-β και η ενέργειά τους δεν είναι χρήσιμη στην πυρηνική ενέργεια. Από το παραπάνω ενεργειακό ισοζύγιο βλέπουμε ότι ένα αργό νετρόνιο παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής ενός τεράστιου ποσού ενέργειας. Η πρακτική σπουδαιότητα της σχάσης φαίνεται και από το ποσό του ουρανίου που καταναλώνεται. Για παράδειγμα για την παραγωγή ισχύος 1 MW καταναλώνεται 1,3 g U-235 την ημέρα. Σε έναν τυπικό αντιδραστήρα 3.000 MW θερμικής ισχύος καταναλώνονται περίπου 4 kg U-235 την ημέρα (άσκηση 4). Είναι φανερό ότι η παραγωγή της ενέργειας αυτής από κάρβουνο, πετρέλαιο ή αέριο θα χρειαζόνταν 10^6 φορές περισσότερο υλικό.



6.4 Πυρηνικοί ενεργειακοί σταθμοί σχάσης

Συνθήκες κρισιμότητας

Αν πάρουμε μια σφαίρα από U-235 όγκου 1 cm^3 (περίπου 20 g) και προσθέσουμε σ' αυτή ένα νετρόνιο θ' αρχίσουν πυρηνικές αντιδράσεις οι οποίες όμως δεν θα διαρκέσουν πολύ επειδή πολλά νετρόνια θα χάνονται από την επιφάνεια της σφαίρας και δεν θα υπάρχει η δυνατότητα αλυσιδωτής αντίδρασης. Ένα τέτοιο σύστημα λέγεται υποκρίσιμο. Αν τώρα πάρουμε μια σφαίρα όγκου 1.600 cm^3 (περίπου 50 kg) τότε η παραγωγή νετρονίων από τις πυρηνικές αντιδράσεις είναι αρκετή να καλύψει τις απώλειες από την επιφάνεια της σφαίρας και οι αντιδράσεις θα συνεχιστούν μέχρι που να καταναλωθούν όλα τ' άτομα του ουρανίου. Το σύστημα αυτό λέγεται κρίσιμο. Αν προσθέσουμε ακόμα περισσότερο ουράνιο τότε παράγονται πολύ περισσότερα νετρόνια απ' όσα χρειάζονται για να συνεχιστούν οι αντιδράσεις. Ο πληθυσμός των νετρονίων αυξάνεται γρήγορα το σύστημα γίνεται υπερκρίσιμο και δεν μπορεί να ελεγχθεί. Οι πρώτες πυρηνικές βόμβες αποτελούνταν από δυο ημισφαίρια από ουράνιο σε υποκρίσιμη κατάσταση που μπορούσε να γίνει κρίσιμη κατά την ένωσή των. Μπορούμε να συνδέσουμε την κατάσταση κρισιμότητας με τον παράγοντα πολλαπλασιασμού K ή K_{eff} που μας δίνει τον αριθμό των παραγόμενων νετρονίων ανά αρχικό νετρόνιο. Αν το $K < 1$ τότε η κατάσταση είναι υποκρίσιμη αν το $K = 1$ η κατάσταση είναι κρίσιμη και αν $K > 1$ η κατάσταση είναι υπερκρίσιμη. Στις καταστάσεις κρισιμότητας και υπερκρισιμότητας στηρίζονται αντίστοιχα οι εφαρμογές της πυρηνικής σχάσης: η πυρηνική ενέργεια και τα πυρηνικά όπλα.

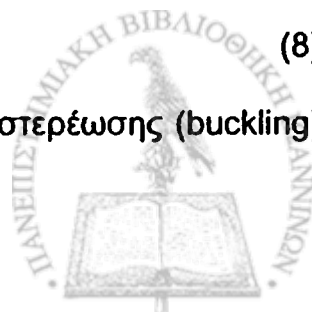
Στην πυρηνική ενέργεια βασικό ρόλο παίζει ο κύκλος του νετρονίου, δηλαδή πώς αρχίζει και πώς τελειώνει τη ζωή του ένα νετρόνιο. Ποιες πιθανότητες υπάρχουν για ένα νετρόνιο που βγήκε από μια αντίδραση να ξανακάνει μια άλλη πριν βγει από το σύστημα ή απορροφηθεί από τα υλικά του. Ένας τρόπος παρακολούθησης του νετρονίου είναι διαμέσου του ρυθμού των αντιδράσεων, της απορρόφησης της διαρροής και άλλων απωλειών. Το νετρονικό ισοζύγιο σ' αυτή την περίπτωση θα μας δείξει αν ο πληθυσμός των νετρονίων ελαττώνεται, παραμένει σταθερός, ή αυξάνεται. Μέσα σ' έναν αντιδραστήρα που βρίσκεται σε κρίσιμη κατάσταση ισχύει το ισοζύγιο

$$\text{Παραγωγή} = \text{Απορρόφηση} + \text{Απώλειες}$$

Αν υποθέσουμε ότι η μέση νετρονική ροή είναι ϕ και οι διατομές για απορρόφηση και σχάση είναι Σ_a και Σ_f , όπως ορίζονται στην άσκηση 1 τότε για έναν αντιδραστήρα όγκου V και παραγωγής ν νετρονίων σε κάθε σχάση η παραπάνω εξίσωση γίνεται η συνθήκη κρισιμότητας

$$\begin{aligned} \phi \Sigma_f \nu V &= \phi \Sigma_a V + D \phi B^2 V \\ \text{ή} \\ \nu \Sigma_f &= \Sigma_a + D B^2 \end{aligned} \quad (8)$$

όπου D είναι ο συντελεστής διάχυσης και B^2 η παράμετρος στερέωσης (buckling)



που εκφράζει τη γεωμετρία του συστήματος. Για έναν σφαιρικό αντιδραστήρα, $B^2 = (\pi/R)^2$, για έναν ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου $B^2 = (\pi/L)^2 + (\pi/W)^2 + (\pi/H)^2$ και για έναν κυλινδρικό $B^2 = (2,405/R)^2 + (\pi/H)^2$.

Η συνθήκη κρισιμότητας μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε τα χαρακτηριστικά μεγέθη του αντιδραστήρα. Αν είναι γνωστός ο όγκος υπολογίζονται οι ιδιότητες του υλικού. Αν το καύσιμο παράγει πολλά νετρόνια τότε μπορεί να ελαττωθεί ο όγκος. Αντίθετα αν υπάρχει μεγάλη απορρόφηση τότε ο όγκος πρέπει να αυξηθεί.

Ισχύς αντιδραστήρα

Ένα ουσιαστικό μέγεθος του αντιδραστήρα είναι η ισχύς του. Αυτή είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον πληθυσμό των νετρονίων και με τη μάζα του σχάσιμου υλικού που βρίσκεται στον αντιδραστήρα. Αν υπάρχουν N πυρήνες ανά μονάδα όγκου (cm^3) και η ενεργός διατομή σχάσης είναι σ_f με τυπικές ταχύτητες νετρονίων u , τότε ο ρυθμός αντιδράσεων σχάσης θα είναι $R_f = n u N \sigma_f$ ανά δευτερόλεπτο. Επειδή σε κάθε αντίδραση απελευθερώνεται η ενέργεια W η ισχύς του αντιδραστήρα ανά μονάδα όγκου θα είναι $p = R_f W$ και η ολική ισχύς του $P = p V$. Παίρνοντας τη μέση τιμή της ροής των νετρονίων σαν $\phi = n u$ μπορούμε να γράψουμε την ισχύ

$$P = \phi N_f \sigma_f W \quad (9)$$

όπου $N_f = N V$.

Από την εξίσωση (9) φαίνεται ότι η ισχύς του αντιδραστήρα εξαρτάται από τη ροή των νετρονίων και από τον αριθμό των ατόμων του καυσίμου υλικού. Μπορεί επομένως να ελαττωθεί ή ν' αυξηθεί εύκολα με την αλλαγή της ροής των νετρονίων, ο πληθυσμός των οποίων ελέγχεται με ράβδους από κάδμιο - άργυρο και ίνδιο. Παραπέρα βλέπουμε ότι επειδή η ισχύς είναι ανάλογη της διατομής σχάσης η οποία ελαττώνεται όπως αυξάνεται η ενέργεια του νετρονίου, ένας "γρήγορος" αντιδραστήρας που λειτουργεί με νετρόνια γύρω στα $E_n = 1 \text{ MeV}$ χρειάζεται για την ίδια ισχύ μεγαλύτερη νετρονική ροή ϕ ή μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου υλικού από ένα θερμικό αντιδραστήρα που λειτουργεί με νετρόνια γύρω στο $0,1 \text{ eV}$.

Ένα σημαντικό στοιχείο για την ισχύ σε σχέση με την ασφαλή λειτουργία του αντιδραστήρα είναι ο τρόπος απαγωγής θερμότητας. Ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας από μέταλλα σε υγρά είναι ευαίσθητος στη διαφορά θερμοκρασίας. Αν η απαγωγή δεν γίνεται κανονικά μπορούν να σχηματιστούν φουσαλίδες αερίου οι οποίες δυσχεραίνουν την απαγωγή θερμότητας με αποτέλεσμα την τήξη του μετάλλου. Για τον προσδιορισμό της ισχύος λοιπόν πρέπει να προσδιορίζονται με μεγάλη ακρίβεια και να ελέγχονται οι σωληνώσεις και τα σημεία τους που εμφανίζουν τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες.



Ταξινόμηση

Από το 1942 μέχρι σήμερα υπήρξε μια θεαματική εξέλιξη στην κατασκευή πυρηνικών αντιδραστήρων. Έτσι αναπτύχθηκαν πυρηνικοί αντιδραστήρες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κίνηση υποβρυχίων, πλοίων και δορυφόρων για ερευνητικούς σκοπούς και για εκπαίδευση. Οι περισσότεροι διαδεδομένοι είναι οι εμπορικοί αντιδραστήρες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που ανάλογα με ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατασκευής τους μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορους τύπους. Σαν κύρια χαρακτηριστικά μπορούμε ν' αναφέρουμε :

- α) Την ενέργεια νετρονίου. Ο "γρήγορος" αντιδραστήρας είναι αυτός που λειτουργεί με νετρόνια που βγαίνουν απευθείας από τη σχάση δηλαδή που έχουν ενέργειες από 0.1 - 1 MeV και επομένως δεν χρειάζονται ενδιάμεσα υλικά για την επιβράδυνση των νετρονίων. Αντίθετα οι θερμικοί αντιδραστήρες λειτουργούν με νετρόνια χαμηλής ενέργειας γύρω στο 0,1 eV και χρειάζονται υλικά για την επιβράδυνσή τους. Σε μερικούς αντιδραστήρες το ίδιο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιβράδυνση των νετρονίων και το ίδιο για την απαγωγή θερμότητας. Έτσι διακρίνουμε συστήματα που ο μετριαστής και ο απαγωγέας θερμότητας είναι το ίδιο υλικό και άλλα που δεν είναι.
- β) Το υλικό σχάσης. Η ποσότητα U-235 στο φυσικό ουράνιο είναι 0,7%. Σε μερικούς αντιδραστήρες γίνεται εμπλουτισμός από 3% μέχρι και 90%. Το υλικό μπορεί να είναι σε μεταλλική μορφή, σε μορφή κράματος με αλουμίνιο ή ενώσεών του, όπως UO_2 , U_3O_8 και UC. Στους περισσότερους αντιδραστήρες δεν έρχεται σ' επαφή με το υλικό απαγωγής θερμότητας. Υπάρχουν όμως και αντιδραστήρες όπου γίνεται ανάμιξη υλικών καύσης - μετριαστή ή και καύσης - μετριαστή - απαγωγέα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά έχουν εξελιχθεί οι εξής κύριοι τύποι πυρηνικών αντιδραστήρων:

P.W.R (Pressurized Water Reactor-Αντιδραστήρας πεπιεσμένου νερού) θερμικός αντιδραστήρας, ελαφρού ύδατος σε υψηλή πίεση (2.200 PSI) και θερμοκρασία (600 °F) για μετριαστή και απαγωγέα θερμότητας. Λειτουργεί με ελαφρά εμπλουτισμένο ουράνιο.

B.W.R. (Boiling Water Reactor) Σχεδόν ο ίδιος τύπος με τον προηγούμενο. Μόνο που τώρα η θερμοκρασία και η πίεση είναι μικρότερες (1.000 PSI και 550 °F) και το νερό επιτρέπεται να φτάσει στο σημείο βρασμού.

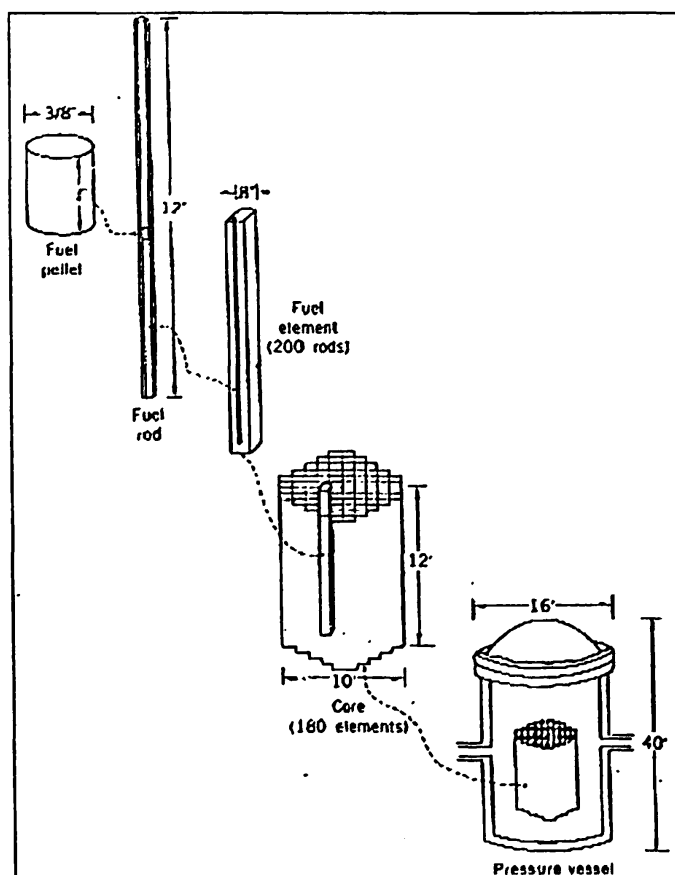
HTGR (High Temperature Gas-Cooled Reactor-υψηλής θερμοκρασίας με αέριο ψυχώμενος αντιδραστήρας). Χρησιμοποιεί μετριαστή από γραφίτη και εμπλουτισμένο ουράνιο σαν καύσιμο. Το υλικό ψύξης είναι Ήλιο σε πίεση 600 PSI και θερμοκρασία 1.430 °F.



CANDU (Canadian Deuterium Uranium - Καναδικός αντιδραστήρας Δευτερίου - Ουρανίου). Χρησιμοποιεί ξεχωριστό κύκλο βαρέος ύδατος για απαγωγή θερμότητας και μετριαστή και λειτουργεί με φυσικό ουράνιο.

LMFBR (Liquid metal fast breeder reactor-Γρήγορος αναπαραγωγικός αντιδραστήρας ρευστού μετάλλου). Δεν έχει μετριαστή, χρησιμοποιεί υγρό νάτριο σαν απαγωγέα θερμότητας και πλουτώνιο σαν καύσιμο υλικό. Αποτελεί την τελευταία εξέλιξη πυρηνικών αντιδραστήρων.

Το Σχήμα 6.4 δίνεται μια περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών ενός τυπικού αντιδραστήρα. Το καύσιμο υλικό σχηματίζεται σε μικρούς κυλίνδρους (fuel pellets) από UO_2 που τοποθετούνται σε ειδικά σωληνάρια (Fuel - rods). Περίπου 200 τέτοια σωληνάρια σχηματίζουν ένα στοιχείο καυσίμου (Fuel element) και 180 τέτοια στοιχεία συναρμολογούνται σε κυλινδρικό σχήμα και αποτελούν την καρδιά (core) του αντιδραστήρα. Η καρδιά μαζί με τον απαγωγέα θερμότητας τον μετριαστή και τις ράβδους ελέγχου τοποθετούνται σε κυλινδρικό δοχείο που λέγεται καλάνδρια και το όλο σύστημα περικλείεται σε κατασκευή από ατσάλι και μπετόν. Η λειτουργία αρχίζει με την τοποθέτηση του υλικού και τον έλεγχο των νετρονίων με τις ράβδους ελέγχου και τελειώνει όταν έχει καεί όλο το υλικό.



Σχήμα 6.4: Στοιχεία του αντιδραστήρα.

6.5 Εισαγωγή στην ελεγχόμενη σύντηξη

Η ελεγχόμενη σύντηξη είναι ένα πρόβλημα πολυσύνθετο. Για την επίλυσή του έχουν επιστρατευτεί σχεδόν όλα τα πεδία της Φυσικής και έχει προωθηθεί σημαντικά η ανάπτυξη της τεχνολογίας σε νέους τομείς. Αρκετά όμως από τα προβλήματα παραμένουν άλυτα και σ' αυτό το κεφάλαιο θα συζητήσουμε τις δυσκολίες που παρουσιάζουν. Οι δυσκολίες αυτές φαίνεται να είναι ανάλογες με τη σπουδαιότητα της πυρηνικής σύντηξης η επίτευξη της οποίας θα επιφέρει σημαντικές αλλαγές στις οικονομικές και κοινωνικές συνθήκες στον πλανήτη μας. Και αυτό γιατί το μοναδικό υλικό που θα χρειάζεται ένας πυρηνικός αντιδραστήρας για τροφοδότηση θα είναι το δευτέριο το οποίο βρίσκεται άφθονο στο θαλασσινό νερό, σε ποσοστό 0,015 %. Έτσι η επίλυση του προβλήματος της θερμοπυρηνικής σύντηξης θα σημάνει στην πραγματικότητα την εξεύρεση ανεξάντλητων πηγών ενέργειας με φτηνό κόστος και διαθεσιμότητα σ' όλες τις χώρες της γης.

Οι πρώτοι αντιδραστήρες πυρηνικής σύντηξης θα στηριχθούν στην αντίδραση δευτέρου (D) και τρίτιου (T)



Επειδή η αντίδραση αυτή χρειάζεται το μικρότερο χρόνο περιορισμού και τη μικρότερη θερμοκρασία ανάφλεξης. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας όμως η αντίδραση αυτή θ' αντικατασταθεί γιατί παρουσιάζει κύρια δυο βασικά μειονεκτήματα. Πρώτο, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που προέρχεται από τη διαφορά των μαζών στην εξίσωση (10) μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του νετρονίου (n) και επομένως για να μετατραπεί σε ηλεκτρική πρέπει να περάσει από το θερμικό κύκλο του οποίου ο συντελεστής θερμικής μετατροπής στην καλύτερη περίπτωση δεν υπερβαίνει το 30%. Επιπλέον η υψηλή ενέργεια των νετρονίων θα δημιουργεί σοβαρά προβλήματα ραδιενέργειας τόσο στο περιβάλλον όσο και στα τοιχώματα του αντιδραστήρα που θα πρέπει γι' αυτό το λόγο ν' αλλάζονται σε σύντομα χρονικά διαστήματα. Δεύτερο, το τρίτιο πέραν του ότι είναι ραδιενεργό υλικό δεν υπάρχει ελεύθερο στη φύση και έτσι θα πρέπει να κατασκευάζεται τεχνητά. Πάντως διαφαίνεται η δυνατότητα παραγωγής του μέσα στον αντιδραστήρα με την αντίδραση



Για το σκοπό αυτό στο εσωτερικό του αντιδραστήρα πρέπει να τοποθετηθεί ένας χιτώνας ${}^6\text{Li}$ που θα παράγει το τρίτιο με την αντίδραση (11) χρησιμοποιώντας τα νετρόνια της αντίδρασης (10).

Έτσι δεν θα υπάρχει πρόβλημα εξεύρεσης υλικού, γιατί το ισότοπο ${}^6\text{Li}$ βρίσκεται σε αναλογία 7,5 % μέσα στο φυσικό λίθιο που υπάρχει σε απεριόριστες ποσότητες στο φλοιό της γης.

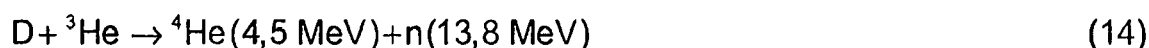
Η δεύτερη γενιά αντιδραστήρων σύντηξης θα στηριχθεί στην καύση ατόμων



δευτερίου που με την ίδια πιθανότητα συμβαίνει σύμφωνα με τις δυο ακόλουθες αντιδράσεις:



Γι' αυτούς τους αντιδραστήρες δεν θα είναι αναγκαία η παραγωγή του τριτίου και έχουν και το επιπρόσθετο πλεονέκτημα ότι μόνο το 34% της ενέργειας εμφανίζεται στα νετρόνια. Επιπλέον οι αντιδραστήρες αυτοί παρουσιάζουν και τη δυνατότητα εξέλιξης σε δυο ενδιαφέρουσες παραλλαγές: Στον κύκλο ημικατάλυσης, όπου το τρίτιο που παράγεται στην αντίδραση (12) επανατροφοδοτείται στον αντιδραστήρα για να συνεχίσει την καύση με την αντίδραση (10), και τον κύκλο κατάλυσης όπου και το ${}^3\text{He}$ επανατροφοδοτείται στον αντιδραστήρα για να χρησιμοποιηθεί στην αντίδραση



Είναι προφανές από τις εξισώσεις (10-14) ότι ο κύκλος ημικατάλυσης συνεπάγεται την καύση 5 ατόμων δευτερίου για την παραγωγή ενέργειας 25 MeV:



Ενώ ο κύκλος κατάλυσης στηρίζεται στην καύση 6 ατόμων δευτερίου για την παραγωγή σχεδόν διπλάσιου ποσού ενέργειας



Έτσι ο κύκλος κατάλυσης θα υπερισχύσει τελικά του κύκλου ημικατάλυσης. Όμως ούτε αυτός ο κύκλος θ' αποτελέσει την τελευταία μορφή της πυρηνικής σύντηξης. Στο βαθμό που θα υπάρχει η παραγωγή νετρονίων και οι συνδεδεμένες μ' αυτή επιπτώσεις στο περιβάλλον τόσο υπό μορφή ραδιενέργειας όσο και με θερμική μορφή, ο κύκλος αυτός τελικά θ' αντικατασταθεί από κύκλους πυρηνικών αντιδράσεων που δεν θα παρουσιάζουν προβλήματα ραδιενέργειας και που θα στηρίζονται αποκλειστικά στην παραγωγή μη ραδιενεργών και φορτισμένων σωματίων για την απευθείας μετατροπή της πυρηνικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Έτσι με την ανάπτυξη της τεχνολογίας οι πυρηνικοί αντιδραστήρες σύντηξης θα στηριχτούν στην αντίδραση (14) ή παρόμοιες, που θα πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις, όπως για παράδειγμα οι αντιδράσεις



και



6.6 Συνθήκες για τη δημιουργία θερμοπυρηνικής σύντηξης

Για την πυρηνική σύντηξη είναι αναγκαίος ο σχηματισμός θερμοπυρηνικού πλάσματος. Επειδή όμως τα ιόντα του πλάσματος είναι θετικά φορτισμένα, για να μπορέσουν ν' αντιδράσουν μεταξύ τους πρέπει να ξεπεράσουν το δυναμικό Coulomb. Επομένως ή πρέπει να επιταχυνθούν ή πρέπει το πλάσμα να θερμανθεί σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, γιατί όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.5 η ενεργός διατομή αυξάνει μέχρι τα 100 keV, όπου παίρνει τη μέγιστη τιμή της. Είναι προφανές ότι η επιτάχυνση δεν μπορεί να γίνει με τον συνήθη τρόπο των πυρηνικών αντιδράσεων, με επιταχυντές, γιατί αυτός ο τρόπος οδηγεί σε μεγάλες απώλειες ενέργειας λόγω ιονισμού, ανάφλεξης του στόχου και ελαστικής σκέδασης. Μήτε μπορεί να γίνει με δυο συγκρουόμενες δέσμες γιατί τέτοιες δέσμες μπορούν να φτιαχτούν μόνο με περιορισμένες πυκνότητες και έτσι η ενέργεια που χρειαζόμαστε για επιτάχυνση γίνεται μεγαλύτερη από την ενέργεια που απελευθερώνεται από τη σύντηξη. Δεν είναι απόλυτα σίγουρο αλλά αρκετά πιθανό ότι το πλάσμα πρέπει να έχει μια κατανομή παρόμοια με κατανομή τύπου Maxwell. Έτσι οι σκεδάσεις θα είναι περιορισμένες και τα γρήγορα ιόντα στην ουρά της κατανομής θα έχουν τη δυνατότητα ν' αντιδρούν. Έτσι η ενέργεια που θα παράγεται ανά μονάδα χρόνου (sec) και όγκου (cm³) για μια πυρηνική αντίδραση που απελευθερώνει την πυρηνική ενέργεια w θα είναι, για την αντίδραση δευτέρου - τριτίου για παράδειγμα

$$P_r = n_D n_T \langle \sigma v \rangle W \quad (19)$$

Όπου n είναι οι πυκνότητες των ιόντων, $\langle \sigma v \rangle$ η μέση τιμή της ροής της διαφορικής διατομής με κατανομή τύπου Maxwell και δηλώνει συνήθως ισχύ $W = 17,6$ MeV η ενέργεια που απελευθερώνεται από την πυρηνική αντίδραση (10). Η ενέργεια αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια η οποία χάνεται μέσω της ακτινοβολίας κατά την επιτάχυνση των ηλεκτρονίων που προέρχεται από την ελαστική σκέδασή τους με τα ιόντα. Η ενέργεια αυτή λέγεται απώλεια Bremsstrahlung λόγω ακτινοβολίας πεδήσεως και δίνεται από τη σχέση

$$P_b = 5 \times 10^{-31} Z^2 n^2 (K T_e)^{1/2} = C n^2 (K T_e)^{1/2} \quad (20)$$

με $K T_e$ σε keV.

Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος της πυρηνικής σύντηξης είναι η θερμοκρασία ανάφλεξης T_{ig} του θερμοπυρηνικού πλάσματος. Η θερμοκρασία αυτή προκύπτει από την ισότητα των εξισώσεων (19) και (20). Εκτιμάται ότι για την αντίδραση D-T η θερμοκρασία αυτή είναι γύρω στα 4 keV ενώ για την D-D είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη δηλαδή γύρω στα 40 keV. Το πρόβλημα όμως της ανάφλεξης δεν είναι το μόνο καθοριστικό γιατί και με δεδομένη τη δυνατότητα ανάφλεξης το πρόβλημα της παραγωγής ενέργειας με σύντηξη παραμένει, αν η ενέργεια που παράγεται κατά τη σύντηξη δεν είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή που χρειάζεται για τη θέρμανση του πλάσματος και την κάλυψη των απωλειών. Αυτή η προϋπόθεση όμως επιβάλλει στο πλάσμα ορισμένες συνθήκες που αναδεικνύονται σε σοβαρά



προβλήματα αναφορικά με την πυκνότητά του (n) την θερμοκρασία του (T) και το χρόνο περιορισμού του (τ).

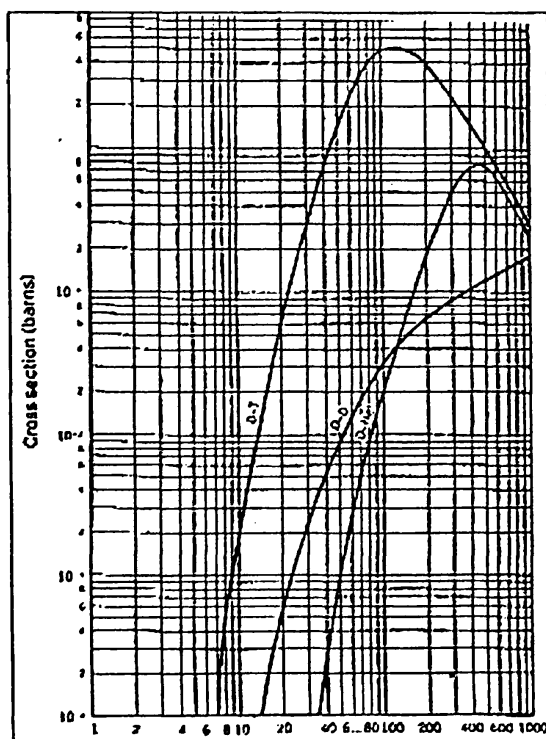
Ένα καθοριστικό μέγεθος για την πυρηνική σύντηξη είναι το γινόμενο $n \tau$. Αν υπάρχουν ($n_T + n_D$) πυρήνες ανά μονάδα όγκου (cm^3), τότε για την ανάφλεξη του πλάσματος χρειαζόμαστε ενέργεια ($n_D + n_T$) $3/2 K T$. Η ωφέλιμη ενέργεια λοιπόν από τη σύντηξη θα δίνεται από το ισοζύγιο του εξισώσεων (19) και (20) με συντελεστή μετατροπής ϵ .

$$E = \epsilon ((n_D + n_T) 3/2 K T + P_r \tau + P_b \tau) \quad (21)$$

ή με

$$n_D = n_T = n$$

$$\frac{E}{3nKT} = \epsilon \left(1 + n\tau \left(\frac{\sigma_u W}{3KT} \right) + n\tau \frac{C(KT_e)^{1/2}}{3KT} \right) \quad (22)$$



Σχήμα 6.5: Ενέργεια Δευτερίου σε keV.

Οπότε για σταθερή παραγωγή ενέργειας πρέπει για κάθε χρόνο τ και θερμοκρασία T να υπάρχει μια πυκνότητα n ώστε

$$n \tau = \text{σταθερό}$$

(23)



Τα πειραματικά αποτελέσματα για το γινόμενο $n \tau$ συγκλίνουν στις ελάχιστες τιμές $n \tau \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}$ για την αντίδραση D-T και $n \tau \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}$ για την αντίδραση D-D. Οι τιμές αυτές ονομάζονται κριτήρια Lawson.

Είναι προφανές ότι για να ικανοποιείται το κριτήριο Lawson χρειάζονται μεγάλες πυκνότητες και χρόνοι περιορισμού και αυτό δεν μπορεί να γίνει χωρίς τη συμπίεση του πλάσματος. Η ερευνητική δουλειά έχει αναπτύξει δυο κύριες μεθόδους: Τη μέθοδο του περιορισμού με μαγνητικά πεδία, $n \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ και $\tau = 0,1 \text{ sec}$, και τη μέθοδο εσωτερικού περιορισμού με δέσμες ακτίνων Laser $n \sim 10^{26} \text{ cm}^{-3}$ και $\tau = 10^{-11} \text{ sec}$. Σήμερα και οι δυο αυτές μέθοδοι χρησιμοποιούνται ερευνητικά σε μεγάλη έκταση και ενώ και οι δυο τους παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα είναι πολύ δύσκολο να προβλέψει κανείς ποια θα είναι η επικρατέστερη. Η μέθοδος του μαγνητικού περιορισμού έχει μελετηθεί εντατικά τα τελευταία χρόνια και στα βασικά της σημεία έχει γίνει κατανοητή. Η μέθοδος με Laser παρουσιάζεται αρκετά πολύπλοκη. Από την άλλη μεριά όμως αυτή η μέθοδος παρακάμπτει όλα τα προβλήματα που προέρχονται από μαγνητικές αστάθειες.

6.7 Μαγνητικός περιορισμός, Ισορροπία και σταθερότητα

Η ιδέα του περιορισμού με μαγνητικά πεδία εξελίσσεται σε τρεις κύριες κατευθύνσεις

- α) Κλειστά συστήματα (Σαμπρέλες - Τοροειδή)
- β) Ανοικτά συστήματα (Μαγνητικοί καθρέφτες)
- γ) Μαγνητικοί σφικτήρες.

Στα κλειστά συστήματα οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές παραμένουν μέσα στο σύστημα παρ' ότι μπορεί και να μην κλείνουν μεταξύ τους. Τ' ανοικτά συστήματα στηρίζονται στην ιδέα της μαγνητικής φιάλης. Στους μαγνητικούς σφικτήρες το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο υποβοηθάται από τα πεδία που δημιουργούνται από τη ροή εσωτερικών ρευμάτων. Τα ρεύματα αυτά χρησιμοποιούνται επιπλέον και για τη θέρμανση του πλάσματος.

Τα πιο σπουδαία κλειστά συστήματα είναι τα τοροειδή. Τα συστήματα αυτά διαφέρουν μεταξύ τους στον τρόπο που γίνεται η ελίκωση των μαγνητικών γραμμών. Διακρίνουμε: α) τους Stellarators που η καμπυλότητα γίνεται με ρεύματα που περνούν από ελικοειδείς εξωτερικούς αγωγούς β) τα Tokamaks που αντίθετα γίνονται με εσωτερικά ρεύματα γ) το Astron που γίνεται με εσωτερικές δέσμες σωματίων και δ) τα πολύπολα.

Το πιο διαδεδομένο από τα τοροειδή είναι το Tokamak. Το Tokamak είναι απλό στην κατασκευή του και στην ανάλυσή του. Παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα ότι τα προβλήματα θέρμανσης και ισορροπίας δεν μπορούν να μελετηθούν ξεχωριστά γιατί και τα δυο αντιμετωπίζονται με τη δημιουργία ρευμάτων. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι το ρεύμα στο πλάσμα δημιουργείται επαγωγικά με



μετασχηματιστή. Έτσι το Tokamak δεν μπορεί να λειτουργήσει σε σταθερή κατάσταση (steady state) αλλά σε παλμοειδή. Παρά τα δυο αυτά μειονεκτήματα, το Tokamak φαίνεται να είναι το πιο επιτυχές από τα τοροειδή συστήματα, παρότι παρουσιάζει ακόμη προβλήματα σταθερότητας και ανάφλεξης.

Τα προβλήματα αυτά στα Tokamak έχουν εντοπιστεί σαν αποτέλεσμα της διαφοράς του μαγνητικού πεδίου B_t στο εσωτερικό και εξωτερικό μέρος του τόρου. Έτσι κατασκευάζονται μη κυκλικές διατομές για παράδειγμα σε σχήμα τριγωνικό Δ ή D. Ένα τέτοιο Tokamak είναι το Tokamak του Ευρωπαϊκού προγράμματος JET (Joint European Torus). Πάντως υπάρχει όριο στη σμίκρυνση της ακτίνας γιατί δημιουργούνται απότομες αλλαγές στην καμπυλότητα των δυναμικών γραμμών. Η αλλαγή της διατομής φαίνεται να επιδρά ευνοϊκά και στη σταθερότητα και στην ανάφλεξη. Μέχρι στιγμής τα πιο ευνοϊκά αποτελέσματα είναι $T = 1 \text{ keV}$, $n = 5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, αλλά η δυο τάξεις μεγέθους κάτω από το κριτήριο Lawson. Οι προσπάθειες αύξησης του χρόνου τ με ανάλογη αύξηση των διαστάσεων ελαττώνει τη θέρμανση και επομένως την αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από 1 keV . Έτσι, όπως θα δούμε στο εδάφιο 6.9 χρησιμοποιούνται πρόσθετοι τρόποι θέρμανσης.

Το Astron στηρίζεται στην αρχή του μαγνητικού καθρέφτη για περιορισμό και σε σχετικιστικές δέσμες ηλεκτρονίων για την αναστροφή του μαγνητικού πεδίου, ώστε να σχηματιστεί μαγνητική μορφολογία εγκλωβισμού. Η δέσμη των ηλεκτρονίων χρησιμοποιείται επίσης για τη θέρμανση του πλάσματος. Το Astron μπορεί να χαρακτηριστεί σαν μια μηχανή μεταξύ Tokamak και πολύπολου στα οποία σχηματίζεται μαγνητικό πηγάδι. Πολύπολα ονομάζονται τα τοροειδή που έχουν $B = 0$ πάνω στο μικρό άξονα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διοχέτευση ρευμάτων με χάλκινους δακτυλιωτούς αγωγούς που ακολουθούν τη διεύθυνση του πλάσματος. Έτσι σωμάτια που εγκλωβίζονται στο χώρο γύρω από το μικρό άξονα βλέπουν μια αυξανόμενη μαγνητική πίεση σε όλες τις διευθύνσεις. Επίσης σωμάτια που είναι κοντά στους αγωγούς βλέπουν μια κεντρομόλο δύναμη και έτσι δημιουργείται σταθερότητα ενάντια στη βαρυτική αστάθεια. Τα πολύπολα σε αντίθεση με το Tokamak και το Stellarator έχουν μόνο πολικό μαγνητικό πεδίο έχουν όμως τη δυνατότητα απόκτησης και τοροειδούς πεδίου με τη διοχέτευση ρεύματος στη διεύθυνση του μεγάλου άξονα.

Οι απλοί μαγνητικοί καθρέφτες είναι κυλινδρικά συστήματα ανοικτά και από τα δυο άκρα. Είναι ασταθή στη βαρυτική αστάθεια και παρουσιάζουν μεγάλες απώλειες στα άκρα τους. Το πρόβλημα της σταθερότητάς τους λύνεται με υποβοηθητικά ρεύματα αντίθετης διεύθυνσης που διοχετεύονται από αγωγούς παράλληλους στη διεύθυνση του πλάσματος, τους αγωγούς Joffe. Με αυτό τον τρόπο το πλάσμα παραμορφώνεται ασύμμετρα και δημιουργείται πάνω στον άξονα του κυλίνδρου μαγνητικό πεδίο με ελάχιστο $-B$. Το πλάσμα που βρίσκεται σ' αυτόν το χώρο βλέπει ένα αυξανόμενο μαγνητικό πεδίο σε κάθε διεύθυνση και έτσι εγκλωβίζεται μέσα σ' αυτό το χώρο.

Οι μαγνητικοί σφιγκτήρες είναι τα πιο απλά συστήματα. Βασίζονται στην αρχή ότι ένα πλάσμα που μεταφέρει ρεύματα περιορίζεται από το ίδιο του το μαγνητικό



πεδίο. Υπάρχουν δυο γεωμετρικές μορφολογίες του σφικτήρα $-Θ$ και του σφικτήρα $-Z$. Και στις δυο περιπτώσεις το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος εγκλωβίζοντας και αναφλέγοντας το πλάσμα. Συνήθως ο σφικτήρας $-Θ$ έχει στα άκρα του μορφολογία του μαγνητικού καθρέφτη για να ελαττώνονται οι απώλειες των σωματιδίων. Και οι δυο τύποι όμως μπορούν να πάρουν τη μορφολογία του τόρου. Δεν έχουν αποδειχτεί αρκετά χρήσιμοι στην πράξη γιατί παρουσιάζουν τόσο την αστάθεια της ασυνέχειας όσο και την αστάθεια του λουκάνικου. Εδώ φαίνεται να μην αποδίδουν και οι συνήθεις μέθοδες καταπολέμησης αυτών των ασταθειών.

Παράλληλα με την ισορροπία πρέπει επίσης να εξασφαλιστεί και η σταθερότητα. Στα τοροειδή συστήματα οι υψηλής συχνότητας αστάθειες των ηλεκτρονίων δεν είναι επικίνδυνες λόγω της βραδύτητας των ιόντων. Αντίθετα οι αστάθειες χαμηλής συχνότητας μπορούν να οδηγήσουν στην απώλεια των ιόντων προς τα τοιχώματα. Οι αστάθειες αυτές διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

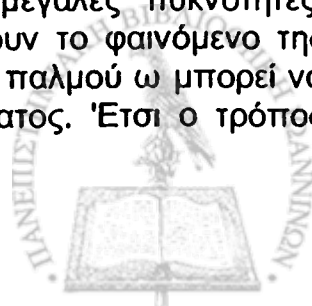
- α) Rayleigh - Taylor
- β) Αστάθειες λόγω ρευμάτων
- γ) Αστάθειες λόγω ολισθήσεων

Επιπρόσθετες αστάθειες προέρχονται από την καμπυλότητα των μαγνητικών γραμμών με κύριο παράδειγμα τη βαρυτική αστάθεια. Η πιο σημαντική αστάθεια αυτού του είδους αστάθεια είναι η Rayleigh - Taylor. Εμφανίζεται κύρια όταν ένα πυκνό υγρό συγκρατείται από ένα αραιότερο, για παράδειγμα το πλάσμα στην ατμόσφαιρα του ήλιου που συγκρατείται με μαγνητικά πεδία ενάντια στη βαρύτητα. Το ίδιο συμβαίνει και με το πλάσμα στο εργαστήριο όταν περιορίζεται με μαγνητικά πεδία, επειδή γίνεται εναλλαγή πλάσματος και πεδίου.

6.8 Εσωτερικός περιορισμός

Μια άλλη μέθοδος περιορισμού πλάσματος για πυρηνική σύντηξη βασίζεται σε παλμοειδείς ακτίνες Laser διάρκειας ω . Σ' αυτή την περίπτωση υπερενεργητικές ακτίνες Laser ακτινοβολούν το πλάσμα και το θερμαίνουν ώστε να αναφλεγεί.

Η μέθοδος Laser έχει εξελιχθεί σε δυο κατευθύνσεις: Στη Laser-αέριο σύντηξη και στη Laser-βλήμα σύντηξη. Στην πρώτη περίπτωση μια δέσμη ακτίνων CO_2 Laser, των 10,6 μm χρησιμοποιείται για τον ιονισμό και τον περιορισμό αεριούχου πλάσματος δευτέρου-τρίτιου (D-T) πυκνότητας 10^{17} cm^{-3} . Η ενέργεια των ακτίνων Laser μεταβιβάζεται στο πλάσμα με το φαινόμενο της αντίστροφης ακτινοβολίας πέδησης, δηλαδή της απόσβεσης του κύματος φωτός λόγω των συγκρούσεων ηλεκτρονίων-ιόντων. Βέβαια αυτό το φαινόμενο δεν είναι επαρκές για τη μεταβίβαση μεγάλων ενεργειών και τον περιορισμό σε μεγάλες πυκνότητες, συμβαίνουν όμως και μη γραμμικά φαινόμενα που ενισχύουν το φαινόμενο της αντίστροφης ακτινοβολίας πέδησης. Γενικά η συχνότητα του παλμού ω μπορεί να προσεγγίσει αλλά δεν φτάνει τη συχνότητα ω_p του πλάσματος. Έτσι ο τρόπος



αυτός συμπίεσης και περιορισμού δεν μπορεί να ξεπεράσει μια κρίσιμη πυκνότητα n_c

$$n_c = \frac{m\omega^2}{4\pi e^2} \quad \omega = \omega_p \quad (25)$$

και επομένως χρειαζόμαστε επιπρόσθετα και μαγνητικό περιορισμό. Ο δεύτερος τρόπος γίνεται με ακτίνες γυάλινου Nd Laser 1,06 μm μήκους κύματος. Οι ακτίνες αυτές συγκεντρώνονται σ' ένα σφαιρίδιο στερεού δευτέρου-τρίτιου (D-T), που βρίσκεται στο κέντρο του πλάσματος. Το σφαιρίδιο αυτό έχει πυκνότητα σωματιδίων $n \sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ή πυκνότητα μάζας $\rho = n M = 0,2 \text{ g/cm}^3$. Το αρνητικό φαινόμενο που παρατηρείται εδώ είναι ότι όταν η πυκνότητα του πλάσματος φτάσει γύρω στα $10^{21} (\text{cm}^{-3})$ σχηματίζεται φλοιός γύρω από το σφαιρίδιο που αρχίζει ν' ανακλά την ακτινοβολία. Σ' αυτή την περίπτωση δεν θα ήταν δυνατή η συνέχιση του περιορισμού με μαγνητικά πεδία γιατί για να ικανοποιηθεί το κριτήριο Lawson, εδώ παίρνει τη μορφή

$$\rho R > 1 \quad \text{g/cm}^2, \quad (26)$$

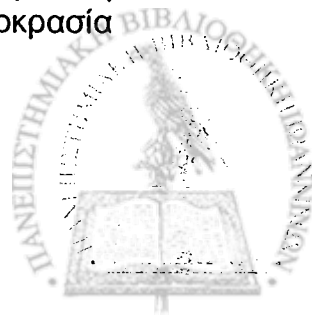
θα ήταν αναγκαίες ακτίνες Laser με ενέργειες 3×10^{10} Joule.

Μια πιθανή διέξοδος δίνεται στο Σχήμα 6.6. Το σφαιρίδιο ακτινοβολείται με ακτίνες Laser από όλες τις κατευθύνσεις, και η ενέργεια απορροφάται από ένα φλοιό πλάσματος που φτάνει στην κρίσιμη πυκνότητα n_c . Ο φλοιός αυτός εκτινάσσεται, δημιουργώντας ώθηση προς το εσωτερικό του πλάσματος που έτσι συμπίεζεται σε μεγαλύτερες πυκνότητες και αρχίζει ν' αναφλέγεται μεταδίδοντας την ανάφλεξη και στο υπόλοιπο πλάσμα.

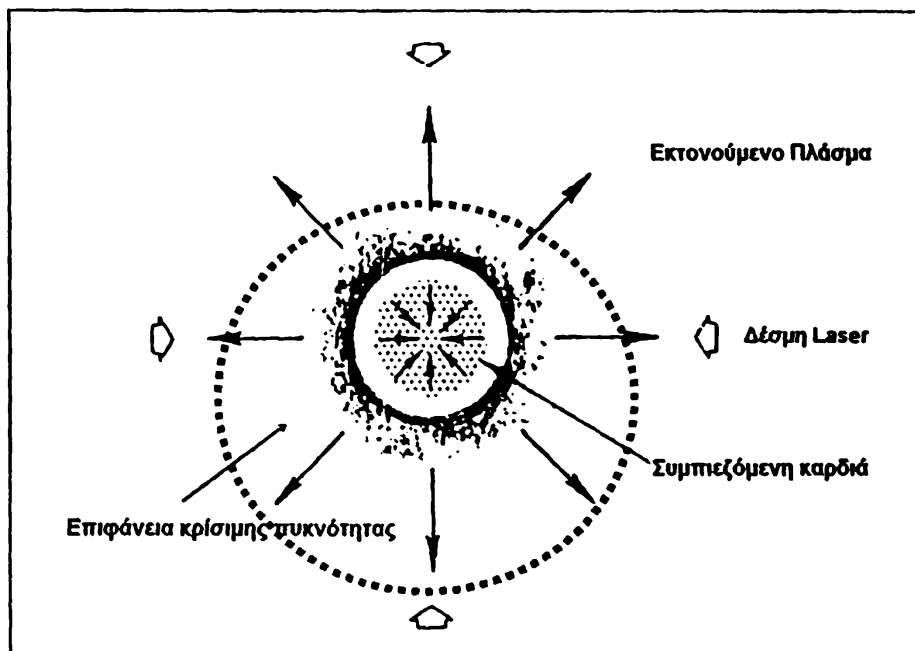
Είναι προφανές ότι η ενέργεια που χρειάζεται για την ανάφλεξη του σφαιριδίου είναι ανάλογος της μάζας του

$$E \propto \rho \frac{4\pi}{3} R^3 \quad (27)$$

Αλλά, όταν η εξίσωση (26) ικανοποιείται οριακά ισχύει $R = \rho^{-1}$, και κατά συνέπεια $E \sim \rho^{-2}$. Επομένως μια αύξηση της συμπίεσης κατά 10^2 συνεπάγεται μια ελάττωση της ενέργειας κατά 10^4 ώστε να κατέβει στην περιοχή M Joules που θεωρείται πραγματοποιήσιμη για ακτίνες Laser. Η επιτυχία όμως αυτού του σεναρίου δεν σημαίνει και τη λύση του προβλήματος. Υπάρχουν ακόμα αρκετά προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν: Η διάρκεια του παλμού, η μορφή του για ν' αποφεύγονται αστάθειες Rayleigh-Taylor και ο συγχρονισμός του, γιατί πρέπει να προθερμαίνει το πλάσμα στην κανονική του θερμοκρασία πριν γίνει αδιαβατική συμπίεση. Αν η θερμοκρασία είναι υψηλή, τότε η πυκνότητα θα είναι χαμηλή. Αν η θερμοκρασία είναι χαμηλή τότε δεν θα γίνεται ανάφλεξη.



Άλλα προβλήματα έχουν να κάνουν με την ταχύτητα των ηλεκτρονίων, με τη σκέδαση των ακτίνων στο φλοιό με $\omega = \omega_p$ και με τα μη γραμμικά παραμετρικά φαινόμενα που εμφανίζονται. Γενικά παρ' ότι η σύντηξη με Laser παρακάμπτει τα πιο σοβαρά προβλήματα που προέρχονται από το μαγνητικό περιορισμό χρειάζεται την επίλυση άλλων εξίσου σοβαρών προβλημάτων.



Σχήμα 6.6: Ανάφλεξη με ακτίνες Laser.

6.9 Θέρμανση και τεχνολογική ανάπτυξη

Ισοδύναμο σε δυσκολία με το πρόβλημα του περιορισμού είναι και το πρόβλημα της ανάφλεξης. Μέχρι τώρα οι κυριότεροι τρόποι θέρμανσης είναι :

- 1) Μέσω αντίστασης Ohm. Εφαρμόζεται στα Tokamak
- 2) Με αδιαβατική συμπίεση. Γίνεται στους σφιγκτήρες και στους μαγνητικούς καθρέφτες
- 3) Με κύματα ιόντων σε ραδιοσυχνότητες
- 4) Με κύματα ηλεκτρονίων σε μικροσυχνότητες
- 5) Με δέσμες φορτισμένων σωματίων
- 6) Με δέσμες ουδέτερων σωματίων.
- 7) Με άλλους τρόπους που όμως χρειάζονται παραπέρα ανάπτυξη της τεχνολογίας.

Η τεχνολογία βέβαια πρέπει ν' αναπτυχθεί και σε άλλους τομείς όπως :

- 1) στα τοιχώματα για να μπορούν να συγκρατούν δέσμες νετρονίων με ενέργειες γύρω στα 14 MeV,
- 2) στους χιτώνες για την παραγωγή τριτίου,
- 3) στην εξαγωγή της ενέργειας,
- 4) σε περιβαντολογικά προβλήματα που αναφέρονται στην παραγωγή και αποθήκευση του τριτίου και σε άλλα προβλήματα μικρότερης δυσκολίας.

6.10 Πυρηνική ενέργεια και περιβάλλον

Όλες οι μορφές ενέργειας επιδρούν με τον ένα ή τον άλλο τρόπο στο περιβάλλον. Η πυρηνική ενέργεια επιδρά αρνητικά με δυο τρόπους, θερμικά και ραδιενεργά. Όλα τα θερμικά εργοστάσια εκλύουν μεγάλες ποσότητες θερμότητας στο περιβάλλον κατά τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανική. Μόλις ο υψηλής θερμοκρασίας ατμός περάσει από την τουρμπίνα μετατρέπεται σε υγρή κατάσταση με τη βοήθεια του συμπυκνωτή. Το ψυκτικό του συμπυκνωτή είναι συνήθως νερό από γειτονικά ποτάμια ή λίμνες που αφού περάσει μέσ' από το συμπυκνωτή, αυξάνεται η θερμοκρασία του κατά 20 °F και επιστρέφει πάλι στο αρχικό σώμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού και επομένως τη θερμική επιβάρυνση των φυτών και ζώων που ζουν σ' αυτό.

Σαν λύση στο θέμα αυτό προτείνεται η εγκατάσταση των πυρηνικών εργοστασίων να γίνεται σε ανοικτές θάλασσες και τεχνητές λίμνες. Πύργοι ψύξης επίσης προτείνονται σαν εναλλακτικές λύσεις.

Πιο πολύ σοβαρά από τα θερμικά προβλήματα είναι τα προβλήματα ραδιενέργειας. Και εδώ διακρίνουμε καταστρεπτική επίδραση στο περιβάλλον από ραδιενέργεια που μπορεί να ξεφύγει από το εργοστάσιο σ' ένα ατύχημα και ραδιενεργά κατάλοιπα που προέρχονται από τη διαδικασία επανεμπλουτισμού και την καύση.

Μέχρι τώρα δεν έχουν βρεθεί τρόποι αποτελεσματικής αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων. Παρά την ανάπτυξη της τεχνολογίας και των συστημάτων ελέγχου, η πιθανότητα ενός ατυχήματος είναι πάντα υπαρκτή.

Για την αποθήκευση των πυρηνικών αποβλήτων έχουν αναπτυχθεί οι εξής τρόποι:

- α) Ρευστοποιούνται σε ειδικές δεξαμενές, ψύχονται και παρακολουθούνται συνεχώς
- β) Τοποθετούνται σε δοχεία και θάβονται σε υπόγειες στοές (συνήθως παλιά αλατορυχεία)
- γ) Βυθίζονται σε καθορισμένες περιοχές των ωκεανών κάτω από την επίβλεψη της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ)

Επίσης σαν προτεινόμενες λύσεις που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι η υαλοποίηση, η ταφή τους στο παγωμένο κομμάτι του Ατλαντικού και η μεταφορά τους στον ήλιο. Οι κίνδυνοι που εμπερικλείονται σε τέτοιες λύσεις είναι εμφανείς και δεν θ' αναφερθούμε αναλυτικά σ' αυτούς.

Η πυρηνική σύντηξη δεν αναμένεται να έχει τα προβλήματα ραδιενέργειας που παρουσιάζονται στη σχάση. Στο αρχικό στάδιο, δηλαδή στους αντιδραστήρες (D-T), ραδιενεργά προβλήματα θα παρουσιάζονται μόνο από το τρίτιο και πιθανά από τα τοιχώματα του αντιδραστήρα λόγω των ενεργητικών νετρονίων. Στα επόμενα, πιο προχωρημένα στάδια, μάλλον θα εκλείψουν τα προβλήματα αυτά. Επιπλέον λόγω του ότι θα γίνεται απευθείας μετατροπή της πυρηνικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό, μάλλον δεν θα υπάρχουν και θερμικά προβλήματα.



6.11 Ασκήσεις

1. Να υπολογιστεί η κρίσιμη ακτίνα σφαίρας καθαρού U-235 όταν το μέταλλο έχει πυκνότητα $\rho = 19 \text{ g/cm}^3$ και αριθμό ατόμων $N_u = 0,048 \text{ cm}^{-3}$ (σε μονάδες 10^{24}). Οι διατομές σχάσης και απορρόφησης είναι αντίστοιχα $\sigma_f = 1,4 \text{ barns}$ και $\sigma_a = 1,65 \text{ barns}$ και ο αριθμός των παραγομένων νετρονίων $\nu = 2,6$ για διατομή σκέδασης $\sigma_s = 6,8 \text{ barns}$.

Λύση

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2 ; \lambda_t = 1/\Sigma_t ; D = \lambda_t/3 ; R = R_o - \Delta R$$

$$\Delta R = 0,71 \lambda_t$$

Συνθήκη κρισιμότητας

$$\Sigma_f \nu = \Sigma_a + DB^2, \text{ για σφαίρα } B^2 = (\pi/R_o)^2$$

$$\Sigma_f = \sigma_f N_u = 0,0672 \text{ cm}^{-1}, \Sigma_a = \sigma_a N_u = 0,792 \text{ cm}^{-1}$$

$$\Sigma_t = \sigma_t N_u = 0,326 \text{ cm}^{-1}, \lambda_t = 1/\Sigma_t = 3,07 \text{ cm}$$

$$D = \lambda_t/3 = 1,02 \text{ cm}; B^2 = (\nu \Sigma_f - \Sigma_a)/D = 0,0936 \text{ cm}^{-2}$$

Διόρθωση που οφείλεται, αν ληφθεί υπ' όψη το σωστό σχήμα της ροής κοντά στην επιφάνεια :

$$R_o = \pi/B = 10,3 \text{ cm}; R = R_o - 0,71 \lambda_t = 10,3 - 2,2 = 8,1 \text{ cm}$$

$$\text{Κρίσιμος όγκος : } V = 4 \pi R^3/3 = 2,2 \times 10^3 \text{ cm}^3$$

$$\text{Κρίσιμη μάζα : } M = \rho V = 41,8 \text{ Kg}$$

2. Να βρεθεί η συνθήκη κρισιμότητας εάν ο αριθμός νετρονίων ανά απορρόφηση είναι ν_{ef} και ο αριθμός των νετρονίων που δεν χάνονται από σκέδαση είναι L .

Λύση

Ο αριθμός νετρίνων ανά απορρόφηση ν_{ef} είναι

$\nu_{ef} = \nu \Sigma_f / \Sigma_a$ Άρα η συνθήκη κρισιμότητας θα είναι

$k = \nu_{ef} L = 1$ ή από την εξίσωση κρισιμότητας

$$\nu \Sigma_f = \Sigma_a + DB^2 \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a} = 1 + \frac{DB^2}{\Sigma_a}$$

αλλά επειδή

$$k = \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a} L = 1 \rightarrow \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a} = \frac{1}{L}$$

οπότε



$$L = \frac{1}{(1 + DB^2 / \Sigma_a)}$$

3. Χρησιμοποιώντας την συνθήκη κρισιμότητας σε έναν κύβο καθαρού U-235 ακμής b , να εξεταστεί η επίδραση της ομοιογενούς θερμικής διαστολής των υλικών στην κατάσταση κρισιμότητας.

Λύση

Επειδή

$$D = \frac{\lambda_t}{3} = \frac{1}{3\lambda_t \Sigma} = \frac{1}{3\sigma_t N} = \frac{1}{3\sigma_t N_t / b^2} = \frac{b^2}{3\sigma_t \alpha}$$

$$B^2 = 3(\pi/b)^2; \Sigma_a = \sigma_a N = \sigma_a N_t / b^3, \text{ έχουμε}$$

$$L = 1 / 1 + \left(\frac{\pi}{N_t} \right)^2$$

Άρα για b μεγάλο $\rightarrow L$ μικρό.

4. Να υπολογιστεί η μάζα του U-235 που χρειάζεται την ημέρα ένας πυρηνικός αντιδραστήρας 3.000 MW θερμικής ισχύος. Λόγω του σχηματισμού U-236 ο λόγος $\nu_{\sigma\alpha}$ σχάσης/απορρόφησης είναι $\nu_{\sigma\alpha} = 0,85$ αντί $\nu_{\sigma\alpha} = 1$.

Λύση

Κάθε σχάση παράγει το ποσό της πυρηνικής ενέργειας $E_n = 190 \text{ MeV}$ επομένως

$$E_n = (190 \text{ MeV}) = (190 \text{ MeV})(1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}) = 3,04 \times 10^{-11} \text{ J}.$$

Επομένως ο αριθμός των σχάσεων που χρειαζόμαστε για 1 W-sec θα είναι

$$k = \frac{1}{E_n} = \frac{1}{3,04 \times 10^{-11}} = 3,3 \times 10^{10} \text{ σχάσεις/W - sec}$$

Για 1 -MW θερμικής ισχύος την ημέρα θα χρειαζόμαστε
 $k_d = 10^6 \text{ W } (3,3 \times 10^{10} \text{ σχάσεις/W-sec})(86.400 \text{ sec/day}) =$
 $= 2,85 \times 10^{21} \text{ σχάσεις/day}$

και επειδή $\nu_{\sigma\alpha} = 0,85$, ο ολικός αριθμός σχάσεων την ημέρα θα είναι



$$K_d^t = \frac{K_d}{n} = 3,35 \times 10^{21} \text{ σχάσεις/day}$$

Επειδή 235 g αντιστοιχούν σε $6,02 \times 10^{23}$ άτομα (αριθμός Avogadro) θα καταναλώνουμε την ημέρα για 1 MW

$$M_d = \frac{(3,35 \times 10^{21} / \text{day}) 235 \text{ g}}{6,02 \times 10^{23}}$$

και επομένως για 3.000 MW, $M = 4 \text{ Kg/day}$.

5. Δείξτε ότι μια πιθανή πυρηνική αντίδραση σύντηξης είναι



Λύση

Το πλεόνασμα μάζας ΔM των πυρήνων D, ${}^4\text{He}$ και ${}^6\text{Li}$ είναι αντίστοιχα 13,14 MeV, 2,43 MeV και 14,10 MeV. Επομένως οι μάζες αδράνειας θα είναι

$$D \rightarrow M_D = 931,48 \times 2 + 13,14 \text{ MeV}$$

$${}^4\text{He} \rightarrow M_{{}^4\text{He}} = 931,48 \times 4 + 2,43 \text{ MeV}$$

$${}^6\text{Li} \rightarrow M_{{}^6\text{Li}} = 931,48 \times 6 + 14,10 \text{ MeV}$$

$$\begin{aligned} \text{Από την αντίδραση (1) έχουμε} \\ (931,48 \times 2 + 931,48 \times 6 + 13,14 + 14,10) \text{ MeV} = \\ = 2[(931,48 \times 4) \text{ MeV} + 2,43 \text{ MeV}] + Q \end{aligned}$$

ή

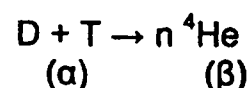
$$Q = (13,14 + 14,10 - 2 \times 2,43) \text{ MeV}$$

ή

$$Q = 22,33 \text{ MeV}$$

6. Δείξτε ότι στην αντίδραση D-T το ${}^4\text{He}$ παίρνει μόνο το 1/5 της απελευθερωμένης ενέργειας.

Λύση



Η ενέργεια που απελευθερώνεται είναι η κινητική ενέργεια των παραγομένων πυρήνων



$$E = \frac{p_n^2}{2m_n} + \frac{p_{He}^2}{2m_{He}} \quad (1)$$

Ορίζοντας $p_\alpha = p_D + p_t$ και $p_\beta = p_n + p_{He}$, η εξίσωση διατήρησης της ορμής για το σύστημα αναφοράς του κέντρου μάζας γράφεται

$$p_\alpha = p_\beta = 0 \quad \text{και} \quad p_n = -p_{He} \quad (2)$$

και επομένως

$$p_n = p_{He}$$

Με τη βοήθεια των (1) και (2), έχουμε

$$E = \frac{p_n^2}{2m_n} = \frac{1}{2m_n} 2 \left(\frac{m_n m_{He}}{m_n + m_{He}} \right) E = \frac{m_{He}}{m_n + m_{He}} E = \frac{4}{5} E$$

και

$$E_{He} = \frac{p_{He}^2}{2m_{He}} = \frac{m_n}{m_n + m_{He}} E = \frac{1}{5} E$$

7. Πόσα γραμμάρια (g) δευτερίου θα χρειαστούν την ημέρα σε ένα αντιδραστήρα σύντηξης D-D, ισχύος 1 MW. Εάν όλο το δευτέριο το πάρουμε από θαλασσινό νερό πόσα χιλιόγραμμα νερού θα χρειαζόμαστε κάθε μέρα.

Λύση

Στον κύκλο της ολικής κατάλυσης έχουμε ότι



Άρα για κάθε υδρογόνο που καίγεται έχουμε παραγωγή ενέργειας

$$E = \frac{43,2}{6} = 7,2 \text{ MeV}$$

και επομένως για κάθε αντίδραση σύντηξης θα έχουμε

$$E = (2 \times 7,2 \text{ MeV})(1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}) = 2 \times 1,15 \times 10^{-12} \text{ J}$$

κατά συνέπεια ο αριθμός των αντιδράσεων που χρειαζόμαστε για την παραγωγή ενέργειας 1W-sec θα είναι

$$N_a = \frac{1}{2 \times (1,15 \times 10^{-12})} = \frac{0,87 \times 10^{12}}{2} \text{ Αντ/W-sec}$$



Για έναν αντιδραστήρα ισχύος 1 MW, ο αριθμός κατανάλωσης δευτερίου την ημέρα θα είναι

$$N_D = (2 \times 10^6 \text{ W}) = \left(\frac{0,87 \times 10^{12}}{2} \text{ Αντ/W-sec} \right) (86.400 \text{ sec/day}) = 7,5 \times 10^{22} / \text{day}$$

Επειδή 2g δευτερίου αντιστοιχούν στον αριθμό Avogadro $6,02 \times 10^{23}$, το δευτέριο που καταναλώνεται θα είναι

$$\gamma = \frac{2 \times 7,5 \times 10^{22}}{2 \times 6,02 \times 10^{23}} = 0,24 (\text{g/day})$$

Επειδή η ποσότητα δευτερίου σε θαλασσινό νερό είναι 0,015% θα χρειαζόμαστε

$$\pi = \frac{0,12 \times 100}{0,015} = 1.600 \text{ g} = 1,6 \text{ kg νερού την ημέρα}$$

8. Για έναν πυρηνικό αντιδραστήρα D-D, να βρεθεί η ταχύτητα UD του δευτερίου που έχουν ενέργεια $ED = 100 \text{ keV}$. Να βρεθεί επίσης η πυκνότητα σωματίων που θα χρειαζόταν για μια πυκνότητα ισχύος 1 kW/cm^2 .

Λύση

Η κινητική ενέργεια του δευτερίου είναι

$$E_{\text{κιν}} = \frac{1}{2} m_d U_d^2 = 100 \text{ keV} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{2} m_d C^2 \left(\frac{u}{c} \right)^2 = 100 \text{ keV}$$

Αλλά $m_d c^2$ είναι η μάζα αδράνειας του δευτερίου που μπορεί να βρεθεί από τον γνωστό τύπο

$$m_d = 931,48 \times 2 + \Delta M, \text{ σε (MeV)}$$

επειδή $\Delta M = 13,4 \text{ MeV}$, έχουμε

$$m_d = 931,48 \times 2 + 13,4 = 1876,36$$

$$\text{Επομένως } 1.876,36 (\text{MeV}) (1/2)(u_d/c)^2 = 100 \times 10^{-3} \text{ MeV}$$

$$\text{ή} \left(\frac{u_d}{c} \right)^2 = \frac{200 \times 10^{-3}}{1876,36} = \frac{200}{1,88} \times 10^6 = 1,06 \times 10^4$$

$$\text{ή} \left(\frac{u_d}{c} \right) = 1,02 \times 10^{-3} \rightarrow u_d = 1,03 \times 10^{-2}$$



Μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ του αντιδραστήρα προσεγγιστικά, κάνοντας χρήση του τύπου ισχύος για τη σχάση και λαμβάνοντας υπ' όψη ότι οι πυρήνες δευτερίου είναι ταυτόχρονα βλήματα και στόχοι. Αν η πυκνότητα σωματιδίων είναι n , ο αριθμός των δυνατών αντιδράσεων ανά μονάδα όγκου δίνεται από το συνδυασμό

$$\binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2} = \frac{n^2}{2} \quad (\text{όταν } n \gg 1)$$

Η ισχύς επομένως γράφεται

$$P = \frac{n^2}{2} \sigma u_b W$$

$$n = \left(\frac{2P}{\sigma u_b W} \right)^{1/2}$$

Για τα δεδομένα του προβλήματος

$$P = \frac{1 \text{ kW}}{\text{cm}^3} = \frac{10^3 \text{ J}}{\text{cm}^3 \text{ sec}} = \frac{10^3}{1,6 \times 10^{-13}} \frac{\text{MeV}}{\text{cm}^3 \text{ sec}}$$

Η ενεργός διατομή μπορεί να βρεθεί από την γραφική παράσταση του Σχήματος 6.5. Για ενέργεια 100 keV είναι

$$\sigma_u = 5 \text{ barn} = 5 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

Η ενέργεια W λαμβάνεται σαν η μέση τιμή απελευθερούμενης ενέργειας κατά τις ίδιες πιθανότητες αντιδράσεις D-D (12) και (13)

$$W = \frac{4 \text{ MeV} + 3,3 \text{ MeV}}{2} = 3,65 \text{ MeV}$$

Τότε έχουμε

$$\begin{aligned} n^2 &= 2 \times \frac{10^3}{1,6 \times 10^{-13}} \frac{\text{MeV}}{\text{cm}^3 \text{ sec}} \times \frac{1}{5} 10^{24} \text{ cm}^2 \times \frac{1}{1,03} \times 10^{-10} \left(\frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right)^{-1} \times \frac{1}{3,65 \text{ MeV}} \\ &= 2,2 \times 10^{-2} \times 10^{23} \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$



6.12 Προβλήματα

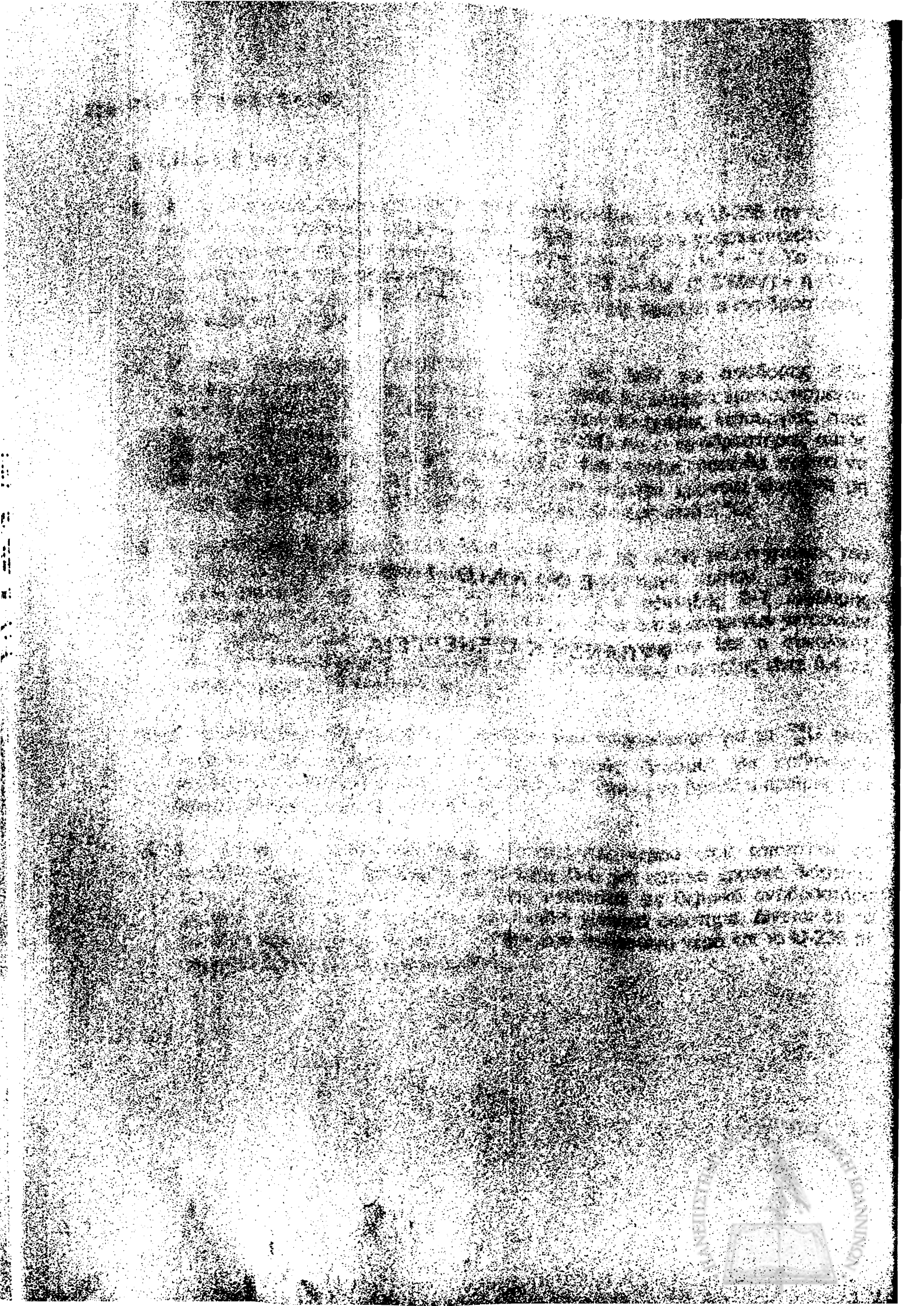
1. Ένας πυρηνικός αντιδραστήρας σχάσης καταναλώνει 3,9 kg U-235 την ημέρα και παράγει 1 επιπλέον νετρόνιο ανά αντίδραση, το οποίο χρησιμοποιείται για την παραγωγή τριτίου μέσω της αντίδρασης $n + \text{Li}^6 \rightarrow \text{He}^4 + \text{T}$. Το τρίτιο καταναλώνεται από αντιδραστήρα σύντηξης $\text{D} + \text{T} \rightarrow \text{He}^4 (3,5 \text{ MeV}) + n (14,1 \text{ MeV})$. Πόση είναι η μάζα του Li και η ενέργεια που παράγει ο αντιδραστήρας σύντηξης την ημέρα;
2. Σ' έναν αντιδραστήρα ηλεκτρικής ισχύος 100 MW και απόδοσης 25% βρίσκονται, στην αρχή της λειτουργίας του, 8000 kg ελαφρά εμπλουτισμένου ουρανίου (2% U-235 και 98% U-238). Μετά από 30 ημέρες λειτουργίας, ποια θα είναι τα ποσοστά του U-235 και του U-238; Αν ο αντιδραστήρας αυτός αποβάλλει την άχρηστη θερμική ενέργεια σ' ένα ποτάμι, ποια θα πρέπει να είναι η ροή του ποταμιού (μάζας νερού στη μονάδα χρόνου) ώστε να μη δημιουργείται αύξηση στη θερμοκρασία του μεγαλύτερη από 2 °C;
3. Η καρδιά ενός αντιδραστήρα σχάσης περιέχει 20 kg U-235 ενώ ο χιτώνας του περιέχει αρκετή ποσότητα ^6Li για την παραγωγή τριτίου. Το τρίτιο χρησιμοποιείται σαν καύσιμο σε αντιδραστήρα σύντηξης D-T ωφέλιμης ηλεκτρικής ισχύος 5 MW. Αν 30% του μέσου αριθμού παραγομένων νετρονίων ανά σχάση χρησιμοποιείται για την παραγωγή τριτίου και ο συνολικός συντελεστής μετατροπής ενέργειας στον αντιδραστήρα σύντηξης είναι 0,4 να ευρεθεί ο χρόνος λειτουργίας του.
4. Ο αριθμός των παραγομένων νετρονίων ανά απορρόφηση για το $^{239}_{92}\text{U}$ είναι περίπου 2,29. Χρησιμοποιώντας τις ενεργούς διατομές για ραδιενεργό σύλληψη $\sigma_c = 48 \text{ barns}$ και για σχάση $\sigma_f = 531 \text{ barns}$, να βρεθεί ο αριθμός των παραγομένων νετρονίων ανά σχάση.
5. Να βρεθεί ο λόγος της μάζας θαλασσινού νερού που απαιτείται σε αντιδραστήρα σύντηξης ολικής κατάλυσης D-D για κάποιο χρονικό διάστημα προς τη μάζα φυσικού ουρανίου που απαιτείται σε θερμικό αντιδραστήρα σχάσης U-235 της ίδιας ισχύος για το ίδιο χρονικό διάστημα. Δίνεται ότι το δευτέριο βρίσκεται σε ποσοστό 0,015% στο θαλασσινό νερό και το U-235 σε ποσοστό 0,71% στο φυσικό ουράνιο.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΡΥΠΑΝΣΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ





ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΡΥΠΑΝΣΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Οποιαδήποτε παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας συνεπάγεται κάποια μικρότερη ή μεγαλύτερη επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Συνάμα αποτελεί και μια πηγή σπατάλης και ανωμαλίας για το οικοσύστημα. Για παράδειγμα: Χρησιμοποιούμε την ενέργεια που είναι εγκλωβισμένη μέσα στο κάρβουνο, μετατρέποντάς τη σε ηλεκτρική ενέργεια στο σταθμό ηλεκτρικής ενέργειας και μεταφέροντας αυτή την ενέργεια στα σπίτια μας. Εκεί μετατρέπουμε την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμική ενέργεια μέσα από ένα ηλεκτρικό θερμαντήρα. Σε κάθε μετατροπή χάνεται και ένα ποσό ενέργειας. Το ίδιο όμως θα συνέβαινε αν καίγαμε το κάρβουνο στο τζάκι με σκοπό την άμεση μετατροπή του σε θερμότητα. Θα χάναμε ένα ποσό ενέργειας με τη ζέστη που θα διέφευγε από την καμινάδα.

Στη φύση, αντίθετα, δεν υπάρχει η έννοια του σπαταλημένου προϊόντος, κι επομένως δεν έχουμε, θεωρητικά, σπατάλη. Και αυτό γιατί ένας οργανισμός μπορεί να παράγει μια ουσία που είναι περιττή για την επιβίωσή του, η ουσία αυτή όμως μπορεί να περιέχει θρεπτικά συστατικά απαραίτητα για την επιβίωση άλλων οργανισμών. Έτσι, στη φύση η ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή μιας ουσίας σε μια άλλη, απλώς αλλάζει μορφή, και η συνολική ισορροπία παραμένει σταθερή. Ένα καλό παράδειγμα είναι η διαδικασία της φωτοσύνθεσης, που είδαμε στο σχετικό κεφάλαιο. Τα πράσινα φυτά χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για να παράγουν οξυγόνο και οργανικές ουσίες από νερό, διοξείδιο του



άνθρακα και μεταλλικά άλατα. Μ' αυτό τον τρόπο ανανεώνεται το οξυγόνο της γης, και η ακτινοβολία που έρχεται από τον ήλιο και απορροφάται από τη γη με τα φυτά της βρίσκεται σε ισορροπία (ή θα έπρεπε να βρίσκεται) με την ακτινοβολία που εκπέμπεται πίσω στο διάστημα. Οποιαδήποτε αλλαγή μεγάλης κλίμακας θα άλλαζε ριζικά τις κλιματολογικές συνθήκες πάνω στον πλανήτη μας.

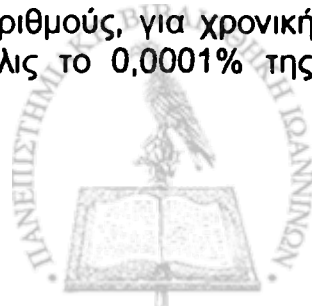
Όπως είδαμε στο πρώτο κεφάλαιο όλη ή ενέργεια, τόσο ή φυσική όσο και η βιοχημική, προέρχεται από τον ήλιο. Η ενέργεια με τη μορφή του φωτός που εκπέμπεται προς τη γη, αποθηκεύεται στην ατμόσφαιρα (με τη μορφή των υδρατμών και του διοξειδίου του άνθρακα), στους ωκεανούς (με την μορφή της θερμότητας και των μικροσκοπικών οργανικών ενεργειακών συστημάτων) και στη γη (με τη μορφή της θερμότητας και της φωτοσυνθετικής εξάπλωσης). Αν ένα μεγάλο μέρος αυτής της ηλιακής ακτινοβολίας δεν εκπέμπονταν τελικά πάλι πίσω στο διάστημα, η γη θα καιγόταν σιγά-σιγά ολόκληρη. Η λειτουργία του οικοσυστήματος έχει σα σκοπό να διατηρεί σε ισορροπία και να κυκλοφορεί το απαραίτητο ποσό θερμότητας που απαιτείται για τη διατήρηση της ζωής.

Η αυξανόμενη κατανάλωση από τους ανθρώπους όλο και περισσότερης ενέργειας μπορεί να βάλει αυτή την ισορροπία - και τον ίδιο τον πλανήτη - σε μεγάλο κίνδυνο (Σχήμα 7.1). Για παράδειγμα μια κηλίδα πετρελαίου στη θάλασσα Μπώφορντ, στα βορειοανατολικά της Αλάσκας, είναι ικανή να ελαττώσει την λευκαύγεια (ανακλαστικότητα) μεγάλων περιοχών της Αρκτικής, όπου επιπλέουν σωροί πάγων. Το πετρέλαιο μπορεί να γαλακτωματοποιηθεί σε σταγονίδια με μεγάλη αντοχή, που θα κυκλοφορούν με τα ρεύματα και θα συσσωρεύονται στο κάτω μέρος της επιφάνειας των πάγων. Μετά από μερικά χρόνια, το εποχιακό λιώσιμο των πάγων στην κορυφή και το πάγωμα στη βάση, μπορεί να δημιουργήσει μια σκούρα παγωμένη επιφάνεια, κι επειδή το μαύρο χρώμα απορροφά περισσότερη ακτινοβολία από το άσπρο, οι πάγοι θα λιώνουν πολύ γρήγορα με αποτέλεσμα μια βαθιά και μη αντιστρεπτή επίδραση στο κλίμα όλου του κόσμου.

Μέσα σε 2 ώρες

20.000	άτομα προστίθενται στον πληθυσμό της γης
20.000	στρέμματα δάσους καταστρέφονται στον πλανήτη
5.000.000	τόνοι CO ₂ συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα από την κατανάλωση καυσίμων από τα αυτοκίνητα και την βιομηχανία

Σχήμα 7.1: Ενέργεια και ρύπανση του περιβάλλοντος με αριθμούς, για χρονική περίοδο 2 ωρών. Οι αριθμοί αυτοί αντιπροσωπεύουν μόλις το 0,0001% της σημερινής κατάστασης.



Ένα άλλο παράδειγμα είναι τα προϊόντα της καύσης βιομηχανιών, που καθώς μεταφέρονται με τους ανέμους, μπορούν εύκολα να επικαθίσουν πάνω στους πάγους, δημιουργώντας παρόμοια αποτελέσματα. Σήμερα έχουν παρατηρηθεί τέτοια προϊόντα στους πόλους. Στους ιστούς των πιγκουϊνών και των ψαριών της Ανταρκτικής καθώς και των φαλαινών της Αρκτικής, βρέθηκαν βιομηχανικές μολυσματικές ουσίες και εντομοκτόνα. Καμιά περιοχή δεν έχει μείνει τώρα πια ανέπαφη από τη μόλυνση που δημιουργείται όταν μετατρέπουμε ορισμένες ύλες σε ενέργεια ή σε άλλες ύλες. Τελευταίο παράδειγμα οι φώκιες της Β. Θάλασσας. Ψόφησαν κατά χιλιάδες από πνευμονία επειδή κάποια μολυσματική ουσία ακινητοποίησε το ανοσοποιητικό τους σύστημα ως προς τον ιό της πνευμονίας.

Η διαδικασία της καύσης επομένως επιβαρύνει σημαντικά το περιβάλλον, αλλά είναι και μια τρομερή σπατάλη δυναμικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει γιατί η βιομηχανική καύση μετατρέπει την ενέργεια σε διασκορπισμένη θερμότητα, θόρυβο και τριβή. Όλα αυτά συνοδεύονται με μηχανικές απώλειες, έξοδα μεταφοράς της ενέργειας και παραγωγή στοιχείων που προκαλούν μόλυνση του περιβάλλοντος.

Το πρόβλημα είναι φυσικά πολύ πιο έντονο στα εκβιομηχανισμένα κράτη όπου η παραγωγή του ηλεκτρισμού απαιτεί την κατανάλωση ενός πολύ μεγάλου ποσοστού φυσικών καυσίμων (πετρέλαιο, κάρβουνο και φυσικό αέριο). Έτσι, έχουμε πια το διπλό πρόβλημα της μόλυνσης και της εξάντλησης των φυσικών πόρων. Πριν ακόμα ένας τυπικός ενεργειακός σταθμός παραγάγει κάποια ενέργεια, αποβάλλει ένα 15% της ενέργειας των καυσίμων του από τις καπνοδόχους. Ένα ακόμα 60% της υπόλοιπης ενέργειας που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, χάνεται στη διάρκεια της μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε μηχανική μέσα στις τουρμπίνες, και μετά σε ηλεκτρική μέσα στους εναλλακτήρες. Μ' άλλα λόγια, ένας σταθμός 1.000 MW ξοδεύει 4.000 MW θερμού νερού και ατμού. Εκείνο που σπαταλάει ο σταθμός είναι ενέργεια σε μορφή "αποθέματος", γιατί από τη στιγμή που έχουμε κάψει υδρογονάνθρακες, η φύση δε μπορεί να τους αντικαταστήσει.

Μέσα και έξω από τη βιομηχανία η μεγαλύτερη σπατάλη γίνεται από το αυτοκίνητο. Αυτό καταναλώνει τεράστιες ποσότητες ενέργειας, κυρίως με τη μορφή των φυσικών καυσίμων, αλλά και με διάφορες άλλες μορφές που απαιτούνται για την κατασκευή, τη συναρμολόγηση και τη συντήρηση των ανταλλακτικών. Καταναλώνει ακόμα ενέργεια για την κατασκευή μεγάλων δρόμων, γκαράζ, χώρων παρκαρίσματος και βενζινάδικων, καθώς και για την εξόρυξη, το καθάρισμα και την επεξεργασία των πρώτων υλών. Και το ίδιο το αυτοκίνητο καταλήγει στο τέλος να είναι ο λιγότερο ικανοποιητικός από όλους τους δυνατούς μετατροπείς ενέργειας.

Ένα ποσοστό περίπου 8% του ακάθартου πετρελαίου που χρησιμοποιείται για την παρασκευή των βασικών πετρελαϊκών προϊόντων χάνεται στη διαδικασία διύλισης (κυρίως σαν μολυσματικά απόβλητα καθώς και σε διαρροές). Από το υπόλοιπο, ένα 12% χάνεται στη διάρκεια της κατεργασίας του σε βενζίνη, κι ένα ακόμα 5% χάνεται στη μεταφορά από το διυλιστήριο στα κέντρα διανομής και στους σταθμούς βενζίνης. Μ' άλλα λόγια περισσότερο από το ένα τέταρτο της αρχικής ενέργειας έχει ολοκληρωτικά χαθεί πριν μπουν καθόλου καύσιμα στη μηχανή του



αυτοκινήτου. Όσο για την απόδοση του οχήματος αυτού καθαυτού, οι διάφορες εκτιμήσεις τοποθετούν τη θερμική αποδοτικότητα της μηχανής περίπου στα 25%, τη μηχανική της αποδοτικότητα στα 70% και την αποδοτικότητα της ενέργειας που μεταφέρεται στις ρόδες στα 70%.

Απλώς και μόνο για την απαραίτητη καθημερινή τους κίνηση, τα αυτοκίνητα σ' όλο τον κόσμο αυτή τη στιγμή, καταναλώνουν το 6% της συνολικής παραγωγής ενέργειας. Στη βάση της ηλεκτρικής ενέργειας, το ποσό αυτό αναλογεί σε 4.000 με 5.000 MWh το χρόνο. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ενέργειας φεύγει στην κυριολεξία σαν καπνός - μονοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου, διοξείδιο του θείου, υπολείμματα υδρογονανθράκων και μόλυβδος. Χοντρικά, μπορούμε να πούμε ότι το αυτοκίνητο σήμερα καταβροχθίζει το 12% της παγκόσμιας πετρελαιοπαραγωγής, και το 5% του σιδήρου, του χάλυβα και των κυριότερων μη σιδηρούχων μετάλλων (χαλκός, μόλυβδος, αλουμίνιο και ψευδάργυρος). Αποτελεί επομένως μια τεράστια πηγή μόλυνσης της ατμόσφαιρας από καυσαέρια και ένα πηγάδι σπατάλης ενέργειας.

Ένα άλλο τέτοιο παράδειγμα μας παρέχει η σύγχρονη αρχιτεκτονική. Τα κτίρια σήμερα φαίνεται να έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούν ενέργεια με τον πιο σπάταλο τρόπο. Άσκοπα ισχυρός φωτισμός, κακή θερμική μόνωση, ισχυρά συστήματα κλιματισμού, ηλεκτρική θέρμανση, τεράστιος όγκος, υπερβολική χρήση υλικών, όπως τσιμέντο και αλουμίνιο, κακός ηλιακός προσανατολισμός. Οι περισσότερες χώρες έχουν να παρουσιάσουν δείγματα αρχιτεκτονικής σπατάλης και κακής ή ελλιπούς μόνωσης.

Είναι σίγουρο ότι θα μπορούσε να γίνει σημαντική οικονομία στην ενέργεια σε παγκόσμια κλίμακα, αν επικρατούσαν καλύτεροι κανόνες μόνωσης. Επίσης διάφοροι τρόποι ελάττωσης του κόστους της θέρμανσης - για παράδειγμα, περιφερειακά εργοστάσια παροχής κεντρικής θέρμανσης κατά συνοικίες, που μπορούν να βοηθήσουν στον περιορισμό της μόλυνσης, διανέμοντας την "άχρηστη" θερμότητα που βγαίνει από τους ενεργειακούς σταθμούς (τηλεθέρμανση των πόλεων Πτολεμαΐδας και Κοζάνης), στις βιομηχανίες και την καύση των απορριμμάτων - θα μπορούσαν ν' ανεβάσουν αισθητά την οικονομία της ενέργειας. Η χρήση της αποκαλούμενης θερμότητας χαμηλής στάθμης, που γίνεται στα περιφερειακά εργοστάσια παροχής κεντρικής θέρμανσης κατά συνοικίες, είναι ένα φαινόμενο που βρίσκεται σε άνθηση στη Σουηδία όπου πρωτοεμφανίστηκε αυτή η ιδέα. Παρά την αντίρρηση που διατυπώνεται συχνά σχετικά με τα περιφερειακά εργοστάσια παροχής κεντρικής θέρμανσης κατά συνοικίες, η λειτουργία τους έχει νόημα μόνο στο βαθμό που θυσιάζεται η "ελεύθερη επιλογή". Μόλις το περιφερειακό εργοστάσιο αρχίζει να λειτουργεί, ο ανταγωνισμός ανάμεσα στα διάφορα καύσιμα - πετρέλαιο, κάρβουνο, ηλεκτρισμός αέριο - για την εξασφάλιση της προτίμησης του καταναλωτή, παίρνει τέλος. Είναι φανερό ότι, ένα καθολικό ενεργειακό σύστημα που λειτουργεί όσο το δυνατό φτηνότερα και αποδοτικότερα, και εξυπηρετεί το γενικό συμφέρον θα πρέπει να εφαρμοστεί σ' όλα τα κτίρια που μπορούν να συνδεθούν με το δίκτυο.



Σ' αυτό το μάθημα μελετήσαμε διάφορες πιθανές πηγές ενέργειας που υποθέσαμε ότι μπορεί να αφήνουν λιγότερα απόβλητα και να επιβαρύνουν το περιβάλλον με λιγότερες βλαβερές ουσίες από ότι τα φυσικά καύσιμα. Ας ξαναδούμε όλες τις μορφές αυτές συνοπτικά.

Υπάρχει βέβαια πρώτα απ' όλα η πυρηνική σχάση. Όπως είδαμε η διάσπαση του ατόμου του ουρανίου απελευθερώνει μεγάλα ποσά ενέργειας, που θα μπορούσαν να μετατραπούν σε χρήσιμη θερμότητα κάτω από τις ελεγχόμενες συνθήκες ενός πυρηνικού αντιδραστήρα σχάσης. Αυτό θα προμήθευε, θεωρητικά, τον κόσμο με άφθονη, φτηνή και καθαρή ενέργεια. Παρόλα αυτά, σήμερα σε παγκόσμια κλίμακα μόνο ένα μικρό ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Τι πήγε στραβά; Τι είναι εκείνο που εμπόδισε την ανάπτυξή της; Η απάντηση είναι ότι το προτέρημα της αφθονίας της πυρηνικής ενέργειας αντισταθμίζεται με τα μειονεκτήματα που προέρχονται από την μόλυνση του περιβάλλοντος (ραδιενέργεια, έκλυση θερμότητας) και τους κινδύνους που συνεπάγεται η παραγωγή της.

Θα μπορέσουμε να έχουμε άφθονη τέτοια ενέργεια μόνο όταν αποκτήσουμε τις οικονομικές και τεχνολογικές δυνατότητες να κατασκευάσουμε και να συντηρήσουμε έναν εντελώς ασφαλή σταθμό παραγωγής πυρηνικής ενέργειας. Επίσης η επένδυση που απαιτείται για την εξόρυξη και την επεξεργασία τόσο ουρανίου που να καλύπτει ένα εθνικό πρόγραμμα, είναι τεράστια και θα απαιτούσε μεγάλες οικονομικές δαπάνες. Ούτε βέβαια είναι απλώς θέμα χρημάτων. Ένας μεγάλος αριθμός φυσικών, χημικών, μηχανικών και υπερεξειδικευμένων εργατών θα ήταν απαραίτητος σ' ένα πλήρες πυρηνικό πρόγραμμα, γιατί οι διαδικασίες της εξόρυξης, της επεξεργασίας, του εμπλουτισμού και του ελέγχου είναι πολύπλοκες. Έτσι, θα χρειαζόταν ένα κολοσσιαίος εκπαιδευτικός οργανισμός εξειδίκευσης, όπου θα εκπαιδεύονταν το απαιτούμενο ανθρώπινο δυναμικό, και όπως είπαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, το σύστημα όπου θα καταλήγαμε τελικά και επικίνδυνο θα ήταν και θα μόλυνε το περιβάλλον. Ακόμα και η πιο προχωρημένη και εμπνευσμένη δουλειά στον τομέα της μηχανικής προστασίας δε μπορεί να μας διασφαλίσει τέλεια απέναντι στα ατυχήματα, πράγμα που έχει αποδειχτεί από τα διάφορα ατυχήματα που έχουν συμβεί τα τελευταία χρόνια.

Υπάρχουν αναρίθμητοι κίνδυνοι στην ανάσχεση της πυρηνικής "πρώτης ύλης" και την ακτινοβολία του καύσιμου υλικού - μέσα στον αντιδραστήρα στην διάρκεια της διακίνησης και της επεξεργασίας - καθώς και στη διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων. Μια ποικιλία πολύπλοκων χημικών, μηχανικών, ηλεκτρικών και διοικητικών ατυχημάτων θα μπορούσε να δημιουργήσει μια καταστροφή τρομερών διαστάσεων. Μέχρι τώρα δεν έχει σχεδιαστεί ολότελα ασφαλής λέβητας για την πυρηνική αντίδραση. Επίσης, δεν διαφαίνεται λύση στο πρόβλημα των ραδιενεργών καταλοίπων. Έτσι, μέχρι που να γίνουν ορισμένα βήματα για τη λύση αυτών των προβλημάτων, το πιθανότερο είναι ότι η πυρηνική σχάση δε μπορεί να θεωρηθεί υποκατάστατο των φυσικών καυσίμων σε παγκόσμια κλίμακα.



Τι έχουμε όμως να πούμε για την πυρηνική σύντηξη; Η προοπτική της εξαγωγής ενέργειας από τη διαδικασία σύντηξης πυρήνων σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (σε αντίθεση με τη διάσπαση του ατόμου στη διαδικασία της σχάσης) υπήρξε από παλιά μια μεγάλη επιστημονική ελπίδα.

Η γενική όμως έλλειψη χρημάτων, υλικών, ανθρώπινου επιστημονικού δυναμικού και πολύπλοκου ερευνητικού εξοπλισμού, δείχνει ότι η εμφάνιση του πρώτου πρότυπου πυρηνικού αντιδραστήρα σύντηξης δε θα γίνει σύντομα. Η επιτυχία σ' αυτόν τον τομέα θα αποτελούσε αναμφίβολα ένα τεράστιο βήμα προς την επίλυση του ενεργειακού προβλήματος. Ίσως όμως και εδώ παρουσιαστούν προβλήματα που ακόμα δεν έχουμε αντιμετωπίσει.

Θεωρείται δεδομένο, για παράδειγμα, ότι δεν υπάρχουν περιορισμοί στους πόρους για τη διαδικασία της σύντηξης γιατί η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται είναι το δευτέριο. Το δευτέριο είναι μια μορφή υδρογόνου που εξάγεται εύκολα από το θαλασσινό νερό. Όλοι όμως ξέρουμε ότι το δευτέριο είναι βιολογικά απαραίτητο στους ωκεανούς για την διατήρηση της ισορροπία της θαλάσσιας ζωής. Για να στηριχθούμε λοιπόν στην προοπτική της σύντηξης πρέπει να μελετήσουμε ποιες είναι οι λειτουργίες του δευτερίου στη θάλασσα. Έτσι, αν και μπορούμε να είμαστε σχεδόν σίγουροι ότι η πυρηνική σύντηξη δεν έχει κινδύνους στη λειτουργία της, ούτε δημιουργεί επικίνδυνα υποπροϊόντα, υπάρχουν πάρα πολλά προβλήματα που παραμένουν ακόμα άλυτα για να τη θεωρήσουμε άμεσα εφαρμόσιμη λύση στο πρόβλημα της παραγωγής ενέργειας.

Μια τρίτη δυνατότητα είναι η γεωθερμική ενέργεια (δηλαδή ενέργεια που προέρχεται από τη φυσική θερμότητα της γης). Υπάρχουν τεράστια υπόγεια αποθέματα χρησιμοποιήσιμης ενέργειας, που αν τρυπήσουμε τη γη θα αναδυθούν με τη μορφή θερμού νερού και ξηρού ατμού. Σε αρκετά μέρη γίνεται εκμετάλλευση τέτοιων αποθεμάτων. Σε γενικές γραμμές, η αποδοτικότητά τους είναι μικρότερη από εκείνη των τυπικών σταθμών ενέργειας, αλλά τα έξοδα της κατασκευής της λειτουργίας και της συντήρησής τους είναι πολύ χαμηλότερα.

Η γεωθερμική ενέργεια έχει όμως και φανερά μειονεκτήματα: μπορούμε να την εκμεταλλευτούμε μόνο σε μέρη ευνοϊκά από γεωλογική άποψη και ένα μέρος της θερμότητας χάνεται όταν μεταφέρεται απευθείας σε μακρινές αποστάσεις (υπολογίζεται ότι χάνεται το ένα δέκατο της θερμότητας σε κάθε 100 km που διανύει). Επίσης δεν είναι απαλλαγμένη από περιβαντολλογικά προβλήματα.

Ένας από τους σημαντικότερους αέριους ρυπαντές που συνοδεύουν τα γεωθερμικά ρευστά είναι υδρόθειο (H_2S). Το αέριο αυτό, σε χαμηλές συγκεντρώσεις έχει δυσάρεστη μυρουδιά. Σε μεγαλύτερες όμως συγκεντρώσεις γίνεται άοσμο και έχει τη δυνατότητα να παραλύει τα ρινικά νεύρα. Τότε είναι πραγματικά επικίνδυνο και μπορεί να προκαλέσει μέχρι και τον θάνατο. Είναι κατά 17% βαρύτερο από τον αέρα. Έτσι μπορεί να συγκεντρωθεί σε κλειστούς υπόγειους χώρους εφόσον δεν έχουν προβλεφθεί ειδικές εγκαταστάσεις αερισμού.



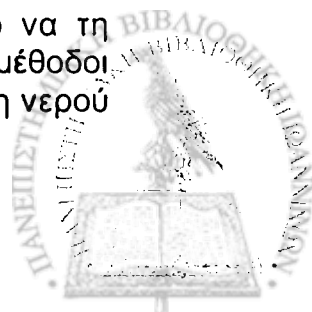
Η διαφυγή του υδρόθειου μπορεί να γίνει είτε στην ατμόσφαιρα, από τον συμπυκνωτή, τους πύργους ψύξης και τα φρεάτια, είτε στους υδατικούς αποδέκτες μαζί με τα υγρά κατάλοιπα. Για την αντιμετώπισή του έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, όπως διασκορπισμός σε μεγάλο ύψος ή μετατροπή του σε διέξοδο του θείου και κατακράτηση του θείου με προσθήκη μεταλλικού καταλύτη και καθίζηση ή επανεισαγωγή του σε κάποια παρακείμενη γεώτρηση.

Απ' τους υπόλοιπους αέριους ρυπαντές, οι πιο επικίνδυνοι είναι το διοξείδιο του άνθρακα, το Μερκούριο, το Αρσενικό καθώς και διάφορα ραδιενεργά στοιχεία. Επειδή όμως βρίσκονται σε αμελητέες ποσότητες δεν είναι σε θέση να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα.

Αντίθετα, όταν οι ουσίες αυτές βρίσκονται και υγροποιημένες και μαζί με άλλες όπως είναι το Βόριο και η Αμμωνία, μπορούν να δηλητηριάσουν τις υδάτινες πηγές άρδευσης και ύδρευσης. Από τις διάφορες μελέτες φαίνεται ότι η πιο σωστή μέθοδος για την αντιμετώπιση των υγρών είναι η επανεισαγωγή τους σε κάποια γειτονική (ανενεργή κατά προτίμηση) γεώτρηση. Όμως η εμπειρία από τη λειτουργία πολλών γεωθερμικών εγκαταστάσεων στον κόσμο, έδειξε ότι και η μέθοδος αυτή δεν είναι χωρίς προβλήματα. Δεν έχει απαντηθεί ακόμη το ερώτημα του επηρεασμού της θερμότητας του εδάφους με την επανεισαγωγή ψυχρότερου ρευστού. Επίσης το κατά πόσο μπορεί να μεταβληθεί η δυναμική ισορροπία σε μεγάλα βάθη με αποτέλεσμα την δημιουργία σεισμικών δονήσεων και καταβυθίσεων. Ακόμη πιο σημαντικό είναι η αλλαγή της διαπερατότητας των γειτονικών τοιχωμάτων από τις χημικές επικαθίσεις. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν οι ουσίες του διαλύματος περιέλθουν σε κατάσταση υπερκορεσμού και κρυσταλλωθούν όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 150 °C. Ειδικά, το SiO_2 καθιζάνει απότομα και μπορεί να προκαλέσει φράξιμο των πόρων του υπόγειου υδροφορέα όσο και των επίγειων αγωγών των εναλλακτών θερμότητας. Πρέπει επίσης να σημειώσουμε ότι η λειτουργία της εγκατάστασης συνοδεύεται και από άλλα δευτερεύοντα φαινόμενα, που είναι άλλωστε χαρακτηριστικά και της λειτουργίας των συμβατικών μονάδων. Τα κυριότερα από τα οποία είναι ο θόρυβος, η θερμική ρύπανση, ο κίνδυνος εκρήξεων, τα φαινόμενα διάβρωσης των γειτονικών εδαφών και η καταστροφή του τοπίου.

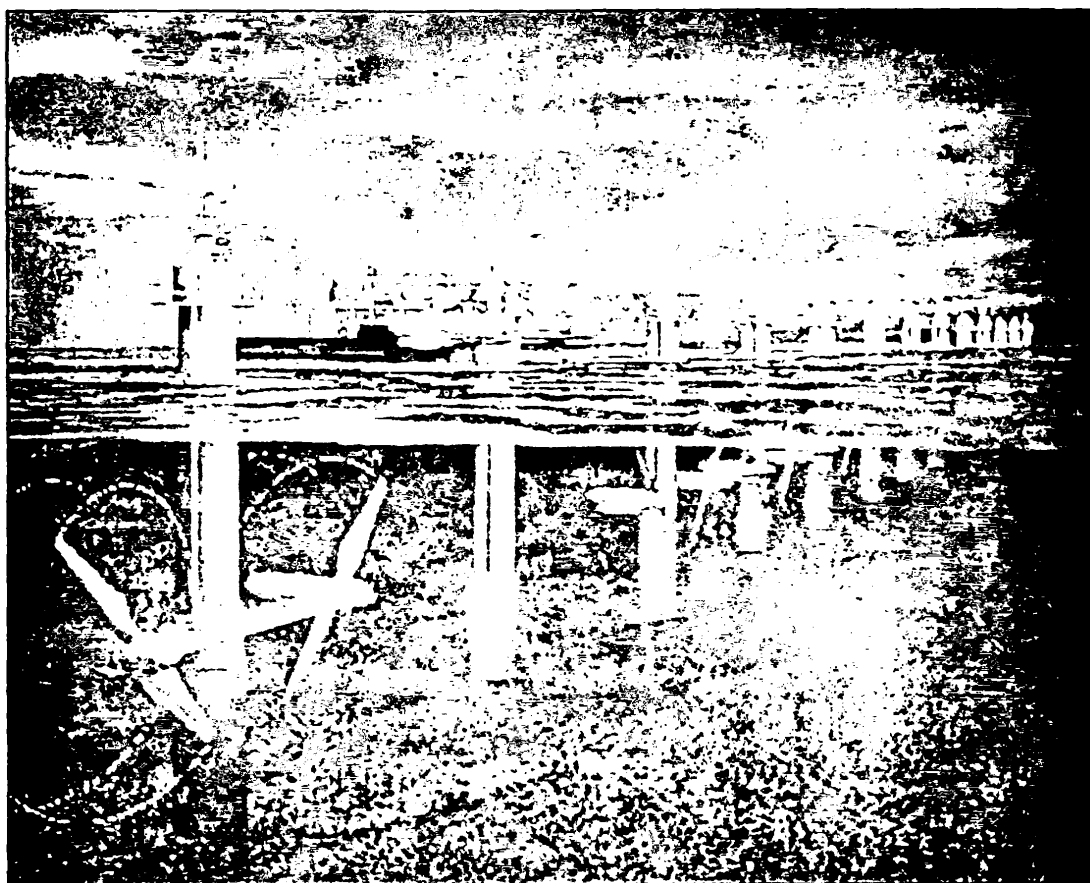
Όλες οι εναλλακτικές λύσεις που αναφέρθηκαν μέχρι τώρα - ακόμα και, ως ένα βαθμό, η γεωθερμική ενέργεια - βασίζονται στην αφαίρεση αποθέματος από τις περιορισμένες προμηθευτικές πηγές της φύσης. Θα ήταν σίγουρα πιο συνετό να προσπαθήσουμε να βρούμε τρόπους για να ζήσουμε στηριζόμενοι μόνο πάνω στο δικό μας εισόδημα. Για παράδειγμα να χρησιμοποιήσουμε το ενεργειακό "εισόδημα" - ενέργεια, που είναι συνεχώς διαθέσιμη στη φύση.

Για παράδειγμα ένα τέτοιο εισόδημα ενέργειας είναι η ασταμάτητη κίνηση των ωκεανών. Η χρησιμοποίηση της παλιρροιακής ενέργειας αντιμετωπίζεται από πολύ παλιά σαν μια πηγή ενέργειας, και τα προγράμματα που έχουν στόχο να τη δαμάσουν έχουν κάνει αρκετή πρόοδο (Σχήμα 7.2). Οι δυο κυριότερες μέθοδοι είναι: η λειτουργία γεννητριών με την ενέργεια των κυμάτων, ή αποθήκευση νερού



αν βρίσκεται σε πλημμυρίδα και η χρήση της δύναμης του καθώς επανέρχεται την άμπωτη. Υποστηρίζεται ότι η παλιρροιακή ενέργεια δε μπορεί να καλύψει πλέον του 1% της ενέργειας που παράγεται από τους συνηθισμένους υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Με το δεδομένο όμως την μέχρι τώρα περιορισμένη ρευνα, δε μπορούμε να είμαστε σίγουροι ότι η εκτίμηση αυτή είναι δικαιολογημένη.

Ιδη λειτουργούν μερικά εργοστάσια παλιρροιακής ενέργειας στη Γαλλία (στη Άνς) και στη Βόρεια Αμερική (στο Πασαμακόντι στο Μέην, και στον Καναδά). Από τη μέχρι τώρα εμπειρία τους μπορούμε να δούμε τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της παλιρροιακής ενέργειας. Τα μεγάλα συστήματα δε μολύνουν τον αέρα, αλλά πληρεάζουν την τοπική γεωγραφία και αλλοιώνουν την τοπική γεωλογία και οικολογία. Οι κοινωνίες των φυτών και των οστρακοειδών καταστρέφονται, οι νεμοι και οι βροχές αλλάζουν, η ναυτιλία και η αλιεία μπαίνουν σε κίνδυνο. Τα ξοδα επίσης της κατασκευής είναι τεράστια και η ενεργειακή απόδοση μικρή (γύρω στα 500 MW). Μέχρι να επινοηθούν απλούστερες και λιγότερο δαπανηρές εχνικές κατασκευής, το πιο πιθανό είναι ότι τέτοια προγράμματα θ' αναπτύσσονται πολύ περιορισμένα.



Εχρήμα 7.2: Όμιλος επιχειρήσεων από την Γερμανία σε συνεργασία με επιστήμονες από την Αυστρία και την Γερμανία εγκατέστησαν σε απόσταση 2 km ανοικτά των ακτών Devon της Μ. Βρετανίας πιλοτική μονάδα κυματικής ενέργειας, ισχύος 300 kW. Κάθε πύργος στήριξης έχει ύψος 50 m, διάμετρο 2,5 m και στηρίζεται σε βάση ενισχυμένου σκυροδέματος πάχους 15 m. Η έναρξη της εμπορικής χρήσης της μονάδος τοποθετείται στις αρχές του 2006, οπότε και θα παραγάγει ηλεκτρισμό για τις ανάγκες μιας μικρής πόλης (περίπου 6.500 κατοίκων).



Υπάρχουν φυσικά άλλοι, πλέον παραδοσιακοί τρόποι χρησιμοποίησης της υδροενέργειας. Το νερό είναι μια από τις παλιότερες πηγές ενέργειας ικανοποιεί περισσότερο από το ένα δέκατο των συνολικών ενεργειακών απαιτήσεων της ανθρωπότητας και ένα πολύ μεγαλύτερο ποσοστό των συνολικών ηλεκτρικών αναγκών. Σύμφωνα όμως με τις περισσότερες εκτιμήσεις όλες οι πραγματικά ευνοϊκές περιοχές που παρέχουν υδροενέργεια έχουν χρησιμοποιηθεί. Για μια σημαντική άνοδο στη συνολική απόδοση θα έπρεπε να υπάρχουν μερικές "ενισχυμένες" τεχνολογίες - πιο αποδοτικές υδροτουρμπίνες, καλύτερα φράγματα κ.λπ. Ακόμα και τότε θα έπρεπε να λύσουμε πολλά άλλα προβλήματα για να αποκτήσουμε τελικά μεγαλύτερα, πιο εκτεταμένα, και πιο παραγωγικά υδροηλεκτρικά εργοστάσια.

Για παράδειγμα, δεν έχουμε μάθει ακόμα πως ν' αντιμετωπίζουμε μ' επιτυχία τη συσσώρευση της ιλύος του ποταμού που τελικά αχρηστεύει ένα σημαντικό μέρος των τεχνικών λιμνών. Υπάρχει επίσης κι εδώ η απειλή της οικολογικής καταστροφής. Η πρόσφατη εμπειρία των μεγάλων φραγμάτων ιδιαίτερα στις τροπικές χώρες αποδεικνύει ότι οι διάφορες παρενέργειές τους -πάνω στο κλίμα, στην αλιεία, στη ζωή των φυτών και την υγεία - τα κάνουν να είναι τελικά ασύμφορη λύση. Έτσι, τα μεγαλύτερα τεχνικά έργα - αξίζει να σημειωθούν εκείνα που σχεδιάστηκαν για τους Αρκτικούς ποταμούς (με την προοπτική να τους διοχετεύσουν στις τεράστιες τεχνικές λίμνες στη Σιβηρία) - καθυστερούν, όσο να γίνουν παραπέρα έρευνες πάνω στην πιθανή επίδραση που μπορεί να έχουν στο περιβάλλον και το κλίμα.

Τέλος, η ενέργεια που παίρνουμε από τα ανεξάντλητα αποθέματα της ηλιακής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια η ενέργεια αυτή είναι αποθηκευμένη και διαπερνά όλα τα οργανικά συστήματα. Έτσι, τη χρησιμοποιούμε έμμεσα σε δραστηριότητες όπως είναι η γεωργία, η δασοκομία, η αλιεία, το κυνήγι κ.λπ. Θεωρητικά λοιπόν θα μπορούσαμε να κατασκευάσουμε τεχνητά ενεργειακά συστήματα που θα λειτουργούν με τις ίδιες αρχές που διέπουν τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Δεν ξέρουμε όμως ακόμα πως να προχωρήσουμε σ' αυτό τον τομέα, και είναι απίθανο ότι θα τα καταφέρουμε στο άμεσο μέλλον.

Μια προσιτή πηγή ενέργειας που βγαίνει έμμεσα από την ηλιακή ενέργεια είναι ο πολύ γνωστός μας άνεμος. Ο άνεμος, θεωρητικά, θα μπορούσε να μας προμηθεύσει τέτοια ποσά ενέργειας, που μπορούν να ικανοποιήσουν όλες τις ανάγκες μας. Στην πραγματικότητα όμως όπως είδαμε στο κεφάλαιο 5 είναι μάλλον απίθανο να μπορέσουν να παρέχουν ενέργεια περισσότερη από εκείνη που θα αρκούσε για να καλύπτει μερικές μικρές, ατομικές ανάγκες, γιατί είναι τρομερά ευμετάβλητοι και εξαρτώνται από πολυάριθμους παράγοντες, όπως είναι οι εποχές, το κλίμα και η συγκεκριμένη τοπογραφία. Έτσι μπορεί κάποια μέρα να γίνουν σημαντικοί βοηθητικοί παράγοντες στη λειτουργία μεγαλύτερων ενεργειακών συστημάτων. Είναι όμως ολότελα απίθανο εξαιτίας της αστάθειάς τους να γίνουν οτιδήποτε άλλο εκτός από βοηθητικοί παράγοντες σε μεγαλύτερα ενεργειακά συστήματα.



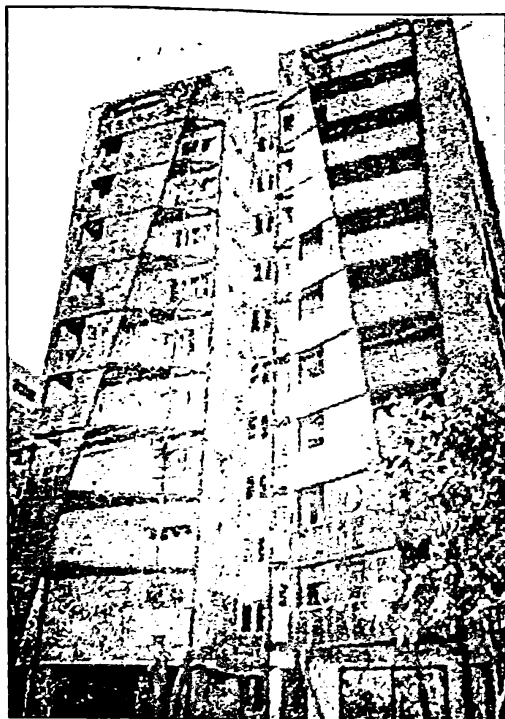
Από την άλλη μεριά μια σίγουρη πηγή ενέργειας είναι η άμεση ηλιακή ενέργεια. Όπως είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο κάθε δευτερόλεπτο, ο ήλιος μετατρέπει 687 εκατομμύρια τόνους υδρογόνο σε 583 εκατομμύρια τόνους ήλιο. Κατά την διαδικασία αυτή 4,6 εκατομμύρια τόννοι μάζας μετατρέπονται σε ενέργεια που εκπέμπεται στο διάστημα, κυρίως σε μορφή θερμότητας και φωτός. Η γη προσλαμβάνει ένα μεγάλο μέρος αυτής της ενέργειας (10^{18} kWh το χρόνο). Το μεγαλύτερο μέρος του δυναμικού αυτής της ενεργειακής πηγής μένει ανεκμετάλλευτο. Η σοβαρότητα όμως της ενεργειακής κρίσης προώθησε την εντατική έρευνα πάνω στους τρόπους σύλληψης και τα μέσα μετατροπής της.

Η "ελεύθερη" προσφορά ενέργειας από τον ήλιο θα μπορούσε, θεωρητικά, να προμηθεύσει τον κόσμο μ' ένα απεριόριστο απόθεμα ενέργειας. Αλλά η μετατροπή αυτής της ενέργειας σε μεγάλη συγκεντρωτική κλίμακα φαίνεται πολύ περισσότερο απίθανη από τη μετατροπή της σε μικρές μονάδες - μια για κάθε κτίριο ή ομάδα κτιρίων. Επίσης η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα ή ηλεκτρισμό μέχρι τώρα γίνεται με μικρό συντελεστή απόδοσης.

Οι έρευνες ωστόσο που έχουν γίνει μέχρι σήμερα, είναι ικανοποιητικές και δείχνουν ότι οι δαπάνες τέτοιων κατασκευών (μετατροπής της ηλιακής ενέργειας) σύντομα θα βρίσκονται σίγουρα μέσα στο οικονομικό πλαίσιο της παγκόσμιας κοινότητας. (Σχήμα 7.3). Ένα άλλο αρνητικό σημείο είναι ότι η εκτεταμένη φωτοθερμική μετατροπή (ηλιακή ενέργεια - θερμότητα - ηλεκτρισμός) θα απαιτεί τεράστιους χώρους για την εγκατάσταση των πινάκων που θα συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια. Παρόλα αυτά είναι σίγουρο ότι η άμεση ηλιακή ενέργεια προσφέρει την προοπτική μιας ενεργειακής πηγής που δε θα μολύνει το περιβάλλον. Εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός ότι η προσφορά ίσων μερίδων ενέργειας σε κάθε γωνία της κατοικήσιμης γης περιορίζει τον κίνδυνο ενός ενεργειακού πολέμου. Ακόμα όμως και αν λύναμε το πρόβλημα παραγωγής ενέργειας η κοινωνία θα ερχόταν μπροστά σ' ένα σημαντικό δίλημμα. Από τη μια μεριά, θα μπορούσαμε να τη χρησιμοποιήσουμε για να εντατικοποιήσουμε τον πυρετώδη ρυθμό της εκβιομηχάνισης και της αστικοποίησης. Από την άλλη μεριά θα μπορούσαμε να την εντάξουμε στα πλαίσια ενός ολόκληρου νέου πολιτισμού που θα βασίζεται σε νέες τεχνολογίες με ήπια επίδραση στο περιβάλλον. Δεν είναι σίγουρο ότι αν τελικά αναπτυχθεί μια φτηνή, ασφαλής και καθαρή πηγή ενέργειας, θα μπορέσουμε να τη χειριστούμε κατάλληλα, έτσι που ν' αποφευχθεί κάποια σοβαρή καταστροφή.

Όπως και να 'ναι, καμιά από τις ενεργειακές πηγές που αναφέραμε μέχρι τώρα δεν πρόκειται να μας δώσει ένα ικανοποιητικό υποκατάστατο των φυσικών καυσίμων πριν μπούμε για τα καλά στον 21^ο αιώνα. Μέχρι τότε, θα συνεχίσουμε ν' απομυζούμε τις "αποθεματικές" μας πηγές, πετρέλαιο, κάρβουνο και φυσικό αέριο (προϊόντα, βέβαια, της έμμεσης ηλιακής συγκέντρωσης πριν από δισεκατομμύρια χρόνια).





Σχήμα 7.3: Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε πολυκατοικίες στον Ταύρο (Αττική).

Σήμερα κάθε κάτοικος των βιομηχανικά ανεπτυγμένων χωρών χρειάζεται 150-300 GJ το χρόνο (το 1/3 σε ηλεκτρική ενέργεια). Η χρήσιμη ενέργεια υπολογίζεται στο 40% περίπου της χρησιμοποιούμενης ενέργειας (Εξοικονόμηση ενέργειας-ΕΕ, Ορθολογική χρήση ενέργειας-ΟΧΕ). Το 97% περίπου της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής ενέργειας προέρχεται τώρα από αυτά τα καύσιμα: 38% από το κάρβουνο, 40% από το πετρέλαιο και 19% από το φυσικό αέριο. Και ο ρυθμός ελάττωσης του καθενός απ' αυτά τα αποθέματα επιταχύνεται συνεχώς.

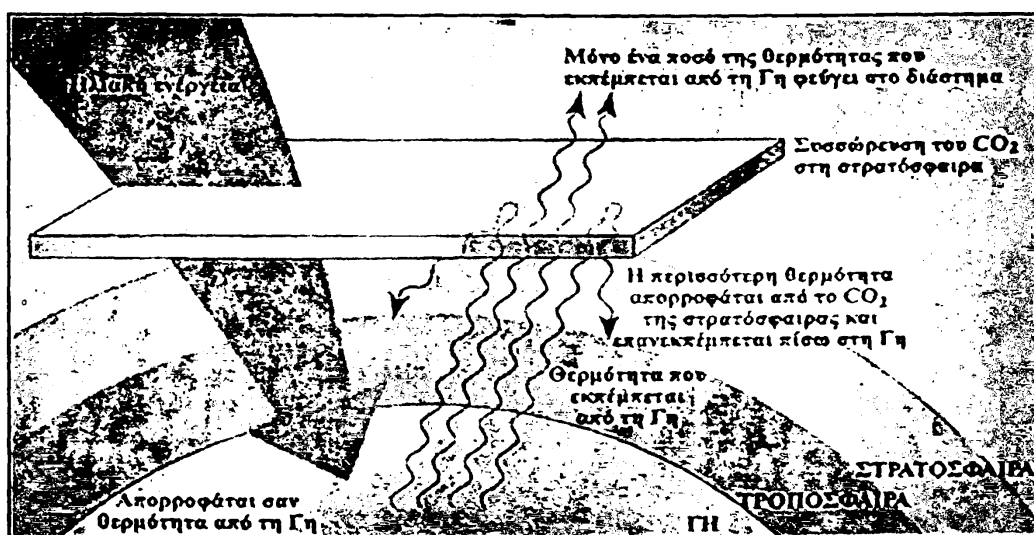
Ήδη μέχρι το έτος 2.000 εξαντλήσαμε περισσότερα από τα μισά παγκόσμια αποθέματα ακάθαρτου πετρελαίου. Το κάρβουνο θα διαρκέσει αρκετά πιο πολύ (και μαζί μ' αυτό και το πρόβλημα του πως να κάνουμε την εξόρυξη του κοινωνικά και περιβαλλοντολογικά αποδεκτή). Όσο για το φυσικό αέριο, όχι μόνο υπάρχει σε σχετικά μικρά αποθέματα αλλά και η μεταφορά του είναι δαπανηρή. Η υγροποίησή του κρύβει τεράστιους περιβαλλοντολογικούς κινδύνους. Όταν χυθεί στο νερό, πράγμα που μπορεί να συμβεί αν ένα δεξαμενόπλοιο γεμάτο με υγροποιημένο αέριο συγκρουστεί μ' ένα άλλο πλοίο, το χαμηλής θερμοκρασίας υγρό βράζει αμέσως απελευθερώνοντας ένα σύννεφο ασφυχτικού μεθανίου στην επιφάνεια της θάλασσας. Στην ξηρά, μια σπίθα μπορεί να μετατρέψει το μεταφορικό μέσο του υγρού σε τεράστια πυρκαγιά, που θα μπορούσε να πυρπολήσει ένα ολόκληρο λιμενικό και βιομηχανικό συγκρότημα.

Ανακεφαλαιώνοντας, θέλουμε να τονίσουμε ότι, τα φυσικά μας καύσιμα είναι ποικιλότροπα, ευάλωτα σε οικονομικές κρίσεις και πολιτικές πιέσεις, βρίσκονται σε σχετικά μικρά αποθέματα και είναι δύσκολο να μπουν κάτω από



περιβαλλοντολογικό έλεγχο. Στην πραγματικότητα, δεν ξέρουμε τα μακροπρόθεσμα αποτελέσματα που θα δημιουργήσει στο περιβάλλον ή καύση του πετρελαίου, του κάρβουνου και του φυσικού αερίου. Όλα τα φυσικά καύσιμα όταν καίγονται παράγουν διοξείδιο του άνθρακα (μαζί με άλλα αέρια) και το εκλύουν στην ατμόσφαιρα. Εκεί αυξάνεται σταθερά στον ετήσιο ρυθμό δύο περίπου μέρη σε κάθε 1.000. Η μισή από αυτή την ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα παραμένει στον αέρα. Υπολογίζεται, θεωρητικά, ότι σε 700 χρόνια ο αέρας θα γεμίσει ολότελα από διοξείδιο του άνθρακα. Η άλλη μισή ποσότητα καταφεύγει στη βιόσφαιρα και τους ωκεανούς - κανένας δεν ξέρει σίγουρα σε τι ποσοστά.

Η ολοένα αυξανόμενη ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα έχει δημιουργήσει κάτι που είναι γνωστό σαν φαινόμενο "θερμοκηπίου" (Σχήμα 7.4). Συγκεντρώνει δηλαδή και παγιδεύει την θερμική ενέργεια της γης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μια σταδιακή αύξηση της γήινης θερμοκρασίας και επομένως σε μια αλλαγή του κλίματος. Υπάρχουν ενδείξεις ότι το φαινόμενο του "θερμοκηπίου" φαίνεται να εξουδετερώνεται από την αντίθετη επίδραση της ατμοσφαιρικής σκόνης που δημιουργείται από τη σύγχρονη γεωργία και βιομηχανία. Πέρα από τη συνηθισμένη σκόνη, η ατμόσφαιρα περιέχει διάφορα προϊόντα της καύσης, όπως θειικά, νιτρικά άλατα και υδρογονάνθρακες. Όλα αυτά μπορούν να παραμείνουν στην κατώτερη στρατόσφαιρα σαν μικρά σωματίδια κάπου τρία χρόνια. Δεν ξέρουμε ακόμη την επίδραση που θα έχουν στο κλίμα, αλλά ένα παράδειγμα από τη φυσική ιστορία δείχνει πόσο τρομαχτικά αποτελέσματα μπορούν να δημιουργήσουν.



Σχήμα 7.4: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Στα 1815 η έκρηξη του ηφαιστείου στο όρος Ταμπόρα στο νησί Σουμπάβα στην Ινδονησία, εξαπέλυσε κάπου 375 κυβικά χιλιόμετρα στάχτης στην ατμόσφαιρα. Στα 1816, οι βορεινές περιοχές των ΗΠΑ και η Βόρεια Ευρώπη δεν βίωσαν καλοκαίρι. Στην Αγγλία, η μέση θερμοκρασία του Ιουλίου έπεσε από τους 15,1 °C στους 13,4 °C. Ήταν μια δραστική πτώση που αν συνεχιζόταν θα άλλαζε σημαντικά τη

συμπεριφορά των φυτών και των ζώων. Οι θερμοκρασίες στο Βόρειο ημισφαίριο πέφτουν σταθερά τα τελευταία χρόνια και ένας πιθανός λόγος μπορεί να είναι ότι ο άνθρωπος συνεχώς τροφοδοτεί την ατμόσφαιρα με μικρά σωματίδια. Ο πιο κρύος καιρός, σε σχέση με το παρελθόν, είναι μόνο μία από τις συνέπειες της βιομηχανικής μόλυνσης σε παγκόσμια κλίμακα, μόλυνσης που οφείλεται στις διαδικασίες μετατροπής της ενέργειας. Ταυτόχρονα, τα καινούργια κτίρια και οι δρόμοι που κατασκευάζονται, ελαττώνουν τις φυτεμένες εκτάσεις στην επιφάνεια της γης, κι έτσι ελαττώνουν και το ποσό του ελεύθερου οξυγόνου στον αέρα. Η καύση εξάλλου των φυσικών καυσίμων έχει προσθέσει ένα ποσοστό 15% διοξείδιο του άνθρακα στο ήδη υπάρχον της ατμόσφαιρας μέσα στα τελευταία 100 χρόνια. Το ποσοστό αυτό συνέχεια μεγαλώνει.

Η άφθονη παραγωγή θερμικών αποβλήτων αρχίζει να δημιουργεί αλλαγές στο περιεχόμενο της ατμόσφαιρας και ακόμα δεν ξέρουμε ποιο θα είναι το κλιματολογικό αποτέλεσμα. Είναι ακόμα πιθανό ότι δε θα μπορέσουμε ν' αντιληφθούμε τις καταστροφικές τάσεις παρά μόνο όταν αυτές θα έχουν προχωρήσει πολύ μακριά. Στην προσπάθειά μας να "καλυτερέψουμε" τον κλήρο μας στη γη, μπορεί να έχουμε ήδη καταστρέψει ανεπανόρθωτα τη λεπτή ισορροπία της φυσικής ενέργειας.

Πριν ακόμα κλείσουν δύο αιώνες εκβιομηχάνισης, ο σύγχρονος άνθρωπος έχει παρέμβει τόσο πολύ στο ενεργειακό απόθεμα της γης που μπορεί να ανοίξει το δρόμο για την εξέλιξη νέων οικοσυστημάτων που ίσως αποκλείσουν την ύπαρξη του ανθρώπου καθώς και των πιο πολύπλοκων μορφών της ζωής. Μια τέτοια κατάληξη - αν θα είναι πραγματικά αυτή η κατάληξη - θα σημαίνει ότι ο άνθρωπος κατάφερε να επιζήσει μερικές εκατοντάδες χρόνια σταθερής εκβιομηχάνισης. Στη διάρκεια αυτής της σύντομης περιόδου κατάφερε να σπαταλήσει όλα τα ενεργειακά αποθέματα, να εμπλακεί σε συγκρούσεις παγκόσμιας κλίμακας στην προσπάθειά του να βρει νέες προμηθευτικές πηγές, και να δημιουργήσει τις συνθήκες για μια οριστική ανθρώπινη εξαθλίωση σε μια πρωτοφανή κλίμακα. Το περιβάλλον όμως, με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, θα επουλώσει τις πληγές του. Αυτό όμως δεν θα το δουν οι απόγονοί μας εκτός αν αρχίσουμε να δραστηριοποιούμαστε τώρα, τόσο για το δικό μας όσο και για το δικό τους καλό.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

ΤΑ ΕΡΓΑ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) καθώς και την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών παρουσιάσθηκε μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1973, ενισχύθηκε μετά την δεύτερη κρίση του 1979 και παγιώθηκε κατά την τελευταία δεκαετία του 20^{ου} αιώνα, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων που δημιουργούν οι συμβατικές πηγές ενέργειας.

Στη χώρα μας, έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός μελετών και έργων που αξιοποιούν τις τεχνολογίες των ΑΠΕ, καλύπτοντας έτσι ένα ολοένα αυξανόμενο μέρος των ενεργειακών μας αναγκών και συμβάλλοντας αποφασιστικά στην προστασία και την αναβάθμιση του περιβάλλοντος. Από μελέτες που έχουν γίνει προκύπτει, ότι το συνολικό δυναμικό των ΑΠΕ στην χώρα μας είναι περίπου 20 φορές μεγαλύτερο από αυτό που ήδη αξιοποιείται.

Σχεδόν το 95% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και ένα σημαντικό μέρος της θερμικής ρύπανσης οφείλονται στην παραγωγή, το μετασχηματισμό και τη χρήση των συμβατικών ορυκτών καυσίμων (άνθρακας και πετρέλαιο). Ο μόνος δυνατός τρόπος για να μπορέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση και τα κράτη μέλη της να ανταποκριθούν στους φιλόδοξους στόχους που τέθηκαν το 1992 και 1997 στις



συνδιασκέψεις του ΟΗΕ για το «Περιβάλλον και την Ανάπτυξη» στο Ρίο και το Κιότο, να περιοριστούν δηλαδή οι εκπομπές του CO₂ και των άλλων «αερίων του θερμοκηπίου» στα επίπεδα του 1990, για την περίοδο 2008-2012, είναι να αυξήσει το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο και να εντείνει την ορθολογική χρήση ενέργειας (ΟΧΕ) και την εξοικονόμηση ενέργειας (ΕΕ). Οι προηγούμενες δεσμεύσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης μεταφράζονται σε ειδικότερους στόχους για τα κράτη-μέλη. Η Ελλάδα ανέλαβε τη δέσμευση για την λήψη ιδιαίτερων μέτρων για αύξηση μόνο κατά 25% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (έναντι αύξησης κατά 48% χωρίς τη λήψη μέτρων). Στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι η αύξηση της ενεργειακής συνεισφοράς των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο σε 12% το 2010 (από 6% που είναι σήμερα).

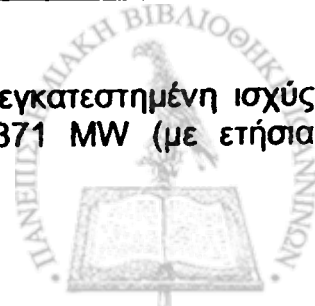
Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι φυσικοί διαθέσιμοι πόροι-πηγές ενέργειας, που υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον, που δεν εξαντλούνται γιατί διαρκώς ανανεώνονται, αλλά και που μπορούν να μετατρέπονται σε θερμική ή ηλεκτρική ενέργεια, όπως είναι ο ήλιος, ο άνεμος, η βιομάζα, η γεωθερμία, οι υδατοπτώσεις και η θαλάσσια κίνηση. Το παγκόσμιο ενδιαφέρον προς την κατεύθυνση της αξιοποίησης των ΑΠΕ οφείλεται σε δύο λόγους: 1) την επίλυση του ενεργειακού προβλήματος, αφού τα αποθέματα συμβατικών πηγών ενέργειας εξαντλούνται και 2) στο γεγονός ότι πρόκειται για φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για την Ελλάδα οι άδειες παραγωγής έργων ΑΠΕ ανά τεχνολογία (συμπεριλαμβάνονται τα έργα με θετικές γνωμοδοτήσεις της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ), δεν περιλαμβάνονται τα έργα με άδειες παραγωγής που έχουν ήδη εξελιχθεί σε άδειες εγκατάστασης ή/και άδειες λειτουργίας). Στον πίνακα παρουσιάζονται χωριστά και τα έργα ΑΠΕ που βρίσκονται υπό κατασκευή ή σε εμπορική λειτουργία.

Πίνακας 1: Άδειες παραγωγής έργων ΑΠΕ ανά τεχνολογία στην Ελλάδα (στοιχεία 11/2005).

Τεχνολογία ΑΠΕ	Άδειες παραγωγής (MW)	Έργα υπό κατασκευή (MW)	Έργα σε λειτουργία (MW)
Αιολικά	3.321,21	733,01	450,27
Βιομάζα	9,08	24,11	23,38
Μικρά υδροηλεκτρικά	275,02	115,10	63,87
Γεωθερμία	8	0	0
Φωτοβολταϊκά	1,85	1,016	0,88
Σύνολο	3.615,16	873,28	570,82

Ειδικότερα όσον αφορά στην αιολική ενέργεια, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αιολικών συστημάτων στην Ελλάδα ανήλθε το 2003 σε 371 MW (με ετήσια



παραγωγή 1.021 γιγαβατώρες ηλεκτρικής ενέργειας), ενώ το 2005 η ισχύς αυτή έφθασε τα 450,3 MW (στοιχεία 11/2005).

Η εγκατεστημένη ισχύς των λειτουργούντων μικρών υδροηλεκτρικών έργων (ισχύς μικρότερη από 10 MW) στην Ελλάδα ανήλθε το 2005 σε 66,6 MW (συμπεριλαμβανομένων των έργων της ΔΕΗ).

Η διείσδυση φωτοβολταϊκών μονάδων στο Ελληνικό ενεργειακό σύστημα είναι ακόμη εξαιρετικά περιορισμένη (Πίνακας 1). Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς τους το 2005 ανέρχονταν μόλις σε 880 kW.

Σε σχέση με την εγκατάσταση γεωθερμικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, σημειώνεται ότι μέχρι σήμερα δεν έχει υλοποιηθεί κάποια σχετική επένδυση. Εντούτοις, στο πλαίσιο του επιχειρησιακού προγράμματος ανταγωνιστικότητας (ΕΠΑΝ, Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης) χρηματοδοτούνται δράσεις προπαρασκευής, ανάπτυξης υποδομών και εγκατάστασης εξοπλισμού για μονάδα ηλεκτροπαραγωγής από γεωθερμία στη Λέσβο. Επομένως, έχει ήδη δρομολογηθεί η υλοποίηση, στο χρονικό ορίζοντα του 2010, μιας τουλάχιστον γεωθερμικής μονάδας ισχύος 8 MW, η οποία και έχει αδειοδοτηθεί από τη ΡΑΕ.

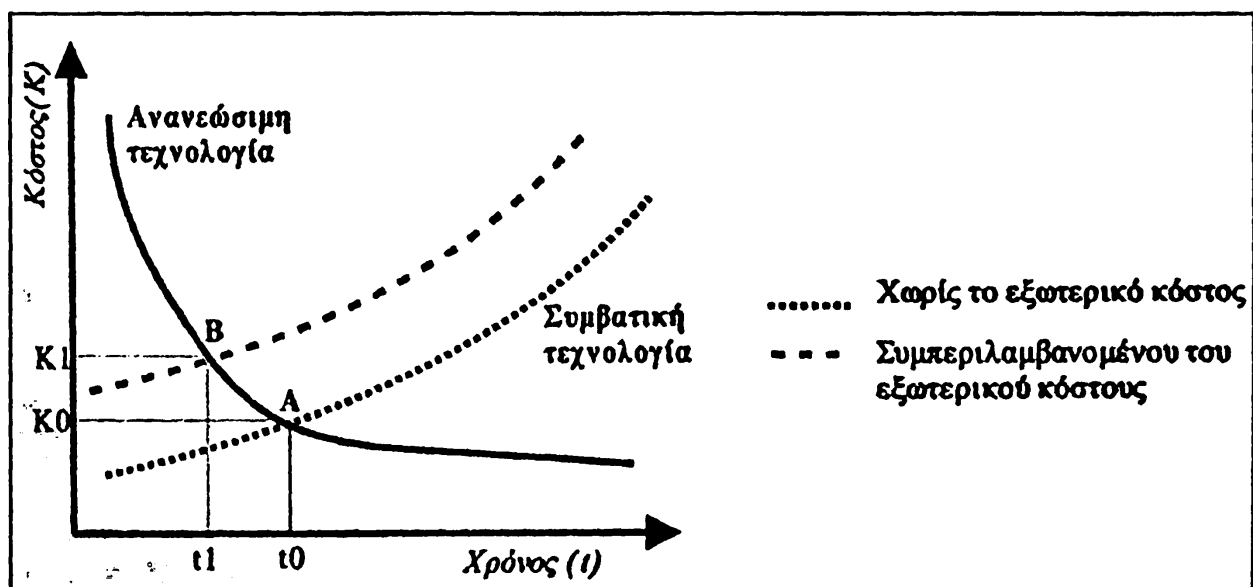
Όσον αφορά, τέλος, στην αξιοποίηση βιομάζας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και ατμού στη βιομηχανία, σχετικές επενδύσεις έχουν χρηματοδοτηθεί τόσο στο πλαίσιο του ΕΠΕ, όσο και του ΕΠΑΝ. Η ΡΑΕ έχει έως σήμερα αδειοδοτήσει 16 μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 57 MW, ενώ ήδη λειτουργούν στο διασυνδεδεμένο σύστημα μονάδες συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 23 MW (κυρίως με βιοαέριο). Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας θα φθάσει το 2010, κατά μεν τη συντηρητική εκτίμηση τα 59 MW, κατά δε την αισιόδοξη τα 71 MW. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η εκτίμηση για τη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας το 2010.

Το κόστος της ανανεώσιμης τεχνολογίας μειώνεται λόγω τεχνολογικής εξέλιξης και οικονομιών κλίμακας, ενώ το κόστος της συμβατικής τεχνολογίας αυξάνει λόγω της αυξανόμενης στενότητας των φυσικών πόρων (Σχήμα 1). Στην περίπτωση που δε λαμβάνεται υπόψη το εξωτερικό κόστος της συμβατικής τεχνολογίας, η ανανεώσιμη γίνεται ανταγωνιστική στη χρονική στιγμή t_0 . Αν όμως ληφθεί υπόψη το εξωτερικό κόστος, η ανανεώσιμη τεχνολογία καθίσταται ανταγωνιστική νωρίτερα (τη χρονική στιγμή t_1).



Πίνακας 2: Απαιτήσεις εγκατάστασης έργων ΑΠΕ για την επίτευξη του εθνικού στόχου για το έτος 2010.

Τεχνολογία ΑΠΕ	Εγκατεστημένη ισχύς το 2010 (MW)	Παραγωγή ενέργειας το 2010 (MW)	Συμμετοχή ανά μορφή ΑΠΕ το 2010 (%)
Αιολικά πάρκα	3.372	7,09	10,42
Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα	364	1,09	1,60
Μικρά υδροηλεκτρικά έργα	3.325	4,58	6,74
Βιομάζα	103	0,81	1,19
Γεωθερμία	12	0,09	0,13
Φωτοβολταϊκά	18	0,02	0,03
Σύνολο	7.193	13,67	20,10



Σχήμα 1: Κόστη ανανεώσιμης τεχνολογίας και συμβατικής τεχνολογίας.

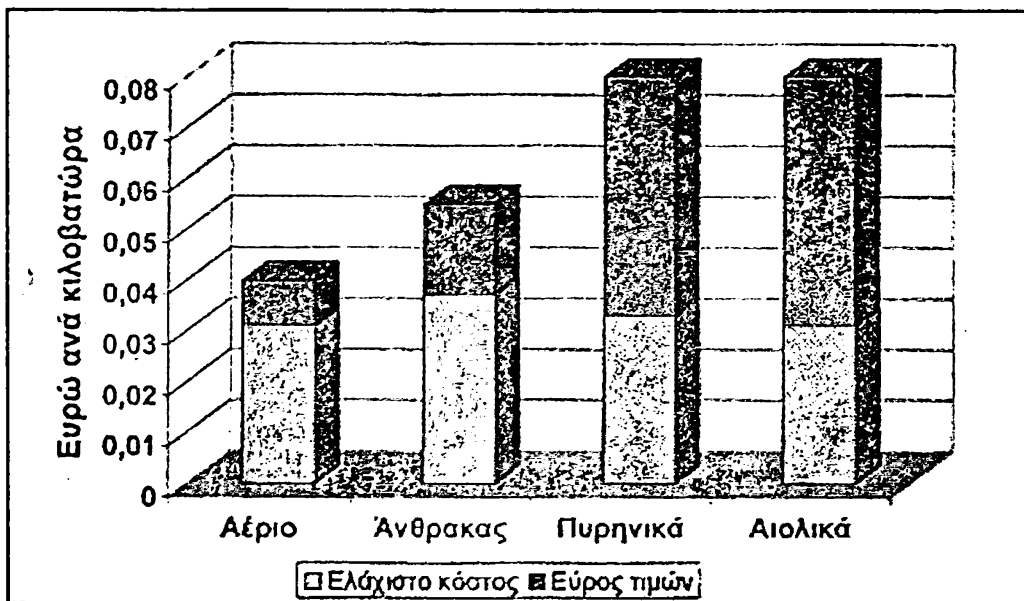
Σύμφωνα με μελέτη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (πρόγραμμα EXTERNE), το περιβαλλοντικό και κοινωνικό κόστος για την περίπτωση της ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα φτάνει έως και 0,084 €/kWh. Η ίδια μελέτη το ανεβάζει στα 0,15 €/kWh για άλλες χώρες. Ειδικότερα, η έρευνα αυτή προσδιορίζει το εξωτερικό κόστος για τους λιγνιτικούς σταθμούς στην Ελλάδα σε 4,6-8,4 λεπτά/kWh, ενώ για τα αιολικά πάρκα σε 0,24-0,26 λεπτό/kWh (18-35 φορές λιγότερο από τους λιγνιτικούς σταθμούς). Δηλαδή αν συνυπολογίζαμε τη ζημιά που κάνουν τα ορυκτά καύσιμα στο περιβάλλον και την υγεία, η ηλεκτρική ενέργεια από συμβατικούς σταθμούς θα έπρεπε να χρεώνεται τουλάχιστον 50-100% παραπάνω απ' ό τι σήμερα.



Πλεονεκτήματα των ΑΠΕ

Τα οφέλη που προκύπτουν από την εκμετάλλευση των ΑΠΕ δεν είναι μόνο οικονομικής φύσεως. Η αξιοποίηση αυτών των ενδογενών ενεργειακών πόρων μπορεί να επιφέρει σημαντικές θετικές περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις στην περιφερειακή και τοπική ανάπτυξη.

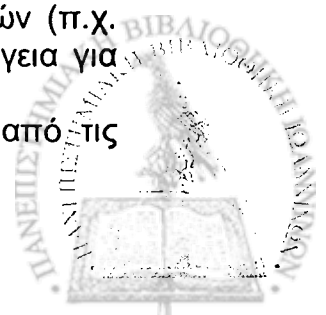
Παρά το γεγονός ότι απαιτείται ένα σημαντικό κεφάλαιο για την αρχική τους εγκατάσταση και εξοπλισμό, το λειτουργικό τους κόστος είναι αμελητέο και τα αποτελέσματά τους ιδιαίτερα σημαντικά (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Συγκριτικές τιμές ελάχιστου κόστους και εύρους τιμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικά καύσιμα και ΑΠΕ (€/kWh).

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι τα εξής:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας που συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους εξαντλήσιμους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους (κυρίως ορυκτά καύσιμα).
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής αυτάρκειας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε τοπικό, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο.
- Είναι διάσπαρτες γεωγραφικά και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, παρέχοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή).
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις



διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.

- Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των ΑΠΕ έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών σε μικρή κλίμακα εφαρμογών ή σε μεγάλη κλίμακα αντίστοιχα, έχουν μικρή διάρκεια κατασκευής, επιτρέποντας έτσι τη γρήγορη ανταπόκριση της προσφοράς προς τη ζήτηση ενέργειας.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ χαρακτηρίζονται ως "εντάσεως εργασίας", συμβάλλουν δηλαδή στη δημιουργία πολλών θέσεων εργασίας ιδιαίτερα σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική και περιφερειακή ανάπτυξη, με την προώθηση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. αιολικά πάρκα, εργοστάσια ενεργειακής αξιοποίησης, γεωργικής βιομάζας, θερμοκηπιακές καλλιέργειες με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας) κ.λπ.
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

Πρόσφατα δημοσιεύθηκε στην εφημερίδα της Κυβερνήσεως (Αριθμός Φύλλου 129, 27 Ιουνίου 2006,) το σχέδιο νόμου για το νέο θεσμικό και αδειοδοτικό πλαίσιο των ΑΠΕ, το οποίο εντάσσεται στο πρόγραμμα υλοποίησης της εθνικής ενεργειακής στρατηγικής για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Στο σχέδιο νόμου υιοθετείται ως εθνικός στόχος για τη συμμετοχή της ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ στην ακαθάριστη εγχώρια κατανάλωση της χώρας, το ποσοστό 20,1% για το 2010 και 29% για το 2020.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

ΓΛΩΣΣΑΡΙ



Αειφόρος ανάπτυξη: μορφή οικονομικής ανάπτυξης που δεν μειώνει ούτε υποβαθμίζει τους φυσικούς πόρους από τους οποίους εξαρτάται η παρούσα αλλά και η μελλοντική ζωή.

Αέρια θερμοκηπίου: CO_2 , CO , CH_4 , NO_2 , CFCs, κ.λπ. **Αιολική ενέργεια** Η ενέργεια του ανέμου που προέρχεται από τη μετακίνηση αερίων μαζών της ατμόσφαιρας.

Αιολική ενέργεια: Η κινητική ενέργεια που παράγεται από τη δύναμη του ανέμου και μετατρέπεται σε απολήψιμη μηχανική ενέργεια ή/και σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ανακύκλωση ενέργειας: διαδικασία επαναχρησιμοποίησης της απορριπτόμενης ενέργειας, π.χ. η θερμότητα που εκλύεται από ένα εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση ενός οικισμού.

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ): Οι μη ορυκτές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η ενέργεια κυμάτων, η παλιρροϊκή ενέργεια, η βιομάζα, τα αέρια που εκλύονται από χώρους υγειονομικής ταφής και από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού, τα βιοαέρια, η γεωθερμική ενέργεια, η υδραυλική ενέργεια που αξιοποιείται από υδροηλεκτρικούς σταθμούς.

Απόδοση: είναι ο λόγος της αρχικής προς την τελική ενέργεια. Αναφέρεται σε κάθε μετατροπή ενέργειας και εκφράζεται συνήθως σε ποσοστό επί τοις εκατό (%), π.χ. η απόδοση ενός ηλιακού θερμοσίφωνα είναι 60%, δηλαδή το 60% της ηλιακής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα.

Αυτόνομο ηλεκτρικό σύστημα μη διασυνδεδεμένων νησιών: Το ηλεκτρικό σύστημα που τροφοδοτεί τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας ενός ή περισσότερων νησιών, διασυνδεδεμένων μεταξύ τους, το οποίο δεν είναι συνδεδεμένο με το διασυνδεδεμένο δίκτυο ή το σύστημα και περιλαμβάνει, ιδίως, σταθμούς παραγωγής, δίκτυο χαμηλής, μέσης ή και υψηλής τάσης, υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης και κάθε άλλο εξοπλισμό αναγκαίο για τη λειτουργία του.

Αυτόνομος παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε.: Ο παραγωγός που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ και του οποίου ο σταθμός δεν είναι συνδεδεμένος με το σύστημα ή το δίκτυο.

Αυτοπαραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. ή Σ.Η.Θ.Υ.Α: Ο παραγωγός που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από μονάδες Α.Π.Ε. ή Σ.Η.Θ.Υ.Α, κυρίως για δική του χρήση και διοχετεύει τυχόν πλεόνασμα της ενέργειας

αυτής στο σύστημα ή στο δίκτυο.

Βιοκαύσιμο: Το υγρό ή αέριο καύσιμο που παράγεται από βιομάζα και ειδικότερα:

α) Βιοντίζελ (πετρέλαιο βιολογικής προέλευσης): Οι μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων {ΜΛΟ-FAME} που παράγονται από φυτικά ή και ζωικά έλαια και λίπη και είναι ποιότητας πετρελαίου ντίζελ, για χρήση ως βιοκαύσιμο.

β) Βιοαιθανόλη: Η αιθανόλη που παράγεται από βιομάζα ή από το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα αποβλήτων, για χρήση ως βιοκαύσιμο.

γ) Βιοαέριο: Το καύσιμο αέριο που παράγεται από βιομάζα ή από το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων, το οποίο μπορεί να καθαρισθεί και να αναβαθμισθεί σε ποιότητα φυσικού αερίου, για χρήση ως βιοκαύσιμο, ή το ξυλαέριο.

δ) Βιομεθανόλη: Η μεθανόλη που παράγεται από βιομάζα, για χρήση ως βιοκαύσιμο.

ε) Βιοδιμεθυλαιθέρας: Ο διμεθυλαιθέρας που παράγεται από βιομάζα, για χρήση ως βιοκαύσιμο.

στ) Βιο-ETBE: Ο αιθυλο-τριτοταγής-βουτυλαιθέρας (ETBE) που παράγεται από βιοαιθανόλη, για χρήση ως βιοκαύσιμο. Το κατ' όγκο ποσοστό του Βιο-ETBE που υπολογίζεται ως βιοκαύσιμο είναι 47% επί του συνόλου του.

Βιομάζα: Είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, που μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια σε οργανική ύλη με μια σειρά διεργασιών των φυτικών οργανισμών χερσαίας ή υδρόβιας προέλευσης (δασικά – γεωργικά υποπροϊόντα, απόβλητα γεωργικών βιομηχανιών και βιομηχανιών τροφίμων κ.λπ.). Σ' αυτή την κατηγορία μπορούν να συμπεριληφθούν και τα αστικά απορρίμματα σε ότι αφορά στην αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου τους στο γενικότερο πλαίσιο μιας ολοκληρωμένης περιβαλλοντικής διαχείρισης και τελικής απόθεσής τους.

Γεωθερμία: Η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και εμπεριέχεται σε φυσικούς ατμούς, σε επιφανειακά ή υπόγεια θερμά νερά και σε ξηρά πετρώματα.

Ενεργειακό δυναμικό: εκφράζει τη θεωρητικά διαθέσιμη ενέργεια μιας περιοχής, π.χ. το αιολικό δυναμικό ή το δυναμικό των υδατοπτώσεων, εκφράζει τη θεωρητικά διαθέσιμη ενέργεια του ανέμου ή του νερού αντίστοιχα της περιοχής. Πρακτικά η ενέργεια που αξιοποιούμε είναι πάντοτε μικρότερη της θεωρητικής.



Ενεργειακός σχεδιασμός κτιρίων: εφαρμογή τεχνικών, στρατηγικών και σχεδιαστικών λύσεων που ικανοποιούν τις ανάγκες των ενοίκων εξασφαλίζοντας συνθήκες άνεσης, ενώ αξιοποιούν τις περιβαλλοντικές πηγές ενέργειας με τη μικρότερη ενεργειακή εξάρτηση του κτιρίου από συμβατικά καύσιμα.

Ενεργειακές καλλιέργειες: Καλλιέργειες αποκλειστικά για ενεργειακή αξιοποίηση.

Ενεργειακή ένταση: Ενέργεια που καταναλώνεται ανά μονάδα ακαθάριστου εθνικού προϊόντος.

Ενεργητικά ηλιακά συστήματα: Συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα.

Εξωτερικό κόστος: Το κοινωνικό κόστος (συνεπώς και περιβαλλοντικό), που παραμένει «εξωτερικό» ως προς το υπάρχον σύστημα αξιών (external cost) και δεν συμπεριλαμβάνεται - προς το παρόν - στην τιμή ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας.

Ηλιακή ενέργεια: Αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται τη θερμική και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου με χρήση μηχανικών μέσων για τη συλλογή, αποθήκευση και διανομή της.

Κυματική ενέργεια: Παραγωγή ενέργειας από αντίστοιχη εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων, δηλαδή του αποτελέσματος της ανάσχεσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε εκτεταμένες ωκεάνιες επιφάνειες. **Οξίνιση:** Αύξηση της οξύτητας της ατμόσφαιρας ως αποτέλεσμα οξέων από εκπομπές SO_2 και NO_x .

Ορυκτά καύσιμα: Οργανικά υλικά που έχουν μετασχηματισθεί από εναποθέσεις σε μεγάλες χρονικές περιόδους (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, άνθρακας, λιγνίτης, τύρφη, κ.λπ.).

ΟΧΕ (Ορθολογική χρήση ενέργειας): Στις κτιριακές εγκαταστάσεις, η ενέργεια που καταναλώνεται για τη θέρμανση και τον κλιματισμό των χώρων είναι ιδιαίτερα σημαντική. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές και τεχνολογίες που επιτυγχάνουν την ορθολογική χρήση της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Παθητικά ηλιακά και υβριδικά συστήματα: Αφορούν κατάλληλες αρχιτεκτονικές λύσεις και χρήση των κατάλληλων δομικών υλικών για τη μεγιστοποίηση της απευθείας εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση, δροσισμό ή φωτισμό.

ΣΗΘ (γνωστή και ως συμπαραγωγή): Συστήματα που παράγουν ταυτόχρονα ηλεκτρική (ή/και μηχανική) και θερμική ενέργεια, σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο σύστημα.

Σύντηξη: η συνένωση δυο ή περισσότερων ελαφρών ατομικών πυρήνων σε ένα πυρήνα μεγαλύτερης μάζας, που γίνεται συνήθως με θερμοπυρηνική αντίδραση και έκλυση μεγάλης ποσότητας ενέργειας.

Σχάση: η αυτόματη ή τεχνητή διάσπαση των βαρέων ατομικών πυρήνων σε δύο θραύσματα συνήθως, με ταυτόχρονη έκλυση τεράστιας ποσότητας ενέργειας, κυρίως κινητικής.

Τηλεθέρμανση: η παροχή θέρμανσης με ειδικό δίκτυο αγωγών που μεταφέρουν νερό το οποίο θερμαίνεται σε λέβητες, συνήθως σε θερμοηλεκτρικά εργοστάσια, μακριά από το χώρο κατανάλωσης.

Υβριδικό σύστημα: Σύνθετα συστήματα που συνδυάζουν ΑΠΕ με συμβατικές πηγές ενέργειας και σε πολλές περιπτώσεις αποθήκευση ενέργειας.

Υδατοκαλλιέργεια: εκτροφή υδρόβιων ζώων, κυρίως ψαριών (ιχθυοκαλλιέργεια), καθώς και η καλλιέργεια υδρόβιων φυτών π.χ. φυκιών.

Υδραυλική ενέργεια (λευκός άνθρακας): Αξιοποιεί τις υδατοπτώσεις με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή/και το μετασχηματισμό της σε απολήψιμη μηχανική.

Φυσικό αέριο ή γαιαέριο: μίγμα αερίων υδρογονανθράκων που βρίσκονται εγκλωβισμένα στο εσωτερικό της γης, με κύρια συστατικά το μεθάνιο, σε ποσοστό μέχρι 90%, μικρή ποσότητα άλλων κορεσμένων υδρογονανθράκων, καθώς επίσης και CO , CO_2 , H_2 , N_2 , και He .

Φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα: Μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια.

Φωτοσύνθεση: η δέσμευση της φωτεινής ενέργειας και η μετατροπή της σε χημική με τη μεσολάβηση της χλωροφύλλης των φυτών. Με αυτόν τον τρόπο τα φυτά μετατρέπουν το H_2O , το CO_2 και τα ανόργανα άλατα σε οργανικές ενώσεις (υδατάνθρακες), απαραίτητες για τη θρέψη τους, απελευθερώνοντας ταυτόχρονα οξυγόνο.



ΠΗΓΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ



ΕΛΛΑΔΑ

www.cres.gr
www.deh.gr
www.rae.gr
www.iene.gr
www.greenpeace.org
www.pandoiko.gr
www.physics4u.gr
www.wel.gr
www.mxd.gr
geocities.com
www.energotech.gr
www.helios.telath.gr
www.sat.uoa.gr/medact/tech/semmp/georgop.html
www.hy2.gr
www.energla.gr
www.hachp.gr
www.helapco.gr
195.251.42.2/website/GIS.htm
ape.chania.telcrete.gr/ape/home/ape.htm
www.nigrita.gr/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=17
www.ecotec.gr/article.php?ID=51
www.viotech.gr/pv_form.html
www.eurostar-solar.com/index-gr.html
texnikos.gr
www.eletaen.gr
www.hellashy.org
www.dena.gr
www.seners.gr

ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ

www.eawe.org
europa.eu.int
www.on.ec.gc.ca
www.windpower.org
me.oregonstate.edu
www.eere.energy.gov
www.answers.com
www.vatechelinebg.at
www.futureenergies.com
www.iea.org
www.windpowerphotos.com
www.hsaps.life.no
www.fuelcells.com
www.eawe.org
www.ase.org
www.agores.org
www.epia.org
www.caddet-re.org
www.distributed-generation.com
www.eurores.org
www-formal.stanford.edu
www.pelletheat.org
www.iesd.dmu.ac.uk/
www.bioheat.info
www.hydrogems.no
www.fuelcelltoday.com
www.retscreen.net/el/news_m.php
www.offshorewindenergy.org



BIBLIOGRAFIA



ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Γιαννούλης, Π., 2001: *Νέες Πηγές Ενέργειας*. Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Κατσούλης, Β., 1989: *Στοιχεία Φυσικής του Περιβάλλοντος*. Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων.
- ΚΑΠΕ, 2002: Βιαέριο: η ενέργεια του μέλλοντος. Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.
- ΚΑΠΕ, 1997: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας & Περιβάλλον. Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. ΚΑΠΕ, 1997: Εξοικονόμηση ενέργειας στον κλάδο των τροφίμων - Θέματα συναφή με την Ελαιοργία. Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. SAVE Programme. ΚΑΠΕ, 1998: Παθητικά ηλιακά συστήματα. Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.
- ΚΑΠΕ, 1998: Ενεργητικά ηλιακά συστήματα. Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.
- ΚΑΠΕ, 1998: Ενέργεια από Βιομάζα. Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. ALTENER Programme.
- ΚΑΠΕ, 1998: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Κρήτη. Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. ALTENER Programme.
- ΚΑΠΕ, 2000: Τα επιδεικτικά ενεργειακά έργα στην Ελλάδα: Thermie (1990-1998). Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ενέργειας.
- ΚΑΠΕ, 2001: Οδηγός Συστημάτων Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού & Θερμότητας. Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. SAVE Programme.
- ΚΑΠΕ, 2001: Θέρμανση κτιρίων και κατοικιών με εφαρμογές βιομάζας- Οδηγός Επενδυτών. Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. ALTENER Programme.
- ΚΑΠΕ, 2001: Θέρμανση κτιρίων και κατοικιών με εφαρμογές βιομάζας- Οδηγός Τοπικής Αυτοδιοίκησης. Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. ALTENER Programme.
- ΚΑΠΕ, 2001: Θέρμανση κτιρίων και κατοικιών με εφαρμογές βιομάζας- Τεχνικός Οδηγός. Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. ALTENER Programme.
- Κουμούτσος Ν. και Μαρίνος Δ.Σ., 1986: Χρήση Εξοικονόμησης Ενέργειας, Αθήνα.
- Μπεργελές Γ., 1994: *Ανεμοκινητήρες. Εκδόσεις Συμεών*.
- Παπαιωάνου, Ι., 2000: Η ενέργεια-Ένα πεδίο εφαρμογών για τα κέντρα Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Φραγκιαδάκης, Ι., 2006: Φωτοβολταϊκά Συστήματα. Εκδόσεις Ζήτη.
- Ψωμάς Σ., 2003: Ενέργεια, Περιβάλλον και Επιχειρηματικότητα-Προτάσεις για τον ενεργειακό τομέα στον Ελληνικό χώρο. Τεχνική Έκθεση Εθνικού Κέντρου Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης.
- Rifkin, J., 2003: Η οικονομία του υδρογόνου: Η δημιουργία του παγκόσμιου ενεργειακού ιστού και η ανακατανομή της εξουσίας στη Γη – Η επόμενη μεγάλη οικονομική επανάσταση. Εκδόσεις Λιβάνη.



ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

- American Wind Energy Association, 2002: The most frequently asked questions about Wind Energy. Technical Report.
- Arya S. P. S., 1988: *Introduction to Micrometeorology*. Academic Press.
- Brinkworth, B.J., 1964: *Solar Energy of Man*; Compton press, Salisbury, U.K.
- CRES, 1998: *Energy Efficient Technologies in High Temperature Industries*. Thermie Programme.
- CRES, 1999: *The World Solar Programme 1996-2005*. ENERGIE Programme.
- CRES, 2000: *Solar Thermal process Heating in Industrial Applications - A Stimulation Plan*. ALTENER Programme.
- CRES, 2003: *Market potential analysis for the introduction of hydrogen energy technology in stand-alone power systems*. ALTENER Programme.
- Daniels F. ,1964: *Direct Use of the Sun's Energy*, Yale University Press.
- Duffie J.A and Beckman W.A., 1976: *Solar Engineering of Thermal Processes* John Wiley and Sons N.Y.
- Energy Needs and Expectations, W.E.C. London 1987
- Justus C. G., 1978: *Winds and Wind System Performance*. The Franklin Institute Press.
- Justus C.G., 1985: *Wind Energy*. Ed. D. Houghton.Manwell J. F., McGowan J. G., and Rogers A. L., 2002: *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons.
- Mathew, S., 2006: *Wind Energy-Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer.
- Meinel A, B and Meinel, M.P, 1976: *Applied Solar Energy*; Addison - Wesley London.
- Palz W., 1978: *Solar Electricity*; Addison - Wesley London.
- Panofsky H. and Dutton J. A., 1984: *Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications*, John Wiley & Sons.
- Petersen E. L., Mortensen N. G., Landberg L., Hogstrop J., and Frank H. P., 1997: *Wind Power Meteorology*. Riso National Laboratory, Denmark.
- Pnevmatikos J., 1991a: Wind energy potential in NW Peloponnese-Greece. *Renewable Energy*, Vol 1, No 1, 137-139.
- Pnevmatikos J., 1991b: An experimental test of the empirical formulae commonly used to represent wind speed profiles near the ground. *Renewable Energy* Vol. 1, No 5/6, 623-628.
- Retscreen International, 2002: *Wind Energy Project Analysis*. Technical Report.
- Stull R. B., 1988: *An introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic.
- Veziroglou, T. Nejat, 1983: *Alternative Energy Sources* 111/ed. Washington, VI-9 (TA 33379A).
- Walker J., 1997: *Wind Energy Technology*. John Willey & Sons.
- World Energy Conference, 13th Congress, 1986, Cannes (TA338.7906W).



ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

A

Α΄ Θερμοδυναμικό αξίωμα, 20
αβαθής γεωθερμική ενέργεια, 100
αδιαβατική θερμοβαθμίδα, 118
αδιαβατική συμπίεση, 161
αιολική ενέργεια, 111
αιολική ενέργεια και περιβάλλον, 133
αιολική μηχανή Darrieus, 129
αιολική μηχανή Lafond, 131
αιολική μηχανή Savonius, 130
αιολική μηχανή Tornado, 131
Αίολος, 111
ακτινοβολία πλάσματος, 29
ακτινοβολούσα σύλληψη, 148
αληγείς, 115
αλυσιδωτή αντίδραση, 148
άμεση ακτινοβολία, 31
ανακλαστές Fresnel, 51
ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, 19
ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα, 133
ανεμόμετρο, 130
ανοδικές/καθοδικές κινήσεις, 115
ανταληγείς, 115
αντιπηκτικό, 57
απόδοση συλλεκτών, 53
αποθηκευμένη ενέργεια, 22
απορρόφηση, 37
απώλεια *Bremstrahlung*, 156
Αρσένιο, 67

B

βιομάζα, 87
Βόριο, 67
Βρωμιούχο Λίθιο, 60

Γ

Γενετική Μηχανική, 91
γεωθερμηλεκτρική εκμετάλλευση, 98
γεωθερμικά ρευστά, 96
γεωθερμική ανωμαλία, 96
γεωθερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας, 98
γεωθερμική ενέργεια χαμηλής θερμοκρασίας, 98
γεωθερμικό κοίτασμα, 96
γωνία απόκλισης, 34

γωνία κλίσης συλλέκτη, 34

Δ

διάχυτη, 31
διάχυτη ακτινοβολία, 33
διεύθυνση ανέμου, 116
δύναμη Coriolis, 115
δύναμη άνωσης, 115

E

ελεγχόμενη σύντηξη, 154
έλλειμμα μάζας, 143
έμμεσες πηγές ενέργειας, 17
ενδοτροπική ζώνη σύγκλισης, 115
ενέργεια σύνδεσης, 143
ενεργειακές ανάγκες, 12
ενεργειακές μετατροπές, 22
ενεργειακό ισοζύγιο, 146
ενεργητικό σύστημα, 48
ένταση ανέμου, 116
εντροπία, 20
εξοικονόμηση ενέργειας, 15
επίπεδος ηλιακός συλλέκτης, 49

H

ηλιακές λίμνες, 71
ηλιακή ακτινοβολία, 30
ηλιακή ενέργεια, 30
ηλιακή σταθερά, 31, 33
ηλιακό φάσμα, 31
ηλιακοί θερμοσίφωνες, 60
ηλιακοί πύργοι, 60
ηλιακοί φούρνοι, 48, 60
ηλιογράφος *Cambell-Stokes*, 40
ηλιοστάτης, 61
ηλιοφάνεια, 37
ημιαγωγοί, 67

Θ

θερμικά προβλήματα, 163
θερμική ακτινοβολία, 29
θερμική μηχανή, 20, 21
θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, 66
θερμοϊονικό στοιχείο, 70



θερμοϊονικό φαινόμενο, 66
θερμοκρασία ανάφλεξης, 156
θερμοπυρηνικό πλάσμα, 156
θερμότητας, 20

I

ισημερίες, 37
ισχύς αντιδραστήρα, 151

K

καύση υδρογόνου, 29
κβαντική απόδοση, 86
κλίμα, 62
κριτήρια Lawson, 158
κύκλος Carnot, 69
κύκλος ημικατάλυσης, 155
κύκλος κατάλυσης, 155
κυψέλη καυσίμου, 102
κυψελίδες κυκλοφορίας, 115

M

μάζα αδράνειας, 141
μαζικός αριθμός, 142
μεταβιβάσιμη ενέργεια, 22
μεταφορέας Ferredoxin, 88
μήκος τραχύτητας εδάφους, 118
μηχανικό έργο, 20
μηχανισμός σκέδασης, 31
μονάδες ενέργειας, 23
μορφές ενέργειας, 22

N

Νόμος Bernoulli, 121
Νόμος Snell, 54

Ξ

ξηρή επεξεργασία, 93

O

ολική ηλιακή ακτινοβολία, 31
ονομαστική ταχύτητα, 125
οπτική πυκνότητα, 32
ορθολογική χρήση ενέργειας, 15
όριο Betz, 121

Π

παθητικά δομικά συστήματα, 62
παθητικό σύστημα, 48
παλιρροιακή ενέργεια, 180
παραγωγή βιομάζας, 91
παραγωγή υδρογόνου, 102
παράμετρος στερέωσης, 150
πετρελαϊκή κρίση, 189
πλεονεκτήματα ΑΠΕ, 193
προβλήματα ραδιενέργειας, 163
προσανατολισμός ηλιακού στοιχείου, 62
πυρανόμετρο Erpley, 39
πυρηλιόμετρο, 39
πυρηνικά καύσιμα, 19
πυρηνική ενέργεια, 17
πυρηνική ενέργεια και περιβάλλον, 163
πυρηνική σχάση, 177
πυρηνικοί αντιδραστήρες, 152

P

Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), 190

Σ

σκέδαση, 37
σκέδαση Rayleigh, 31
στιβαρότητα, 126
συγκεντρωτικοί συλλέκτες, 60
συγχροτρονική ακτινοβολία, 29
συμβατικά ή απολιθωμένα καύσιμα, 19
συνθήκη κρισιμότητας, 151
συντελεστής Carnot, 70
συντελεστής Seebeck, 69, 70
συντελεστής ανάκλασης, 54
συντελεστής απόδοσης, 54
συντελεστής διαπερατότητας, 55
συντελεστής θερμικής απόδοσης, 20
συντελεστής θερμικής μετατροπής, 154
σύντηξη, 19
συστήματα ανοικτού κυκλώματος, 57
συστήματα κλειστού κυκλώματος, 57
σχάσιμο υλικό, 148

T

ταχύτητα αποκοπής, 125
ταχύτητα έναρξης, 125
ταχύτητα τριβής, 118



τεχνικά χαρακτηριστικά τυπικού πυρηνικού
αντιδραστήρα, 153
τοίχος Trombe, 64
τύποι αιολικών μηχανών, 126
τύποι κυψελών καυσίμου, 103
τυρβώδης ροή ανέμου, 116

Υ

υγρή επεξεργασία, 93
υπολείμματα φυτικά/ζωικά, 93

Φ

φαινόμενο Joule, 70
φαινόμενο Seebeck, 68
φαινόμενο θερμοκηπίου, 184
φαιοφύκη, 92
φτερωτή, 121
φύκια Algae, 90

φυτείες ενέργειας, 90
φυτείες πρωτεΐνης, 90
φυτικά έλαια, 91
φωτοβολταϊκό στοιχείο, 68
φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, 66
φωτοσύνθεση, 87

Χ

χλωροφύλλη, 87
χρησιμοποίησιμη ενέργεια, 20

Ψ

ψυκτική μηχανή, 21

Ω

ωριαία γωνία, 34





Τυπώθηκε στο Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο με
δαπάνη του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.



Copyright: Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Απαγορεύεται η μερική ή ολική ανατύπωση, καθώς και η
λήψη φωτοαντιγραφικών από το βιβλίο χωρίς τη γραπτή
άδεια του Τμήματος Δημοσιευμάτων του Πανεπιστημίου
Ιωαννίνων και του συγγραφέα.

Διατίθεται και στο Πανεπιστημιακό Βιβλιοπωλείο,
Πανεπιστημιούπολη, Τηλ.: 26510 96490

Διανέμεται Δωρεάν στους φοιτητές.

