



ΑΝΟΙΚΤΑ
ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΑ
ΜΑΘΗΜΑΤΑ



ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Κατσανεβάκης Αθανάσιος
Διπλ. Μηχανολόγος μηχανικός
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΕ



Άδειες Χρήσης

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

Χρηματοδότηση

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



Αφιερώνεται στον πατέρα μου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι σημειώσεις αυτές έγιναν για να συνδράμουν τις διαλέξεις του μαθήματος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας –ΑΠΕ- το οποίο γίνεται στο ΤΕΙ Σερρών στο τμήμα Μηχανολογίας. Ο στόχος του μαθήματος είναι να μπορούν οι φοιτητές μετά το πέρας του, να αναπτύξουν την εμπειρία τους και τις ικανότητές τους, εφόσον αυτό απαιτηθεί από τον επαγγελματικό τους προσανατολισμό και την προσωπική τους επιθυμία για επαγγελματική εξέλιξη, στους κυριώτερους τομείς των ΑΠΕ σε σχέση με τις εφαρμογές τους στην Ελλάδα.

Όπως σε κάθε επιστημονικό και επαγγελματικό τομέα η εμπειρία από την πραγματική ενασχόληση δεν μπορεί να υποκατασταθεί από κείμενα, σχήματα εργαστήρια και τα λοιπά περιεχόμενα ενός μαθήματος. Μπορεί όμως το μάθημα να είναι μια εισαγωγή στο περιεχόμενο του επαγγέλματος ή του επιστημονικού πεδίου. Το ρόλο αυτό προσπαθούν να καλύψουν οι σημειώσεις και το μάθημα.

Το αντικείμενο των ΑΠΕ είναι σύνθετο. Αποτελεί πεδίο συνεργασίας τομέων όπως η φυσική, η μετάδοση θερμότητας, η ρευστομηχανική, τα μαθηματικά, η ηλεκτροτεχνία, η τεχνική εμπειρία, η ηλεκτρονική, η χρήση εργαλείων και μηχανημάτων, η τοπογραφία κ.λ.π. Στις σημειώσεις αυτές αντιμετωπίζονται θέματα των ΑΠΕ τα οποία είναι σαφώς έξω από το αντικείμενο άλλων πεδίων. Για παράδειγμα το θέμα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μια ηλεκτρογεννήτρια και η σύνδεσή της με το δίκτυο θεωρείται ότι είναι αντικείμενο των ηλεκτρικών μηχανών και της ηλεκτροτεχνίας και δεν αντιμετωπίζεται εδώ παρά μόνον δίδονται ορισμένες χρήσιμες βιβλιογραφικές αναφορές. Το ίδιο γίνεται και σε άλλα θέματα τα οποία θα βρει ο αναγνώστης μέσα στις σημειώσεις.

Ελπίζω οι σημειώσεις αυτές να φανούν χρήσιμες για αυτούς οι οποίοι ενδιαφέρονται για το αντικείμενο των ΑΠΕ.

Θεσσαλονίκη Οκτώβριος 2007

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	8
Εισαγωγή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	8
Γενικά.....	8
Η γεωγραφική κατανομή των ΑΠΕ.....	9
Η χρονική κατανομή των ΑΠΕ.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	11
Ηλιακή Ενέργεια. Θέση του ηλίου και ηλιακή ακτινοβολία.....	11
Εισαγωγή.....	11
Η ηλιακή σταθερά.....	13
Η σχετική θέση της γής ως προς τον ήλιο	14
Η ηλιακή ώρα.....	16
Η ηλιακή απόκλιση.....	16
Η θέση του ήλιου στον ορίζοντα	18
Γενικά.....	18
Ο υπολογισμός της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα.....	19
Η πορεία του ήλιου στον ουρανό.....	21
Εφαρμογή.....	22
Η ηλιακή ακτινοβολία.....	23
Γενικά.....	23
Η ηλιακή ακτινοβολία έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα.....	23
Η ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γής.....	26
Μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γής.....	29
Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γής.....	32
Αξιοπιστία του μοντέλου του Hottel.....	33
Εφαρμογή.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Συλλέγοντας την ηλιακή ενέργεια	34
Γενικά.....	34
Προσανατολισμός της επιφάνειας του συλλέκτη και ορισμοί.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	38
Φωτοβολταϊκά.....	38
Εισαγωγή.....	38
Ονοματολογία και κατασκευή ΦΒ στοιχείων.....	38
Σχήμα 3.3 Συνδέσεις ΦΒ στοιχείων.....	40
Σχήμα 3.4 Πεδίο ΦΒ συλλεκτών σε ΦΒ σταθμό.....	40
Απόδοση του Φ/Β στοιχείου.....	41
Συμπεριφορά Φ/Β συλλέκτη.....	41
Παράλληλη και εν σειρά σύνδεση ΦΒ συλλεκτών.....	42
Παραγόμενη ισχύς από Φ/Β συλλέκτη.....	43
Επίπτωση της θερμοκρασίας στην απόδοση των Φ/Β.....	43
Μετρήσεις απόδοσης ΦΒ συλλεκτών.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	47
Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες.....	47
Εισαγωγή.....	47
Ο μηχανισμός συλλογής και απωλειών της ηλιακής ακτινοβολίας στον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη.....	47
Επιλεκτικές επιφάνειες.....	50
Μέτρηση της απόδοσης επίπεδου ηλιακού συλλέκτη.....	51

Εφαρμογή.....	52
Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	55
ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	55
Εισαγωγή.....	55
Τα χαρακτηριστικά του ανέμου.....	55
Η μεταβλητή φύση του ανέμου.....	56
Μεταβολή του ανέμου καθ' ύψος.....	58
Μεταβολή του ανέμου λόγω τοπογραφίας.....	59
Πώς μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου καθ' ύψος;.....	59
Η κατανομή πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου.....	60
Εφαρμογή.....	61
Ανεμολογικές μετρήσεις.....	62
Η ενέργεια του ανέμου.....	64
Εφαρμογή.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	66
Η ανεμομηχανή.....	66
Εισαγωγή.....	66
Γενικά.....	66
Ο μέγιστος θεωρητικός βαθμός απόδοσης μίας Ανεμομηχανής. Το όριο του Betz.....	69
Γιατί περιστρέφεται ο δρομέας μίας Α/Γ;.....	70
Ο αριθμός των πτερυγίων και ο λόγος ταχύτητας κορυφής –tip speed ratio- ...	74
Εφαρμογή.....	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	79
Ενέργεια από το νερό –Υδροηλεκτρικά-.....	79
Εισαγωγή.....	79
Οι βασικές ενεργειακές μετατροπές σε ένα υδροηλεκτρικό.....	79
Τύποι υδροστροβίλων και εγκαταστάσεων.....	81
Υπολογισμοί παραγωγής ενέργειας από υδατορεύματα.....	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Γενικά.

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, [1], ο σύγχρονος τρόπος ζωής είναι στενά συνδεδεμένος με τη διαθεσιμότητα ενεργειακών πόρων. Η ενέργεια χρησιμοποιείται σε όλο και περισσότερες στιγμές της ζωής μας: Τη χρησιμοποιούμε για να μετακινούμαστε, στο σπίτι μας για θέρμανση ή ζεστό νερό, για τη λειτουργία των υπολογιστών ή των οικιακών μας συσκευών κ.λ.π. Είναι δύσκολο να βρεθεί δραστηριότητα κατά την οποία δεν γίνεται χρήση κάποιας εξωτερικής πηγής ενέργειας –έξω από αυτήν την οποία μετατρέπει και αξιοποιεί ο ανθρώπινος οργανισμός-.

Η ολοένα αυξανόμενη χρήση ενέργειας από την ανθρώπινη δραστηριότητα και οι κατά καιρούς ανατιμήσεις των συμβατικών καυσίμων π.χ. πετρέλαιο, οδήγησαν στον προβληματισμό σε σχέση με την επάρκεια των φυσικών αποθεμάτων καυσίμων. Διαπιστώθηκε ότι αν συνεχιστεί η χρήση των φυσικών αυτών πόρων με το ρυθμό του τέλους του 20ου αιώνα τότε η επάρκεια των γνωστών φυσικών αποθεμάτων είναι περιορισμένη και, ανάλογα με το καύσιμο φθάνει μέχρι τον χρονικό ορίζοντα των 150 ετών. Έτσι έχει αρχίσει η αμφισβήτηση του καθιερωμένου μοντέλου σκέψης της συνεχούς "ανάπτυξης" -ανάπτυξη σε τί, μέχρι πού και σε βάρος τίνος;- και η σταδιακή αντικατάστασή του από το μοντέλο σκέψης της αειφορίας-αειφορία ως προς τι;-.

Αν και σήμερα δίδεται έμφαση στην αειφόρο ανάπτυξη λίγοι μπαίνουν στον κόπο να σκεφθούν τί ακριβώς αυτό σημαίνει, σε ποιό βαθμό είναι υλοποιήσιμο και τί αλλαγές αυτό συνεπάγεται στην καθημερινή ζωή και συνήθειες του "σύγχρονου" ανθρώπου. Δυστυχώς ελάχιστα γίνεται αντιληπτό και αναφέρεται στις διάφορες δημοσιεύσεις ότι η εφαρμογή στην πράξη οποιασδήποτε επαγγελίας για αειφορία, προστασία του περιβάλλοντος κ.λ.π. περνάει πρώτα από την αλλαγή των προσωπικών συνηθειών του ανθρώπου, απαλλαγή από τον καταναλωτικό τρόπο ζωής και υιοθέτηση ασκητικής σκέψης και συμπεριφοράς.

Μέσα στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας για αειφορία ως προς τη μετατροπή και χρήση της ενέργειας αναπτύχθηκε τις τελευταίες δεκαετίες ο τομέας των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Δυστυχώς η σύγχρονη ανάπτυξη των ΑΠΕ δεν προήλθε από τη συνειδητοποίηση της ανάγκης για αειφορία αλλά από την αύξηση των τιμών του πετρελαίου κατά την περίοδο έντασης στην Μέση Ανατολή το 1973, [1]. Παρόλα αυτά στο χρονικό διάστημα που μεσολάβησε έγινε αντιληπτό ότι σε συνδυασμό με τη μείωση των ανθρωπίνων απαιτήσεων για ενέργεια η χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι αυτή που μπορεί να επιτύχει συνδυασμό ενός αποδεκτού βιοτικού επιπέδου με βασικές ευκολίες για την ανθρώπινη δραστηριότητα και σχετική αειφορία.

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας-ΑΠΕ- είναι αυτές που προέρχονται από μετατροπή ενέργειας η οποία υπάρχει στη φύση και η οποία ανανεώνεται και δέν μειώνεται μέσα στον πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα της ανθρώπινης ιστορίας.

Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας είναι π.χ. η θερμότητα του ήλιου, η δύναμη του ανέμου ή των κυμάτων κ.λ.π.

Αντίθετα συμβατικές πηγές ενέργειας είναι αυτές των ορυκτών καυσίμων π.χ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ουράνιο κ.λ.π.

Στόχος του μαθήματος αυτού είναι να εισαχθούν οι φοιτητές στις έννοιες, στην αξιολόγηση και στις τεχνικές εφαρμογές για την χρήση ορισμένων από τις ΑΠΕ και συγκεκριμένα στην

- Ηλιακή Ενέργεια
- Αιολική Ενέργεια.
- Υδατοπτώσεις.
- Βιομάζα και Βιοαέριο.

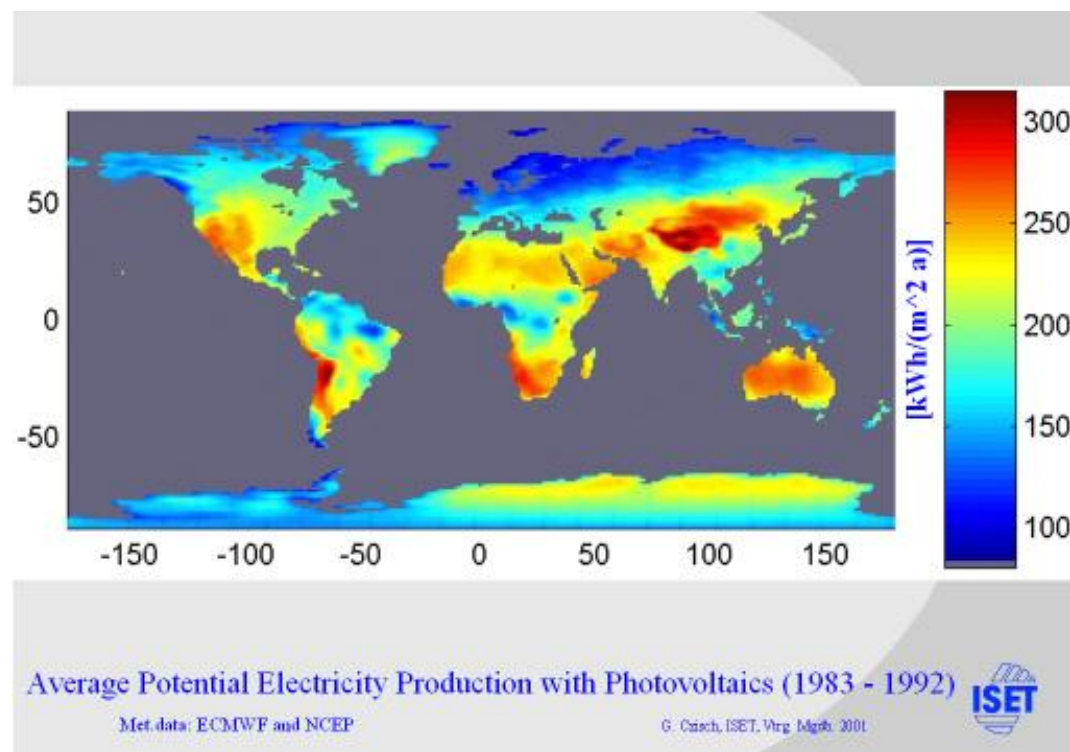
Ακόμα στο μάθημα γίνεται μιά εισαγωγή στο αντικείμενο της οικονομικής αξιολόγησης επενδύσεων ΑΠΕ.

Σε αρκετά σημεία στο βιβλίο αυτό χρησιμοποιούνται πληροφορίες και γνώσεις από το μάθημα των Ενεργειακών συστημάτων-Ατμοπαραγωγών και Ατμοστροβίλων καθώς και από προαπαιτούμενα μαθήματα.

Η γεωγραφική κατανομή των ΑΠΕ.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των ΑΠΕ είναι η γεωγραφική τους κατανομή. Για τα διάφορα είδη των ΑΠΕ υπάρχει σημαντικά διαφοροποιημένη γεωγραφική κατανομή. Έτσι για παράδειγμα η ηλιακή ενέργεια είναι πιά άφθονη στις περιοχές των ερήμων ενώ η υδροηλεκτρική σε μέρη όπου υπάρχουν ποτάμια, ροή νερού κ.λ.π. Ο άνθρωπος γενικά δεν μπορεί να επηρεάσει αυτή τη γεωγραφική κατανομή: θα πρέπει οι μονάδες που θα μετατρέψουν τις διαθέσιμες ΑΠΕ σε ωφέλιμη για τον άνθρωπο ενέργεια να κατασκευαστούν και να λειτουργήσουν στα μέρη όπου η ΑΠΕ είναι διαθέσιμη.

Έχουν γίνει διάφορες μελέτες σε σχέση με τη γεωγραφική κατανομή των ΑΠΕ. Στο παρακάτω σχήμα 1 φαίνεται για παράδειγμα η παγκόσμια κατανομή της δυνατότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Φωτοβολταικά συστήματα. Παρόμοιοι χάρτες έχουν αναπτυχθεί για διάφορες ΑΠΕ και σε κλιμακούμενη ακρίβεια.

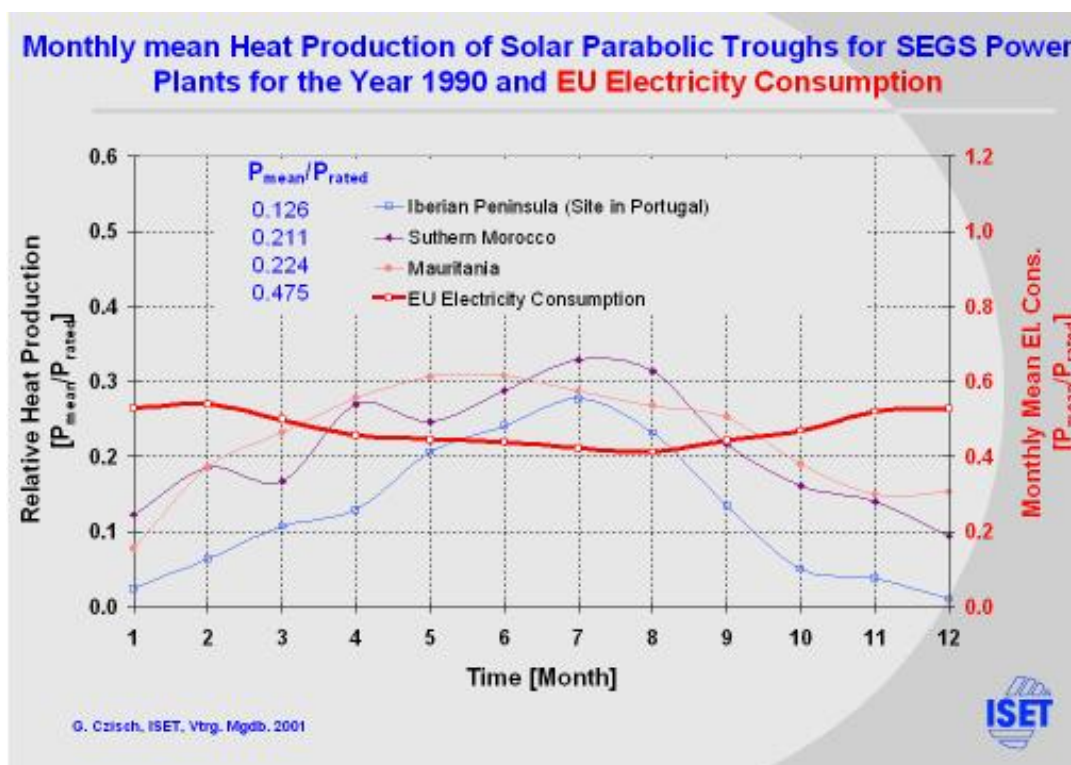


Σχήμα 1.1 Κατανομή της δυνατότητας παραγωγής ηλ. ενέργειας από Φ/Β συστήματα. Από [2].

Η χρονική κατανομή των ΑΠΕ.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των ΑΠΕ είναι η μεταβολή τους στη διάρκεια του χρόνου. Για τα διάφορα είδη των ΑΠΕ υπάρχει σημαντικά διαφοροποιημένη μεταβολή της διαθεσιμότητάς τους στη διάρκεια του χρόνου -ώρας, ημέρας, έτους-. Έτσι για παράδειγμα η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη κατά τη διάρκεια της ημέρας μόνον και πιά άφθονη κατά τη διάρκεια του θέρους. Ο άνθρωπος γενικά δεν μπορεί να επηρεάσει αυτή τη χρονική μεταβλητότητα: θα πρέπει να βρεί μεθοδολογίες που να επιτρέπουν το συνταίριασμα αυτής της μεταβλητότητας με τις δικές του συνήθειες ή ανάγκες ενεργειακής κατανάλωσης.

Έχουν γίνει διάφορες μελέτες σε σχέση με τη χρονική μεταβολή των ΑΠΕ και το ταίριαγμα της με την ανθρώπινη ενεργειακή ζήτηση -demand side-. Στο παρακάτω σχήμα 1.2 φαίνεται για παράδειγμα η συσχέτιση της δυνατότητας παραγωγής ηλ. ενέργειας από ηλιακούς σταθμούς με παραβολικά κάτοπτρα για διάφορες τοποθεσίες -Ιβηρική χερσόνησος/Νότιο Μαρόκο/Μαυριτανία- σε σχέση με τη ζήτηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης.



Σχήμα 1.2 Συσχέτιση της δυνατότητας παραγωγής ηλ. ενέργειας από σταθμούς με παραβολικά κάτοπτρα σε σχέση με την ζήτηση στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Από [2].

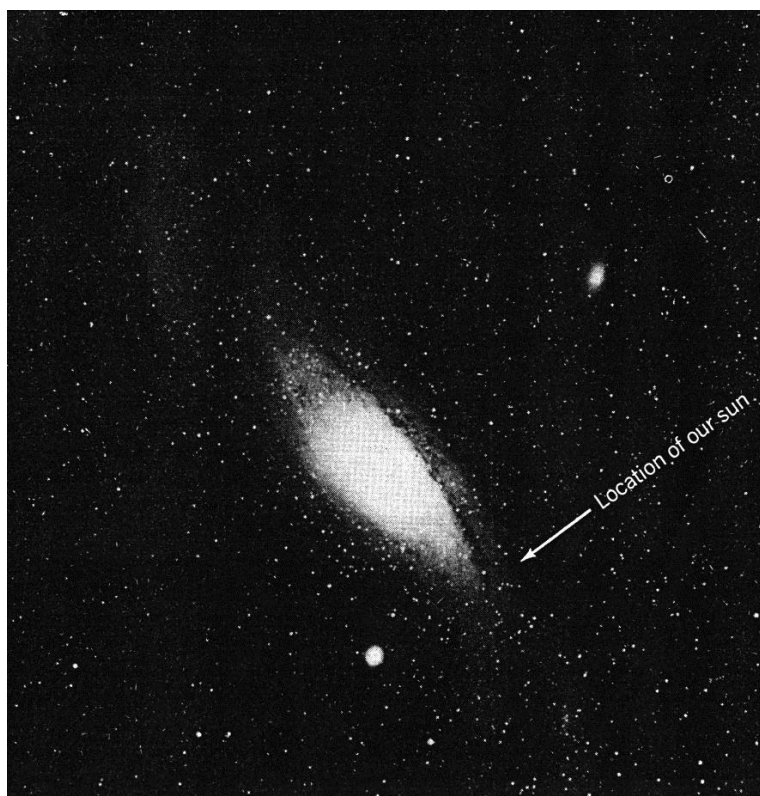
Περισσότερα για την μεταβολή των ΑΠΕ σε διάφορες χρονικές κλίμακες θα δούμε στο κάθε εξειδικευμένο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ηλιακή Ενέργεια. Θέση του ηλίου και ηλιακή ακτινοβολία.

Εισαγωγή.

Οι –Α.Π.Ε- στο μεγαλύτερο ποσοστό τους προέρχονται άμεσα ή έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία. Εξαίρεση αποτελούν η γεωθερμία και οι παλίρροιες. Η ενέργεια του ήλιου είναι η αιτία για τη δημιουργία της βιομάζας, των ανέμων κ.λ.π. Ο ήλιος του πλανητικού μας συστήματος βρίσκεται στην περιφέρεια του γαλαξία μας. Αν θα μπορούσαμε να δούμε τη θέση του ήλιου μας σε σχέση με το γαλαξία μας τότε θα μπορούσε να συγκριθεί με τη θέση την οποία σημειώνει το βέλος στην παρακάτω εικόνα η οποία αφορά έναν άλλο γαλαξία, το νεφέλωμα της Ανδρομέδας.



Σχήμα 2.1 Σχετική θέση του ήλιου μας σε σχέση με τον γαλαξία μας. Από [3].

Ο ήλιος είναι ένα αστέρι σχετικά μικρών διαστάσεων πάνω στο οποίο έχουν ξεκινήσει πριν από εκατομμύρια χρόνια και συνεχίζουν μέχρι σήμερα αντιδράσεις σύντηξης ελαφριών πυρήνων. Κατά τις αντιδράσεις αυτές μάζα μετατρέπεται σε ενέργεια η οποία

ενέργεια στη συνέχεια ακτινοβολείται στο διάστημα και θερμαίνει μεταξύ άλλων και τη γή μας.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά του ήλιου.

παρούσα ηλικία του ήλιου	$4,5 \times 10^9$ έτη.
αναμενόμενη διάρκεια ζωής ήλιου	10×10^9 έτη.
απόσταση ήλιου -γης	
μέση	$1,496 \times 10^{11}$ m = 1 AU
μεταβάλλεται μεταξύ	0,983 - 1,016 AU
διάμετρος (φωτόσφαιρα)	$1,39 \times 10^9$ m.
γωνιακή διάμετρος (από τη γή)	$9,6 \times 10^{-3}$ ακτίνια.
μεταβολή	1,7%.
όγκος (φωτόσφαιρα)	$1,41 \times 10^{27}$ m ³ .
μάζα	$1,987 \times 10^{30}$ kg.
Σύσταση	
Υδρογόνο	73,46 %
Ήλιο	24,85 %
Οξυγόνο	0,77 %
άνθρακας	0,29 %
σίδηρος	0,16 %
Νέον	0,12 %
άζωτο, πυρίτιο, μαγνήσιο, Θείο κ.α.	< 0,1 %
Πυκνότητα	
Μέση	14,1 kg/m ³
πυρήνας	1600 kg/m ³

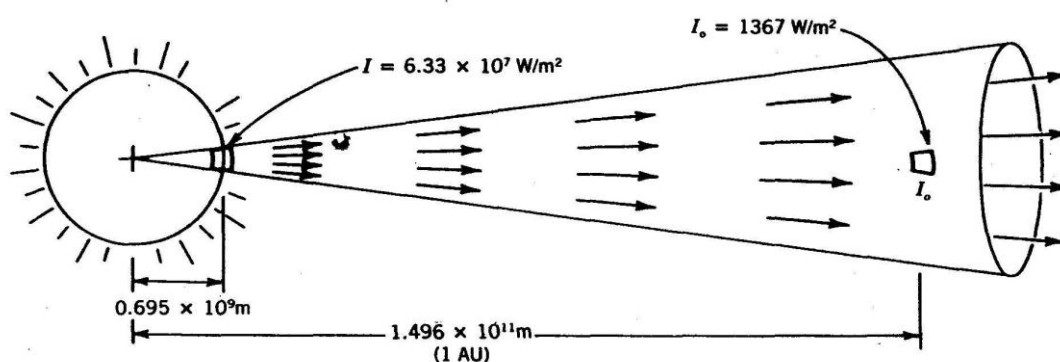
Ηλιακή ακτινοβολία	
ολόκληρος ο ήλιος	$3,83 \times 10^{26} \text{ W}$
ανά μονάδα επιφανείας	$6,33 \times 10^7 \text{ W/m}^2$
σε απόσταση 1 AU -ηλιακή σταθερά-	1367 W/m ²
Θερμοκρασία	
πυρήνας	15.000.000 °K
επιφάνεια (φωτόσφαιρα)	6.050 °K
Χρωμόσφαιρα	4.300 -50.000 °K
κορώνα	800.000 - 3.000.000 °K
Περιστροφή	
ισημερινός του ηλίου	26,8 ημέρες
σε πλάτος 30ο	28,3 ημέρες
σε πλάτος 60ο	30,8 ημέρες
σε πλάτος 75ο	31,8 ημέρες
Πηγή ενέργειας	
ρυθμός απώλειας μάζας -λόγω μετατροπής σε ενέργεια-	$4,1 \times 10^9 \text{ kg/sec}$

Η ηλιακή σταθερά.

Εξαιτίας των πυρηνικών αντιδράσεων οι οποίες λαμβάνουν χώρα στον ήλιο και της θερμότητας η οποία αποδεδεσμεύεται, η θερμοκρασία του ανεβαίνει και φθάνει, όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο τους 6000 περίπου βαθμούς κέλβιν στην επιφάνειά του. Έτσι ο ήλιος αρχίζει και ακτινοβολεί προς το διάστημα. Τμήμα αυτής της ακτινοβολίας φθάνει στη γη. Όσο απομακρυνόμαστε από τον ήλιο τόσο μειώνεται η ένταση της ακτινοβολίας του δηλαδή η ισχύς/m² της ακτινοβολίας του. Όταν

φθάσουμε στη μέση απόσταση της τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο δηλαδή σε απόσταση 1 AU -Astronomical Unit, αστρονομική μονάδα-μονάδα μέτρησης των αποστάσεων στο πλανητικό μας σύστημα ίση με $1,496 \times 10^{11}$ μέτρα - η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ήλιου έχει μειωθεί και έχει φθάσει τα περίπου 1367 W/m^2 . Η ένταση αυτή της ηλιακής ακτινοβολίας σε απόσταση 1 AU από τον ήλιο και επομένως αμέσως έξω από την γήινη ατμόσφαιρα σε ένα επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ήλιου ονομάζεται ηλιακή σταθερά.

Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι η τιμή της ηλιακής σταθεράς δεν επηρεάζεται ούτε από την ατμόσφαιρα ούτε από τα διάφορα καιρικά φαινόμενα παρά μόνον από την απόσταση γης και ηλίου.



Σχήμα 2.2 Προσδιορισμός της ηλιακής σταθεράς. Από [3].

Για τον προσδιορισμό της ηλιακής σταθεράς έχουν γίνει κατά το παρελθόν αρκετές μελέτες οι οποίες επαναπροσδιόρισαν την αποδεκτή τιμή της. Σήμερα η κοινά αποδεκτή τιμή της ηλιακής σταθεράς προέρχεται από τις εργασίες των *Fröhlich και Brusa, 1981, καθώς και του Iqbal, 1983* και έχει τιμή

Ηλιακή σταθερά -Solar constant- = 1367 W/m^2

Η ηλιακή σταθερά έχει μεγάλη σημασία στους υπολογισμούς των ηλιακών συστημάτων διότι δίνει το μέτρο της ενεργειακής μας πηγής.

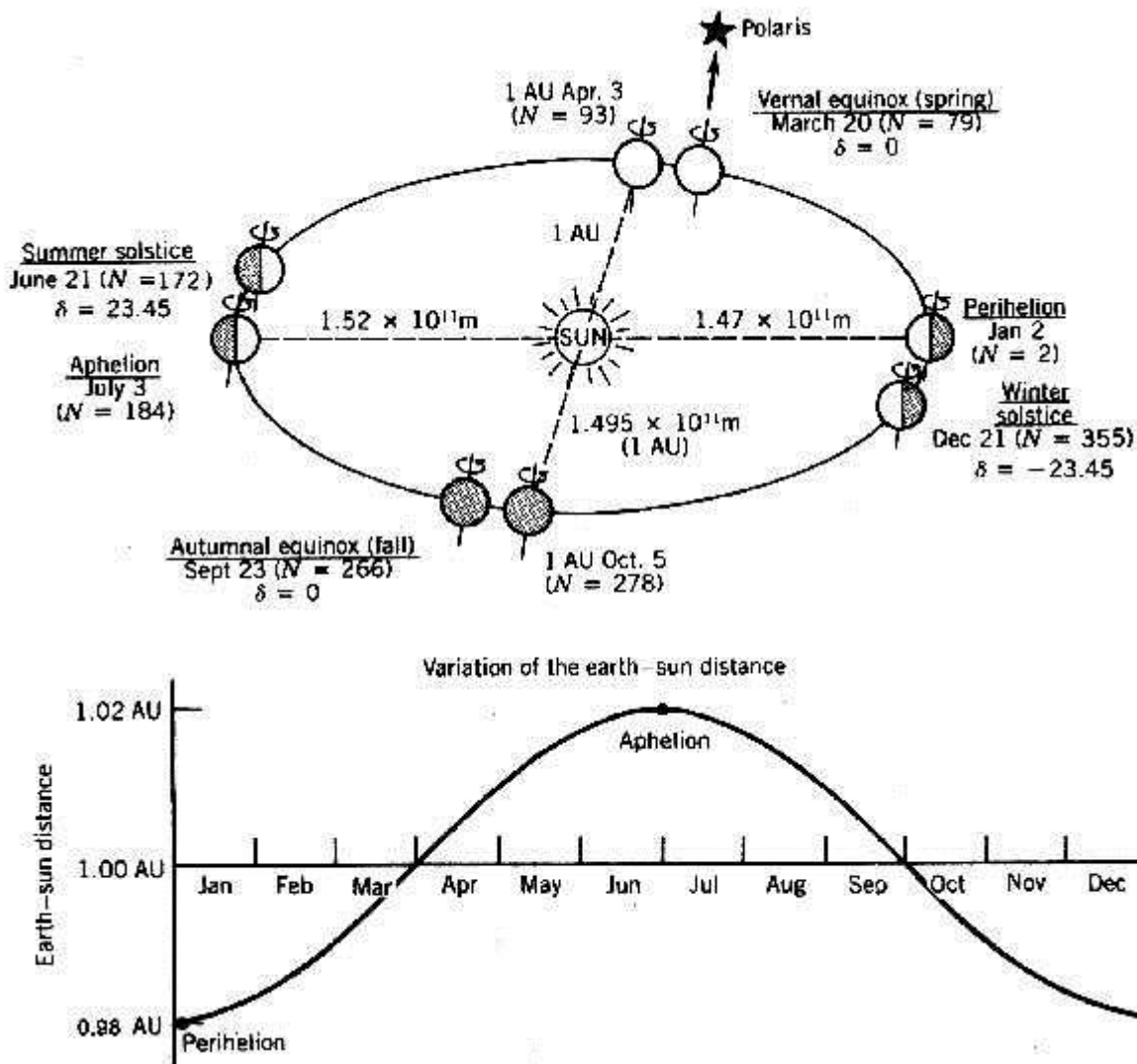
Η σχετική θέση της γης ως προς τον ήλιο

Αφού είδαμε τη σχετική θέση του ήλιου μας ως προς το γαλαξία μας ας δούμε τη σχετική θέση της γης ως προς τον ήλιο.

Η τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο είναι ελλειπτική. Επιπλέον ο ήλιος δεν βρίσκεται στο κέντρο της έλλειψης αλλά παράκεντρα. Σχηματικά η τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.3. Η τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο ορίζει ένα νοητό επίπεδο το επίπεδο της τροχιάς της γης.

Υπάρχουν ορισμένες θέσεις της τροχιάς της γης οι οποίες βρίσκονται στη μικρότερη αλλά και στην μεγαλύτερη απόσταση από τον ήλιο. Ονομάζονται αντιστοίχως περιήλιο και αφήλιο. Οι ημερομηνίες κατά τις οποίες αυτό συμβαίνει είναι αντίστοιχα η 2η Ιανουαρίου και η 3η Ιουλίου.

Η γή εκτός από την περιστροφή της γύρω από τον ήλιο η οποία διαρκεί περίπου 365 ημέρες περιστρέφεται και γύρω από τον εαυτό της σε χρονικό διάστημα 24 ωρών -μιάς ημέρας-



Σχήμα 2.3 Σχετική κίνηση της γης ως προς τον ήλιο. Από [3].

Ένα σημαντικότατο στοιχείο της κίνησης της γης ως προς τον ήλιο είναι ότι ο άξονας περιστροφής της γης γύρω από τον εαυτό της δεν είναι κάθετος στο επίπεδο της τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο. Αυτό δημιουργεί μια μεταβολή στις ώρες κατά τις οποίες τα διάφορα τμήματα της επιφάνειας της γης δέχονται ηλιακή ακτινοβολία και είναι η κύρια αιτία των εποχών. Έτσι σε μια περιοχή η οποία δεν βρίσκεται στον ισημερινό της γης η διάρκεια της ημέρας και της νύχτας αλλάζει στη διάρκεια του έτους δηλ. στο χρόνο που απαιτείται για μια πλήρη περιστροφή της γης γύρω από τον ήλιο.

Υπάρχουν 2 ημέρες τον χρόνο κατά τις οποίες η διάρκεια της ημέρας είναι ίση με τη διάρκεια της νύχτας. Αυτές λέγονται ισημερίες. Έχουμε 2 ισημερίες: την εαρινή και την φθινοπωρινή - 20 Μαρτίου και 23 Σεπτεμβρίου αντίστοιχα για το Βόρειο ημισφαίριο- Υπάρχει επίσης μια ημέρα στο έτος στην οποία έχουμε τη μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας καθώς και μια στην οποία έχουμε τη μεγαλύτερη διάρκεια της νύχτας. Αυτές

είναι αντίστοιχα η 21η Ιουνίου και η 21η Δεκεμβρίου. Ονομάζονται Θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο αντίστοιχα για το Βόρειο ημισφαίριο. Είναι σημαντικό να κατανοηθεί η αρίθμηση των ημερών αυτών όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.

Η ηλιακή ώρα

Εφόσον μέσα σε 24 ώρες η γη εκτελεί μια πλήρη περιστροφή δηλ. 360° γύρω από τον άξονά της αυτό σημαίνει ότι σε 1 ώρα περιστρέφεται κατά $360/24=15^\circ$. Για κάθε τόπο υπάρχει μια χρονική στιγμή κατά την οποία ένας παρατηρητής στον τόπο αυτό θα δει τον ήλιο να βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο σε σχέση με τον ορίζοντα. Αυτή η χρονική στιγμή είναι το ηλιακό μεσημέρι. Η ηλιακή ώρα κατά το ηλιακό μεσημέρι είναι εξ' ορισμού 12. Μια ώρα πριν η ηλιακή ώρα είναι η 11η ηλιακή ώρα μια ώρα μετά είναι η 13η κ.ο.κ.

Από την ηλιακή ώρα μπορούμε να υπολογίσουμε την γωνία ώρας - η θέση της γωνίας ώρας θα φανεί στο επόμενο σχήμα-

Η γωνία ώρας υπολογίζεται από την σχέση

$$\text{Γωνία ώρας } (\omega) \quad \omega = 15 \cdot (t_s - 12) \quad (2.1)$$

Όπου t_s η ηλιακή ώρα σε ώρες.

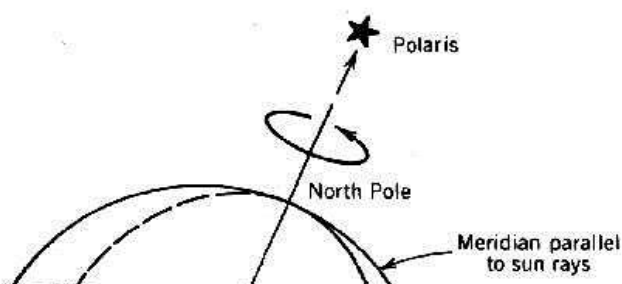
Η ηλιακή απόκλιση

Ηλιακή απόκλιση -Declination- είναι η γωνία που σχηματίζουν οι ακτίνες του ήλιου με το επίπεδο του ισημερινού κατά το ηλιακό μεσημέρι.

Ο υπολογισμός της ηλιακής απόκλισης γίνεται με τη σχέση

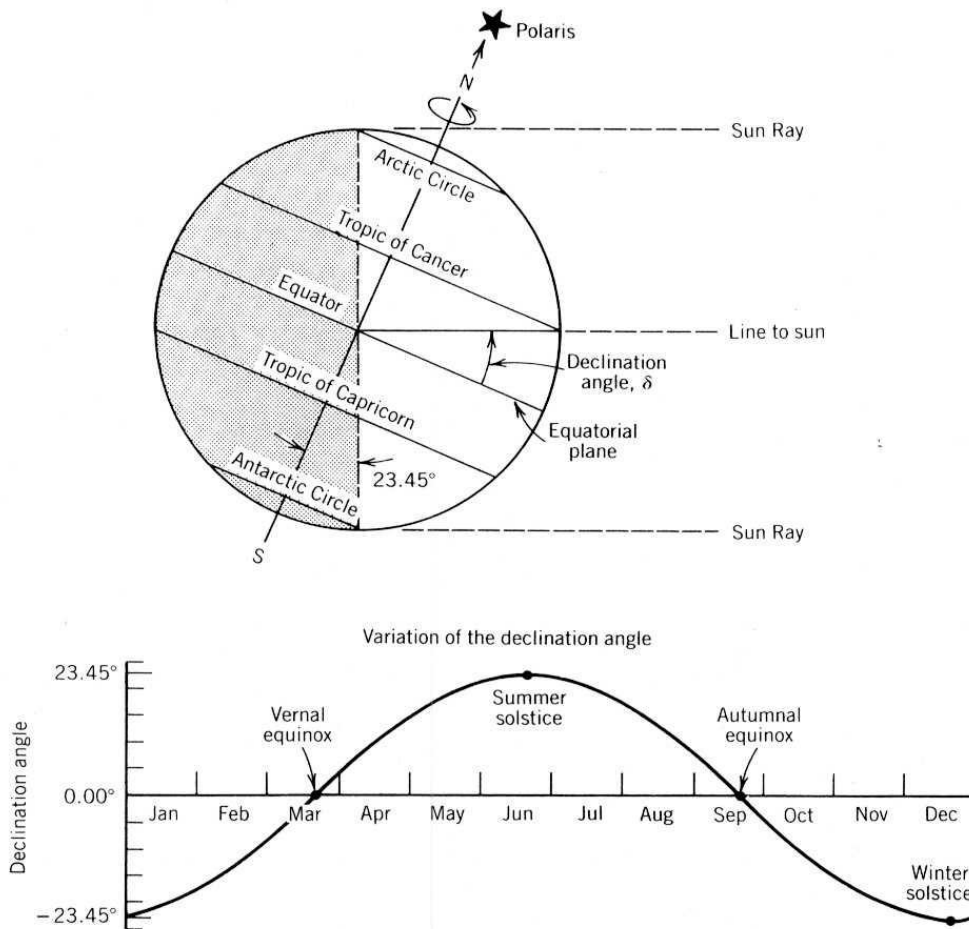
$$\delta = 23,45 \sin [(360/365)(284+N)] \quad (2.2)$$

Όπου N η ημέρα του έτους. Εντός των αγκυλών του συνημιτόνου το αποτέλεσμα είναι μοίρες.



Σχήμα 2.4 Προσδιορισμός της ηλιακής απόκλισης και της ηλιακής ώρας. Από [3].

Η ηλιακή απόκλιση μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους και παίρνει τιμές από $-23,45^\circ$ μέχρι $+23,45^\circ$, μηδενίζει δε τις τιμές της κατά τις ισημερίες. Ο υπολογισμός της ηλιακής απόκλισης είναι η βάση πάνω στην οποία γίνεται ο υπολογισμός όλων των άλλων στοιχείων τα οποία είναι απαραίτητα για να προσδιορίσουμε τη θέση του ήλιου - και άρα της ενεργειακής μας πηγής- στον ορίζοντα.



Σχήμα 2.5 Μεταβολή της ηλιακής απόκλισης κατά τη διάρκεια του έτους. Από [3].

Η θέση του ήλιου στον ορίζοντα

Γενικά

Έχει επικρατήσει η θέση του ήλιου στον ορίζοντα ή στον ουράνιο θόλο σε σχέση με έναν παρατηρητή ο οποίος βρίσκεται στην επιφάνεια της γης να προσδιορίζεται με βάση συγκεκριμένες γωνίες. Ο προσδιορισμός και η ονοματολογία των γωνιών αυτών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.6. Ο παρατηρητής βρίσκεται στη θέση Q.

Οι γωνίες αυτές είναι :

Γωνία ύψους του ηλίου. Η γωνία αυτή ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζει η νοητή γραμμή από τον ήλιο στον παρατηρητή με το οριζόντιο επίπεδο. Είναι η γωνία α στο σχήμα 2.6.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ υπολογισμών

Γεωγραφικό πλάτος φ

Γωνία ώρας ω

$$\omega = 15 \cdot (t_s - 12) \quad (2.1)$$

Όπου t_s η ηλιακή ώρα σε ώρες.

Ηλιακή απόκλιση δ

$$\delta = 23,45 \sin [(360/365)(284+N)] \quad (2.2)$$

Οι σχέσεις και τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται παρακάτω.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ υπολογισμών

Γωνία ύψους ηλίου α

$$\alpha = \arcsin (\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \omega \cos \varphi) \text{ σε μοίρες.} \quad (2.3)$$

Γωνία αζιμουθίου A

$$\sin A = (-\cos \delta \sin \omega) / \cos \alpha \quad (2.4)$$

ή

$$\cos A = (\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \cos \omega \sin \varphi) / \cos \alpha \quad (2.5)$$

Η σχέση 2.5 δίδει την γωνία αζιμουθίου του ήλιου A μέχρι την ώρα του ηλιακού μεσημεριού. Μετά το ηλιακό μεσημέρι πρέπει να προστεθούν 90 μοίρες.

Θέση ανατολής και δύσης.

Από τις παραπάνω σχέσεις μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θέση Ανατολής και Δύσης κάτι το οποίο είναι ενδιαφέρον για τη μελέτη και τον προσανατολισμό των ηλιακών συστημάτων

Ο προσδιορισμός της θέσης Ανατολής και Δύσης γίνεται με την γωνία ώρας για την οποία η γωνία ύψους του ηλίου μηδενίζεται. Έτσι έχουμε την παρακάτω σχέση.

$$\omega_s = \arccos (-\tan \delta \tan \varphi) \text{ σε μοίρες } [^\circ] \quad (2.6)$$

Αντικαθιστώντας την υπολογισμένη από την παραπάνω σχέση γωνία ώρας στην εξίσωση του αζιμουθίου βρίσκουμε τη γωνία αζιμουθίου της θέσης ανατολής και δύσης.

Ώρες ηλιοφάνειας.

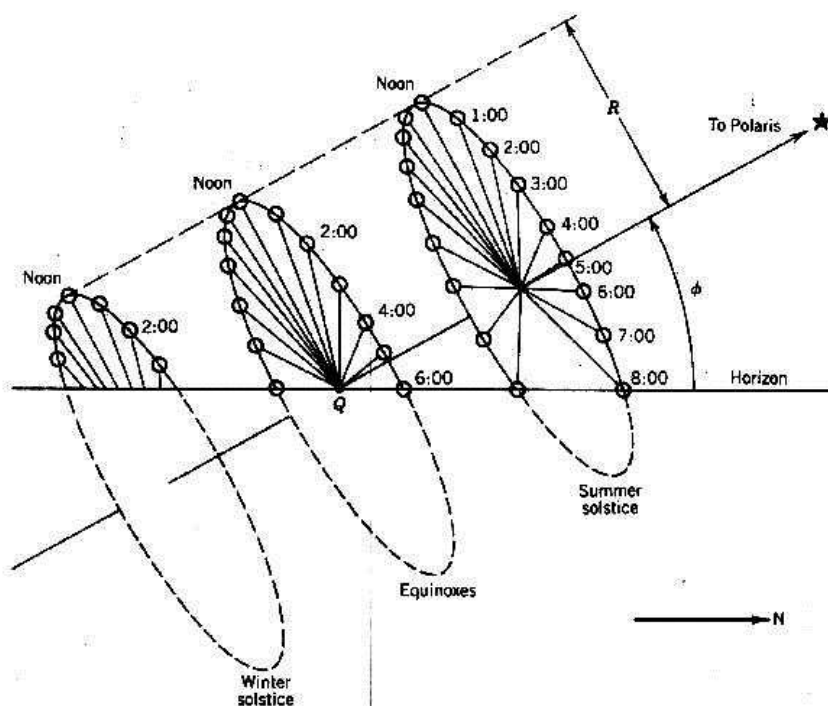
Οι ώρες ηλιοφάνειας είναι μια επίσης σημαντική παράμετρος του υπολογισμού των ηλιακών συστημάτων. Οι ώρες ηλιοφάνειας προκύπτουν από τη σχέση

$$\text{ώρες ηλιοφάνειας} = (2 \omega_s) / 15 \quad (2.7)$$

Η πορεία του ήλιου στον ουρανό.

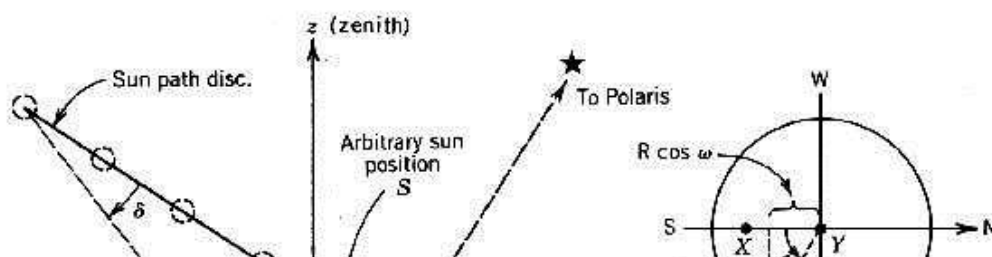
Είναι σημαντικό μαζί με τις σχέσεις με τις οποίες υπολογίζουμε τη θέση του ήλιου στον ουράνιο θόλο να έχουμε και μια ποιοτική εικόνα της πορείας του ήλιου στον ορίζοντα κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους.

Στο παρακάτω σχήμα 2.7 φαίνεται αυτή η πορεία για 3 διαφορετικές ημέρες του έτους: για την ημέρα του χειμερινού ηλιοστασίου, της ισημερίας και του θερινού ηλιοστασίου.



Σχήμα 2.7 Η πορεία του ηλίου στον ορίζοντα 3 διαφορετικές ημέρες του έτους - χειμερινό ηλιοστάσιο, ισημερία και θερινό ηλιοστάσιο- βόρειο ημισφαίριο. Από [3].

Στο επόμενο σχήμα και για μεγαλύτερη ακρίβεια της κατανόησης της πορείας του ηλίου δίδεται η πλάγια όψη και η κάτοψη της πορείας του ηλίου για μια ενδεικτική ημέρα.



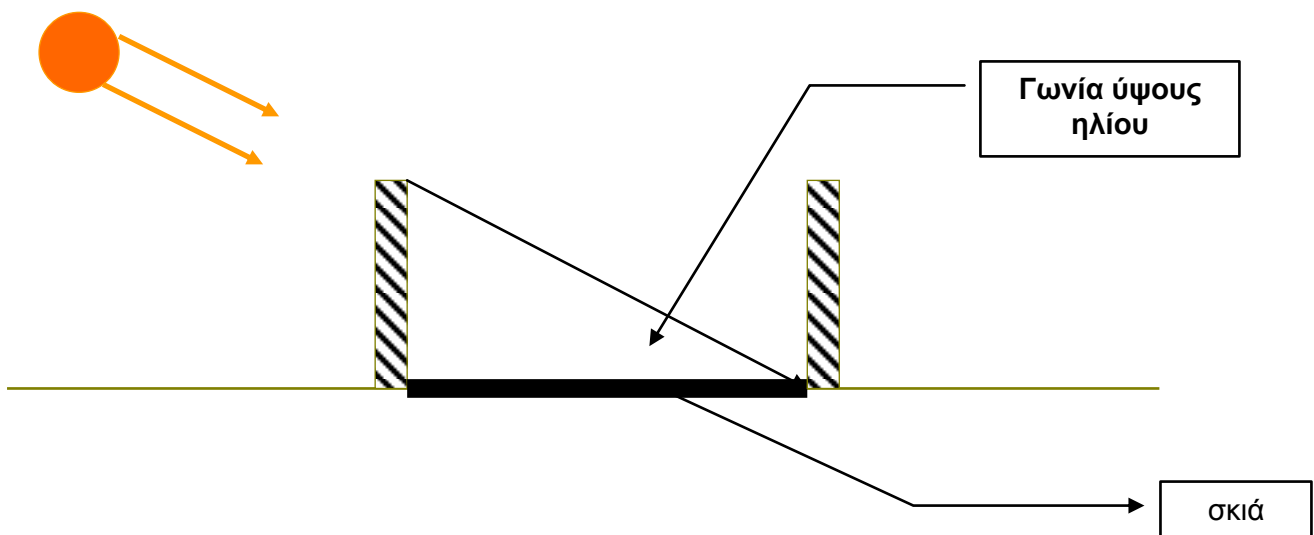
Σχήμα 2.8 Πλάγια όψη και κάτοψη της πορείας του ηλίου για μια αντιπροσωπευτική ημέρα του έτους. Από [3].

Εφαρμογή

Η εφαρμογές των παραπάνω είναι ιδιαίτερα σημαντικές τόσο στον υπολογισμό ηλιακών συστημάτων όσο και στη χωροθέτηση κτιρίων, στον βιοκλιματικό σχεδιασμό κ.λ.π.

Παράδειγμα

Σε ποια απόσταση πρέπει να χωροθετηθούν κτίρια ύψους 20 μέτρων σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος 40° ώστε κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο να μην σκιάζονται για τουλάχιστον 4 ώρες/ημέρα.



Η ηλιακή ακτινοβολία.

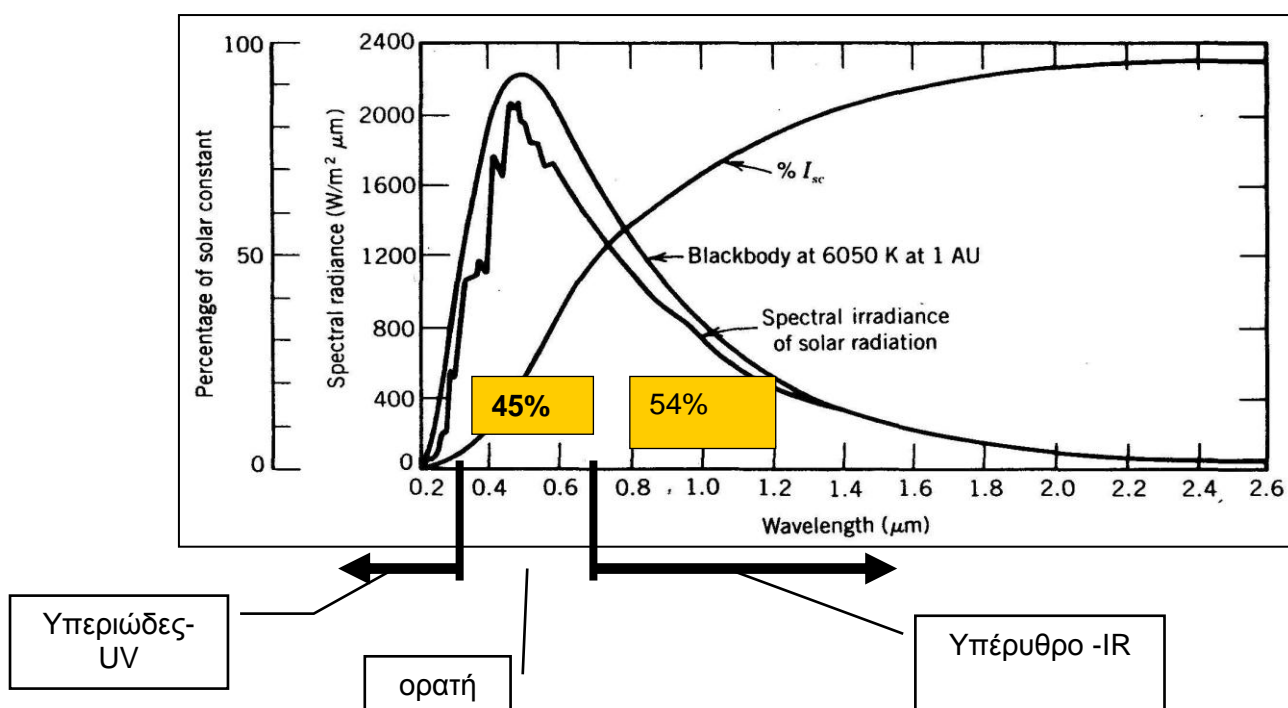
Γενικά

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ηλιακή ακτινοβολία φθάνει στη γή -έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα- σε μια ένταση η οποία εξαρτάται μόνον από την απόσταση γής-ηλίου. Η ένταση αυτή είναι περίπου 1367 W/m^2 και ονομάζεται ηλιακή σταθερά.

Θα μελετήσουμε την ηλιακή ακτινοβολία πρώτα έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα και μετά θα δούμε τις επιπτώσεις της ατμόσφαιρας μέχρις ότου η ηλιακή ακτινοβολία φθάσει στην επιφάνεια της γής.

Η ηλιακή ακτινοβολία έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα.

Η ηλιακή ακτινοβολία αμέσως έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα - σε απόσταση 1AU- αποτελεί τη βάση όλων των υπολογισμών οι οποίοι γίνονται για τον προσδιορισμό της προσπίπτουσας στην επιφάνεια της γης ακτινοβολίας. Η ηλιακή ακτινοβολία -1AU- περιλαμβάνει διάφορα μήκη κύματος το σύνολο των οποίων ονομάζεται φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.10.

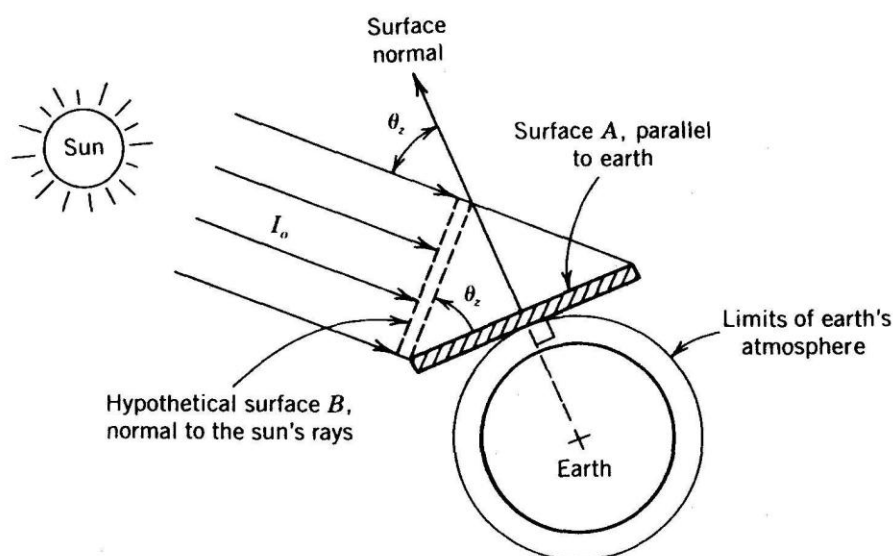


Σχήμα 2.10 Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας και η διαθέσιμη σε κάθε μήκος κύματος ενέργεια.

Από το σχήμα 2.10 φαίνεται ότι:

-Τα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας σε 1 AU ομοιάζουν με αυτά τα οποία εκπέμπει ένα μέλαν σώμα σε θερμοκρασία περίπου 6050°K σε απόσταση 1 AU.
 - το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας μεταφέρεται από τα ορατά μήκη κύματος -45% της συνολικής ενέργειας- και από την υπέρυθη -Infra Red/ IR-ακτινοβολία -54% της συνολικής ενέργειας-. Το υπεριώδες-Ultra Violet /UV- τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας μεταφέρει το υπόλοιπο 1% μόνον.
 Το σχήμα 2.10 παρουσιάζει το τυπικό φάσμα. Εννοείται ότι μικρές μεταβολές μπορεί να υφίστανται συνεχώς εξαιτίας των φαινομένων σύντηξης στον ήλιο, των κηλίδων κ.ο.κ.

Με βάση λοιπόν τη μέση τιμή της ηλιακής σταθεράς I_{sc} , μπορούμε να υπολογίσουμε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ηλίου αμέσως έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα. Αυτή η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας θα συμβολίζεται στα επόμενα ως I_0 .



Σχήμα 2.11 Για την κατανόηση του τρόπου ορισμού της I_0 .

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αμέσως έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ήλιου I_0 υπολογίζεται από τη σχέση.

$$I_0 = I_{sc} * [1 + 0,034 * \cos(360 * N / 365,25)] \quad \text{W/m}^2 \quad (2.8)$$

όπου N ο αριθμός της ημέρας του έτους για την οποία θέλουμε να υπολογίσουμε και I_{sc} η ηλιακή σταθερά. Από την I_0 μπορούμε να υπολογίσουμε την ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο με τη σχέση

$$I_{0, \text{horizontal}} = I_0 \cos \theta_z \quad (2.9)$$

όπου θ_z η γωνία ζενίθ του ηλίου.

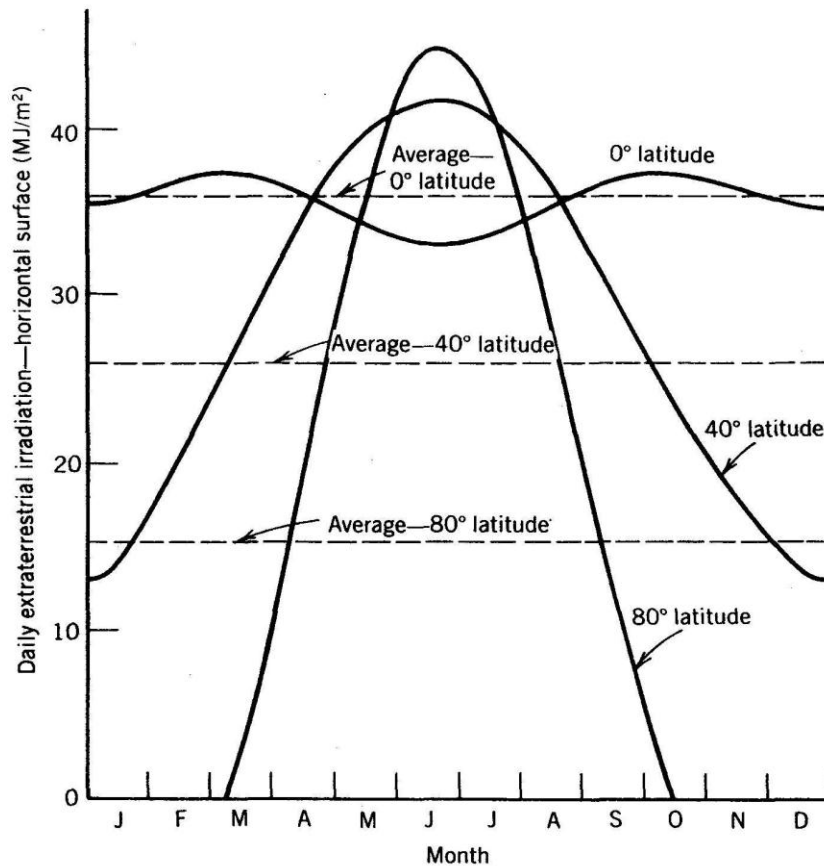
Η γωνία ζενίθ εξαρτάται από την ώρα και την ημέρα του έτους και υπολογίζεται σύμφωνα με αυτά που έχουν εκτεθεί στα παραπάνω.

Ολοκληρώνοντας τη σχέση από την ώρα της ανατολής μέχρι την ώρα της δύσης του ηλίου μπορούμε να υπολογίσουμε την συνολική ημερήσια ενέργεια από τον ήλιο η οποία προσπίπτει σε επιφάνεια παράλληλη με την επιφάνεια της γης. Το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης είναι :

$$H_{o,h} = (86400 * I_o / \pi) * (\omega_s \sin\phi \sin\delta + \cos\delta \cos\phi \sin\omega_s) \quad \text{J/m}^2 \quad (2.10)$$

όπου η γωνία δύσης του ηλίου ω_s έχει μονάδες ακτίνια και η ένταση I_o W/m^2

Η μελέτη της παραπάνω σχέσης παρέχει σημαντικά συμπεράσματα για την μεταβολή της ηλιακής ενέργειας στις διάφορες περιοχές της γης αν εξαιρούσαμε την επίπτωση της γήινης ατμόσφαιρας. Ας δούμε το παρακάτω σχήμα 2.12.



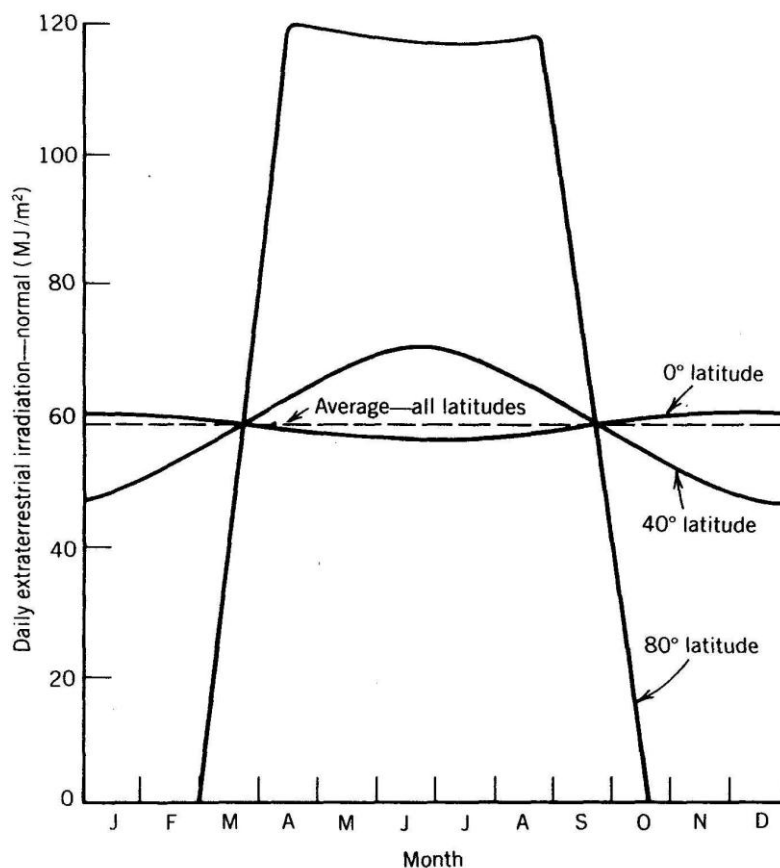
Σχήμα 2.12 Συνολική ημερήσια ηλιακή ενέργεια η οποία προσπίπτει σε επίπεδο παράλληλο με την επιφάνεια της γης αμέσως έξω από την γήινη ατμόσφαιρα. Βόρειο ημισφαίριο. Από το (3).

Στην περιοχή του Ισημερινού -0° γεωγραφικό πλάτος- η προσπίπτουσα ημερήσια ηλιακή ενέργεια είναι σχετικά σταθερή στη διάρκεια του έτους και από $33-37 \text{ MJ/m}^2$.

Σε γεωγραφικό πλάτος 40° η ετήσια διακύμανση μεγαλώνει και φθάνει σχεδόν τα 30 MJ/m^2 και ημέρα - $13-41 \text{ MJ/m}^2$.

Στους πόλους η διακύμανση αυτή αυξάνεται περισσότερο με μηδενισμό της ημερήσιας ηλιακής ενέργειας τον χειμώνα και αύξηση σε περίπου 45 MJ/m^2 και ημέρα το καλοκαίρι.

Εάν με κάποιο μηχανισμό μπορούσαμε να παρακολουθούμε τον ήλιο ώστε οι ακτίνες του να είναι συνεχώς κάθετες στο επίπεδο μέτρησης τότε τα αποτελέσματα θα διαμορφώνονταν όπως στο σχήμα 2.13.



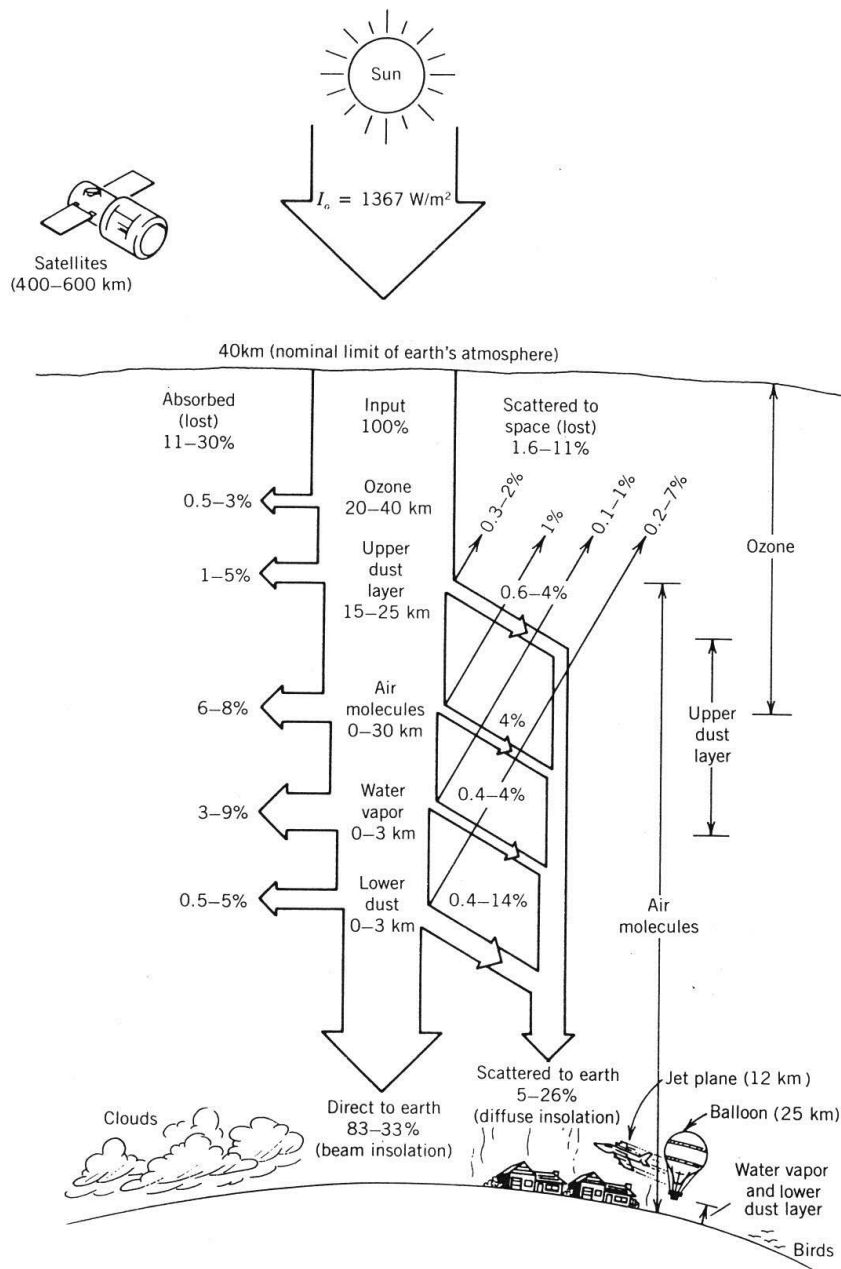
Σχήμα 2.13 Συνολική ημερήσια ηλιακή ενέργεια η οποία προσπίπτει σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ηλίου αμέσως έξω από την γήινη ατμόσφαιρα. Βόρειο ημισφαίριο. Από το (3).

Η ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης.

Αφού έχουμε μελετήσει την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα θα δούμε πως αυτή μεταβάλλεται καθώς προσεγγίζει την επιφάνεια της γης.

Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα αρχίζει η διαδικασία της σκέδασης και της απορρόφησης σημαντικού τμήματός της από τα μόρια της ατμόσφαιρας, τα ιπτάμενα σωματίδια, τους υδρατμούς κ.λ.π. Κατά μέσο όρο μια πολύ καθαρή ημέρα μόνον το 80% της ηλιακής ακτινοβολίας φθάνει στην επιφάνεια της γης ενώ σε μια συννεφιασμένη μέρα το ποσοστό αυτό μειώνεται ακόμα και στο 10%.

Στο παρακάτω σχήμα 2.14 φαίνεται η διαδικασία σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη γήινη ατμόσφαιρα.



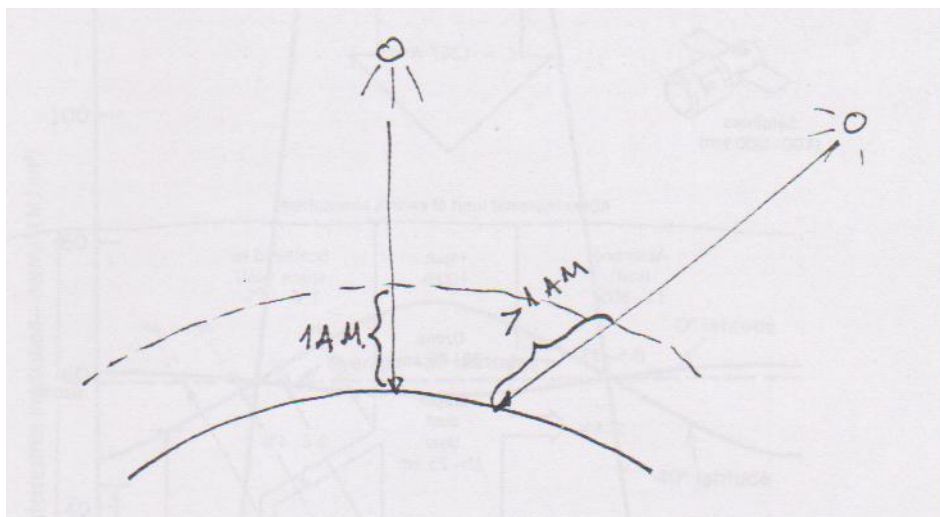
Σχήμα 2.14 Η απομείωση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διέλευσή της μέσα από τη γήινη ατμόσφαιρα. Από το (3).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.14 η ηλιακή ακτινοβολία φθάνει στην επιφάνεια της γης μέσω δύο συνιστωσών: της άμεσης και της έμμεσης ή διάχυτης ακτινοβολίας. Οι δύο συνιστώσες μαζί κάνουν την ολική ηλιακή ακτινοβολία.

Άμεση ηλιακή ακτινοβολία -Beam Irradiation- είναι αυτή που προέρχεται κατευθείαν από τον ήλιο

Έμμεση ή διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία -Diffused Irradiation- είναι αυτή η οποία προέρχεται από την ακτινοβολία η οποία έχει σκεδαστεί στην γήινη ατμόσφαιρα. Δεν έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση.

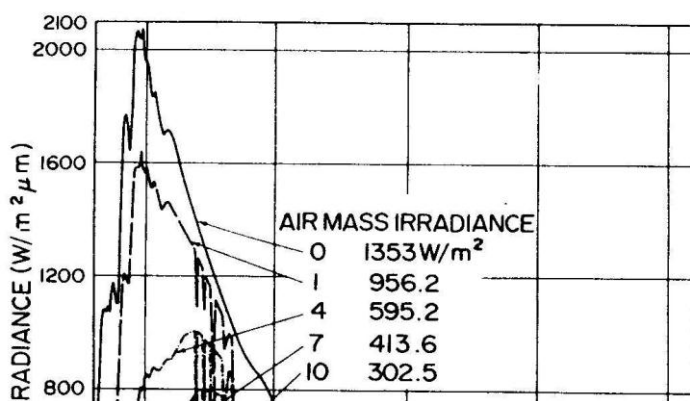
Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία διέρχεται μέσα από τη γήινη ατμόσφαιρα υφίσταται αλλαγές και το φάσμα της. Βέβαια ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων του ηλίου η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να διανύει μικρότερη ή μεγαλύτερη απόσταση μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα βλέπε σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15 Η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα από διαφορετικά πάχη γήινης ατμόσφαιρας.

Έτσι όταν έχουμε κάθετη πρόσπτωση των ακτίνων του ηλίου οι ακτίνες διανύουν την μικρότερη δυνατή απόσταση μέσα στην ατμόσφαιρα και τότε λέμε ότι οι ακτίνες διανύουν διαδρομή πάχους μιας ατμόσφαιρας -Air mass 1-. Αντίστοιχα μπορεί να διανυθεί απόσταση 1,5 ατμόσφαιρας 2 κ.ο.κ.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το τυπικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης όταν η ηλιακή ακτινοβολία διανύει 1 ή περισσότερες ατμόσφαιρες.

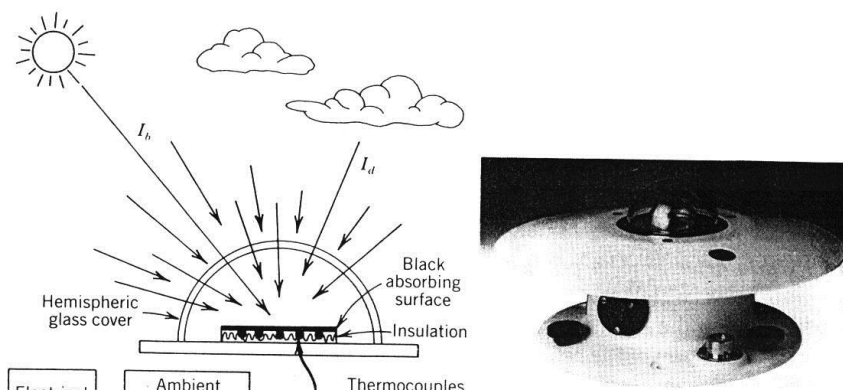


Σχήμα 2.16 Η επίπτωση της γήινης ατμόσφαιρας στο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Από το (3).

Μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γής.

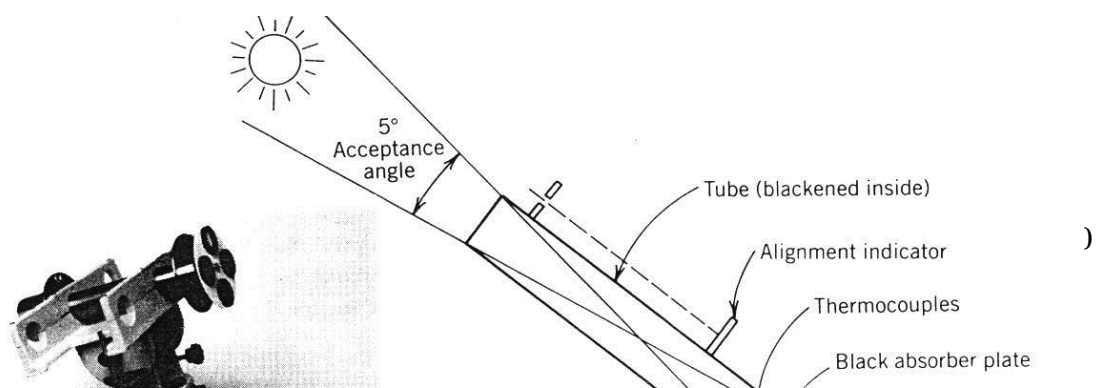
Για τη μέτρηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται διάφορα όργανα όπως τα πυρανόμετρα και τα πυρηλιόμετρα. Βασίζονται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο κατά το οποίο ορισμένα ζεύγη ημιαγωγών αναπτύσσουν διαφορά δυναμικού όταν εκτίθενται σε φως. Περισσότερα για το φαινόμενο αυτό θα αναπτυχθούν στο κεφάλαιο των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Στο παρακάτω σχήμα 2.17 φαίνεται ένα πυρανόμετρο. Το πυρανόμετρο μετράει την ολική ηλιακή ακτινοβολία ενώ αν προστεθεί η προστατευτική ταινία η οποία φαίνεται στο σχήμα και η οποία έχει τοποθετηθεί σε θέση τέτοια ώστε να κρύβει το δίσκο του ηλίου τότε μετράει μόνον τη έμμεση. Με δύο πυρανόμετρα -1 έμμεσης και ένα ολικής- μπορούμε να έχουμε την άμεση.



Σχήμα 2.17 μέτρηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας με πυρανόμετρο. Από [3].

Για την απευθείας μέτρηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας υπάρχουν τα πυρηλιόμετρα, βλέπε σχήμα 2.18.

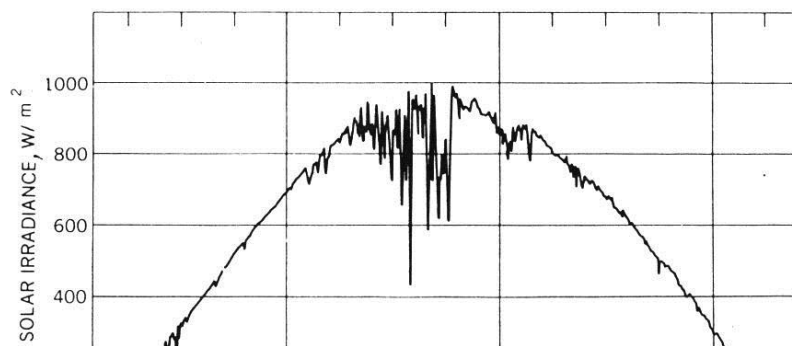


Σχήμα 2.18 μέτρηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας με πυρηλιόμετρο. Από [3].

Το πυρανόμετρο πρέπει με κατάλληλο μηχανισμό να παρακολουθεί και να στοχεύει στο δίσκο του ηλίου ώστε να έχει συνεχή ένδειξη.

Στο παρακάτω σχήμα 2.19 φαίνονται 2 καταγραφές από πυρανόμετρο για την ολική ηλιακή ακτινοβολία. Η πρώτη αφορά μια πολύ καθαρή ημέρα με λίγα σύννεφα κοντά στο ηλιακό μεσημέρι ενώ η δεύτερη καταγραφή αφορά μια συννεφιασμένη ημέρα στην οποία για κάποιες ώρες εμφανίζεται ο ήλιος.

Είναι αξιοπρόσεκτη η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και αξίζει να κάνει κανείς σκέψεις το πώς αυτές οι μεταβολές θα μπορούσαν να επηρεάσουν την απόδοση ενός ηλιακού ενεργειακού συστήματος.



Σχήμα 2.19 πραγματικές καταγραφές ολικής ηλιακής ακτινοβολίας από πυρανόμετρο. Από [3].

Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης.

Ο υπολογισμός της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης είναι ιδιαίτερα σημαντικός διότι έτσι προσδιορίζεται η διαθέσιμη ενεργειακή πηγή κατά τη μελέτη ενός ηλιακού συστήματος.

Για τον υπολογισμό της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες υπολογισμού -μοντέλα- από τα οποία θα επικεντρωθούμε σε αυτό των Hottel (1976) και Liu & Jordan (1960).

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό η ένταση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ηλίου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$I_{b,n} = I_o * (\alpha_o + \alpha_1 e^{-k(1/\cos\theta z)}) \quad (W/m^2) \quad (2.11)$$

ενώ η έμμεση ηλιακή ακτινοβολία μια καθαρή ημέρα σε οριζόντιο επίπεδο μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$I_{d,h} = I_o * \cos\theta_z * [0,2710 - 0,2939 * (\alpha_o + \alpha_1 e^{-k(1/\cos\theta_z)})] \quad (W/m^2) \quad (2.12)$$

Επομένως η συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο είναι:

$$I_{t,h} = I_{b,n} * \cos\theta_z + I_{d,h} \quad (W/m^2) \quad (2.13)$$

Οι συντελεστές α και k των προηγούμενων σχέσεων παίρνουν τιμές ανάλογα με την ποιότητα της ατμόσφαιρας.

Για καθαρή ατμόσφαιρα –ορατότης 23 km στο επίπεδο της θάλασσας- είναι:

$$\alpha_o = 0,4237 - 0,00821 * (6-A)^2 \quad (2.14)$$

$$\alpha_1 = 0,5055 + 0,00595 * (6,5-A)^2 \quad (2.15)$$

$$k = 0,2711 + 0,01858 * (2,5-A)^2 \quad (2.16)$$

Όπου το A είναι το υψόμετρο σε km

Για αστική ατμόσφαιρα –ορατότης 5 km στο επίπεδο της θάλασσας- είναι:

$$\alpha_o = 0,2538 - 0,0063 * (6-A)^2 \quad (2.17)$$

$$\alpha_1 = 0,7678 + 0,0010 * (6,5-A)^2 \quad (2.18)$$

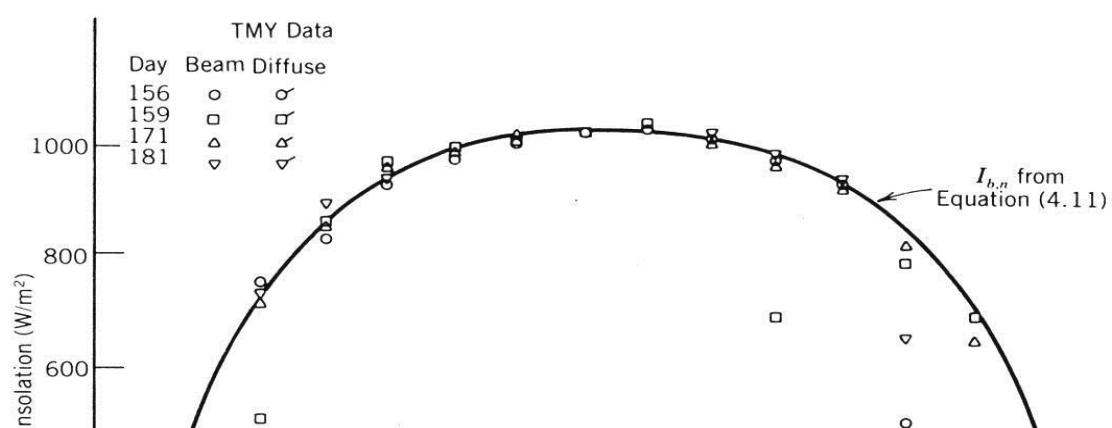
$$k = 0,249 + 0,081 * (2,5-A)^2 \quad (2.19)$$

Όπου το A είναι το υψόμετρο σε km

Αξιοπιστία του μοντέλου του Hottel.

Έχουν γίνει διάφορες εργασίες για την αιολόγηση του μοντέλου του Hottel. Ένα σχηματικό παράδειγμα που συγκρίνει τα αποτελέσματα των υπολογισμών του μοντέλου με αυτά μετρήσεων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Στο σχήμα αυτό φαίνεται ότι υπάρχει αρκετή συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των υπολογισμών και αυτών των μετρήσεων. Βέβαια η γραμμή η οποία δίνει τα αποτελέσματα του μοντέλου του Hottel δεν έχει τη πραγματική της μορφή η οποία είναι αυτή που φαίνεται στο επόμενο σχήμα



Σχήμα 2.20 Σύγκριση υπολογισμών του μοντέλου του Hottel και μετρήσεων.
Σχήμα 2.20 Μετρήσεις και υπολογισμοί από το μοντέλο Hottel. Από [3].

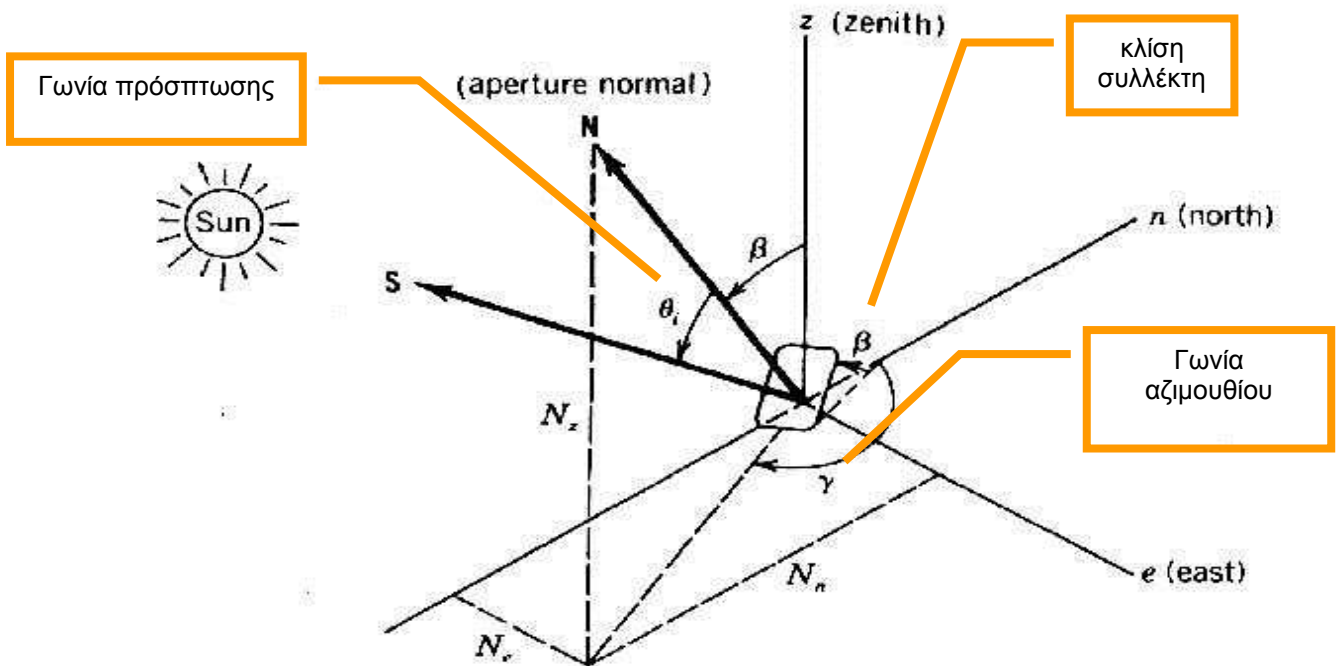
Συλλέγοντας την ηλιακή ενέργεια

Γενικά

Έχοντας δει τους τρόπους υπολογισμού της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο είναι χρήσιμο να δούμε πως μπορούμε να υπολογίσουμε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία προσπίπτει σε μια επιφάνεια ηλιακού συλλέκτη τυχαίου προσανατολισμού. Έτσι θα μπορούμε να υπολογίσουμε την παρεχόμενη από τον ήλιο ενέργεια σε κάποιο σύστημα συλλογής της ηλιακής ενέργειας και ακόμα τον βέλτιστο προσανατολισμό του συστήματος αυτού.

Προσανατολισμός της επιφάνειας του συλλέκτη και ορισμοί.

Στο παρακάτω σχήμα 2.22 φαίνεται η επιφάνεια ενός ηλιακού συλλέκτη στο χώρο καθώς και οι σχετικές παράμετροι προσδιορισμού της θέσης του ήλιου και του προσανατολισμού της επιφάνειας.



Σχήμα 2.22 Ονοματολογία των παραμέτρων προσανατολισμού επιφάνειας συλλέκτη.

Η γωνία πρόσπτωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos\theta_i = \cos\beta (\sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega) - \cos\delta \sin\omega \sin\beta \sin\gamma + \sin\beta \cos\gamma (\sin\delta \cos\varphi - \cos\delta \cos\omega \sin\varphi) \quad (2.20)$$

Σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά. Τέτοια περίπτωση είναι αυτή κατά την οποία ο συλλέκτης είναι προσανατολισμένος προς το νότο. Στην περίπτωση αυτή η σχέση η οποία δίνει την γωνία πρόσπτωσης γίνεται:

$$\cos\theta_i = \sin\alpha \cos\beta - \cos\alpha \sin\beta \cos\Lambda \quad (2.21)$$

Έχοντας υπολογίσει τη γωνία πρόσπτωσης της κεκλιμένης επιφάνειας σε σχέση με τις ακτίνες του ηλίου η άμεση ηλιακή ακτινοβολία στην κεκλιμένη αυτή επιφάνεια προκύπτει από την ηλιακή ακτινοβολία σε επιφάνεια κάθετη ως προς τις ακτίνες του ηλίου μέσω της παρακάτω σχέσης.

$$I_{b,a} = I_{b,n} \cos \theta_i \quad (W/m^2) \quad (2.22)$$

Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε μια κεκλιμένη επιφάνεια προκύπτει από το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας. Έχοντας υπολογίσει τη διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια μπορούμε να υπολογίσουμε τη διάχυτη ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια λαμβάνοντας υπόψη και την ανάκλαση από το περιβάλλον (συντελεστής ρ) μέσω του δεύτερου παράγοντα της παρακάτω σχέσης. Έτσι με την παρακάτω σχέση υπολογίζεται η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια.

$$I_{t,a} = I_{b,n} \cos \theta_i + \left[I_{d,h} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho I_{t,h} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right] \quad (W / m^2) \quad (2.23)$$

Η συνολική προσπίπτουσα ενέργεια ηλιακής ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια κατά τη διάρκεια μίας ημέρας προκύπτει από την στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια ολοκληρώνοντας στη διάρκεια της ημέρας –από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου–

$$H_{b,a} = \int_{\text{sunrise}}^{\text{sunset}} I_{b,a} dt \quad (J / m^2) \quad (2.24)$$

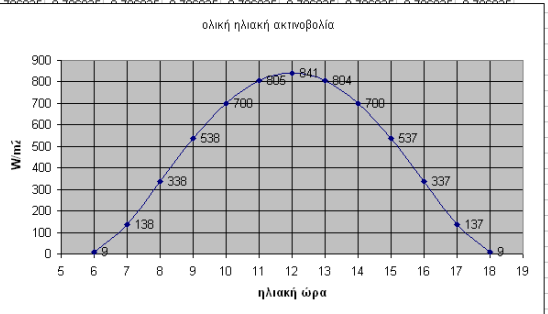
Με τον ίδιο τρόπο προκύπτει η συνολική ετήσια προσπίπτουσα ενέργεια στην επιφάνεια.

Ο συντελεστής ρ παίρνει τιμές από 0 -για μια τοποθεσία όπου το περιβάλλον του συλλέκτη είναι πλήρως απορροφητικό ως προς την άμεση ηλιακή ακτινοβολία μέχρι 1 όταν ο συλλέκτης είναι τοποθετημένος πάνω σε ταράτσα με 100% αποδοτικό καθρέπτη. Συνήθως μια τιμή 0,3-0,5 είναι κατάλληλη για δώματα από μπετόν ανοιχτού φαιού χρώματος ή για χρώμα.

Εφαρμογή.

Είναι χρήσιμο να προγραμματίσει ο φοιτητής τις σχέσεις υπολογισμού της θέσης του ήλιου και τη μεθοδολογία υπολογισμού του μοντέλου του Hottel σε υπολογιστικό φύλλο. Μπορεί έτσι να διαπιστώσει την επίπτωση των διαφόρων παραμέτρων π.χ. ημέρα και ώρα του έτους, στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το αποτέλεσμα αυτής της εργασίας φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.

Υπολογισμός θέσης του ηλίου και ηλιακής ακτινοβολίας ΚΑΘΑΡΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ												
ΔΕΔΟΜΕΝΑ												
ηλιακή σταθερά	W/m2	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367
γεωγραφικό πλάτος φ	ο	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
ημέρα έτους N		90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
ηλιακή ώρα		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
απόσταση από την θάλασσα	km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
κλίση επιφάνειας γ	ο	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
αζιμουθια επιφάνειας γ	ο	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
παράγοντας ρ για συνυπολογισμό διάχυτης ακτ		-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
cos β		0,70738827	0,707388	0,707388	0,707388	0,707388	0,707388	0,707388	0,707388	0,707388	0,707388	0,707388
sin β		0,70682518	0,706825	0,706825	0,706825	0,706825	0,706825	0,706825	0,706825	0,706825	0,706825	0,706825
sin γ		0,00159265	0,001593	0,001593	0,001593	0,001593	0,001593	0,001593	0,001593	0,001593	0,001593	0,001593
cos γ		-0,9999987	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
ηλιακή απόκλιση δ	ο	3,54290216	3,542902	3,542902	3,542902	3,542902	3,542902	3,542902	3,542902	3,542902	3,542902	3,542902
γωνία ώρας ω	ο	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60
cos φ		0,76627189	0,766272	0,766272	0,766272	0,766272	0,766272	0,766272	0,766272	0,766272	0,766272	0,766272
cos ω		0,00079633	0,25946	0,50046	0,707388	0,866025	0,980974	1,000000	0,980974	0,866025	0,707388	0,50046
cos δ		0,99809074	0,998091	0,998091	0,998091	0,998091	0,998091	0,998091	0,998091	0,998091	0,998091	0,998091
sin δ		0,06176462	0,061765	0,061765	0,061765	0,061765	0,061765	0,061765	0,061765	0,061765	0,061765	0,061765
sin φ		0,64251645	0,642516	0,642516	0,642516	0,642516	0,642516	0,642516	0,642516	0,642516	0,642516	0,642516
tan δ		0,06188277	0,061883	0,061883	0,061883	0,061883	0,061883	0,061883	0,061883	0,061883	0,061883	0,061883
tan φ		0,83849669	0,838497	0,838497	0,838497	0,838497	0,838497	0,838497	0,838497	0,838497	0,838497	0,838497
sin ω		-0,9999997	-0,96575	-0,86576	-0,70683	-0,50000	-0,25946	0,00000	0,25946	0,50000	0,70683	0,86576
γωνία ύψους ηλίου α	ο	2,31046249	13,78272	25,00146	35,51791	44,42701	51,34019	55,90327	57,66442	56,16442	51,76442	44,82701
cos α		0,99918787	0,971235	0,906391	0,814116	0,699090	0,563815	0,412614	0,250000	0,087386	-0,087386	-0,250000
γωνία αζιμουθίου του ηλίου Α	ο	87,3589602	97,09063	107,6245	120,0002	133,90327	148,00000	161,90327	175,00000	186,09673	193,90327	198,00000
γωνία ώρας ανατολής και δύσης ηλίου ωs	ο	93,0214957	93,02149	93,02149	93,02149	93,02149	93,02149	93,02149	93,02149	93,02149	93,02149	93,02149
ώρες ηλιοφάνειας		12,4028648	12,40286	12,40286	12,40286	12,40286	12,40286	12,40286	12,40286	12,40286	12,40286	12,40286
ώρα ανατολής του ηλίου		5,79856762	5,798568	5,798568	5,798568	5,798568	5,798568	5,798568	5,798568	5,798568	5,798568	5,798568
ηλ. Ακτ. Ι ₀ σε οριζ. Επ. έξω από την ατμόσφαιρα W/m2		1368,09577	1368,096	1368,096	1368,096	1368,096	1368,096	1368,096	1368,096	1368,096	1368,096	1368,096
παράγοντας α ₀		0,12614	0,12614	0,12614	0,12614	0,12614	0,12614	0,12614	0,12614	0,12614	0,12614	0,12614
παράγοντας α ₁		0,7568875	0,756888	0,756888	0,756888	0,756888	0,756888	0,756888	0,756888	0,756888	0,756888	0,756888
παράγοντας κ		0,387225	0,387225	0,387225	0,387225	0,387225	0,387225	0,387225	0,387225	0,387225	0,387225	0,387225
γωνία ζενίθ του ηλίου θz	ο	87,6895375	76,21728	64,99854	54,48209	45,37922	38,85431	36,41145	38,85431	45,37922	54,48209	64,99854
cos θz		0,04108949	0,238895	0,423162	0,58135	0,702697	0,778959	0,804966	0,778959	0,702697	0,58135	0,423162



Σχήμα 2.21 Υπολογισμός της ακτινοβολίας και της θέσης του ήλιου σε υπολογιστικό φύλλο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Φωτοβολταικά.

Εισαγωγή.

Με τα φωτοβολταικά -Φ/Β- μετατρέπεται απευθείας η ηλιακή ενέργεια και γενικά το φώς σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η μετατροπή αυτή εξηγείται σε ένα βαθμό από τη θεωρία των ημιαγωγών και δεν θα επεκταθούμε εδώ περισσότερο. Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να ανατρέξει στη σχετική βιβλιογραφία, [4,5].

Το αποτέλεσμα του φωτοβολταικού φαινομένου είναι η εμφάνιση μιας διαφοράς δυναμικού -τάσης- στα άκρα του Φ/Β στοιχείου. Αυτή η διαφορά δυναμικού μπορεί να αξιοποιηθεί και να δημιουργήσει ηλεκτρικό ρεύμα και επομένως ηλεκτρική ισχύ.

Το Φωτοβολταικό φαινόμενο είναι γνωστό εδώ και χρόνια. Φ/Β στοιχεία είχαν κατασκευαστεί ήδη από τη δεκαετία του 1930 όμως η εξέλιξή τους και η εφαρμογή τους ξεκίνησε από την προσπάθεια χρήσης τους ως πηγή ενέργειας σε δορυφόρους για να φθάσει τη δεκαετία του 1990 να γενικευθεί η χρήση τους ως πηγές ενέργειας σε απομακρυσμένες καταναλώσεις ενώ εδώ και 10 χρόνια έχουν ξεκινήσει να υλοποιούνται εφαρμογές ΦΒ για κεντρικούς σταθμούς παραγωγής ηλ. Ενέργειας διασυνδεδεμένους με το ηλεκτρικό δίκτυο όλο και μεγαλύτερης ισχύος –μέχρι 10-15 MWrel-.

Ονοματολογία και κατασκευή ΦΒ στοιχείων

Συνήθως αυτό το οποίο βλέπουμε π.χ. φωτογραφία 3.1 λέγεται φωτοβολταικός συλλέκτης. Ο ΦΒ συλλέκτης έχει τη μορφή ενός πλαισίου. Αποτελείται από ένα υαλοπίνακα κάτω από τον οποίο έχουν προσαρμοσθεί τα ΦΒ στοιχεία, εικόνα 3.2, συνδεδεμένα μεταξύ τους. Κατόπιν ένα φύλλο συνθετικού υλικού έχει καλύψει τα ΦΒ στοιχεία και τις συνδέσεις τους δημιουργώντας ένα περικλειστο με τον υαλοπίνακα και αφήνοντας έξω μόνον τους ακροδέκτες σύνδεσης του ΦΒ συλλέκτη. Έτσι τα ευαίσθητα ΦΒ στοιχεία είναι προστατευμένα από τις καιρικές συνθήκες. Η όλη κατασκευή τοποθετείται μέσα σε ένα πλαίσιο το οποίο προσδίδει στιβαρότητα και προστασία.

Για την κατασκευή των Φ/Β στοιχείων χρησιμοποιούνται ενώσεις και μορφές του πυριτίου ή άλλων ημιαγωγών. Η έρευνα στο συγκεκριμένο χώρο είναι εντατική για να καταστεί δυνατή η κατασκευή στοιχείων χαμηλότερου κόστους ή/και μεγαλύτερης απόδοσης σε ηλ. Ενέργεια. Σήμερα τα ΦΒ στοιχεία κατασκευάζονται συνήθως από μια μορφοποιημένη μπάρα πυριτίου το οποίο μπορεί να είναι είτε μονοκρυσταλικό είτε

πολυκρυσταλικό. Η μπάρα αυτή κόβεται με τη βοήθεια λέιζερ σε λεπτές φέτες οι οποίες αποτελούν τη βάση του ΦΒ στοιχείου.

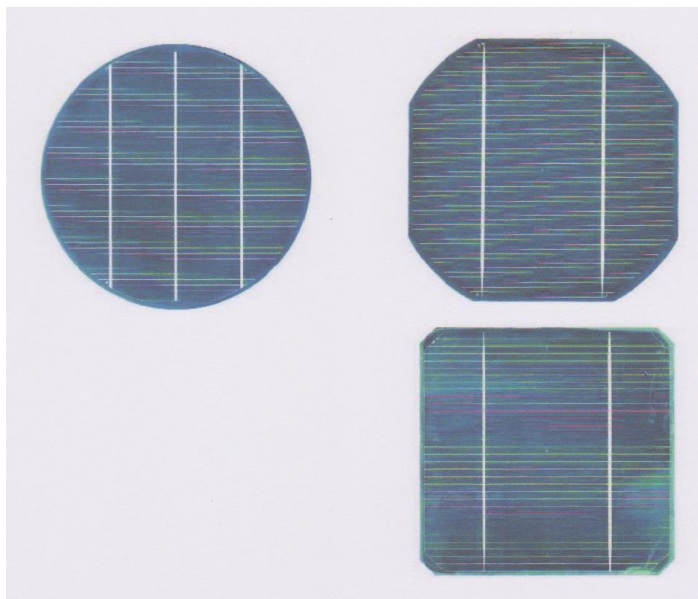


Σχήμα 3.1 Φ/Β συλλέκτες.

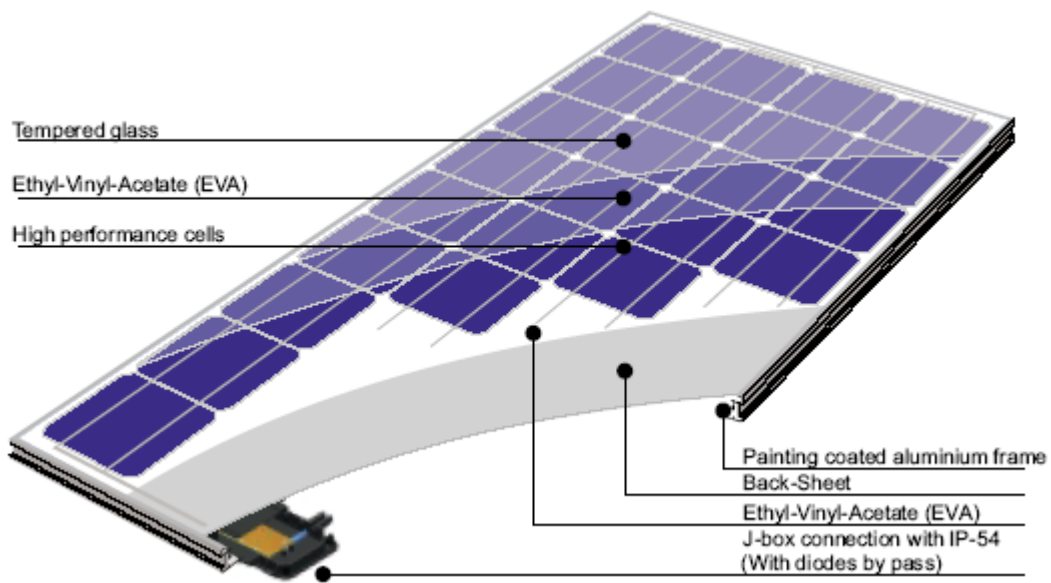
Στις φέτες αυτές γίνεται επίστρωση ενός μονωτικού υλικού και τοποθετούνται οι ακροδέκτες μεταφοράς της τάσης οι οποίοι είναι λεπτά συρματάκια τα οποία καταλήγουν στους ακροδέκτες του ΦΒ στοιχείου.

Τα Φ/Β στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους μέσω των ακροδεκτών και φτιάχνουν τους Φ/Β συλλέκτες.

Πολλοί Φ/Β συλλέκτες συνδεδεμένοι μεταξύ τους φτιάχνουν τα πεδία Φ/Β συλλεκτών. -εικόνα 3.4-.



Σχήμα 3.2 Φ/Β στοιχεία



Σχήμα 3.3 τομή φωτοβολταϊκού συλλέκτη.



Σχήμα 3.4 Πεδίο ΦΒ συλλεκτών σε ΦΒ σταθμό

Απόδοση του Φ/Β στοιχείου

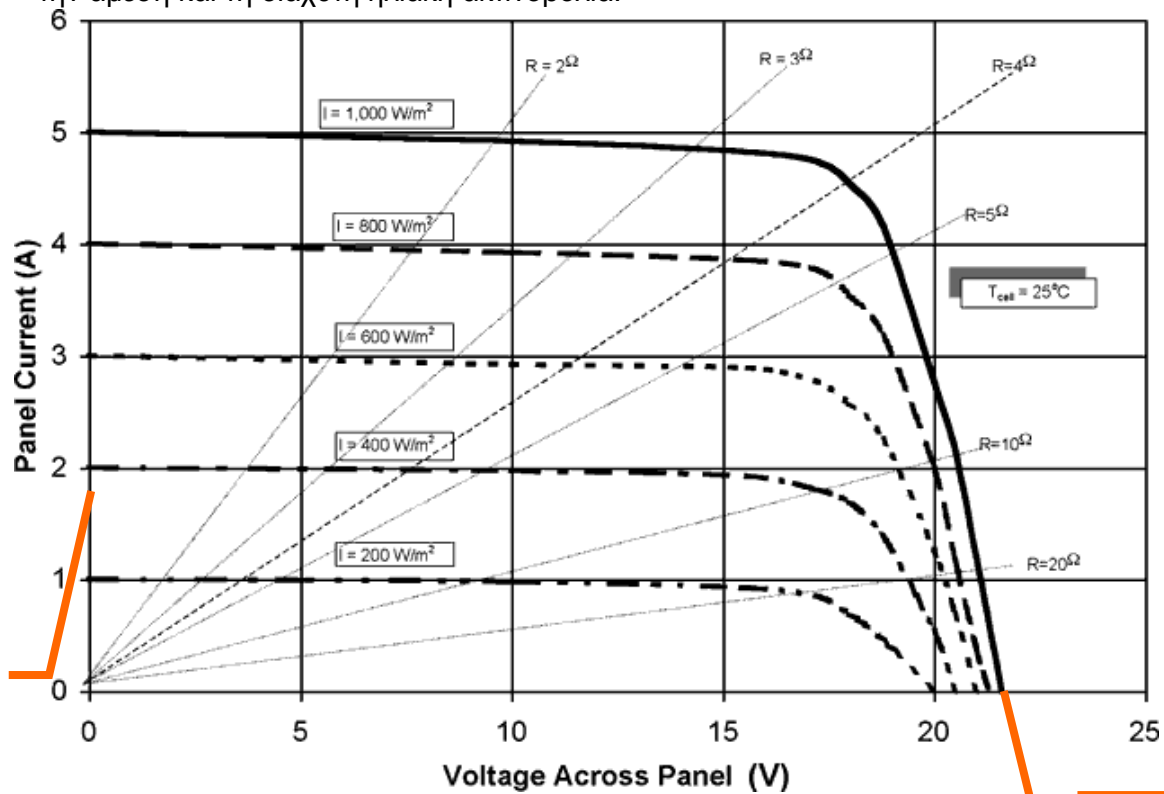
Ως απόδοση του Φ/Β στοιχείου εννοούμε το λόγο της ωφέλιμης ηλ. ισχύος που παίρνουμε στην έξοδο ενός Φ/Β στοιχείου προς την προσπίπτουσα στην επιφάνειά του ολική φωτεινή ισχύ -άμεση ηλιακή ακτινοβολία+ διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία –

$$\eta = P_{el}/I_{tot} \quad (3.1)$$

Η απόδοση του Φ/Β στοιχείου σε ισχύ είναι συνάρτηση εκτός των υλικών κατασκευής, του μεγέθους των στοιχείων και της μεταξύ τους συνδεσμολογίας -παράλληλη ή εν σειρά συνδεσμολογία.

Συμπεριφορά Φ/Β συλλέκτη

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η συμπεριφορά ενός τυπικού ΦΒ συλλέκτη σε διάφορες τιμές έντασης ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Τα ΦΒ στοιχεία αξιοποιούν και την άμεση και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 3.5 Τυπική χαρακτηριστική απόδοσης ΦΒ συλλέκτη.

Το σχήμα δείχνει ότι

- Αυξανόμενη της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνεται -για την ίδια τάση στα άκρα του συλλέκτη- η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο παράγει ο συλλέκτης.
- Για μηδενική τάση –ενωμένοι ακροδέκτες- ο συλλέκτης παράγει τη μεγαλύτερη του ένταση για μια δοσμένη ακτινοβολία. Η ένταση αυτή είναι χαρακτηριστική του συλλέκτη και ονομάζεται ένταση βραχυκύκλωσης –Isc- short circuit-. Η ένταση αυτή είναι ανάλογη της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Για μηδενική ένταση –ακροδέκτες σε ανοιχτό κύκλωμα- ο συλλέκτης παράγει τη μεγαλύτερη του τάση για μια δοσμένη ακτινοβολία. Η τάση αυτή είναι χαρακτηριστική του συλλέκτη και ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος –Voc- open circuit-. Η τάση αυτή αυξάνεται λίγο και όχι αναλογικά με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Για μια συγκεκριμένη τιμή ακτινοβολίας η ένταση την οποία παράγει ο συλλέκτης παραμένει σχεδόν σταθερή αυξανόμενη της τάσεως μέχρι ενός σημείου όπου αρχίζει απότομη πτώση της παραγόμενης έντασης. Κοντά στο σημείο αυτό ο συλλέκτης έχει και το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης.

Πολλοί κατασκευαστές αντί να δώσουν την πλήρη εικόνα του βαθμού απόδοσης όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα 3.5 δίδουν μόνον τις τιμές της έντασης βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος. Κατόπιν θεωρούνε ότι η καμπύλη απόδοσης προκύπτει από τις κάθετες ευθείες στους άξονες τάσης και έντασης στα σημεία αυτά.

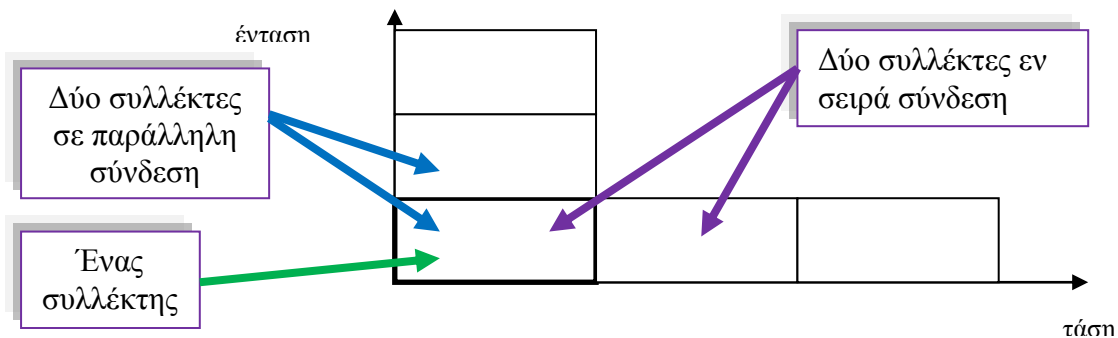
Παράλληλη και εν σειρά σύνδεση ΦΒ συλλεκτών.

Οι ΦΒ συλλέκτες όταν συνδέονται εν σειρά ή εν παραλλήλω συμπεριφέρονται όπως οι πηγές συνεχούς ρεύματος.

Στην εν σειρά σύνδεση μια συστοιχία ομοίων συλλεκτών παράγει σε σχέση με τον ένα συλλέκτη ίδια ένταση ρεύματος ενώ η παραγόμενη τάση πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των συλλεκτών.

Στην παράλληλη σύνδεση μια συστοιχία ομοίων συλλεκτών παράγει σε σχέση με τον ένα συλλέκτη ίδια τάση ρεύματος ενώ η παραγόμενη ένταση πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των συλλεκτών.

Τα παραπάνω φαίνονται σχηματικά παρακάτω.



Σχήμα 3.6 Επίπτωση της παράλληλης και εν σειρά σύνδεσης ΦΒ συλλεκτών.

Η συμπεριφορά ενός Φ/Β στοιχείου είναι παρόμοια με τη διαφορά ότι η παραγόμενη τάση στα άκρα του στοιχείου είναι πολύ μικρότερη: ένα σύνηθες Φ/Β στοιχείο δημιουργεί τάση ανοιχτού κυκλώματος περίπου 0,55 volts. Επομένως πρέπει να συνδεθούν περίπου 36 Φ/Β στοιχεία για να δημιουργηθεί συλλέκτης με $V_{oc} = 20$ V.

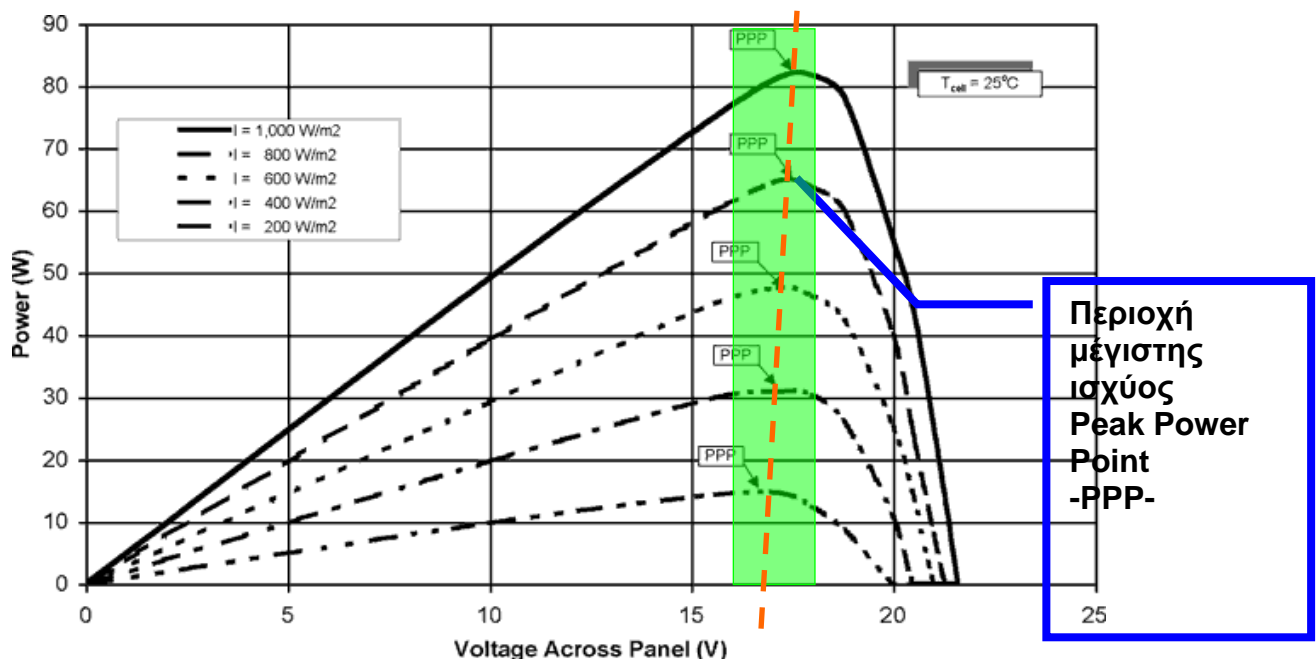
Σήμερα στην αγορά υπάρχουν συλλέκτες με τάση ανοιχτού κυκλώματος η οποία μπορεί να φθάσει και τα 100 Volt.

Παραγόμενη ισχύς από Φ/Β συλλέκτη

Το ΦΒ φαινόμενο παράγει συνεχή τάση. Έτσι η ισχύς μιάς ΦΒ πηγής προκύπτει από το γινόμενο

$$P=V \cdot I$$

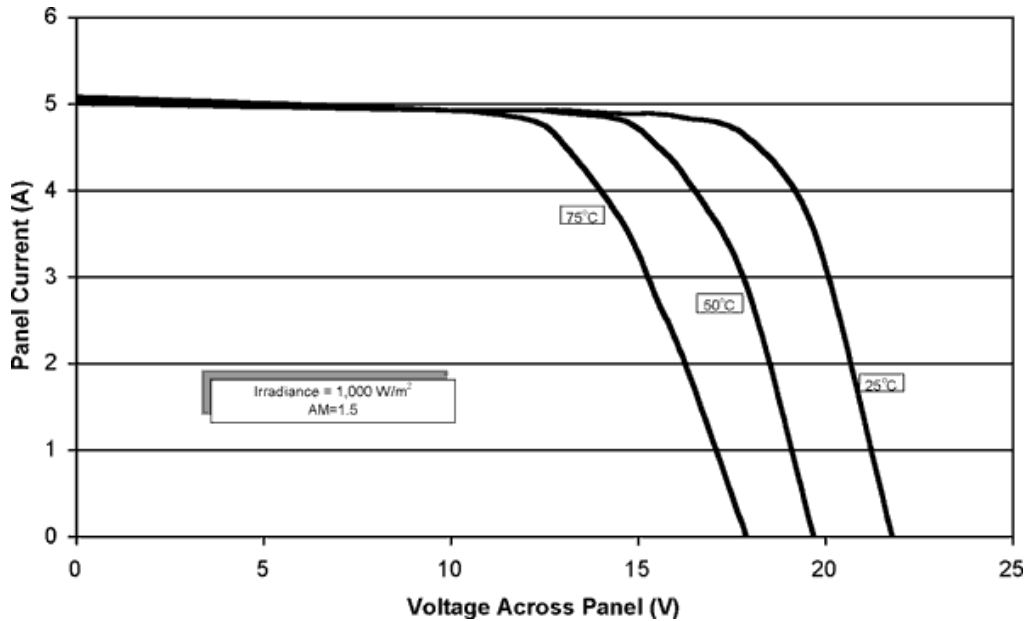
Στο παρακάτω σχήμα 3.7 φαίνεται η τυπική χαρακτηριστική ισχύος ενός ΦΒ συλλέκτη. Στο σχήμα φαίνεται και η περιοχή μέγιστης απόδοσης και ισχύος.



Σχήμα 3.7 Τυπική χαρακτηριστική ισχύος ΦΒ συλλέκτη.

Επίπτωση της θερμοκρασίας στην απόδοση των Φ/Β.

Αυξανόμενη της θερμοκρασίας των υλικών του συλλέκτη μεταβάλλεται και η απόδοση ενός ΦΒ στοιχείου και επομένως και του ΦΒ συλλέκτη. Στο παρακάτω σχήμα 3.8 φαίνεται η τυπική μεταβολή της χαρακτηριστικής ενός ΦΒ συλλέκτη με την αύξηση της θερμοκρασίας του.



Σχήμα 3.8 Τυπική μεταβολή της χαρακτηριστικής ισχύος ΦΒ συλλέκτη με την αύξηση της θερμοκρασίας του συλλέκτη.

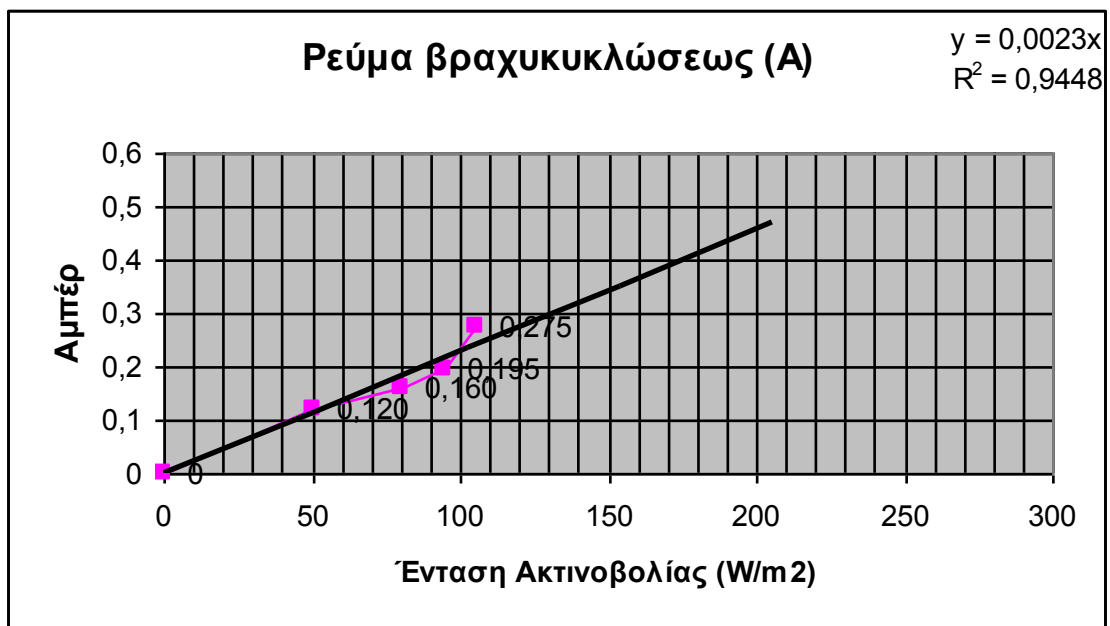
Στην πράξη η επίπτωση της θερμοκρασίας προσδιορίζεται από τους κατασκευαστές με το συντελεστή πτώσης της V_{oc} / $^{\circ}C$ αύξησης της θερμοκρασίας του συλλέκτη. Για παράδειγμα συντελεστής 0,2 Volt/ $^{\circ}C$ σημαίνει ότι για 10 $^{\circ}C$ αύξηση της θερμοκρασίας του συλλέκτη θα έχουμε πτώση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος 2 Volt. Οι περισσότεροι κατασκευαστές δίδουν τις αποδόσεις των ΦΒ συλλεκτών τους για συνθήκες 1,5 AM και 25 $^{\circ}C$.

Μετρήσεις απόδοσης ΦΒ συλλεκτών.

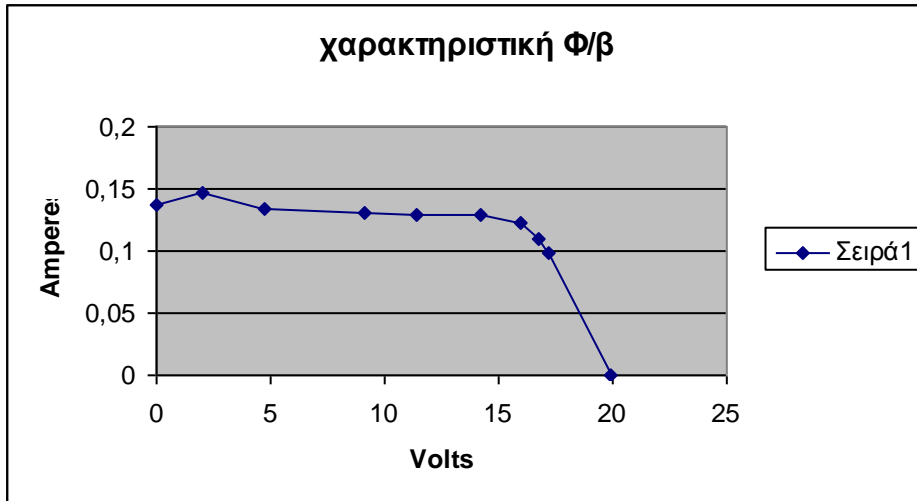
Η μέτρηση της απόδοσης των ΦΒ συλλεκτών γίνεται με βάση ορισμένα πρότυπα πχ. [6].

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων μετρούνται η παραγόμενη τάση και ένταση ενός συλλέκτη σε γνωστές συνθήκες ακτινοβολίας ώστε να προκύψει ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται στοιχεία από πραγματικές μετρήσεις.





Σχήμα 3.9 Τυπικές χαρακτηριστικές μετρήσεις σε ΦΒ συλλέκτη.



Σχήμα 3.10 Τυπική χαρακτηριστική απόδοσης ΦΒ συλλέκτη σε πραγματικές συνθήκες πεδίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες.

Εισαγωγή.

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες αποτελούν την πλέον συνήθη εφαρμογή για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ωφέλιμη θερμότητα.

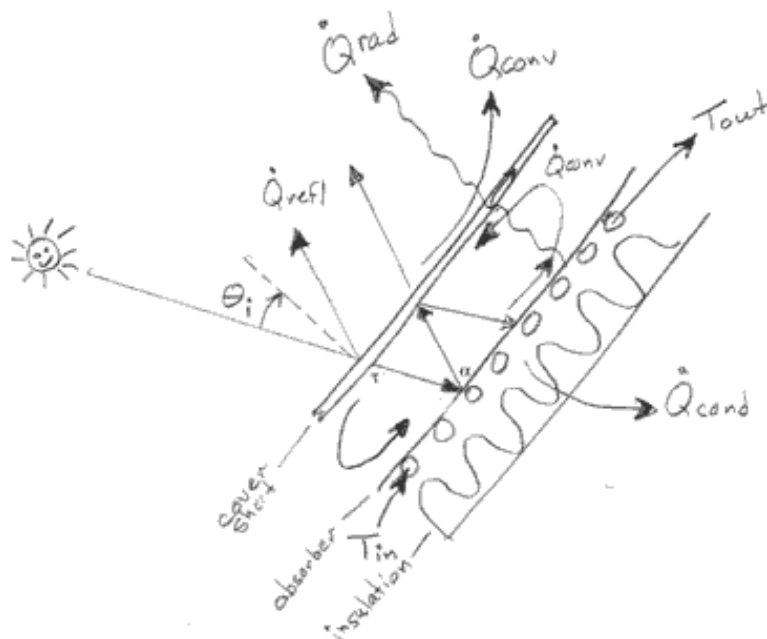
Η χρήση τους ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970 μετά την πετρελαική κρίση του 1973 και σιγά-σιγά εξαπλώθηκε ώστε σε μεγάλο βαθμό να χρησιμοποιούνται για την παραγωγή θερμού νερού χρήσης σε χώρες με σημαντική ηλιακή ακτινοβολία όπως οι μεσογειακές.

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία για να θερμάνουν ένα θερμικό μέσο π.χ. νερό. Κατόπιν το μέσο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες χρήσεις οι οποίες απαιτούν θερμότητα π.χ. πλύσιμο ή θέρμανση χώρων.

Ο μηχανισμός συλλογής και απωλειών της ηλιακής ακτινοβολίας στον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη.

Ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από ένα απορροφητικό στοιχείο πίσω από ένα διαφανές κάλυμμα. Η ηλιακή ακτινοβολία διέρχεται από το διαφανές κάλυμμα και προσπίπτει επί του απορροφητικού στοιχείου το οποίο έχει συνήθως σκούρο χρώμα. Το θερμικό μέσο σε επαφή με το απορροφητικό στοιχείο απορροφάει μέρος της θερμότητας και θερμαίνεται.

Η ανάλυση αυτού του μηχανισμού βασίζεται σε ένα ισοζύγιο ενέργειας και τα φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 Σχηματική τομή επίπεδου ηλιακού συλλέκτη και μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας και ακτινοβολίας..

Η ολική ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του διαφανούς καλύμματος. Ένα τμήμα της διαπερνά το κάλυμμα ενώ ένα άλλο μικρότερο ανακλάται και απορροφάται διότι η επιφάνεια δεν είναι απολύτως διαφανής. Το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο πέρασε την διαφανή επιφάνεια φθάνει στην απορροφητική επιφάνεια. Εκεί πάλι ένα τμήμα –το μεγαλύτερο- απορροφάται ενώ ένα άλλο ανακλάται. Από το τμήμα αυτό το οποίο ανακλάται τελικά μετά από διαδοχικές ανακλάσεις και απορροφήσεις ένα τμήμα απομακρύνεται προς το περιβάλλον ενώ ένα άλλο απορροφάται από την απορροφητική επιφάνεια. Σιγά σιγά η απορροφητική επιφάνεια ανεβάζει τη θερμοκρασία της οπότε ένα τμήμα της θερμότητας η οποία προσπίπτει εξαιτίας της ηλιακής ακτινοβολίας μεταφέρεται στο διαθερμικό ρευστό το οποίο ανεβάζει τη θερμοκρασία του από T_{in} στην είσοδο του συλλέκτη σε T_{out} στην έξοδό του. Συγχρόνως ένα τμήμα της θερμότητας η οποία μεταφέρεται από την ηλιακή ακτινοβολία πάνω στη συλλεκτική επιφάνεια χάνεται λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας από το εμπρός τμήμα του συλλέκτη ενώ ένα άλλο χάνεται λόγω αγωγής και συναγωγής από το πίσω μέρος του συλλέκτη μέσα από τη μόνωση.

Η ταυτόχρονη εξέλιξη όλων των παραπάνω φαινομένων δίδει τελικά τη συνισταμένη της συμπεριφοράς του συλλέκτη και προσδιορίζει το βαθμό απόδοσής του, ποιά δηλαδή ποσοστό της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας μεταφέρθηκε στο διαθερμικό ρευστό.

Θα δούμε παρακάτω τις σχέσεις οι οποίες περιγράφουν τα βασικά φαινόμενα.

Ωφέλιμη θερμότητα

Η ωφέλιμη θερμότητα είναι:

$$Q_{\omega\phi} = m \cdot C_p \cdot (T_{εξ} - T_{εισ}) \quad [W] \quad [4.1]$$

Όπου m η ροή μάζας του ρευστού.

Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία

Είναι:

$$\text{Επροσπ.} = I_{\alpha} * A \quad [W] \quad [4.2]$$

Όπου

I_{α} η προσπίπτουσα στον συλλέκτη ηλ. Ακτινοβολία

A η επιφάνεια του ανοίγματος του συλλέκτη

Οπτικές απώλειες

Η προσπίπτουσα ηλ. Ακτινοβολία υφίσταται μείωση εξαιτίας διαφόρων παραγόντων. Γενικά η μείωση αυτή εκφράζεται από μια σχέση της μορφής

$$E_{\text{τελική}} = \Gamma * \rho * \tau * \alpha * I_{\alpha} * A \quad [W] \quad [4.3]$$

Όπου

Γ = λόγος συλλογής –για συγκεντρωτικούς συλλέκτες-

ρ = αντανάκλαστικότητα – για συγκεντρωτικούς συλλέκτες-

τ = διαπερατότητα

α = απορροφητικότητα

Απώλειες θερμότητας

Οι απώλειες θερμότητας προκύπτουν από τους τρεις γνωστούς μηχανισμούς:

$$\text{Συναγωγή} \quad Q_{\text{συν}} = k * A_{\sigma} * (T_{\text{συλλέκτη}} - T_{\text{περ.}}) \quad [4.4]$$

$$\text{Ακτινοβολία} \quad Q_{\text{ακτ}} = \varepsilon * \sigma * A_{\sigma} * (T_{\text{συλλέκτη}}^4 - T_{\text{ουρανού}}^4) \quad [4.5]$$

$$\text{Αγωγή} \quad Q_{\text{αγωγής}} = \lambda * d * A_{\sigma} * (T_{\text{συλλέκτη}} - T_{\text{περ.}}) \quad [4.6]$$

Συνολικά αποτελέσματα

Συνδυάζοντας τις προηγούμενες σχέσεις έχουμε:

$$Q_{\omega\phi} = m * C_p * (T_{\varepsilon\zeta} - T_{\varepsilon\iota\sigma}) = \Gamma * \rho * \tau * \alpha * I_{\alpha} * A - A_{\sigma} * [k \text{ συνολικό} (T_{\text{συλλέκτη}} - T_{\text{περ.}}) + \varepsilon * \sigma * (T_{\text{συλλέκτη}}^4 - T_{\text{ουρανού}}^4)] \quad [4.7]$$

Όπου το k συνολικό είναι ο συνολικός φαινόμενος συντελεστής συναγωγής και αγωγής – για απλότητα-

Σε έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη μπορούμε να κάνουμε τις παρακάτω απλοποιήσεις

- $A = A_{\sigma}$,

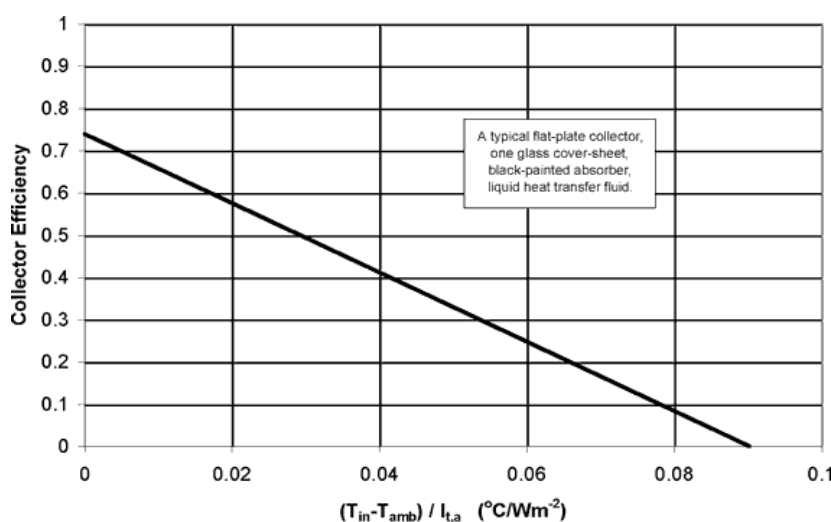
-τα Γ και ρ δεν χρησιμοποιούνται,

-η διαφορά της τέταρτης δύναμης της θερμοκρασίας του συλλέκτη μείον τη θερμοκρασία του ουρανού η οποία μπορεί να θεωρηθεί κοντά στο απόλυτο μηδέν δεν αλλάζει πολύ και επομένως μπορεί να αντικατασταθεί από έναν σταθερό όρο.

Αν οι επιμέρους συντελεστές για τις εξισώσεις απωλειών θερμότητας αντικατασταθούν από έναν συνολικό συντελεστή U και η θερμοκρασία του συλλέκτη αντικατασταθεί με τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού τότε μπορούμε να παραστήσουμε το βαθμό απόδοσης σε συνδυασμό με τον παράγοντα

$$(T_{\text{εισ}} - T_{\text{περ}}) / I_{\text{ολικό}} \quad [4.8]$$

Στην πράξη χρησιμοποιείται αυτή η απλοποιητική προσέγγιση και ο βαθμός απόδοσης του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη δίδεται ως συνάρτηση του παραπάνω παράγοντα. Η γενική μορφή αυτής της συσχέτισης φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

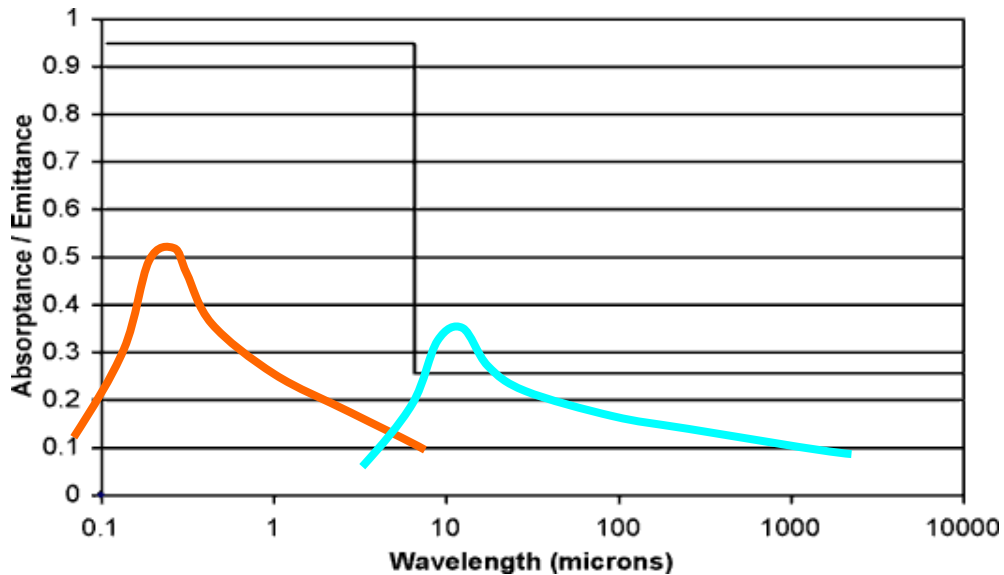


Σχήμα 4.2 Βαθμός απόδοσης επίπεδου ηλιακού συλλέκτη σε συνάρτηση με τον παράγοντα $(T_{\text{εισ}} - T_{\text{περ}}) / I_{\text{ολικό}}$.

Επιλεκτικές επιφάνειες.

Όπως είδαμε στην προηγούμενη ανάλυση ένα σημαντικό τμήμα των απωλειών ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη οφείλεται στις απώλειες λόγω ακτινοβολίας από την συλλεκτική-απορροφητική επιφάνεια προς το περιβάλλον. Μετά από έρευνες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν τη δεκαετία του 1970 αναπτύχθηκαν οι επιλεκτικές επιφάνειες. Βασίζονται στο γεγονός ότι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας την οποία εκπέμπει ένα θερμό σώμα διαφέρει ανάλογα με τη θερμοκρασία του σώματος –μικρότερα μήκη κύματος σε υψηλές θερμοκρασίες, μεγαλύτερα σε χαμηλές-. Έτσι το 95% της ηλιακής ακτινοβολίας έχει μήκος κύματος < 5μικρά με μέγιστη ένταση στα 0,48 μικρά ενώ μια μεταλλική επιφάνεια –π.χ. η απορροφητική επιφάνεια ενός συλλέκτη- σε θερμοκρασία 80°C έχει μέγιστη ένταση στα 8,21 μικρά βλέπε σχήμα 4.3.

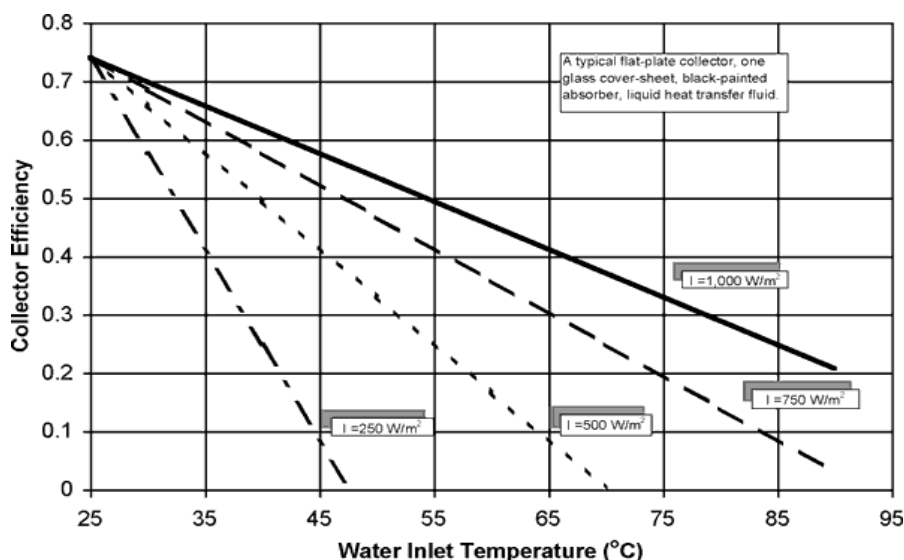
Με βάση αυτή την παρατήρηση έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται ειδικές επεξεργασίες της μεταλλικής απορροφητικής επιφάνειας του συλλέκτη οι οποίες δεν επιτρέπουν την εκπομπή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος –επιλεκτικές επιφάνειες-. Οι επιφάνειες αυτές δημιουργούνται με την εναπόθεση λεπτού στρώματος νικελίου ή χαλκού ειδικής επεξεργασίας –μαύρος χαλκός ή νικέλιο-. Η χρήση τέτοιων επιφανειών σε επίπεδους συλλέκτες μπορεί να επιφέρει ανάλογα με άλλες παραμέτρους αύξηση της απόδοσης στην τάξη του 5-10%.



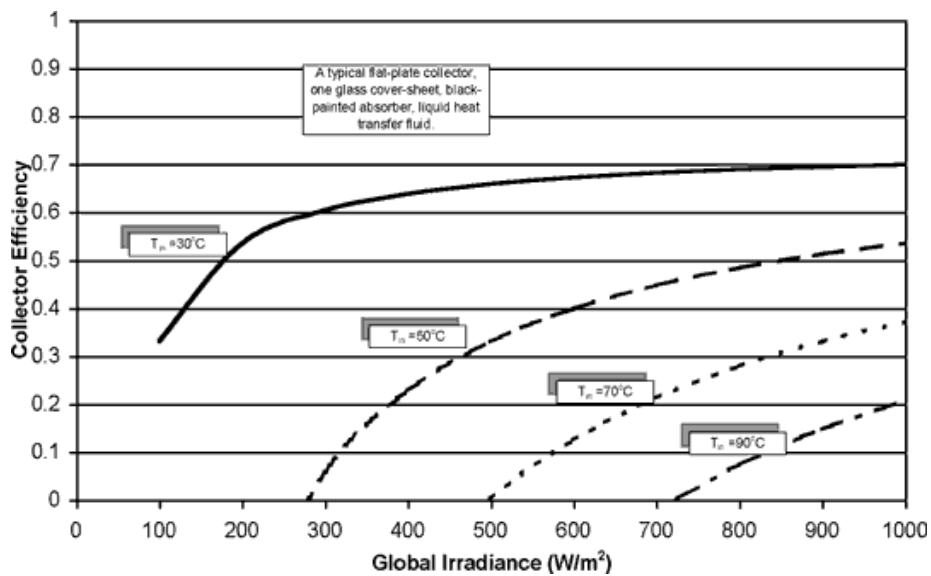
Σχήμα 4.3 Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας και ακτινοβολίας την οποία εκπέμπει σώμα 80οC.

Μέτρηση της απόδοσης επίπεδου ηλιακού συλλέκτη.

Ο κάθε επίπεδος ηλιακός συλλέκτης κανονικά συνοδεύεται από τη χαρακτηριστική του απόδοσης. Αυτή έχει τη μορφή του σχήματος 4.2 μπορεί όμως να έχει και μια από τις παρακάτω μορφές –σχήματα 4.4 και 4.5-.



Σχήμα 4.4 βαθμός απόδοσης σε σχέση με τη θερμοκρασία εσόδου.



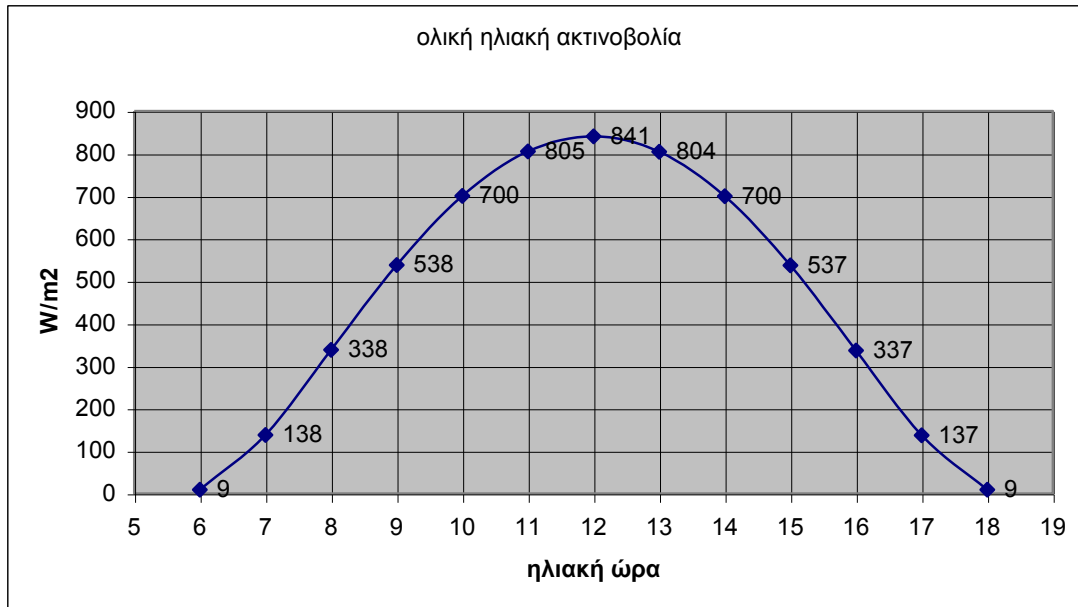
Σχήμα 4.5 βαθμός απόδοσης σχ σχέση με την ακτινοβολία.

Για τη μέτρηση του βαθμού απόδοσης έχουν θεσπισθεί πρότυπα όπως π.χ. το ΕΛΟΤ EN 12975.02 Ε2. Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να το μελετήσει από τη βιβλιογραφία.

Εφαρμογή.

Για μία ημέρα του έτους μας έχει δοθεί η παρακάτω χαρακτηριστική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι $10^\circ C$ και θεωρείται σταθερή σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Στη διάρκεια ολόκληρης της ημέρας χρειαζόμαστε να παράγουμε $2m^3$ νερό $30^\circ C$ χρησιμοποιώντας νερό δικτύου $15^\circ C$. Για να το επιτύχουμε αυτό θα χρησιμοποιήσουμε ηλιακούς συλλέκτες με χαρακτηριστική απόδοσης αυτή που φαίνεται στο σχήμα 4.2. Να βρεθεί πόσους τέτοιους συλλέκτες με καθαρή επιφάνεια παραθύρου $2m^2$ πρέπει να χρησιμοποιήσουμε σε παράλληλη σύνδεση για να επιτύχουμε το σκοπό μας.

Η ανάλυση να γίνει για κάθε ώρα.



Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες.

Οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως διότι το πλεονέκτημά τους σε σχέση με τους επίπεδους είναι ότι μπορούν να αναπτύξουν υψηλότερες θερμοκρασίες οι οποίες είναι πιο κατάλληλες για τη λειτουργία κύκλων παραγωγής έργου. Για τον λόγο αυτό οι εφαρμογές των συγκεντρωτικών συλλεκτών έχουν σχεδόν αποκλειστικά προσανατολισθεί προς τις εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Υπάρχουν και μερικές κατασκευές και μάλιστα ελληνικές οι οποίες χρησιμοποιούν συγκεντρωτικούς συλλέκτες για παραγωγή θερμού νερού επιτυγχάνοντας σχετικά υψηλότερες θερμοκρασίες βλέπε σχήμα 4.6.

Συγκεντρωτικοί συλλέκτες υπάρχουν πολλών ειδών. Δεν θα επεκταθούμε προς το παρόν στη μελέτη τους και στις εφαρμογές τους. Αυτό θα αποτελέσει σε επόμενη έκδοση αυτών των σημειώσεων ξεχωριστό κεφάλαιο. Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται δύο απόψεις παραβολικών συγκεντρωτικών συλλεκτών. Η πρώτη σε θέση δοκιμής και η δεύτερη δείχνει το πεδίο των συγκεντρωτικών συλλεκτών ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με παραβολικούς συλλέκτες.

Η λειτουργία ενός τέτοιου σταθμού βασίζεται σε κύκλο Rankine -βλέπε [1]- όπου η πηγή θερμότητας είναι αντί το καύσιμο ο ήλιος.



Σχήμα 4.6 παραβολικός συλλέκτης σε θέση δοκιμής.



Σχήμα 4.7 Πεδίο παραβολικών συλλεκτών σε σταθμό παραγωγής ηλ. ενέργειας στο Cramer Junction στις Η.Π.Α.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.

Εισαγωγή.

Η αιολική ενέργεια είναι από τις πιο διαδεδομένες μορφές ΑΠΕ. Σήμερα-2007-στην Ελλάδα είναι εγκατεστημένα περίπου 650 Mwe1 αιολικών πάρκων ενώ χιλιάδες MW είναι εγκατεστημένα στην Ευρώπη -η οποία έχει προς το παρόν σημαντικό τεχνολογικό προβάδισμα- αλλά και σε άλλα μέρη του κόσμου ΗΠΑ, Κίνα, Αυστραλία κ.λ.π.

Στην Ελλάδα παρόλο που φτιάξαμε ανεμομηχανές χιλιάδες χρόνια πριν από τους άλλους Ευρωπαίους, σήμερα, δυστυχώς, δεν κατασκευάζουμε ανεμογενήτριες.

Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας και ο αντίστοιχος εξοπλισμός έχει φθάσει σήμερα σε επίπεδο που να παράγει ηλεκτρική ενέργεια σε κόστος ανταγωνιστικό του κόστους των συμβατικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής αλλά επιπλέον χωρίς καμιά –ή σχεδόν καμιά- περιβαλλοντική επιβάρυνση.

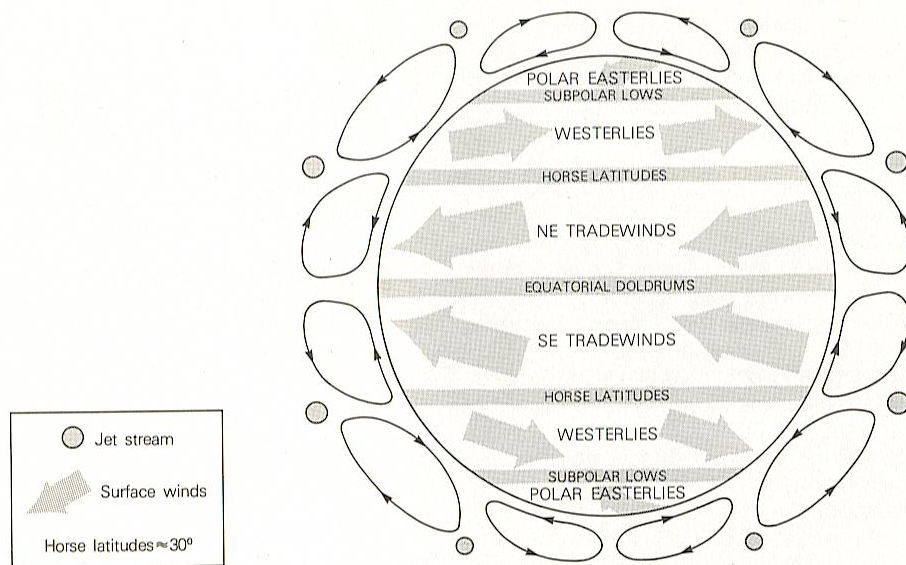
Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών της ενεργειακής μας πηγής δηλ. του ανέμου ενώ στο επόμενο κεφάλαιο θα πάρουμε βασικές γνώσεις για τις ανεμομηχανές δηλ. για τον εξοπλισμό ο οποίος χρησιμοποιείται για να μετατρέψει την διαθέσιμη από τον άνεμο κινητική ενέργεια σε ωφέλιμη για τον άνθρωπο ενέργεια.

Τα χαρακτηριστικά του ανέμου

Η δημιουργία των ανέμων στη γή οφείλεται σε πολλές αιτίες οι κυριότερες των οποίων είναι η ανομοιόμορφη θέρμανση από τον ήλιο των πόλων της γής σε σχέση με τις περιοχές του ισημερινού, καθώς επίσης και η περιστροφή της γής γύρω από τον άξονά της.

Εξαιτίας αυτών των παραγόντων δημιουργείται στην γήινη ατμόσφαιρα η γενική κυκλοφορία των αερίων μαζών η γενική μορφή της οποίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.1.

Η γενική αυτή κυκλοφορία μεταβάλλεται σε τοπικό επίπεδο εξαιτίας της μορφολογίας του εδάφους, της ύπαρξης μεγάλων μαζών νερού –θάλασσες, λίμνες, ωκεανοί- αλλά και άλλων παραγόντων οι οποίοι επηρεάζουν σε μεγάλο ή μικρότερο βαθμό το μικροκλίμα και κατεπέκταση και τους ανέμους σε μια περιοχή.



Global wind circulation patterns. Prevailing winds blow from the east in the tropics and from the west in the mid-latitudes.

Σχήμα 5.1 Γενική κυκλοφορία στη γήινη ατμόσφαιρα.

Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να βρεί περισσότερα στοιχεία σχετικά με την αέρια κυκλοφορία και τη γένεση των ανέμων στη βιβλιογραφία [8].

Η μεταβλητή φύση του ανέμου.

Η άμεση εμπειρία μας είναι ότι ο άνεμος πνέει με μεταβλητή ένταση και κατεύθυνση. Εάν παρατηρήσουμε μια σημαία ή ένα δένδρο θα έχουμε άμεση εμπειρία από τη μεταβλητή αυτή φύση του ανέμου.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα μετρητή ταχύτητας ανέμου και τον τοποθετούμε σε μια τοποθεσία καταγράφοντας τη στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου. Το κάνουμε αυτό για χρονικό διάστημα π.χ. 100 ημερών. Ενδεχομένως θα πάρουμε το γράφημα το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.2. Αν πάρουμε ένα τυχαίο χρονικό διάστημα 15 ημερών από τις 100 ημέρες καταγραφών και το μεγενθύνουμε τότε θα πάρουμε την επόμενη καταγραφή κ.ο.κ.

Μεταξύ των καταγραφών όσο αυξάνουμε τη μεγέθυνση παρατηρούμε ορισμένες διαφορές: στην πρώτη καταγραφή είχαμε μεγάλη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου –από 0 έως τη μέγιστη- ενώ στην τελευταία υπάρχει πάλι μεταβολή το μέγιστο εύρος της όμως έχει μειωθεί.

Η ανάλυση πολλών τέτοιων καταγραφών έδωσε το φάσμα της ταχύτητας του ανέμου το οποίο φαίνεται στο σχήμα 5.3. Προφανώς το φάσμα αυτό δεν είναι ακριβώς ίδιο σε κάθε τοποθεσία αποδίδει όμως το ποιοτικό χαρακτηριστικό ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι συνήθως ίδια μεταξύ διαδοχικών 10λέπτων ή ωρών ενώ έχει μεγάλη διαφορά μεταξύ π.χ. διαδοχικών ημερών,

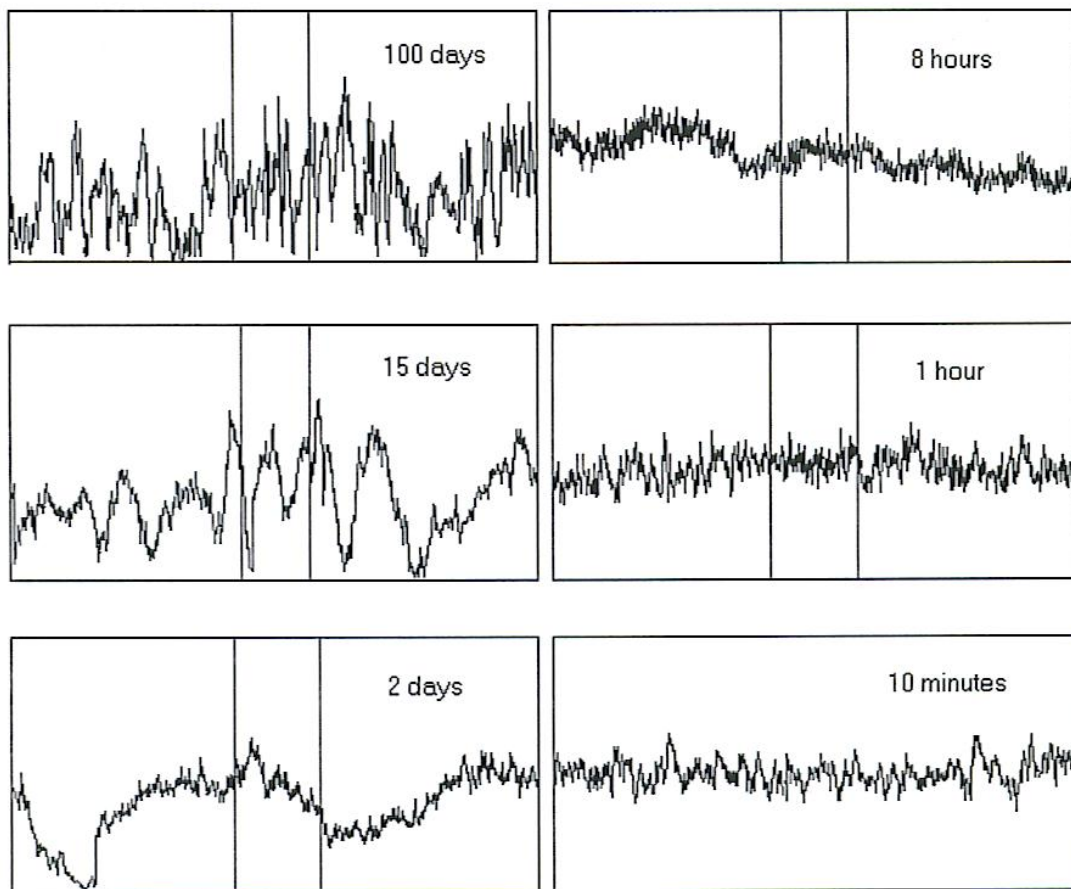


Figure 1: Variation in wind speed on different time-scales. The area between the bars in the 100-day sample refers to the area in the 15 days sample, etc
By kind permission of Riso, Denmark

Σχήμα 5.2 καταγραφές ταχύτητας ανέμου σε διαφορετικές κλίμακες χρόνου.

Για τους παραπάνω λόγους όταν μετριοούνται ταχύτητες ανέμου χρησιμοποιώντας μέσες τιμές θα πρέπει οι μέσες αυτές τιμές να αντιστοιχούν σε χρονικά διαστήματα τα οποία θα διατηρήσουν την αντιπροσωπευτικότητα της στιγμιαίας μέτρησης π.χ. μέσες τιμές 10λέπτου κ.ο.κ.

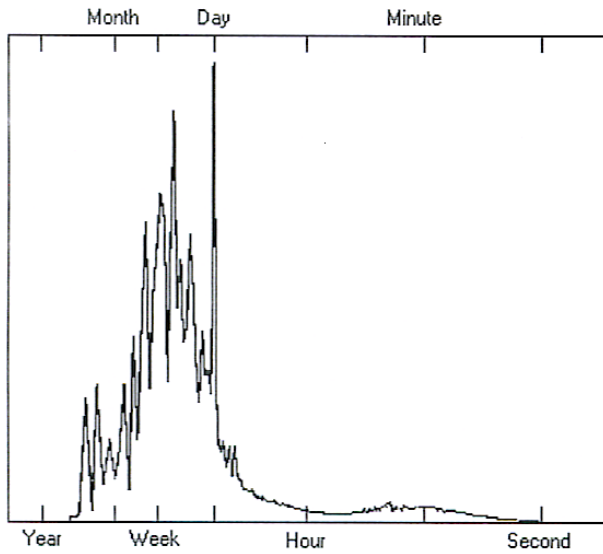


Figure 2. The Van de Hoven Spectrum showing the amount of variation in wind speed on a particular time-scale.

By kind permission of Riso, Denmark

Σχήμα 5.3 Το φάσμα Van de Hoven για το ποσό μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες.

Μεταβολή του ανέμου καθ' ύψος

Αφού είδαμε το πώς μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου στο χρόνο θα δούμε τις μεταβολές της στο χώρο. Στο παρακάτω σχήμα 5.4 φαίνεται η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου καθ ύψος στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας.

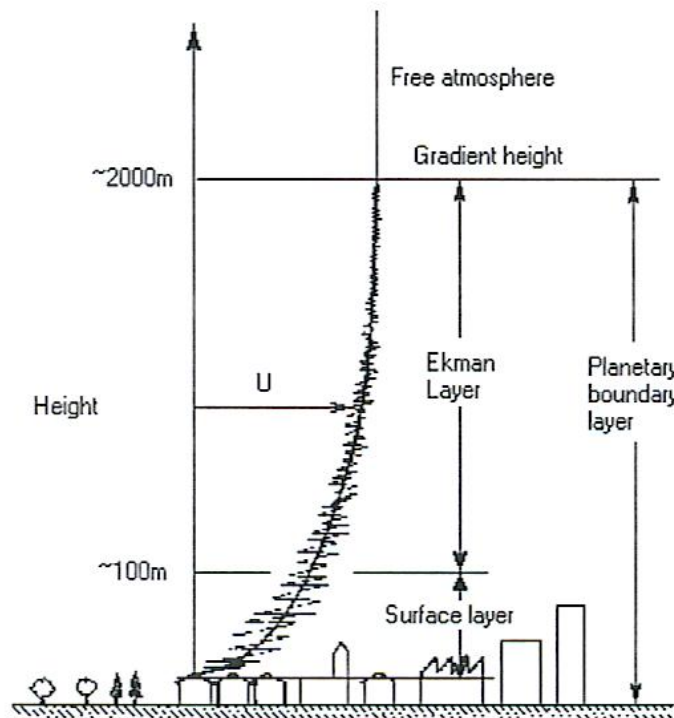


Figure 3: The atmospheric boundary layer.

Σχήμα 5.4 Το οριακό στρώμα του ανέμου.

Στο επιφανειακό στρώμα το οποίο καταλαμβάνει τα πρώτα 100 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους, η ροή του ανέμου υφίσταται όλες τις διαταραχές εξαιτίας των εμποδίων του εδάφους π.χ. δένδρα, κτίσματα κ.λ.π. Έτσι έχει μεγάλες τυρβώδες. Αυξανόμενου του ύψους η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου γενικά αυξάνεται και το τυρβώδες μειώνεται. Μετά το ύψος των 2 χιλιομέτρων η επίπτωση του εδάφους έχει σχεδόν εκμηδενιστεί και έτσι βρισκόμαστε πλέον έξω από το οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας με σχεδόν μηδενική καθύψος μεταβολή της μέσης ταχύτητας του ανέμου.

Μεταβολή του ανέμου λόγω τοπογραφίας

Η επίδραση της μορφολογίας του εδάφους στην κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας του ανέμου είναι σημαντική. Ας ρίξουμε μια ματιά στο σχήμα 5.5. Όταν στη ροή του ανέμου σε μια πεδιάδα παρεμβάλλεται ένα εμπόδιο π.χ. ένας λόφος, επεδεί η παροχή του ανέμου θα πρέπει να παραμείνει σταθερή αυξάνεται τοπικά η ταχύτητα δημιουργώντας κάποια επιτάχυνση κατά τη διέλευση πάνω από τον λόφο. Αυτή η επιτάχυνση είναι σε αρκετές περιπτώσεις σημαντική και λαμβάνεται υπόψη στη χωροθέτηση των ανεμογεννητριών.

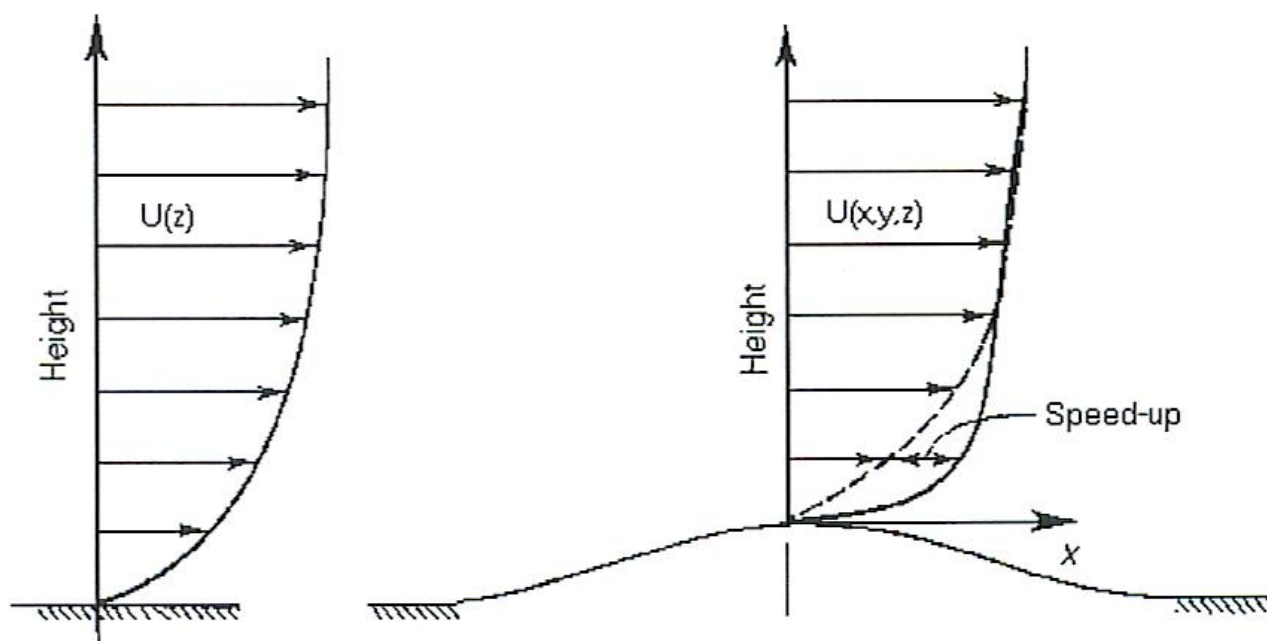


Figure 4: Diagram showing the changed wind shear on top of a small hill

Σχήμα 5.5 Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου εξαιτίας της τοπογραφίας.

Πώς μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου καθ' ύψος;

Η περιγραφή της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου καθ' ύψος είναι ένα περίπλοκο θέμα το οποίο σχετίζεται με τις τοπικές συνθήκες –τοπογραφία, εμπόδια, τραχύτητα της επιφάνειας του εδάφους κ.λ.π. Σε επίπεδο πεδίο -σε μια μεγάλη ανοιχτή πεδιάδα όπου η ροή του ανέμου έχει πλήρως αναπτυχθεί- συνήθως ισχύει ο νόμος

$$u(z)/u(z_h) = (z/z_h)^\alpha \quad [5.1]$$

Η τιμή του α μεταβάλλεται ανάλογα με τη μορφολογία του πεδίου και παίρνει τιμές από 0,07 μέχρι 0,4.

Συνήθως σε μια τοποθεσία γίνεται μέτρηση σε δύο ή περισσότερα διαφορετικά ύψη οπότε από την παραπάνω σχέση προκύπτει ο α .

Παράδειγμα:

Σε μια τοποθεσία μετρήθηκε μέση ταχύτητα ανέμου 6,5 m/s στα 10 μέτρα ύψος και 7m/s στα 30 μέτρα ύψος. Να βρεθεί ο α .

Η κατανομή πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου.

Ας υποθέσουμε ότι μετράμε την ταχύτητα του ανέμου σε ένα σημείο. Για κάθε δεκάλεπτο υπολογίζουμε τη μέση ταχύτητα που μετρήσαμε και τη σημειώνουμε. Στο τέλος μίας μεγάλης χρονικής περιόδου μετρήσεων π.χ. ενός έτους κάνουμε ένα γράφημα του αριθμού των δεκαλέπτων σε σχέση με το σύνολο των δεκαλέπτων των μετρήσεων για τα οποία η μέση ταχύτητα είχε τιμή 1 m/s, 2m/s, 3m/s κ.ο.κ. μέχρι τη μέγιστη τιμή της ταχύτητας η οποία κατεγράφει. Ακολουθώντας αυτή τη διαδικασία θα προκύψει ένα γράφημα με σημεία σαν αυτό στο σχήμα 5.6. Το γράφημα αυτό δίδει τη μετρημένη κατανομή πυκνότητας πιθανότητας για την ταχύτητα του ανέμου στο σημείο μέτρησης. Η γραφική αυτή παράσταση των σημείων μπορεί να προσεγγισθεί από μια εξίσωση η οποία δίδει την πυκνότητα πιθανότητας. Η εξίσωση αυτή φαίνεται μέσα στο πλαίσιο και λέγεται κατανομή Weibull.

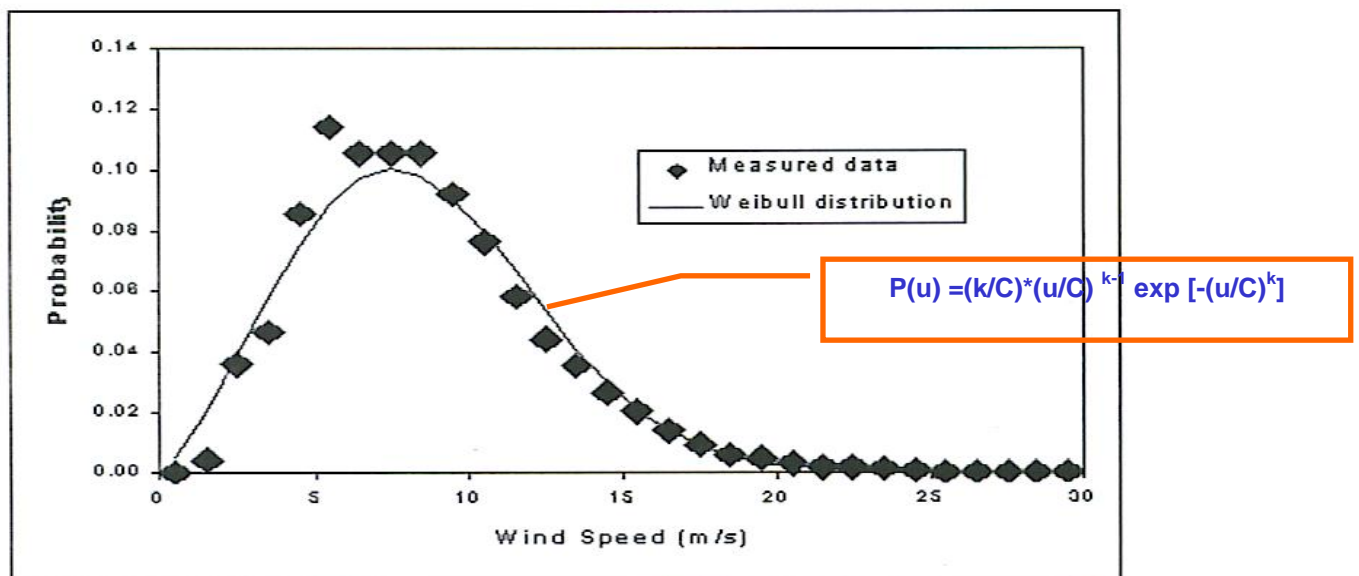


Figure 5: A measured distribution and a fitted Weibull distribution with a scale parameter C of 9.5m/s and a shape parameter k of 2.3.

Σχήμα 5.6 Ταχύτητα ανέμου σε ένα σημείο. Σύγκριση μεταξύ τυπικών μετρήσεων και προσέγγισης με την κατανομή Weibull.

Η κατανομή Weibull εκφράζεται από τη σχέση:

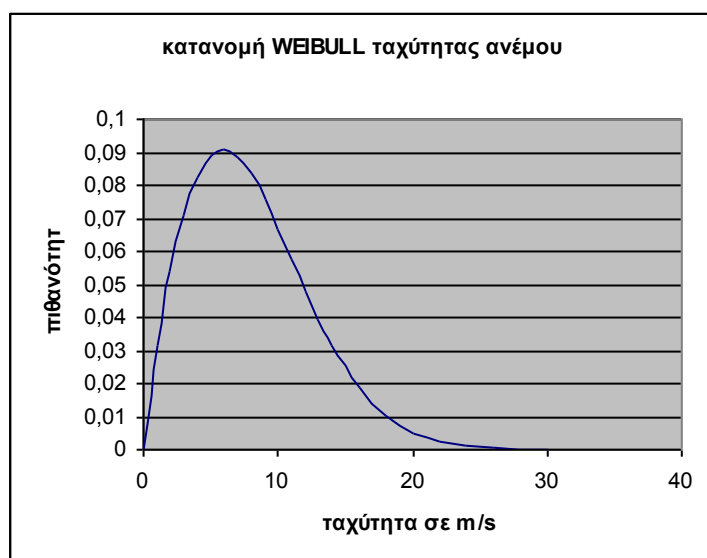
$$P(u) = (k/C) * (u/C)^{k-1} \exp[-(u/C)^k] \quad [5.2]$$

Στη σχέση αυτή υπάρχουν δύο συντελεστές ο k και ο C . Ο k λέγεται συντελεστής μορφής και ο c συντελεστής κλίμακας. Οι δύο αυτοί συντελεστές επηρεάζουν τη μορφή της καμπύλης που προκύπτει από την εξίσωση Weibull και επομένως την προσαρμογή της στα πραγματικά μετρημένα χαρακτηριστικά της ταχύτητας. Έχει αποδειχθεί από πολλές ανεμολογικές μετρήσεις οι οποίες έχουν γίνει ότι η κατανομή της πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να προσεγγισθεί με ικανοποιητική ακρίβεια από την κατανομή Weibull χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους συντελεστές k και c . Για τον λόγο αυτό και έχει καθιερωθεί η χρήση της στην ανάλυση ανεμολογικών δεδομένων. Μια πιο απλή κατανομή που χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν είναι η Raleygh η οποία είναι η κατανομή Weibull με σταθερούς συντελεστές $k=$ και $c=$.

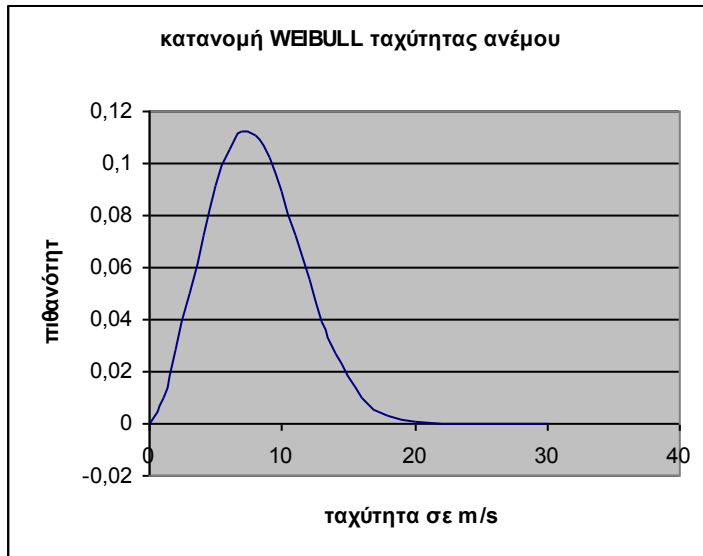
Εφαρμογή.

Προγραμματίστε την κατανομή Weibull σε ένα υπολογιστικό φύλλο και εξερευνήστε την επίπτωση των συντελεστών μορφής και κλίμακας στη μορφή και τη θέση της καμπύλης.

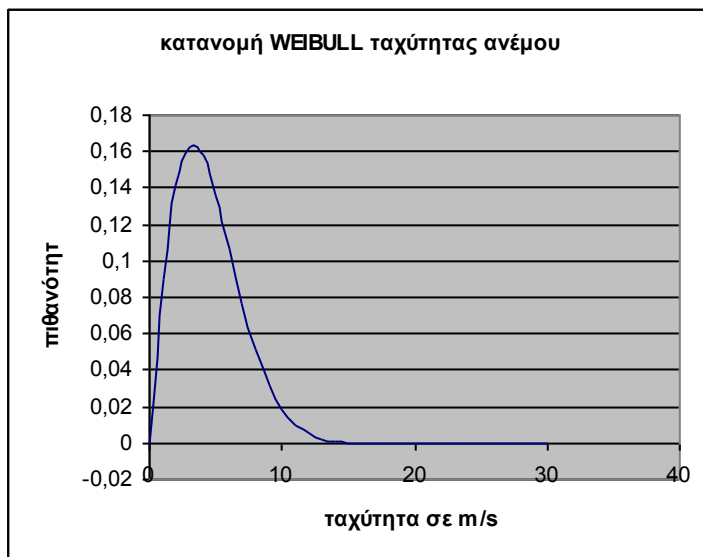
συντελεστής k -παράμετρος μορφής-	1,85
συντελεστής C -παράμετρος κλίμακας-	9



συντελεστής k -παράμετρος μορφής-	2,5
συντελεστής C -παράμετρος κλίμακας-	9



συντελεστής k -παράμετρος μορφής-	1,85
συντελεστής C -παράμετρος κλίμακας-	5



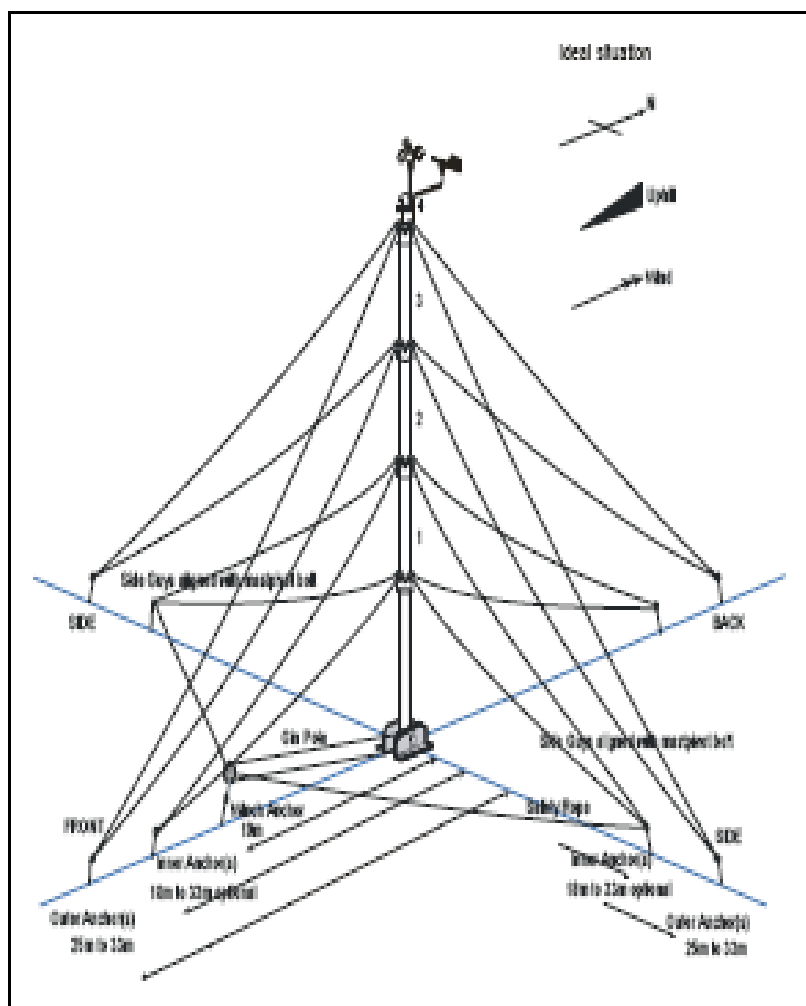
Ανεμολογικές μετρήσεις

Οι ανεμολογικές μετρήσεις είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό του αιολικού δυναμικού μίας τοποθεσίας. Για την υλοποίηση των ανεμολογικών μετρήσεων έχουν αναπτυχθεί διαδικασίες μέσα από διεθνή πρότυπα όπως το IEC 61400. Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να ανατρέξει σε αυτά για περισσότερες πληροφορίες.

Σήμερα ο συνηθέστερος τρόπος υλοποίησης ανεμολογικών μετρήσεων είναι αυτός με κυπελοφόρα ανεμόμετρα. Υπάρχουν και άλλες μεθοδολογίες όπως με υπερήχους ή με λέιζερ αλλά προς το παρόν δεν έχουν επικρατήσει για διάφορους λόγους.

Τα κυπελοφόρα ανεμόμετρα μαζί με τους δείκτες κατεύθυνσης ανέμου και τα άλλα όργανα τοποθετούνται σε έναν ιστό –μετρητικός ιστός - ο οποίος στη συνέχεια ανυψώνεται οπότε τα όργανα φθάνουν στο προβλεπόμενο ύψος μέτρησης. Έκεί υλοποιούνται οι μετρήσεις για το χρονικό διάστημα το οποίο μας ενδιαφέρει. Τα δεδομένα καταγράφονται συνεχώς και μετά γίνεται η επεξεργασία τους η οποία δίνει εικόνα για το αιολικό δυναμικό της περιοχής.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μορφή ενός ιστού και στις φωτογραφίες ιστοί σε θέση μέτρησης.



Σχήμα 5.7 Τυπική διάταξη ενός ανεμολογικού ιστού.

Η ενέργεια του ανέμου

Η ενέργεια του ανέμου την οποία προσπαθούμε να αξιοποιήσουμε είναι η κινητική ενέργεια την οποία περιέχει η μάζα του αέρα ο οποίος κινείται.

Όπως ξέρουμε η κινητική ενέργεια μιάς μάζας m η οποία κινείται με ταχύτητα v είναι:

$$E_{\text{κιν}} = \frac{1}{2} m v^2 \quad [5.3]$$

Έστω ότι μέσα από μια επιφάνεια 1 m^2 διέρχεται άνεμος με ταχύτητα v . Στη μονάδα του χρόνου η μάζα του αέρα που διήλθε μέσα από τη νοητή επιφάνεια A θα είναι

$$\text{Μάζα} = A \cdot \rho \cdot v \quad [5.4]$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα.

Αρα η κινητική ενέργεια του αέρα που διήλθε μέσα από τη νοητή επιφάνεια θα είναι

$$E_{\text{κιν}} = \frac{1}{2} A \cdot \rho \cdot v^3 \quad [5.5]$$

Και επειδή όλα τα παραπάνω τα υπολογίσαμε στη μονάδα του χρόνου αυτή θα είναι και η ισχύς του ανέμου.

Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του. Αυτό δείχνει και το πόσο σημαντικό είναι από άποψη ενεργειακή να αξιοποιήσουμε τις ενδεχόμενες επιταχύνσεις του ανέμου σε μια τοποθεσία.

Εφαρμογή.

Σε μια τοποθεσία στην οποία μετρήθηκε μέση ταχύτητα ανέμου 5 m/s σε ύψος 10 μέτρων και συντελεστή καθ' ύψους μεταβολής $\alpha=0,11$ να υπολογιστεί η πυκνότητα ισχύος του ανέμου σε Watt/m^2 σε ύψος 10 μέτρων και σε ύψος 40 μέτρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Η ανεμομηχανή

Εισαγωγή.

Η ανεμομηχανή είναι ο βασικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε κάποια άλλη ωφέλιμη μορφή. Επειδή τις τελευταίες δεκαετίες η μετατροπή της αιολικής ενέργειας γίνεται κυρίως σε ηλεκτρική επικράτησε ο όρος ανεμογεννήτρια -Α/Γ-.

Οι Α/Γ πέρασαν μια περίοδο κατά την οποία υπέστησαν σημαντική εξέλιξη και από πειραματικά μοντέλα φθάσαμε να έχουμε σήμερα μηχανές για εμπορική χρήση δοκιμασμένες σε πραγματικές συνθήκες, αξιόπιστες και με κόστος παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ανταγωνιστικό με αυτό των συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Στο κεφάλαιο αυτό θα πάρουμε τις βασικές γνώσεις που αφορούν τις Α/Γ . Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αντληθούν από τη βιβλιογραφία και τα εγχειρίδια των κατασκευαστών, [9,10].

Γενικά

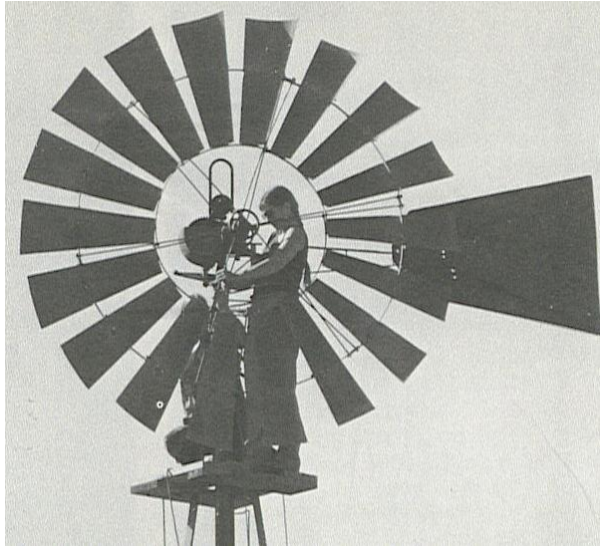
Οι Α/Γ κατατάσσονται σε δύο γενικές κατηγορίες:

- 1.Οριζοντίου άξονα.
- 2.Κατακόρυφου άξονα.

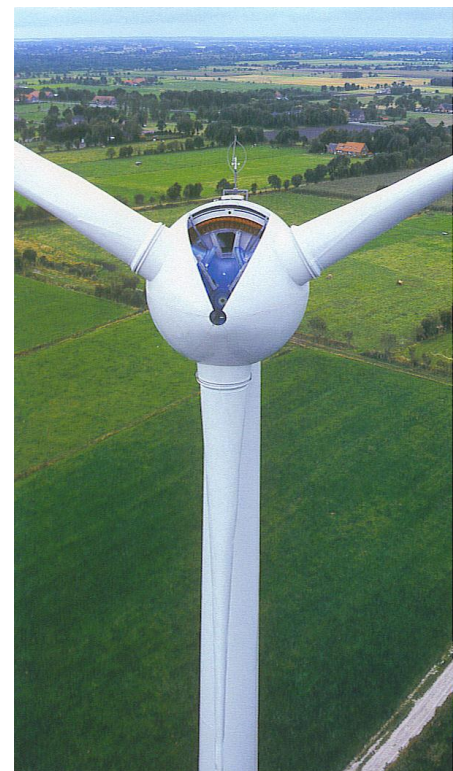
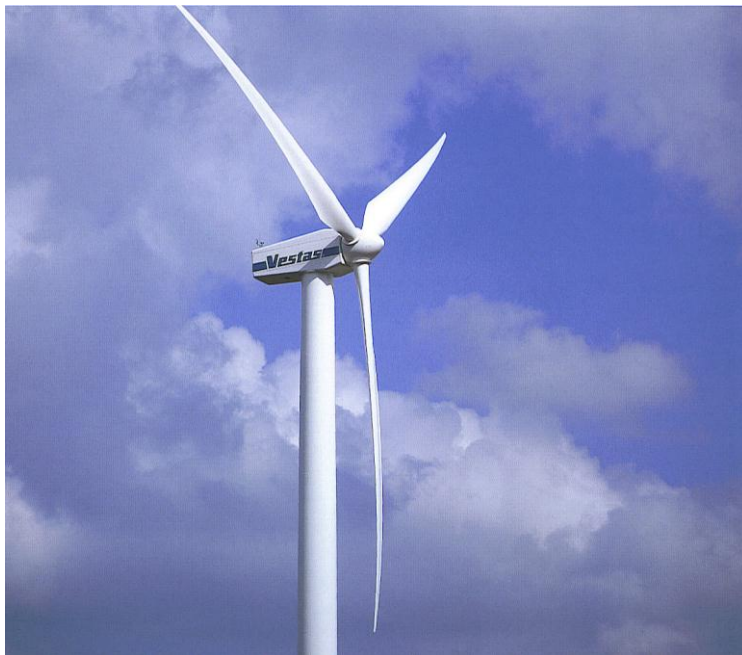
Οι μηχανές οριζοντίου άξονα έχουν τον κινητήριο άξονά τους παράλληλα με τη διεύθυνση της ροής του ανέμου ενώ του κατακόρυφου κάθετα. Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται μηχανές οριζοντίου άξονα και κατακόρυφου άξονα. Σήμερα έχει επικρατήσει σχεδόν αποκλειστικά η χρήση μηχανών οριζοντίου άξονα. Μεταξύ των λόγων είναι:

- ο αποδεδειγμένος μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης των μηχανών οριζοντίου άξονα οι οποίες βασίζονται στην αεροδυναμική άνωση.
- Η δυνατότητα των μηχανών οριζοντίου άξονα να καλύψουν μεγάλες επιφάνειες και επομένως να παράγουν μεγαλύτερη ισχύ.
- Η δυνατότητα να κατασκευαστούν σε μεγάλο ύψος όπου έχουμε και μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου.

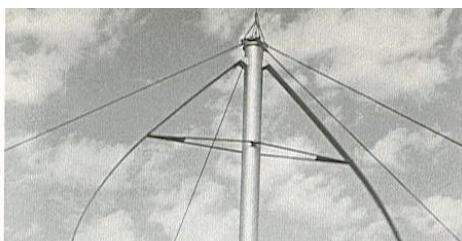
Οι μηχανές κατακόρυφου άξονα έχουν ακόμα κάποιες περιορισμένες εφαρμογές σε μικρά μεγέθη της τάξεως των kW.

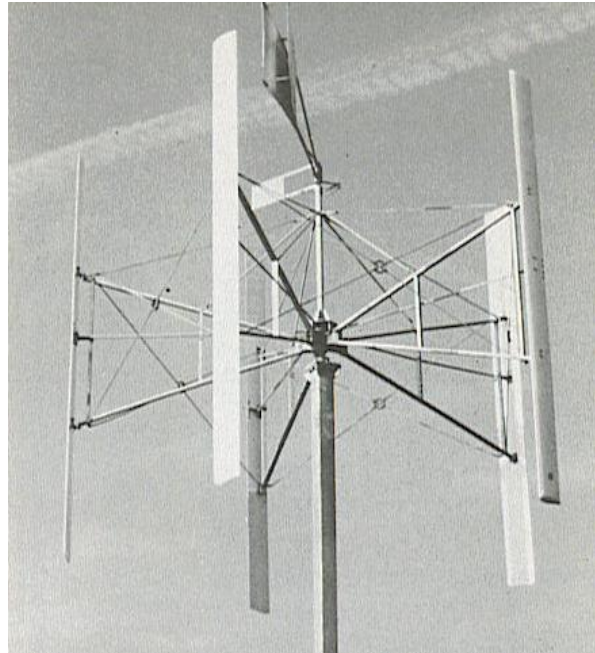


Σχήμα 6.1 Ανεμομηχανές οριζοντίου άξονα. Αριστερά ο κλασσικός Αμερικάνικος ανεμόμυλος –American Farm Wind Mill- ο οποίος χρησιμοποιήθηκε και χρησιμοποιείται για άντληση νερού και σε πολλές περιοχές της Ελλάδας. Δεξιά ο ανεμόμυλος με πανιά μια παραλλαγή του δικού μας ανεμόμυλου που χρησιμοποιήθηκε για αιώνες για την άντληση νερού, το άλεσμα της σοδειάς και άλλες εργασίες.

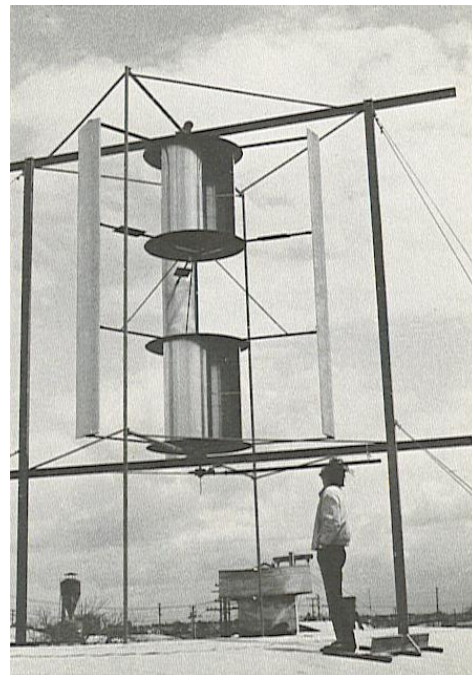


Σχήμα 6.2 Σύγχρονες Ανεμομηχανές οριζοντίου άξονα. Αριστερά τυπική τριπτέρυγη Α/Γ και δεξιά η μηχανή χωρίς τμήμα του καλύμματος της πλύμνης.

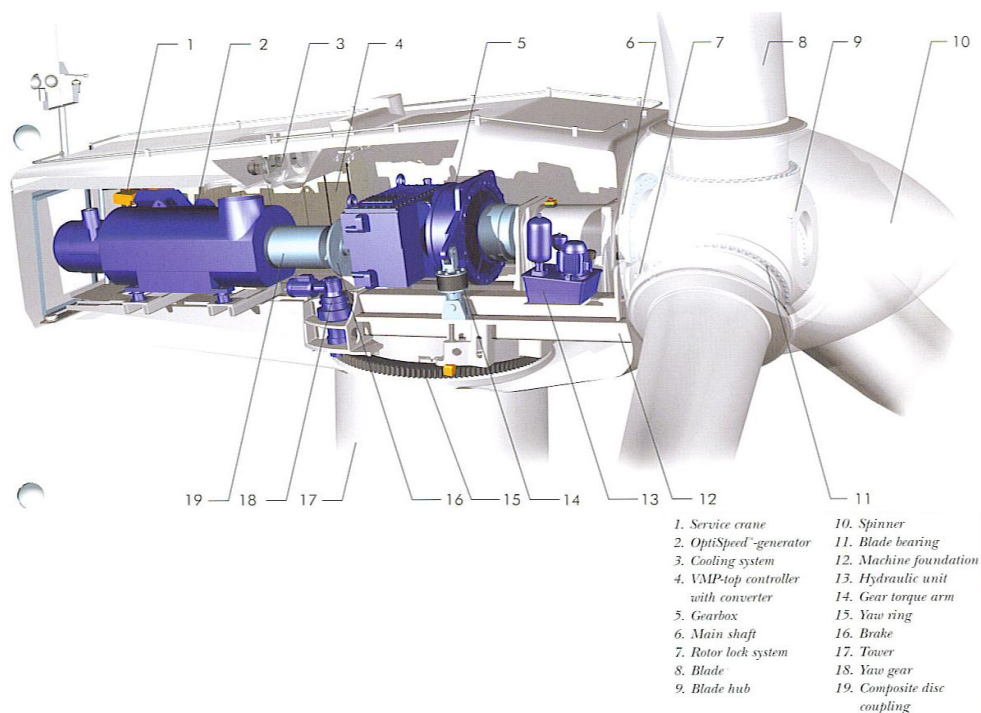




Σχήμα 6.3 Ανεμομηχανές κατακόρυφου άξονα που βασίζονται στην αεροδυναμική άνωση. Αριστερά Α/Γ τύπου Darrieus και δεξιά άλλος σχεδιασμός με κατακόρυφα πτερύγια.



Σχήμα 6.4 Ανεμομηχανές κατακόρυφου άξονα που βασίζονται στην αεροδυναμική αντίσταση. Αριστερά αυτοσχέδια μηχανή και δεξιά συνδυασμός αντίστασης και άνωσης με κατακόρυφα πτερύγια. Η μηχανή αυτή ξεκινάει μόνη της από νηνεμία. Στο παρακάτω σχήμα 6.5 φαίνεται το εσωτερικό μιας σύγχρονης ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 6.5 Στο εσωτερικό μιάς Α/Γ.

1	Γερανός συντήρησης	10	καλύπτρα
2	Ηλεκτρογεννήτρια	11	έδρανο πτερυγίου
3	Σύστημα ψύξης	12	βάση στήριξης εξοπλισμού
4	σύστημα ελέγχου	13	υδραυλικό σύστημα
5	κιβώτιο ταχυτήτων	14	βραχίονας ροπής κιβωτίου
6	κύριος άξονας	15	γρανάζι προσανατολισμού
7	σύστημα οδήγησης δρομέα	16	πέδη
8	πτερύγιο	17	πύργος
9	πλύμνη	18	σύστημα προσανατολισμού

Ο μέγιστος θεωρητικός βαθμός απόδοσης μιάς Ανεμομηχανής. Το όριο του Betz.

Το 1927 ο γερμανός φυσικός Betz απέδειξε με μια απλή αλλά και αποτελεσματική προσέγγιση ότι ο βαθμός απόδοσης μιας ανεμομηχανής δεν μπορεί να ξεπερνάει το 59,3% περίπου. Το όριο αυτό ονομάστηκε όριο Betz και αποτελεί το μέγιστο θεωρητικό άνω όριο στο οποίο θα μπορούσε να φθάσει η απόδοση μιας ανεμομηχανής αεροδυναμικής άνωσης αν όλα ήταν τέλεια. Στην πραγματικότητα οι αποδόσεις των σύγχρονων Α/Γ βρίσκονται αρκετά χαμηλότερα περίπου στο 45%. Η απόδειξη του Betz βρίσκεται για τον ενδιαφερόμενο στο σχήμα 6.6.

Maximum Rotor Efficiency

The analysis of maximum possible efficiency for lift-type rotors was originally done by Betz in 1927. Here, the rotor extracts power from the airstream by slowing down the free-stream windspeed V to a lesser speed V_2 far downstream of the rotor blades. The power extracted is just the difference in wind energy upstream and downstream of the rotor, or

$$\text{Power} = \frac{1}{2} \times M \times (V^2 - V_2^2),$$

where M is the mass of air that flows through the rotor per second. If V_2 equals zero in the above equation, you might expect that power would be maximized. But no air would flow through the rotor in this case, and the power is zero. The mass flow through the rotor is just the air density times the rotor area times the average wind velocity at the rotor, or:

$$M = \rho \times A \times \frac{V + V_2}{2}.$$

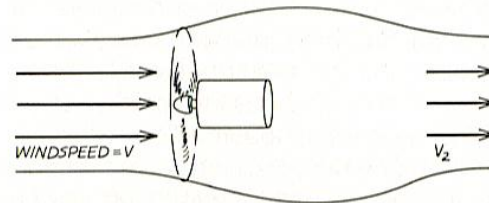
Substituting this formula into the power equation yields:

$$\text{Power} = \frac{1}{4} \times \rho \times A \times (V + V_2) \times (V^2 - V_2^2).$$

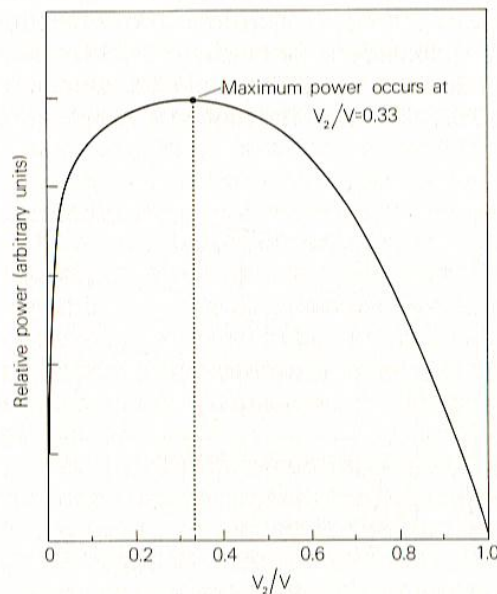
A graph of the relative power generated versus the ratio of V_2 to V is presented here. Note that maximum power occurs when V_2 equals one-third of V . Under such conditions,

$$\text{Maximum Power} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \times \frac{16}{27}.$$

Thus, maximum possible (theoretical) efficiency of a lift-type rotor is $16/27$, or 59.3 percent. In reality, swirl in the downwind airstream and other inefficiencies limit the practical efficiency even more.



† Airflow through lift-type rotor.



Power output of lift-type rotor.

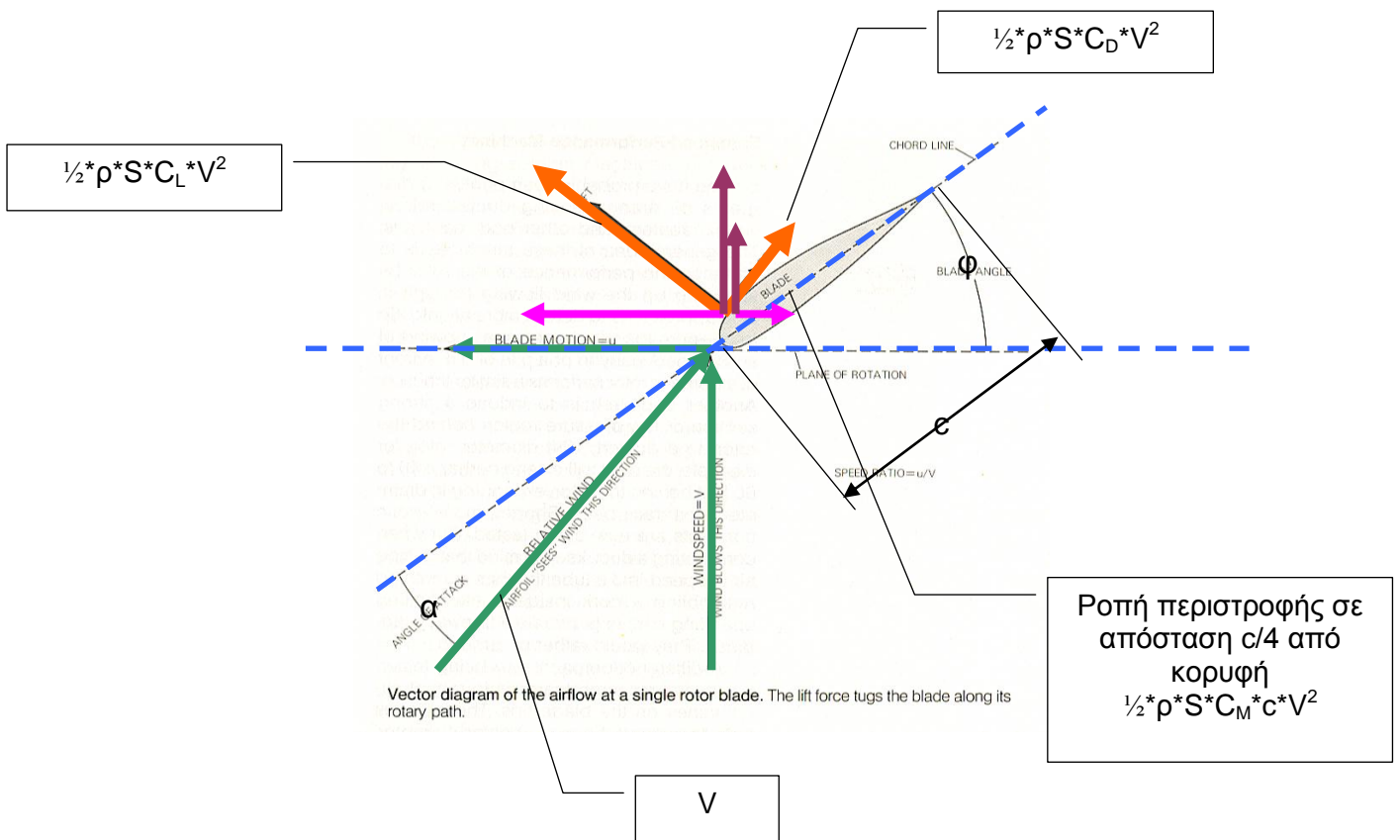
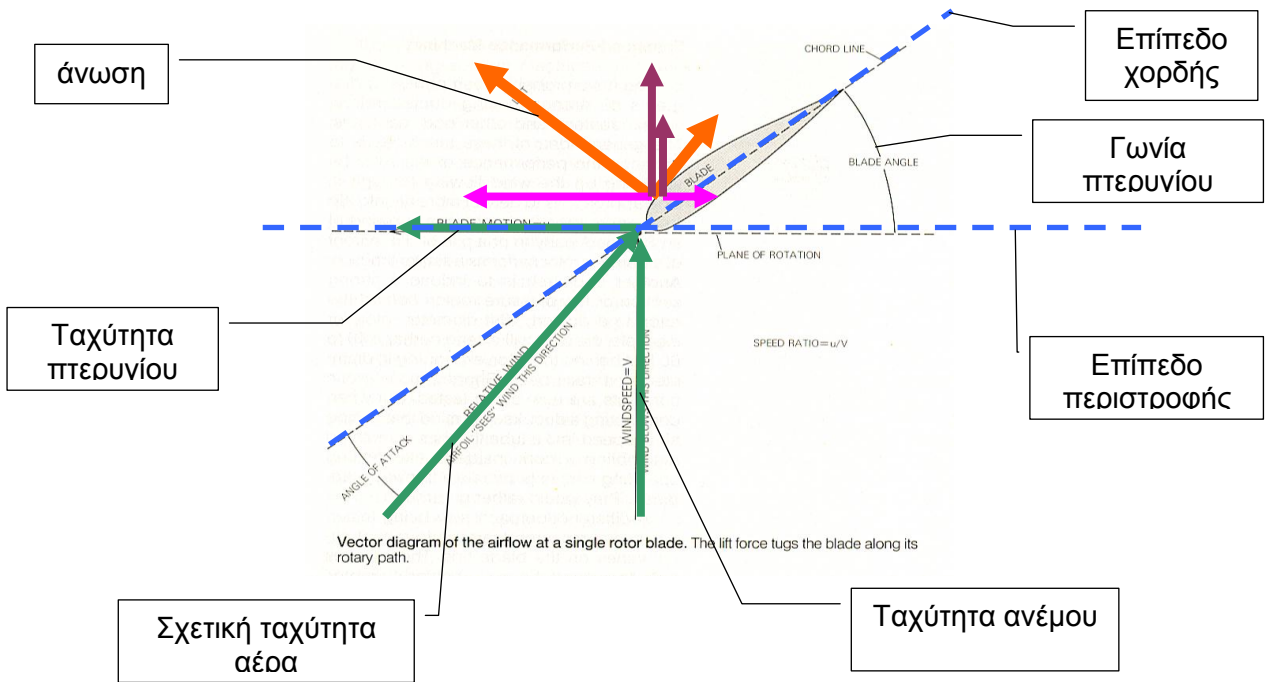
Σχήμα 6.6 Η απόδειξη του θεωρήματος του Betz.

Γιατί περιστρέφεται ο δρομέας μιας Α/Γ;

Στην παράγραφο αυτή θα αναλύσουμε τα φαινόμενα τα οποία δημιουργούν την περιστροφή του δρομέα μιας Α/Γ.

Ας κάνουμε μια τομή στο 1 από τα 3 πτερύγια του δρομέα μιας Α/Γ. Η τομή αυτή φαίνεται στο σχήμα 6.7. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται το διάνυσμα της ταχύτητας του ανέμου. Αν υποθέσουμε ότι ο δρομέας περιστρέφεται τότε πάνω στο σχήμα φαίνεται και το διάνυσμα της ταχύτητας του πτερυγίου. Εξαιτίας αυτών των δυο ταχυτήτων η σχετική ταχύτητα του ανέμου ως προς το πτερύγιο διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο σχήμα. Αυτή την ταχύτητα είναι την οποία αντιλαμβάνεται το πτερύγιο. Η ταχύτητα αυτή επιτίπτει υπό μια γωνία προς την αεροτομή. Η γωνία αυτή λέγεται γωνία πρόσπτωσης. Εξαιτίας αυτής της σχετικής ταχύτητας του ανέμου η αεροτομή αναπτύσσει τις δυνάμεις άνωσης και οπισθέλκουσας όπως φαίνονται στο σχήμα. Αν αναλυθούν οι δυνάμεις αυτές σε συνιστώσες πάνω στο επίπεδο περιστροφής και σε

επίπεδο κάθετο σε αυτό δημιουργούνται δύο ομάδες δυνάμεων. Η μια ομάδα είναι παράλληλη με το επίπεδο περιστροφής του δρομέα και είναι αυτή η οποία κάνει το δρομέα να περιστρέφεται. Η άλλη ομάδα είναι κάθετη στο επίπεδο περιστροφής και δημιουργεί καμπτικά φορτία στα πτερύγια.



Σχήμα 6.7 Σχετικές ταχύτητες και δυνάμεις που ασκούνται σε μια αεροτομή

Τα παραπάνω ισχύουν για μια λεπτή φέτα του πτερυγίου σε μια συγκεκριμένη απόσταση από τον άξονα περιστροφής των πτερυγίων. Εάν ολοκληρώσουμε καθ' όλο το μήκος του πτερυγίου και στα τρία πτερύγια του δρομέα παίρνουμε τη συνισταμένη δύναμη X απόσταση = ροπή όλου του δρομέα που είναι αυτή η οποία δημιουργεί τη συνολική ροπή περιστροφής στον άξονα της A/Γ ο οποίος με τη σειρά του περιστρέφει την ηλεκτρογεννήτρια για την παραγωγή δυναμικού.

Ανάλογα με τον τύπο της αεροτομής η οποία χρησιμοποιείται για την κατασκευή των πτερυγίων έχουμε και τη δημιουργία αντίστοιχων δυνάμεων άνωσης, οπισθέλκουσας και ροπής στρέψης. Ο υπολογισμός των δυνάμεων γίνεται από τις σχέσεις του σχήματος 6.7. Οι συντελεστές άνωσης, οπισθέλκουσας και ροπής στρέψης προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα τα οποία έχουν μετρηθεί για διάφορους τύπους αεροτομών. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 6.8. Υπάρχουν βάσεις δεδομένων για πλήθος αεροτομών οι οποίες δημιουργήθηκαν κυρίως για την αεροπορία και οι οποίες δίδουν τους συντελεστές σε διαγράμματα με αδιάστατους αριθμούς βλέπε σχήμα 6.9. Εκτός από τον πειραματικό προσδιορισμό των συντελεστών σε αεροσήραγγα υπάρχει σήμερα και η δυνατότητα υπολογιστικού προσδιορισμού με μεθοδολογίες υπολογιστικής ρευστομηχανικής βλέπε σχήμα 6.10.

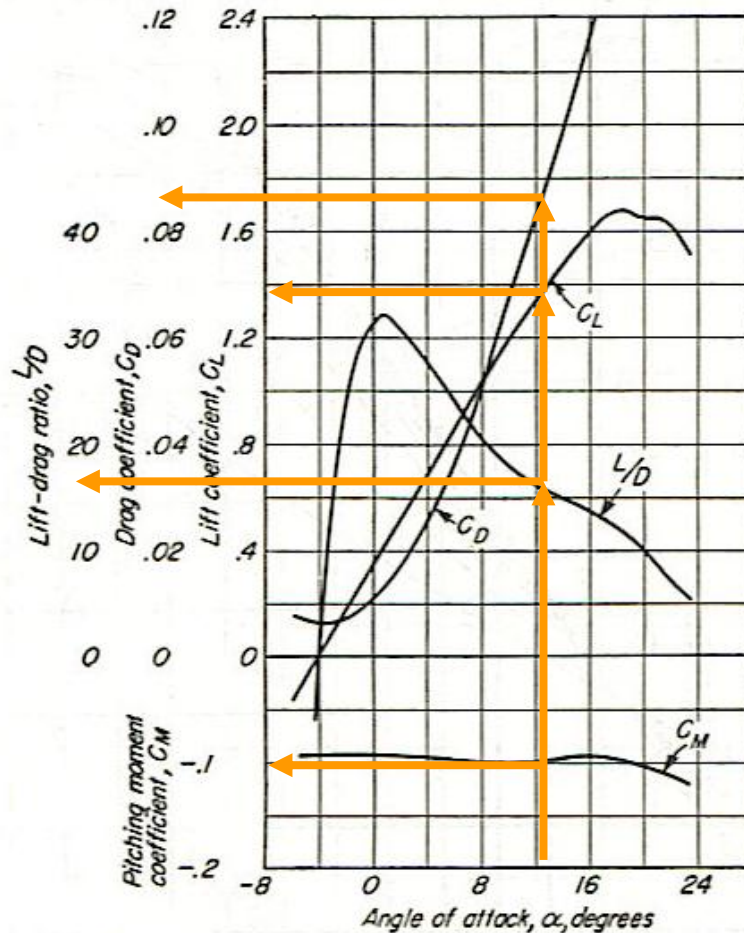
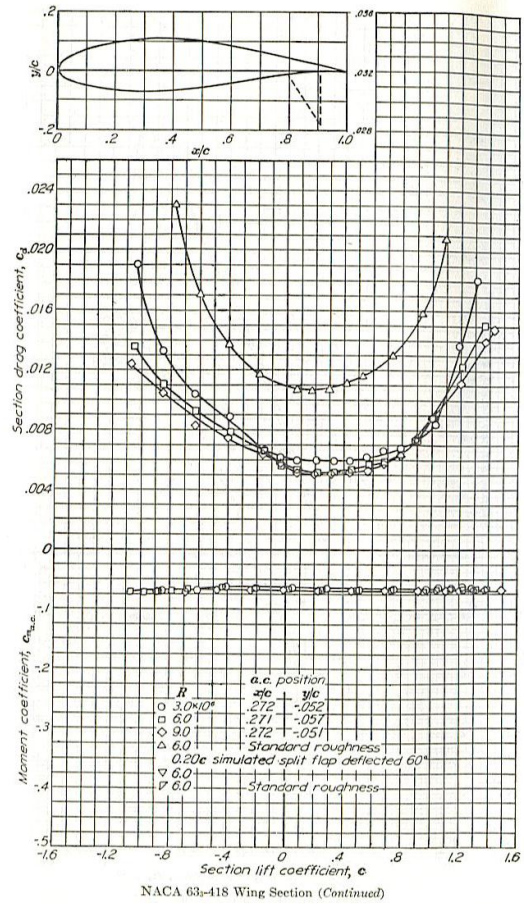
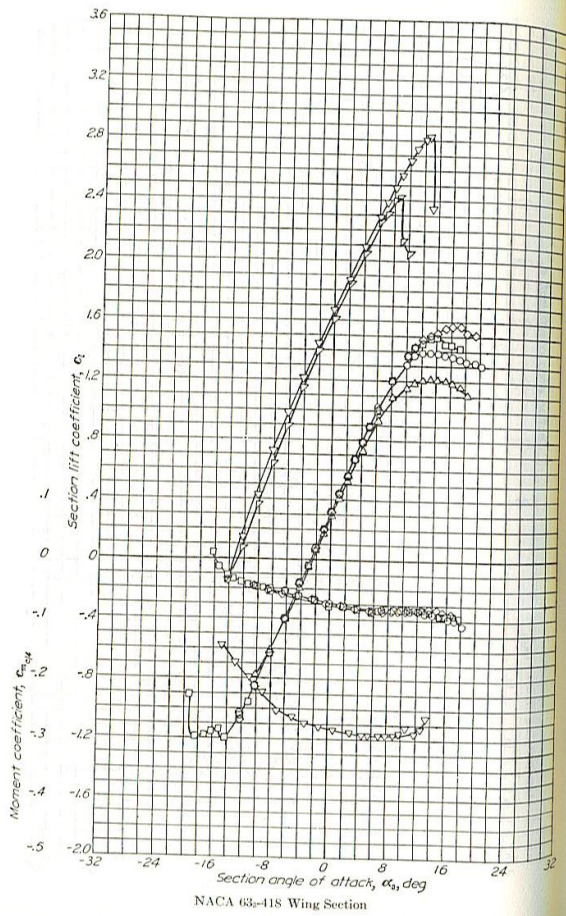


FIG. 1. Typical wing characteristics.

Σχήμα 6.8 προσδιορισμός των συντελεστών για μια αεροτομή, [11].



Σχήμα 6.9 προσδιορισμός των συντελεστών με χρήση αδιάστατων αριθμών για μια αεροτομή από βάση δεδομένων, από [11].

Σχήμα 6.10 υπολογιστική επίλυση του πεδίου ροής για τον προσδιορισμό των συντελεστών από [12].

Ο αριθμός των πτερυγίων και ο λόγος ταχύτητας κορυφής –tip speed ratio-

Στη διάρκεια των δεκαετιών ανάπτυξης των Α/Γ έγιναν αρκετές μελέτες για να προσδιοριστεί ο βέλτιστος αριθμός των πτερυγίων του δρομέα. Μια μέθοδος η οποία εφαρμόστηκε για κάποιο διάστημα ήταν για βέλτιστη απόδοση να χρησιμοποιείται η σχέση

$$\lambda \approx 4\pi/n \quad [6.1]$$

όπου n ο αριθμός των πτερυγίων και όπου οι τιμές του λ είναι 4-6.

Το λ είναι ο λόγος ταχύτητας κορυφής –tip speed ratio- και ορίζεται

$$\lambda = \frac{\text{ταχύτητα κορυφής πτερυγίων}}{\text{ταχύτητα ανέμου}} \quad [6.2]$$

Άρα

$$\lambda = R \cdot \omega / V \quad [6.3]$$

Όπου R = ακτίνα πτερωτής, ω = γωνιακή ταχύτητα, V = ταχύτητα ανέμου.

Από τις παραπάνω σχέσεις φαίνεται ότι για κάποιες τιμές ταχυτήτων και στροφών ο βέλτιστος αριθμός πτερυγίων θα είναι 2 ή ακόμα και 1. Επίσης για πολύστροφες μηχανές ενδεχομένως ο αριθμός των πτερυγίων να προκύπτει μεγάλος π.χ. 5 ή 6 πτερύγια ή περισσότερα.

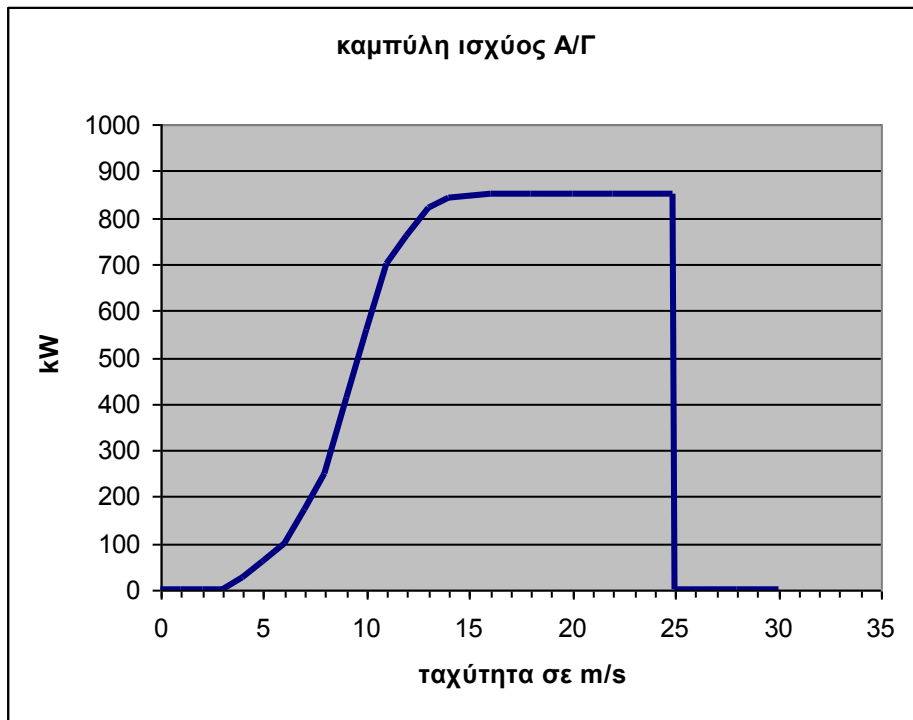
Στην πράξη και μετά από πολλές δοκιμές και πειράματα κατά τα οποία κατασκευάστηκαν και μηχανές με 1 πτερύγιο έχει επικρατήσει η κατασκευή μηχανών με 3 πτερύγια διότι συνδυάζει εκτός από την υψηλή απόδοση και καλύτερη μηχανική συμπεριφορά.

Η παραγόμενη ενέργεια από μια Α/Γ σε συγκεκριμένη τοποθεσία.

Έχοντας αναλύσει τον τρόπο λειτουργίας του δρομέα μίας Α/Γ θα δούμε πως υπολογίζουμε τη παραγόμενη από την Α/Γ ενέργεια εφόσον γνωρίζουμε τα ανεμολογικά δεδομένα μιας τοποθεσίας.

Στην πράξη κάθε Α/Γ αφού κατασκευαστεί δοκιμάζεται για να προκύψει η απόδοσή της. Υπάρχει συγκεκριμένο πρότυπο για τη διενέργεια αυτών των δοκιμών -IEC 61400-

Το αποτέλεσμα των δοκιμών αυτών είναι η χαρακτηριστική απόδοσης της Α/Γ η οποία έχει τη μορφή η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 6.11.



Σχήμα 6.11 τυπική χαρακτηριστική ισχύος Α/Γ.

Κάθε Α/Γ ξεκινάει τη λειτουργία της σε μια συγκεκριμένη ελάχιστη ταχύτητα ανέμου η οποία είναι συνήθως για τις σημερινές Α/Γ στην τάξη των 4 m/s. Η ταχύτητα του ανέμου μετρείται σύμφωνα με τα πρότυπα στο ύψος του άξονα της πλώμνης του δρομέα της Α/Γ. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται ταχύτητα εκκίνησης –cut-in speed-.

Αυξανόμενης της ταχύτητας του ανέμου αυξάνεται η παραγόμενη από την Α/Γ ισχύς περίπου ανάλογα με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Από μια ταχύτητα ανέμου και μετά επενεργούν οι μηχανισμοί ελέγχου της μηχανής και μεταβάλλουν τη γωνία πρόσπτωσης των πτερυγίων, εφόσον πρόκειται για μηχανή η οποία ελέγχει τις στροφές της με γωνία πρόσπτωσης –pitch controlled-. Έτσι η γωνία παύει να είναι η βέλτιστη, ο βαθμός απόδοσης μειώνεται και η ισχύς της μηχανής σταθεροποιείται στην ονομαστική της ισχύ. Ανάλογα με τον σχεδιασμό της μηχανής η ονομαστική ισχύς επιτυγχάνεται στα 12-13 m/s ή σε χαμηλότερες ταχύτητες εάν η μηχανή είναι σχεδιασμένη για πιο χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Σε μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου η μηχανή συνεχίζει με τη μεθοδολογία που προαναφέρθηκε να παράγει σταθερά την ονομαστική της ισχύ. Σε μια ταχύτητα ανέμου η οποία είναι στην τάξη των 25-30 m/s ανάλογα με τον κατασκευαστή επενεργεί ο μηχανισμός σταματήματος και τα μέρη πτερύγια τοποθετούνται παράλληλα με τον άνεμο ενώ τα φρένα της μηχανής ενεργοποιούνται και σταματάει η περιστροφή του δρομέα ώστε να προστατευθεί η μηχανή από υπερβολικές καταπονήσεις οι οποίες θα μπορούσαν να την καταστρέψουν. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται ταχύτητα αποκοπής –cut-out speed-.

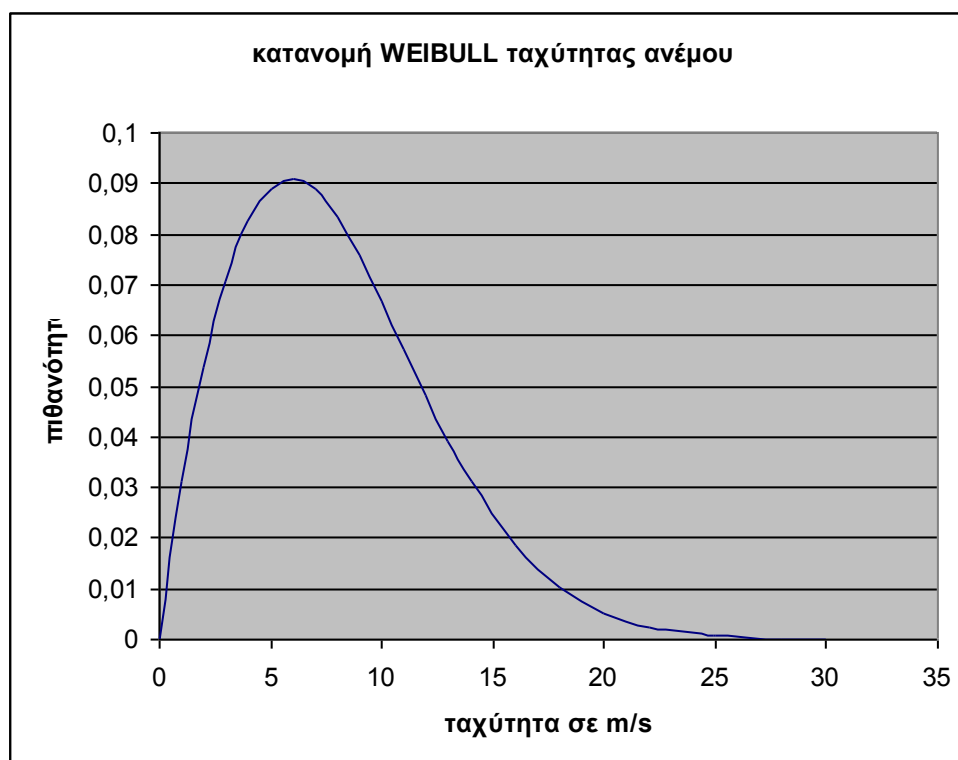
Συγχρόνως με τη χαρακτηριστική απόδοσης της μηχανής έχουμε σε μια τοποθεσία και τα ανεμολογικά της χαρακτηριστικά. Αυτά περιγράφονται όσον αφορά την ταχύτητα του ανέμου από την καμπύλη Weibull. Προφανώς εκτός από την ταχύτητα του ανέμου υπάρχει και η διεύθυνσή του. Θα υποθέσουμε προς το παρόν ότι:

- Η μηχανή μας έχει τη δυνατότητα για πρακτικά άμεση περιστροφή του δρομέα της προς την κατεύθυνση του ανέμου.
- Ότι δεν υπάρχουν στην περιοχή άλλες μηχανές οι οποίες θα δημιουργούσαν αλληλεπίδραση π.χ.αεροδυναμική σκίαση μεταξύ τους.

Με βάση τα παραπάνω η κατανομή Weibull περιγράφει τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά στην τοποθεσία.

Υπάρχει το ενδεχόμενο οι μετρήσεις από τις οποίες προέκυψε η κατανομή Weibull να έγιναν σε ύψος χαμηλότερο από το ύψος της πλύμνης της μηχανής. Τότε θα πρέπει με κάποιο τρόπο -βλέπε α σχετικά με την καθ' ύψος μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου- να κατασκευαστεί μια κατανομή Weibull για το ύψος του άξονα της μηχανής. Στη διαδικασία αυτή συνήθως κάνουμε την υπόθεση ότι η πιθανότητα για κάθε περιοχή ταχυτήτων παραμένει ίδια και το μόνο που αλλάζει είναι το μέτρο της ταχύτητας ανάλογα με τους συντελεστές καθ' ύψους μεταβολής.

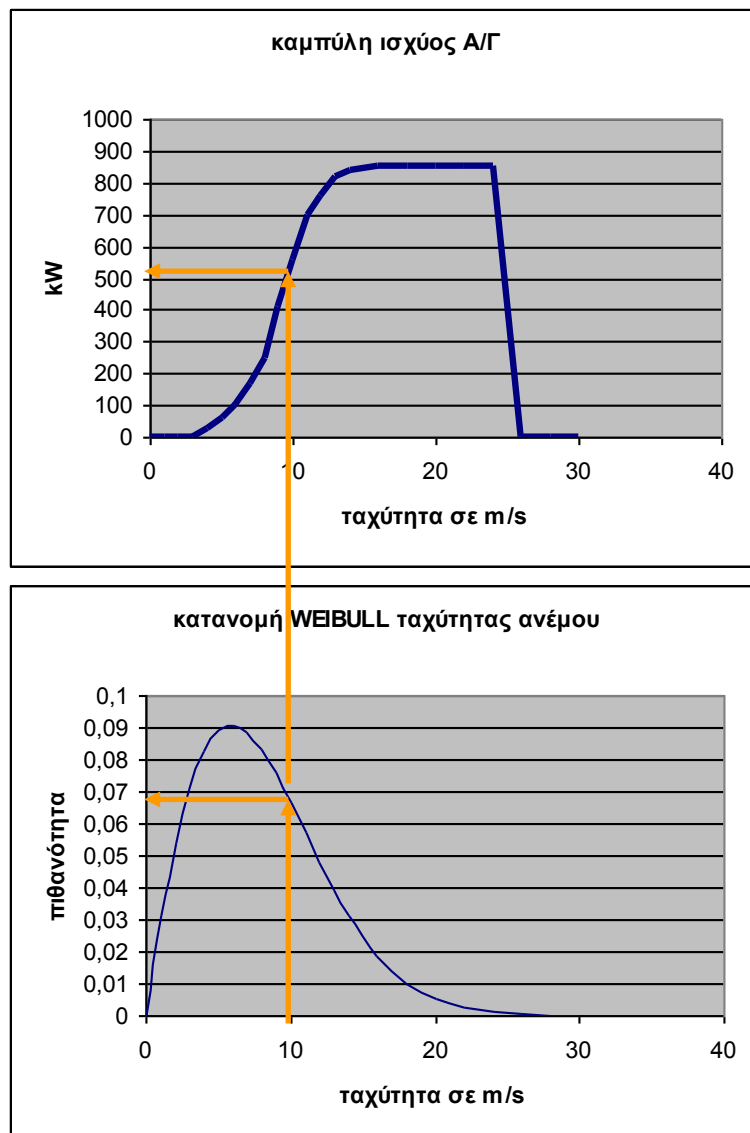
Τελικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά στο ύψος της πλύμνης της μηχανής περιγράφονται από την κατανομή Weibull η οποία έχει την παρακάτω μορφή.



Σχήμα 6.12 τυπική χαρακτηριστική ανεμολογικών δεδομένων στη θέση της Α/Γ.

Με βάση τα σχήματα 6.11 και 6.12 ο υπολογισμός της παραγόμενης από την Α/Γ ενέργειας γίνεται με τη μεθοδολογία η οποία σχηματικά φαίνεται στο σχήμα 6.13.

Η μεθοδολογία αυτή είναι η ολοκλήρωση της σχέσης η οποία περιγράφει την απόδοση της μηχανής για κάθε περιοχή ταχύτητας στη διάρκεια του χρονικού διαστήματος για το οποίο έχει κατασκευαστεί η κατανομή Weibull με βάση την πιθανότητα η οποία περιγράφεται από την κατανομή Weibull.



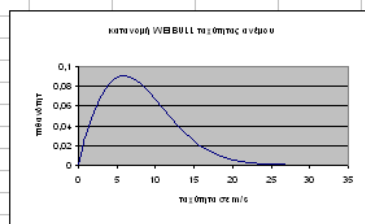
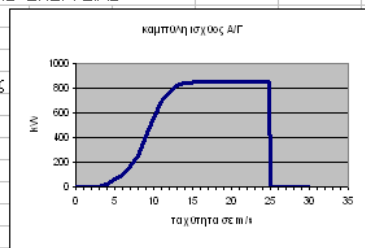
Εφαρμογή.

Για τα δεδομένα των σχημάτων 6.11 και 6.12 να υπολογίστε την ετήσια παραγόμενη ενέργεια από την συγκεκριμένη Α/Γ. Υποθέτουμε ότι η κατανομή Weibull αφορά ετήσια δεδομένα και ότι αυτά μετρήθηκαν στο ύψος των 60 μέτρων στο οποίο βρίσκεται η πλύμνη της Α/Γ.

Η διαδικασία υπολογισμού γίνεται πολύ πιο αποδοτική εάν προγραμματιστεί σε ένα υπολογιστικό φύλλο. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Στα αποτελέσματα φαίνεται και το μεγάλο σφάλμα που προκύπτει αν υπολογιστεί η παραγόμενη ενέργεια με βάση τη μέση ετήσια ταχύτητα και όχι με βάση την κατανομή Weibull –37%-. Το σφάλμα αυτό προκύπτει από το ότι η ενέργεια δεν είναι ανάλογη της ταχύτητας αλλά του κύβου της ταχύτητας καθώς και από την καμπύλη απόδοσης της Α/Γ.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΗΤΡΙΑΣ						
ΤΥΠΟΣ : VESTAS V52-850						
ετήσιες ώρες λειτουργίας	8760	ώρες				
διάμετρος πτερωτήρας	52	μέτρα				
επιφάνεια πτερυγίων	2122,64	m ²				
πυκνότητα αέρα	1,2	kg/m ³				
Κατανομή WEIBULL	ετήσιας ταχύτητας ανέμου	Καμπύλη i	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ			
συντελεστής k -παρά	1,85					
συντελεστής C -παρ	9					
Ταχύτητα	πιμή κατα	Υπολογισμ	ισχύς ανέμου[kW]	Παραγωγή	Ενέργεια	Βαθμός απόδοσης
0	0		0	0	0	
1	0,031217	0,031217	1,273584	0	0	0
2	0,053815	0,107631	10,18867	0	0	0
3	0,070901	0,212702	34,38677	0	0	0
4	0,082601	0,330405	81,50938	25	18089,69	0,306713
5	0,089125	0,445623	159,198	60	46843,93	0,376889
6	0,09094	0,545639	275,0941	100	79663,27	0,363512
7	0,088751	0,621259	436,8393	170	132168,4	0,389159
8	0,083417	0,667333	652,075	250	182682,4	0,383391
9	0,075851	0,682657	928,4427	410	272425,6	0,4416
10	0,066938	0,669383	1273,584	560	328372,3	0,439704
11	0,057465	0,632116	1695,14	700	352375,9	0,412945
12	0,048074	0,576891	2200,753	760	320059,4	0,345336
13	0,039246	0,510201	2798,064	820	281913,5	0,29306
14	0,031299	0,438193	3494,714	840	230314,1	0,240363
16	0,018624	0,297985	5216,6	850	138674,8	0,162941
18	0,010185	0,183325	7427,542	850	75835,52	0,114439
20	0,00514	0,102793	10188,67	850	38269,68	0,083426
22	0,002401	0,05282	13561,12	850	17877,05	0,062679
24,9	0,000698	0,017371	19661,91	850	5194,557	0,043231
25	0,000667	0,016668		0	0	
28	0,000157	0,004409		0	0	
30	5,51E-05	0,001654		0	0	
ΣΥΝΟΛΟ	0,947567				2520760	με αναλυτικό υπολογισμό μέσω κατανομής Weibull
μέση ταχύτητα [m/s]	7,543819				1839600	με μέση ταχύτητα
					37,02762	μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Ενέργεια από το νερό –Υδροηλεκτρικά-

Εισαγωγή.

Η χρήση του νερού για την αντικατάσταση του ανθρώπινου κόπου είναι γνωστή από το παρελθόν. Σήμερα η χρήση της δυναμικής και κινητικής ενέργειας του νερού έχει μονοπωληθεί πλέον στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι έχουμε τα υδροηλεκτρικά έργα τα οποία αξιοποιούν τις υδατοπτώσεις και τα υδατορεύματα για να παράγουν ηλεκτρισμό.

Τα υδροηλεκτρικά έργα -Υ/Η- μπορούν να διαχωριστούν σε μικρά και μεγάλα με βάση το όριο των 10MW ονομαστικής ισχύος όριο το οποίο είναι συμβατικό. Μπορούν ακόμα να ταξινομηθούν με πολλούς άλλους τρόπους π.χ. εάν διαθέτουν ταμιευτήρα ή αν λειτουργούν στον ρού του ποταμού κ.λ.π. Στο κεφάλαιο αυτό θα δούμε τα βασικά στοιχεία που αφορούν τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα.

Οι βασικές ενεργειακές μετατροπές σε ένα υδροηλεκτρικό.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε το υδροηλεκτρικό του σχήματος 7.1. Το νερό βρίσκεται σε ένα υψόμετρο z_1 . Με μια σωλήνωση το νερό μεταφέρεται και περνάει μέσα από τον υδροστρόβιλο και καταλήγει σε ένα υψόμετρο z_2 . συγχρόνως στη θέση 1 όπου και το υψόμετρο z_1 επικρατεί πίεση p_1 ενώ η ταχύτητα του νερού είναι v_1 . Αντίστοιχα στη θέση εξόδου από τον υδροστρόβιλο η πίεση περιβάλλοντος είναι p_2 και η ταχύτητα του νερού v_2 .

Αρχικά θα υποθέσουμε ότι ο στρόβιλος είναι ένα μαύρο κουτί χωρίς να δούμε με λεπτομέρειες τι ακριβώς γίνεται μέσα του. Βλέπουμε μόνον τις συνθήκες πριν –στη θέση 1-και μετά –στη θέση 2-. Μπορούμε με βάση τις τιμές υψομέτρου, πίεσης και ταχύτητας να κάνουμε το ισοζύγιο ενέργειας στο σύστημα το οποίο περιλαμβάνει ως είσοδο το 1 και έξοδο το 2. Το ισοζύγιο αυτό δίδει ανά μονάδα μάζας νερού:

$$\frac{1}{2} v_2^2 + g z_2 + p_2 / \rho + E_{\text{turb}} + \text{απώλειες} = \frac{1}{2} v_1^2 + g z_1 + p_1 / \rho \quad [7.1]$$

Επιλύοντας ως προς την ειδική παραγόμενη από το στρόβιλο ενέργεια παίρνουμε

$$E_{\text{turb}} = \frac{1}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) + g \cdot (z_1 - z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho} - \text{απώλειες.} \quad [7.2]$$

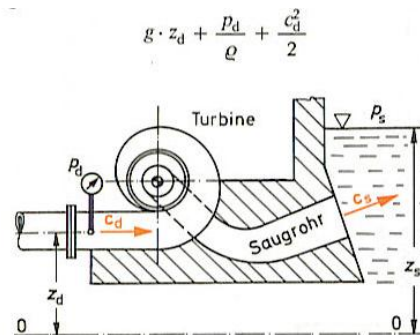


Bild 2.2 Wasserturbine

und am Saugrohrende (Austrittsstutzen):

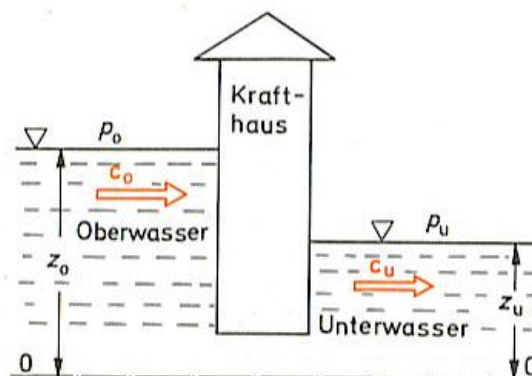
$$g \cdot z_s + \frac{p_s}{\rho} + \frac{c_s^2}{2}$$

Die spezifische Stutzenarbeit Y ergibt sich als Energiedifferenz:

$$Y = g(z_d - z_s) + \frac{p_d - p_s}{\rho} + \frac{c_d^2 - c_s^2}{2} \quad (2.6)$$

Αν υποθέσουμε ότι η διαφορά πίεσης στην είσοδο και την έξοδο από το χώρο ελέγχου καθώς και η διαφορά ταχύτητας είναι πολύ μικρές κάτι το οποίο στην πράξη ισχύει βλέπουμε ότι η δυνατότητα παραγωγής έργου προέρχεται κυρίως από την υψομετρική διαφορά και την παροχή μάζας του νερού.

Έτσι στην πράξη αυτοί οι δύο παράγοντες είναι που καθορίζουν την δυνατότητα κάποιο υδατόρευμα να παράγει ωφέλιμο έργο.



Σχήμα 7.1 Ισοζύγιο ενέργειας.

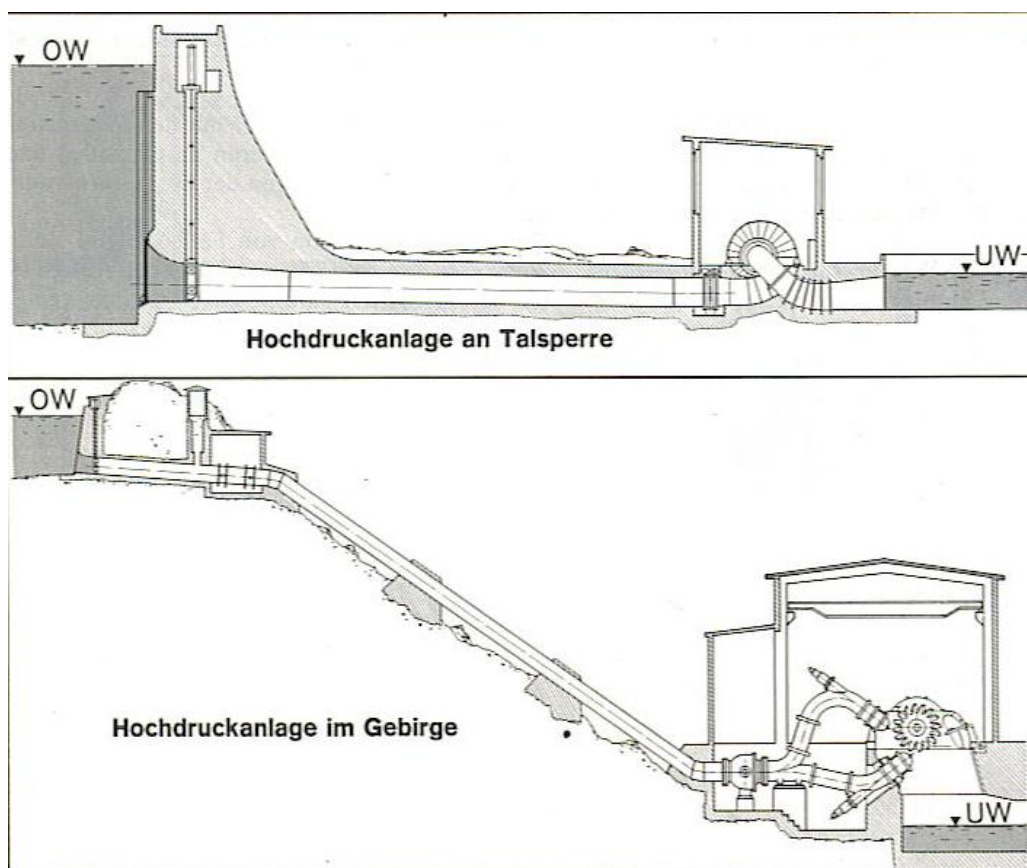
Ο επόμενος σημαντικός παράγοντας είναι η δυνατότητα του στροβίλου να μετατρέψει τη διαθέσιμη στο νερό ενέργεια σε έργο ατράκτου το οποίο στη συνέχεια με τη βοήθεια μίας ηλεκτρογεννήτριας θα μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Το θέμα αυτό

δεν θα το αντιμετωπίσουμε εδώ μια και θεωρούμε ότι είναι αντικείμενο του μαθήματος των στροβιλομηχανών. Απλώς θα αναφέρουμε ότι οι σημερινοί υδροστρόβιλοι φθάνουν σε βαθμούς απόδοσης της τάξης του 80-85%. Ένας ακόμη παράγοντας απωλειών είναι αυτός στη σωλήνωση προσαγωγής του νερού -αγωγός πτώσεως-. Οι απώλειες αυτές υπολογίζονται με βάση τις μεθοδολογίες για απώλειες δικτύων νερού.

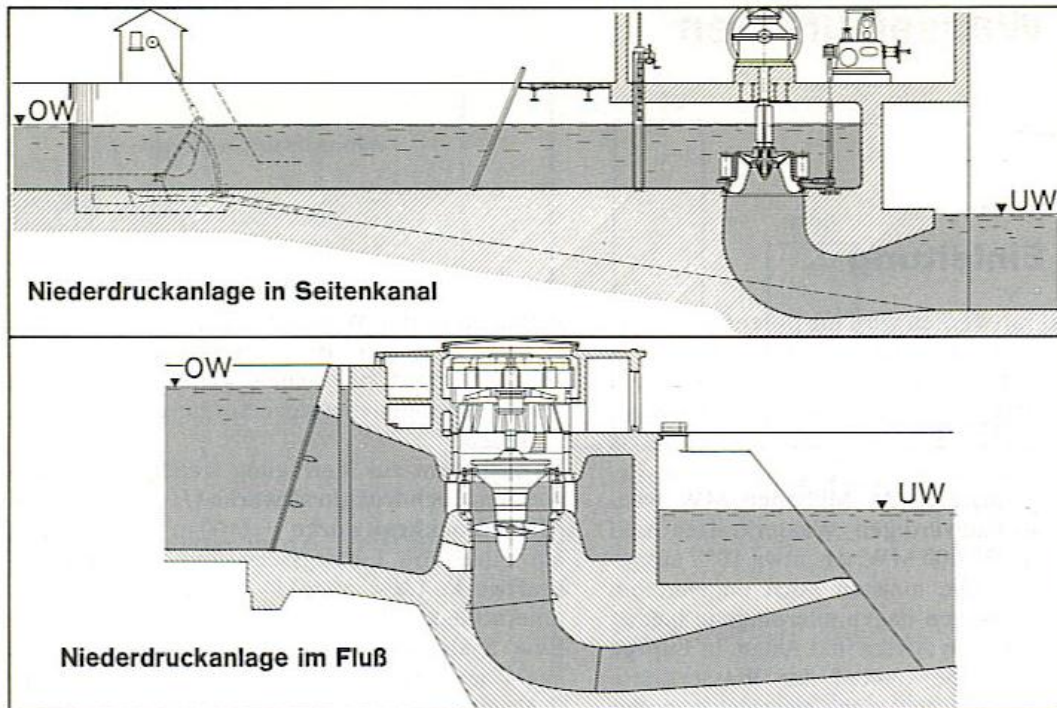
Τύποι υδροστροβίλων και εγκαταστάσεων.

Οι εγκαταστάσεις των υδροηλεκτρικών έργων ταξινομούνται σε εγκαταστάσεις υψηλής πίεσης -ή μεγάλου ύψους πτώσης- και χαμηλής πίεσης -ή μικρού ύψους πτώσης-. Σχηματικά φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.

Τα μικρά υδροηλεκτρικά ανήκουν συνήθως στην πρώτη κατηγορία αλλά χωρίς να έχουν ταμιευτήρα. Με άλλα λόγια αξιοποιούν όσο νερό παρέχει το υδατόρευμα.

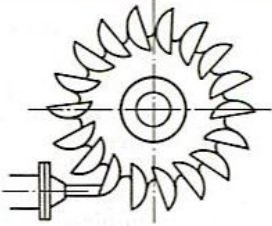
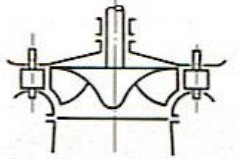
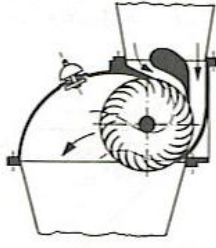
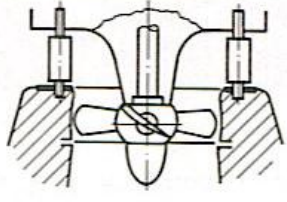
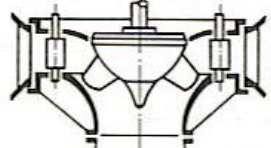


Σχήμα 7.2 Υδροηλεκτρικά με σχετικά μεγάλο ύψος πτώσης.



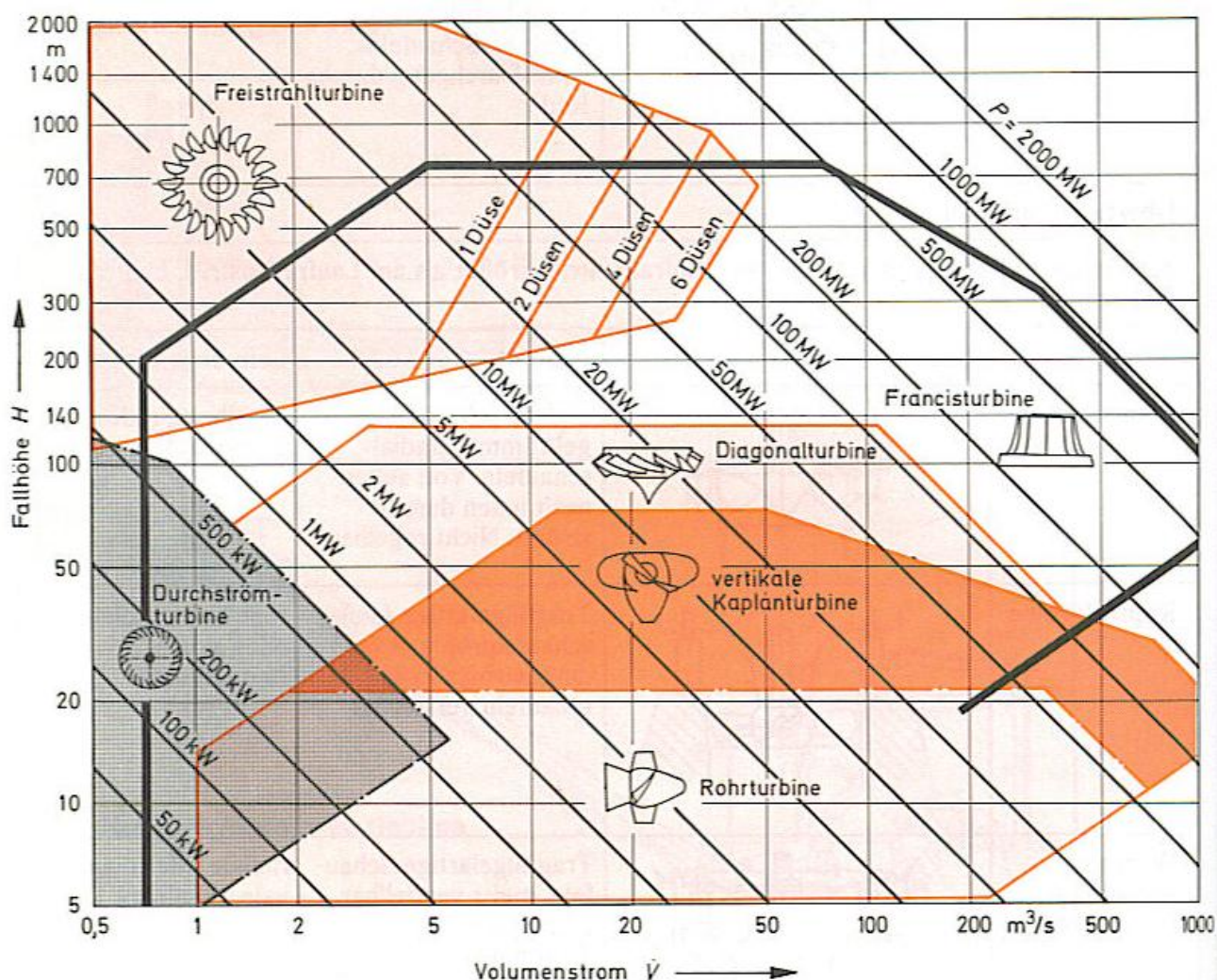
Σχήμα 7.3 Υδροηλεκτρικά με μικρό ύψος πτώσης.

Οι κυριότεροι τύποι υδροστροβίλων οι οποίοι βρίσκονται σε χρήση σήμερα φαίνονται παρακάτω

Freistrahlturbine (Pelton turbine)		Francisturbine	
Durchström-turbine, z.B. Ossberger-Turbine		Kaplanturbine	
		Diagonal-turbine, z.B. Dériazturbine	

Σχήμα 7.4 Οι κυριότεροι τύποι υδροστροβίλων.

Στα μικρά υδροηλεκτρικά όπου έχουμε σχετικά μικρές παροχές και μεγάλα ύψη πτώσης χρησιμοποιείται ο στρόβιλος τύπου Pelton. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα διάγραμμα επιλογής μηχανής σε σχέση με την παροχή του υδατορεύματος και το διαθέσιμο ύψος πτώσης.



Σχήμα 7.5 Διάγραμμα επιλογής τύπου υδροστρόβιλου.

Στην πράξη η περιοχή του στρόβιλου Pelton επεκτείνεται και σε χαμηλότερα ύψη πτώσης ενώ περισσότερα από 1 ακροφύσια χρησιμοποιούνται σε μικρότερες παροχές -ήδη στο 1 m³/s μπορεί να έχουμε 2 ακροφύσια-.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένας στρόβιλος Pelton με δύο ακροφύσια σε λεπτομέρεια ενώ τη συνέχεια φαίνεται ο στρόβιλος ενός μικρού υδροηλεκτρικού στην Ελλάδα.

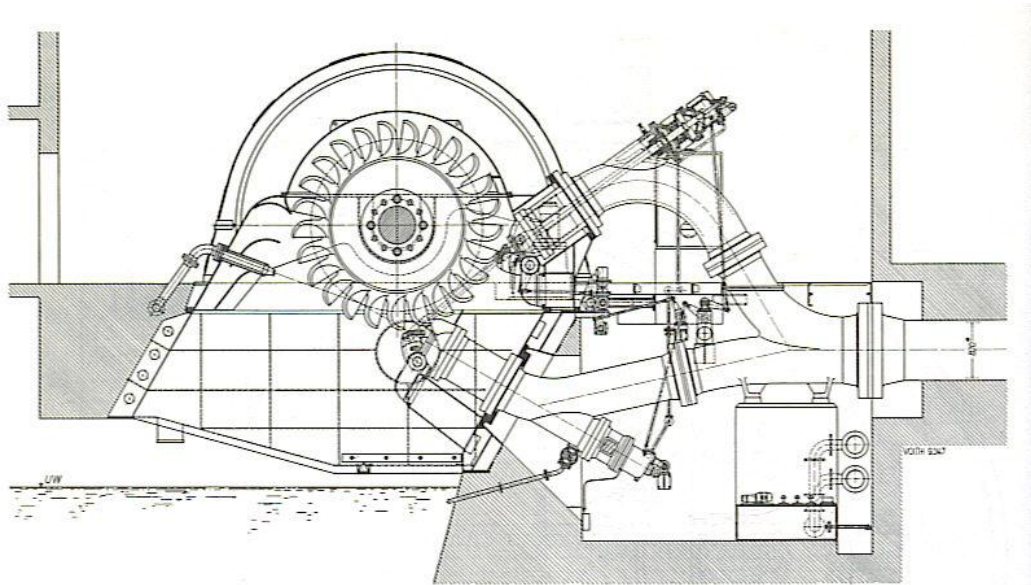


Bild 7.8 Freistrahltriebmaschine (nach Fa. Voith)



Σχήμα 7.6 Σχεδιάγραμμα και φωτογραφία υδροστροβίλου μικρού Υ/Η.



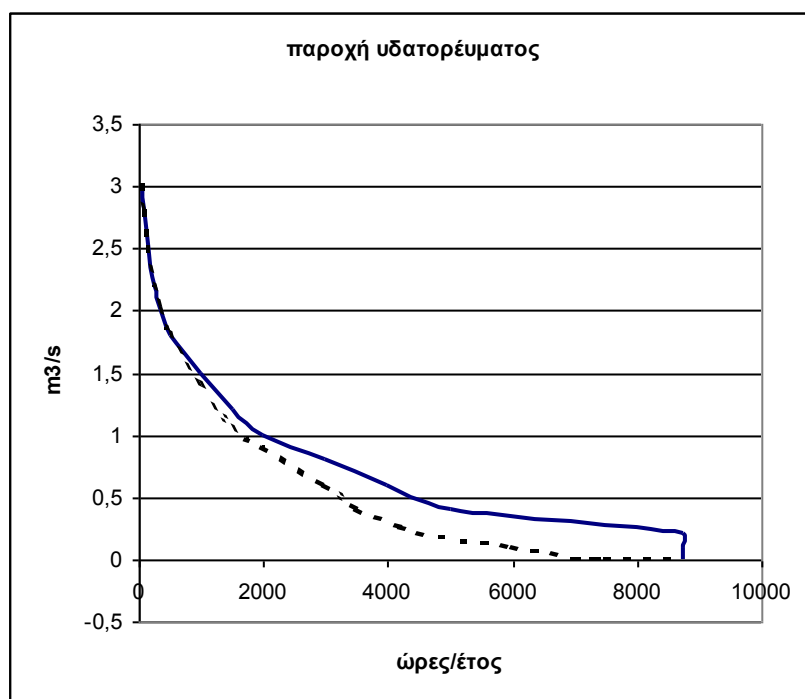
Σχήμα 7.7 Ο μηχανισμός ελέγχου και ο αγωγός πτώσης πριν την είσοδό του στο κτίριο των στροβίλων ενός μικρού Υ/Η.

Υπολογισμοί παραγωγής ενέργειας από υδατορεύματα.

Στην παράγραφο αυτή θα δούμε απλοποιημένη τη διαδικασία υπολογισμού της παραγόμενης ενέργειας από μικρά υδατορεύματα.

Κάθε υδατόρευμα χαρακτηρίζεται από μια μεταβλητή παροχή στη διάρκεια του έτους. Η παροχή μεταβάλλεται εξαιτίας πολλών παραγόντων μεταξύ των οποίων οι βροχοπτώσεις και οι χιονοπτώσεις –κατακριμνήσεις-, η διαπερατότητα του εδάφους, η φυτική κάλυψη του εδάφους κ.λ.π. Για περισσότερες πληροφορίες ο ενδιαφερόμενος μπορεί να ανατρέξει στη βιβλιογραφία, [13]. Τελικά όλοι αυτοί οι παράγοντες διαμορφώνουν μια παροχή στο υδατόρευμα. Η παροχή του υδατορεύματος μεταβάλλεται και στη διάρκεια του έτους αλλά και μεταξύ διαφορετικών ετών μια και οι παράγοντες που την επηρεάζουν έχουν σημαντικές μεταβολές μεταξύ των διαφόρων ετών.

Τελικά για κάθε υδατόρευμα υπάρχει μια μέση κατανομή πιθανότητας των διαφόρων παροχών του η οποία και το χαρακτηρίζει. Γενικά έχει τη μορφή η οποία φαίνεται στο σχήμα 7.8 και δείχνει για πόσες ώρες της πλήρους διάρκειας του έτους η παροχή του υδατορεύματος είναι μεγαλύτερη από την τιμή του διαγράμματος.



Σχήμα 7.8 Παροχή υδατορεύματος στη διάρκεια του έτους

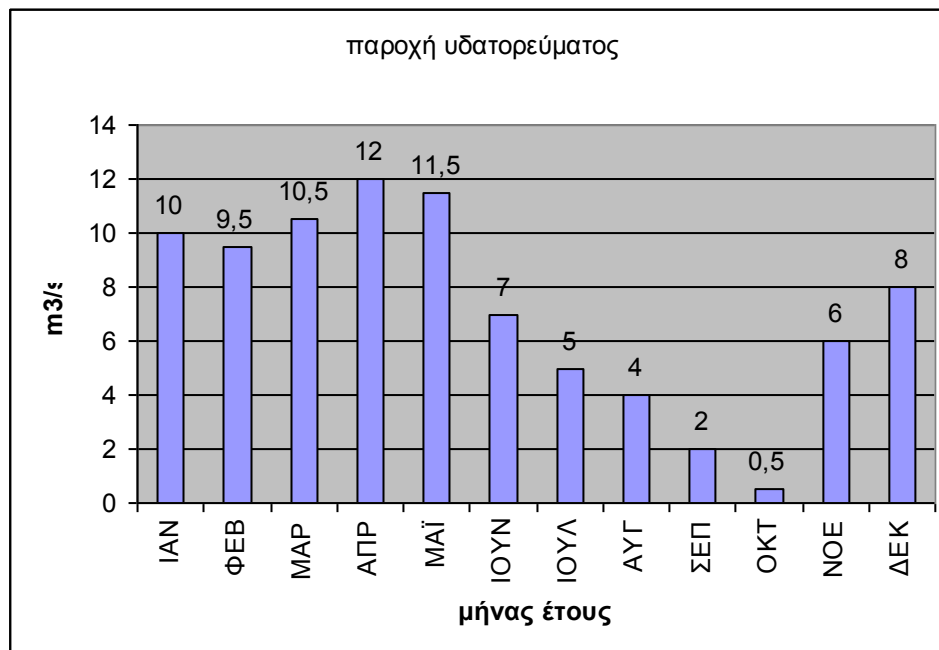
Για παράδειγμα στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η παροχή δυο υδατορευμάτων. Το ένα αντιστοιχεί στη συνεχή γραμμή και το άλλο στη διακεκομμένη.

Για το πρώτο το διάγραμμα δείχνει ότι η παροχή του είναι μεγαλύτερη από $1\text{m}^3/\text{s}$ για 2000 ώρες /έτος ενώ για το δεύτερο η παροχή είναι μεγαλύτερη από $1\text{m}^3/\text{s}$ για περίπου 1600 ώρες/έτος. Αντίστοιχα το διάγραμμα δείχνει ότι το δεύτερο υδατόρευμα για περίπου 1500 ώρες/έτος δεν έχει καθόλου παροχή -είναι στεγνό- ενώ το πρώτο για το σύνολο των ωρών του έτους έχει παροχή τουλάχιστον $0,25\text{m}^3/\text{s}$.

Ο προσδιορισμός αυτού του διαγράμματος γίνεται από την υδρολογική μελέτη η οποία αξιοποιεί δεδομένα μετρήσεων και κατακριμνήσεων. Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να ανατρέξει στη βιβλιογραφία, [13].

Ποιά απλή -αλλά και λιγώτερο ακριβής- προσέγγιση είναι να χρησιμοποιήσουμε παροχές του υδατορεύματος με μέσους όρους μηνών. Αυτό απλοποιεί τους υπολογισμούς.

Ένα παράδειγμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



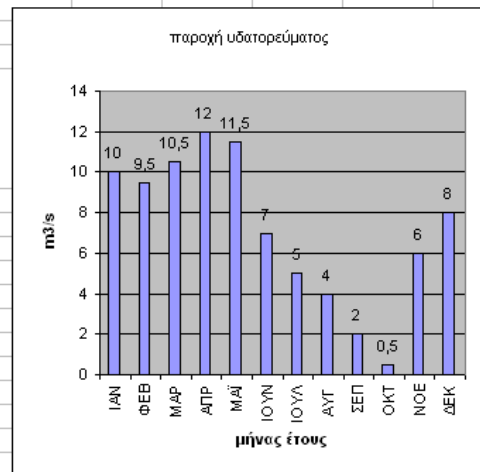
Μετά τον προσδιορισμό της παροχής του υδατορεύματος θα πρέπει να καθοριστεί η οικολογική παροχή.

Οικολογική παροχή λέγεται η παροχή η οποία θα πρέπει οπωσδήποτε να αφήνεται να περνάει συνεχώς από την κοίτη του ρέματος ώστε να μπορεί να διατηρηθεί η πανίδα και η χλωρίδα του ρέματος. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υπολογισμού της οικολογικής παροχής. Υπάρχουν προδιαγραφές οι οποίες ζητούν η οικολογική παροχή να είναι τουλάχιστον το 30% του μέσου όρου των θερινών μηνών -Ιούλιος και Αύγουστος-. Αυτή η προσέγγιση ενδεχομένως σε αρκετά ρέματα στα οποία η ροή είναι οριακή να έχει καταστρεπτικές συνέπειες για την διατήρηση της ζωής του ρέματος. Το πλέον βέβαιο είναι ότι για να μην υπάρχει αρνητική περιβαλλοντική επίπτωση θα πρέπει η οικολογική παροχή να είναι το 100% της μέσης θερινής παροχής και σε περιπτώσεις που αυτή είναι αρκετά μεγάλη να αποδεικνύεται από την περιβαλλοντική μελέτη ότι μικρότερη οικολογική παροχή δεν θα έχει αρνητικές συνέπειες. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει η περιβαλλοντική μελέτη να ασχολείται με μεγάλη σοβαρότητα με το θέμα αυτό.

Έφ'όσον έχει καθοριστεί η οικολογική παροχή, υπολογίζεται με αφαίρεση η υδατοπαροχή η οποία είναι διαθέσιμη για αξιοποίηση. Στη συνέχεια γίνονται οι υπολογισμοί απωλειών του αγωγού πτώσης και του υδροστροβίλου και υπολογίζεται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Οι υπολογισμοί γίνονται για κάθε περιοχή παροχών και φυσικά όσο πιο μικρές είναι οι περιοχές παροχών τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια υπάρχει στον υπολογισμό του συνόλου δηλ. του ολοκληρώματος.

Οι υπολογισμοί αυτοί μπορούν να γίνουν σχετικά εύκολα σε ένα υπολογιστικό φύλλο και σχετικό παράδειγμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Υπολογισμός παραγωγής ενέργειας από υδατόρευμα					
Μέσο ύψος πτώσης		7 μέτρα			
βαθμός απόδοσης στραβίλου κ		0,7			
κόστος ενέργειας		0,066 Ε/kWh			
ΜΗΝΑΣ	ΠΑΡΟΧΗ m ³ /s	ειδική ενέργεια νερού [J/kg]	ισχύς νερού [kW]	παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς [kW]	μηνιαία παραγωγή ενέργειας [kWh]
ΙΑΝ	10	68,67	686,7	480,69	357633,4
ΦΕΒ	9,5	68,67	652,365	456,6555	306872,5
ΜΑΡ	10,5	68,67	721,035	504,7245	375515
ΑΠΡ	12	68,67	824,04	576,828	415316,2
ΜΑΪ	11,5	68,67	789,705	552,7935	411278,4
ΙΟΥΝ	7	68,67	480,69	336,483	242267,8
ΙΟΥΛ	5	68,67	343,35	240,345	178816,7
ΑΥΓ	4	68,67	274,68	192,276	143053,3
ΣΕΠ	2	68,67	137,34	96,138	69219,36
ΟΚΤ	0,5	68,67	34,335	24,0345	17881,67
ΝΟΕ	6	68,67	412,02	288,414	207658,1
ΔΕΚ	8	68,67	549,36	384,552	286106,7
ΣΥΝΟΛΟ					3011619



Σχήμα 7.9 Υπολογισμός της παραγόμενης από υδατόρευμα ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κατσανεβάκης Αθανάσιος, Σημειώσεις του μαθήματος Ενεργειακά συστήματα, Ατμοπαραγωγοί και Ατμοστρόβιλοι, ΤΕΙ Σερρών, 2007.
- [2] www.iset.uni-kassel.de
- [3] W.B.Stine and R.W.Harrigan "*Solar Energy Systems Design*", John Wiley and Sons, Inc. 1985
- [4] Antonio Luge, Steven Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and engineering, Willey, ISBN 0-471-49196-9
- [5] Crystalline Silicon Solar Cells, Willey, 1998.
- [6] ASTM 1036, πρότυπο για μετρήσεις απόδοσης ΦΒ συλλεκτών.
- [7] ΕΛΟΤ EN 12975.02 E2 , πρότυπο δοκιμής ηλιακών συλλεκτών.
- [8] Αεροπορική Μετεωρολογία, Ουρανία Χατζηαλέκου, εκδόσεις AVIATION, Θεσσαλονίκη 2007.
- [9] The Wind Power Book, Jack Park, Cheshire Books, 1981.
- [10] Wind Energy Explained, Manwell, McGowan, Rogers, Willey, 2001.
- [11] Theory of Wing sections, Ira Abbott, Albert Von Doenhoff, Dover Publications, 1959.
- [12] www.cd-adapco.com
- [13] ΜΙΚΡΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ, Παπαντώνης Δημήτριος.

Τέλος

