

Αρχές Οικολογίας και Περιβαλλοντικής Χημείας

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Νίκος Μαμάσης

Τομέας Υδατικών Πόρων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα 2008

ΗΠΙΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι **Ήπιες Μορφές Ενέργειας (ΗΠΕ)** είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχεται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Ο όρος "ήπιες" αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους:

- Δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση για την εκμετάλλευσή τους (εξόρυξη, άντληση, καύση), αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση.
- Πρόκειται για μορφές ενέργειας οι οποίες που δεν αποδεδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα

Οι τεχνολογίες αυτές αναφέρονται και ως **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας** δεδομένου ότι το βασικό τους χαρακτηριστικό είναι η διαχρονική τους ανανέωση και η απεριόριστη διαθεσιμότητά τους.

Ακόμη είναι γνωστές και σαν **Εναλλακτικές Μορφές Ενέργειας** γιατί αποτελούν σήμερα εναλλακτικές λύσεις για την παραγωγή ενέργειας αντί των συμβατικών

Σήμερα οι Ήπιες Μορφές Ενέργειας χρησιμοποιούνται είτε άμεσα (κυρίως για θέρμανση) είτε μετατρεπόμενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια). Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό από τις μορφές αυτές είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης.

ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Αιολική ενέργεια. Χρησιμοποιείται η ένταση του ανέμου. Τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Ηλιακή ενέργεια. Χρησιμοποιείται η ηλιακή ακτινοβολία. Η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος προωθείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Υδατοπτώσεις. Χρησιμοποιείται η κινητική ενέργεια του νερού. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.

Βιομάζα. Χρησιμοποιούνται οι υδατάνθρακες των φυτών με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε απ' το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές.

Γεωθερμική ενέργεια. Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται απ' τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια.

Ενέργεια από παλίρροιες. Εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού.

Ενέργεια από κύματα. Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.

Ενέργεια από τους ωκεανούς. Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων.

ΗΠΙΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Πλεονεκτήματα

- Είναι ανεξάντλητες, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας σχεδόν μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- Μπορούν να αποτελέσουν εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.
- Είναι ευέλικτες εφαρμογές που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού σε απομακρυσμένες περιοχές
- Στις περισσότερες εφαρμογές ο εξοπλισμός είναι κατασκευαστικά απλός και με μεγάλο χρόνο ζωής.
- Η υλοποίηση ΑΠΕ σήμερα επιδοτείται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.

Μειονεκτήματα

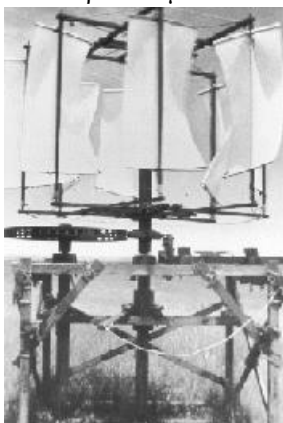
- Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης και γι αυτό απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής.
- Η απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους, το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Σήμερα τα προβλήματα αυτά έχουν επιλυθεί.

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

- Ο Αίολος ήταν σύμφωνα με την ελληνική μυθολογία ο θεός διαχειριστής των ανέμων, μαζί με τους οκτώ βοηθούς του (Βορέας, Καικίας, Απηνιώτης, Εύρος, Νότος, Λιψ, Ζέφυρος, Σκίρων) που απεικονίζονται στον πύργο των Αέρηδων (κτίσμα του 2^{ου} π.Χ. αιώνα) στην Πλάκα.
- Η πρώτη χρήση αιολικής ενέργειας έγινε στη ναυσιπλοία, ενώ οι πρώτοι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για άλεσμα δημητριακών και άντληση νερού.
- Οι αρχαιότεροι ανεμόμυλοι (κατακόρυφου άξονα) κατασκευάστηκαν στην Περσία τον 6^ο έως τον 9^ο αιώνα μ.Χ., ενώ η πρώτη γραπτή αναφορά γίνεται στην Κίνα το 13^ο αιώνα μ.Χ.
- Στην Ευρώπη αναπτύχθηκαν διάφορα είδη ανεμόμυλου (οριζόντιου άξονα) από τον 13^ο αιώνα και πιθανόν οι νερόμυλοι να αποτέλεσαν πρότυπο για την κατασκευή τους.
- Το 17^ο αιώνα η 'τεχνολογία' μεταφέρεται στην Αμερική όπου οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για άντληση νερού.
- Ο πρώτος ανεμόμυλος για παραγωγή ηλεκτρισμού κατασκευάστηκε το 1888 στο Cleveland του Ohio. Είχε διάμετρο πτερωτής 17 μέτρα και ισχύ 12 kW.
- Σήμερα η Δανία χώρα πλούσια σε αιολικό δυναμικό έχει τα πρωτεία στην κατασκευή αλλά και στην χρήση ανεμογεννητριών.
- Στην Ελλάδα (ειδικότερα στο Αιγαίο) η χρήση ανεμομύλων χρονολογείται από το 13^ο αιώνα. Το 1960 υπήρχαν 10000 ανεμόμυλοι στο Οροπέδιο Λασιθίου, 2500 στην υπόλοιπη Κρήτη, και 600 στη Ρόδο

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Αντίγραφο του πρώτου
Περσικού μύλου



Μεσογειακός



Αμερικάνικος
(18^{ος} αιώνας)



ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Δανικός



Ολλανδικός



Αγγλικός



ΑΙΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ

Θεωρητική αιολική ισχύς

$$I = E / t = (1/2) m V^2 / t = (1/2) \rho L A V^2 / t = (1/2) \rho A V^3$$

I αιολική ισχύς (W)

E κινητική ενέργεια (J)

t χρόνος (s)

m μάζα αέρα (kg)

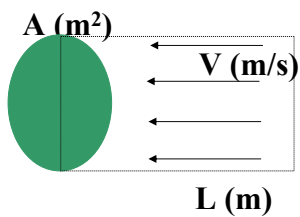
V ταχύτητα ανέμου (m/s)

ρ πυκνότητα αέρα (kg/m³)

A επιφάνεια αναφοράς (m²)

L διαδρομή ανέμου σε χρόνο t (m)

Ονομαστική ισχύς ανεμογεννήτριας



$$I = (1/2) C \eta_M \eta_E \rho A V^3$$

C συντελεστής ισχύος

η_M βαθμός απόδοσης μηχανικού συστήματος

η_E βαθμός απόδοσης ηλεκτρομηχανικής μετατροπής

ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Οριζοντίου άξονα



ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ



Κοπεγχάγη

ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Κατακόρυφου άξονα



Η κατακόρυφη ανεμογεννήτρια του σχήματος είναι η πιο διαδεδομένη. Ονομάζεται Darrieus από τον Γάλλο μηχανικό που την κατοχύρωσε το 1931.

Πλεονεκτήματα

- δεν χρειάζονται σύστημα προσανατολισμού
- η ηλεκτρική γεννήτρια είναι στο έδαφος

Μειονεκτήματα

- εκμεταλλεύονται μικρότερες ταχύτητες ανέμου (αφού είναι κοντά στο έδαφος)
- έχουν μικρότερο συντελεστή ισχύος
- η στερέωση στο έδαφος απαιτεί εγκαταστάσεις που καταλαμβάνουν μεγάλο εμβαδόν

ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Χαρακτηριστικά μεγέθη

1. Διάμετρος της πτερωτής D

2. Ύψος τοποθέτησης H

Συνήθως $1 < H/D < 1.5$

3. Πλήθος των πτερυγίων

Έχουν επικρατήσει οι αιολικές μηχανές με 3 πτερύγια. Με λιγότερα πτερύγια (2 ή 1) απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής για το ίδιο ενεργειακό αποτέλεσμα που συνεπάγεται περισσότερο θόρυβο και φθορές, με μόνο πλεονέκτημα το μικρότερο κόστος.

4. Είδος των πτερυγίων (πάχος, υλικό)

Οι πολύ συμπαγείς πτερωτές (πολλά ή φαρδιά πτερύγια) σημαίνει ότι ξεκινάνε τη λειτουργία τους με μικρές ταχύτητες ανέμου αλλά θα πρέπει να βγαίνουν εκτός λειτουργίας στις μεγάλες ταχύτητες. Κλασικό παράδειγμα τέτοιων ανεμομύλων αποτελούν οι αμερικανικοί του 18^{ου} αιώνα οι οποίοι αντλούσαν σταθερά μικρή ποσότητα νερού όλο το χρόνο.

5. Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής

Συνδέεται με παράγοντες όπως η συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου και η αντοχή των πτερυγίων σε φυγόκεντρες τάσεις.

6. Συντελεστής ισχύος C

Υπολογίζεται από το πηλίκο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την εισερχόμενη ενέργεια του αέρα. Ουσιαστικά είναι ο αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης πτερωτής και έχει μέγιστο όριο την τιμή $C \leq 16/27 = 0.593$ (όριο Betz, 1919). Πρακτικά στην περίπτωση καλού σχεδιασμού ο συντελεστής κυμαίνεται στο 0.35.

7. Ονομαστική ισχύς

ΧΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

- Παραγωγή μηχανικής ενέργειας (αλευρόμυλοι, άντληση υπόγειων νερών, αποστράγγιση)
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Ανεξαρτησία από ορυκτά καύσιμα (δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με αέριους ρύπους, παρέχει προστασία έναντι της αστάθειας τιμών των ορυκτών καυσίμων)
- Τεχνολογικά ώριμη, οικονομικά ανταγωνιστική, γρήγορη και τυποποιημένη στην εφαρμογή της, φιλική προς το περιβάλλον
- Ελεύθερη, άφθονη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας
- Βοηθά στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος μειώνοντας απώλειες μεταφοράς ενέργειας
- Ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία κάθε χώρας
- Δημιουργεί θέσεις απασχόλησης στην περιφέρεια

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Θόρυβος
- Υποβάθμιση της αισθητικής του τοπίου
- Επίδραση στις γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες
- Επιπτώσεις στον πληθυσμό των πουλιών

ΧΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ

Παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς 47912 MW (2004) και 58982 MW (2005)

ΧΩΡΑ	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	
	2004	2005
Γερμανία	16629	18428
Ισπανία	8263	10027
ΗΠΑ	6725	9149
Δανία	3124	3128
Ινδία	3000	4430
Ιταλία	1265	1717
Ολλανδία	1078	1219
Ιαπωνία	896	1040
Βρετανία	888	1353
Κίνα	764	1260
Σύνολο	42632	51751

ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

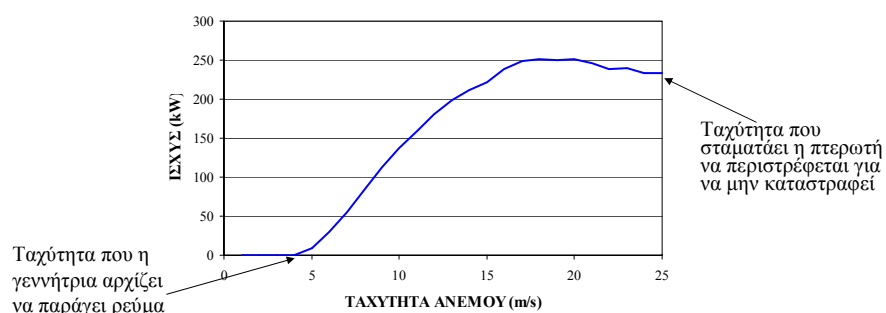
Δανία 19%
Αυστραλία 12.5%
Γερμανία 5.5%
Ιρλανδία 2%
ΗΠΑ 0.4%
Ελλάδα 0.35%

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΡΓΟΥ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

- Εκτίμηση αιολικού δυναμικού
- Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- Άδεια κατασκευής
- Σχεδιασμός έργου
- Κατασκευή
 - Ανεμογεννήτριας
 - Οδικής πρόσβασης
 - Γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος
 - Υποσταθμού ηλεκτρικού ρεύματος

ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Καμπύλες ισχύος ανεμογεννήτριας



Οι καμπύλες ισχύος συνήθως εκτιμώνται εμπειρικά, από μετρήσεις πεδίου της ταχύτητας ανέμου με ανεμόμετρο και της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

Υπάρχουν αβεβαιότητες στην εκτίμηση των καμπυλών που σχετίζονται με:
(α) τη μέτρηση της ταχύτητας και (β) την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στην πτερωτή

ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Επιλογή θέσης ανεμογεννητριας

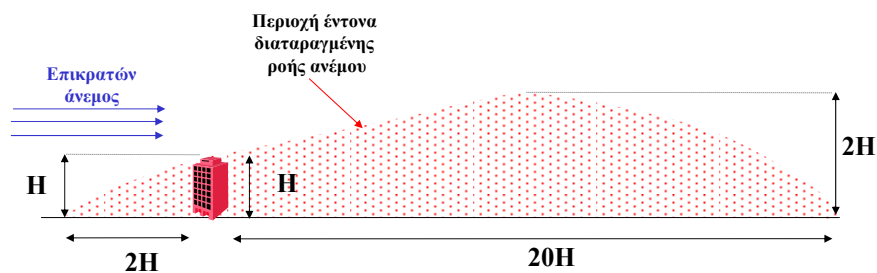
- Μελέτη για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης και της ταχύτητας των επικρατούντων ανέμων
- Εντοπισμός των φυσικών και τεχνητών εμποδίων
- Εκτίμηση της τραχύτητας του εδάφους
- Καταγραφή του υπάρχοντος στην περιοχή ηλεκτρικού δικτύου
- Εκτίμηση της ευκολίας υλοποίησης κατασκευών (πρόσβαση στη θέση, μορφολογία εδάφους)

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- ♦ Όταν ο αέρας έχει φύγει από ανεμογεννήτρια έχει χάσει την ενέργειά του και έτσι στην περίπτωση των αιολικών πάρκων οι αποστάσεις μεταξύ δύο ανεμογεννητριών πρέπει να είναι 5-9 φορές την διάμετρο της πτερωτής (στη διεύθυνση των επικρατούντων ανέμων) και 3-5 φορές (κάθετα στη επικρατούσα διεύθυνση). Γενικά σε αιολικά πάρκα οι απώλειες κυμαίνονται από 5 έως 15%
- ♦ Όταν ο αέρας βρει άνοιγμα, η ταχύτητα του μπορεί να αυξηθεί έως και 50% (tunnel effect)
- ♦ Η ταχύτητα ανέμου αυξάνεται στις κορυφές λόφων (hill effect)

ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

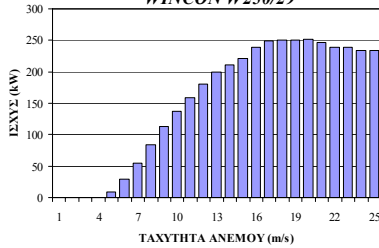
Επιλογή θέσης ανεμογεννητριας σε σχέση με εμπόδιο



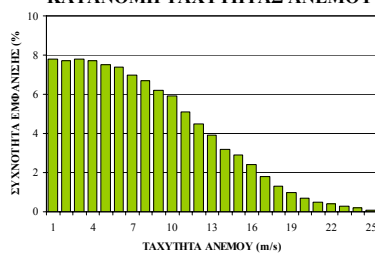
Σημαντική επίδραση έχει η ανεμοπερατότητα (porosity) του εμποδίου. Η ανεμοπερατότητα ενός συμπαγούς εμποδίου (π.χ. κτιρίου) έχει την τιμή 0, ενώ στην περίπτωση μη συμπαγούς εμποδίου (π.χ. συγκροτήματος κτιρίων) υπολογίζεται ως το πηλίκο της ανοικτής επιφάνειας προς τη συνολική επιφάνεια.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

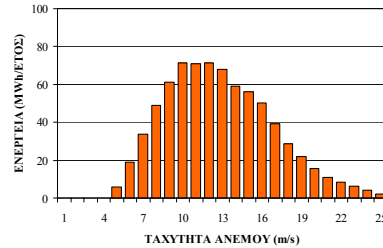
ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ
WINCON W250/29



ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ



ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Φωτοβολταϊκά συστήματα

- Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα έχει στόχο την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Αποτελείται από ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία και τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην επιθυμητή μορφή.
- Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι συνήθως από **άμορφο ή κρυσταλλικό πυρίτιο**. Εκτός από το πυρίτιο χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων, όπως το Κάδμιο - Τελλούριο και ο ινδοδισεληνιούχος χαλκός.
- Ο βαθμός απόδοσης εκφράζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία που σχεδιάστηκαν τον 19ο αιώνα είχαν 1-2% απόδοση, τη δεκαετία του 1950 η απόδοση ήταν 6%, ενώ σήμερα βρίσκεται στο 13- 15%. Συγκρινόμενη με την απόδοση άλλων συστημάτων (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.) παραμένει ακόμα αρκετά χαμηλή. Έτσι απαιτείται να καταληφθεί μεγάλη επιφάνεια προκειμένου να παραχθεί η επιθυμητή ηλεκτρική ισχύς. Ωστόσο, η απόδοση ενός δεδομένου συστήματος μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών σε ηλιοστάτη.

ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Φωτοβολταϊκά συστήματα

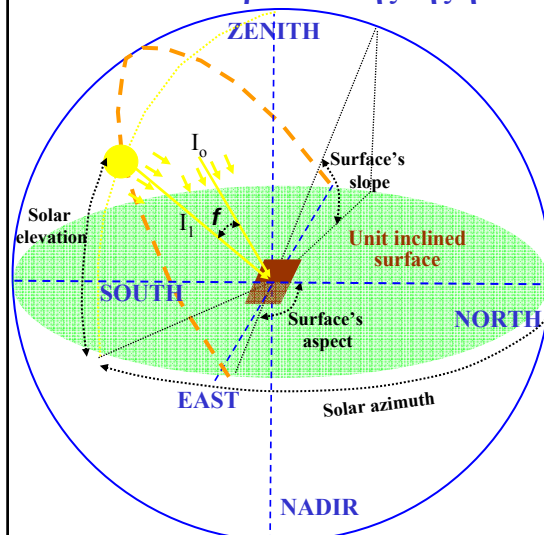
Πλεονεκτήματα

- Δεν προκαλούνται ρύποι από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Η ηλιακή ενέργεια διατίθεται παντού και δεν στοιχίζει απολύτως τίποτα
- Αθόρυβη λειτουργία
- Σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (20-30 χρόνια λειτουργίας)
- Δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης
- Εγκατάσταση πάνω σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές (στέγες, προσόψεις κτηρίων)
- Ευελιξία στις εφαρμογές: λειτουργούν ως αυτόνομα συστήματα, αυτόνομα υβριδικά συστήματα, συσσωρευτές, διασυνδεδεμένο σύστημα

Μειονέκτημα

Το κόστος εγκατάστασης παραμένει ακόμη αρκετά υψηλό (για γενική ενδεικτική τιμή είναι 6000 Ευρώ ανά εγκατεστημένο kW ηλεκτρικής ισχύος). Δεδομένου ότι μια τυπική οικιακή κατανάλωση στην Ελλάδα απαιτεί από 1.5 έως 3.5 kW, το κόστος της εγκατάστασης δεν είναι αμελητέο.

Παράγοντες που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας



Αζιμούθιο ηλίου-azimuth (Azm)

Η γωνία μεταξύ (α) του επιπέδου που περνάει από τον ήλιο, τον παρατηρητή και το zenith του και (β) της γραμμής που συνδέει τον παρατηρητή και το Βορρά. Η γωνία μετριέται από το Βορρά στη φορά των δεικτών του ρολογιού σε μοίρες (0-360).

Υψόμετρο ηλίου-Elevation ($Elev$). Η γωνία μεταξύ (α) της γραμμής του ορίζοντα του παρατηρητή και (β) της γραμμής που συνδέει τον παρατηρητή και τον ήλιο. Η γωνία μετριέται από τον ορίζοντα προς τα πάνω σε μοίρες (0-90).

Κλίση κυτάρων-Slope (Slp)

Η κλίση ενός κυτάρου είναι η μεγαλύτερη κλίση ενός επιπέδου που ορίζεται από το κύταρο και τα οκτώ γειτονικά του. Η γωνία μετριέται σε μοίρες (0-90).

Διεύθυνση κυτάρων-Aspect (Asp)

Η διεύθυνση που 'βλέπει' η κλίση. Η γωνία μετριέται από το Βορρά στη φορά των δεικτών του ρολογιού σε μοίρες (0-360). Επίπεδα κύταρα παίρνουν την τιμή -1.

Υπολογισμός της δυνητικής ηλιακής ακτινοβολίας (W/m²)

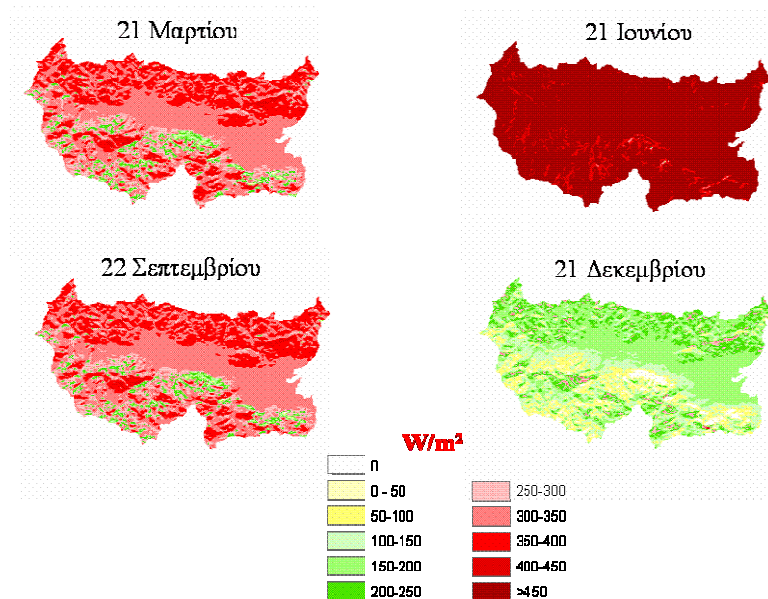
$$I = I_o * d * \cos f$$

$$I_o \approx 1367 \text{ W/m}^2$$

$$\cos f = \sin Az_m * \cos El_v * \cos(90 - Sl_p) * \sin Asp + \\ \cos Az_m * \cos El_v * \cos(90 - Sl_p) * \cos Asp + \\ \sin El_v * \sin(90 - Sl_p)$$

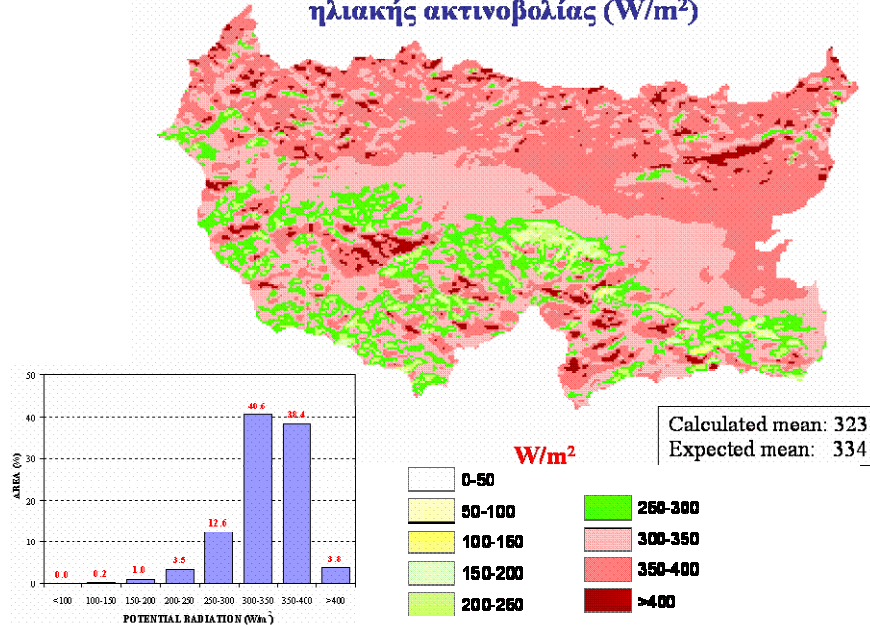
$$d = 1 + 0.034 * \cos(2 * \pi * J / 365 - 0.05)$$

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ ΣΤΗ ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ Ημερήσιες κατανομές δυνητικής ηλιακής ακτινοβολίας (W/m²)

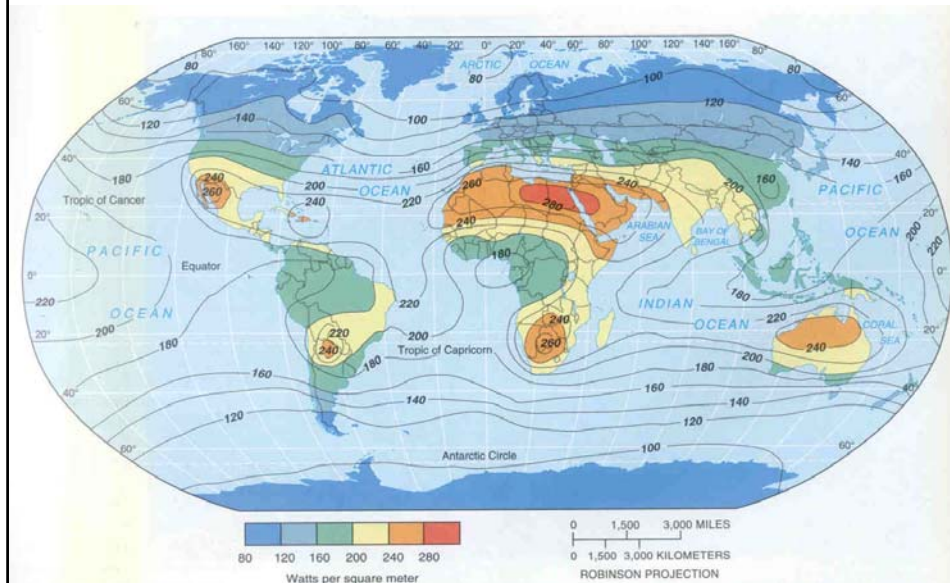


ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ ΣΤΗ ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ

Ετήσια κατανομή δυνητικής
ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2)



ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΟ ΕΛΑΦΟΣ (W/m^2)



Πηγή: Christopherson, 2000