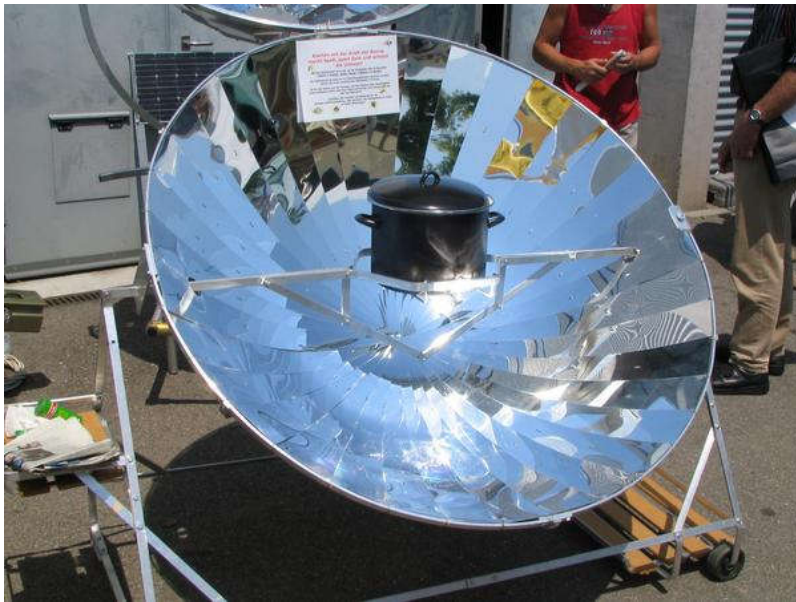


Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

1ο και 5ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Ηλιακή ενέργεια



Νίκος Μαμάσης, Ανδρέας Ευστρατιάδης και Αθανάσιος Ζήσος
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ακαδημαϊκό έτος 2024-25

Διάρθρωση παρουσίασης: *Ηλιακή ενέργεια*

- Ηλιακή ακτινοβολία
- Ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα
- Αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας
- Φωτοβολταϊκά συστήματα
- Στρεβλώσεις στο ενεργειακό μίγμα
- Εφαρμογές

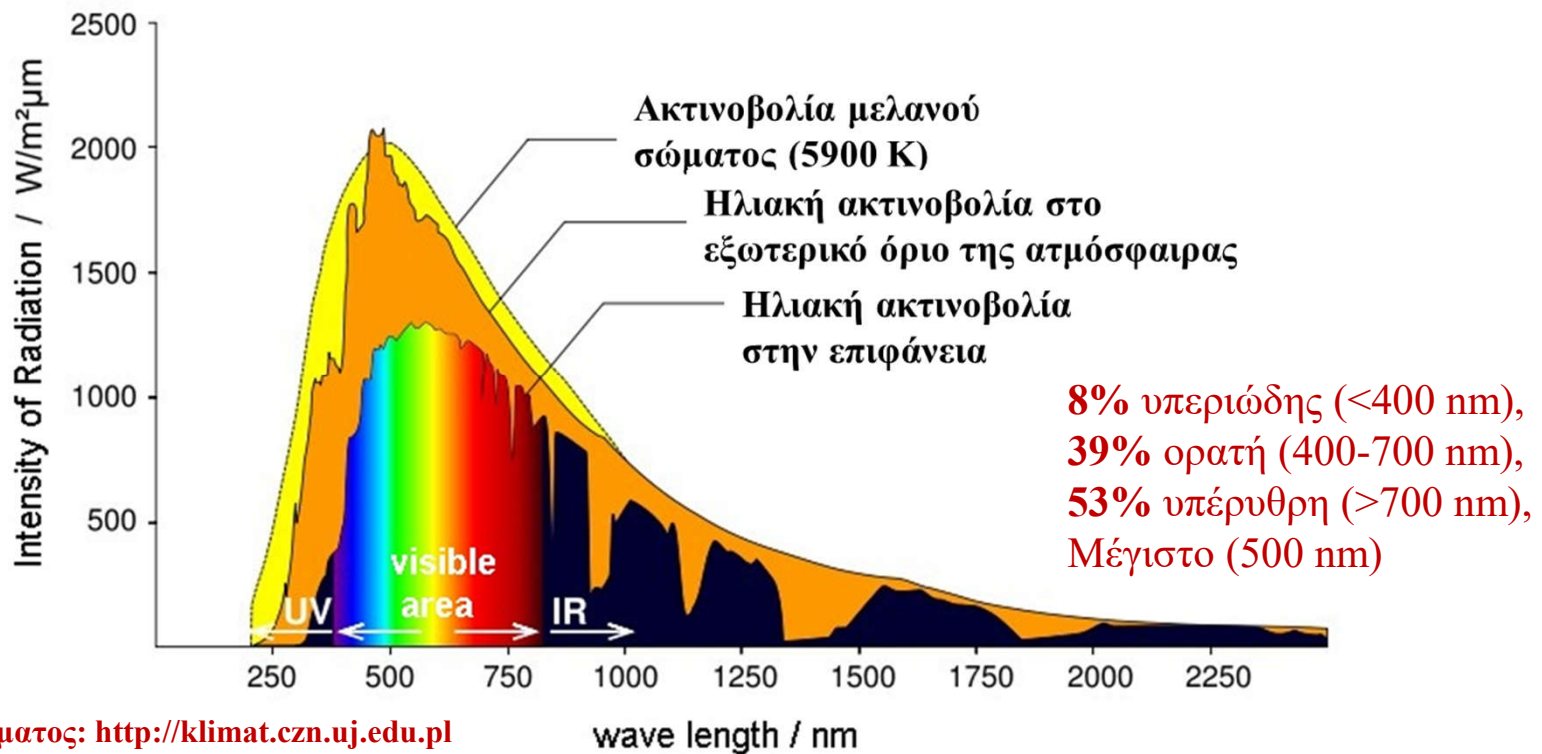
Ηλιακή ακτινοβολία

Γενικά χαρακτηριστικά του Ήλιου

Ο ήλιος (τυπικό αστέρι του γαλαξία μας), είναι μια πυρακτωμένη αεριώδης μάζα που αποτελείται κυρίως από υδρογόνο και ήλιο. Η θερμοκρασία στον πυρήνα υπολογίζεται σε $14 \cdot 10^6$ °C. Η ηλιακή ενέργεια προέρχεται από θερμοπυρηνικές αντιδράσεις (σύντηξη ατόμων υδρογόνου σε ήλιο) που γίνονται στον πυρήνα του Ηλίου. Η ενέργεια μεταφέρεται στην επιφάνεια με ακτινοβολία ή με κατακόρυφη μεταφορά του υδρογόνου.

Η **φωτόσφαιρα** είναι ένα στρώμα σε ακτίνα $7 \cdot 10^5$ km, πάχους μερικών εκατοντάδων km και θερμοκρασία περίπου 6000 K. Εκπέμπει στην ορατή και υπέρυθη περιοχή του φάσματος.

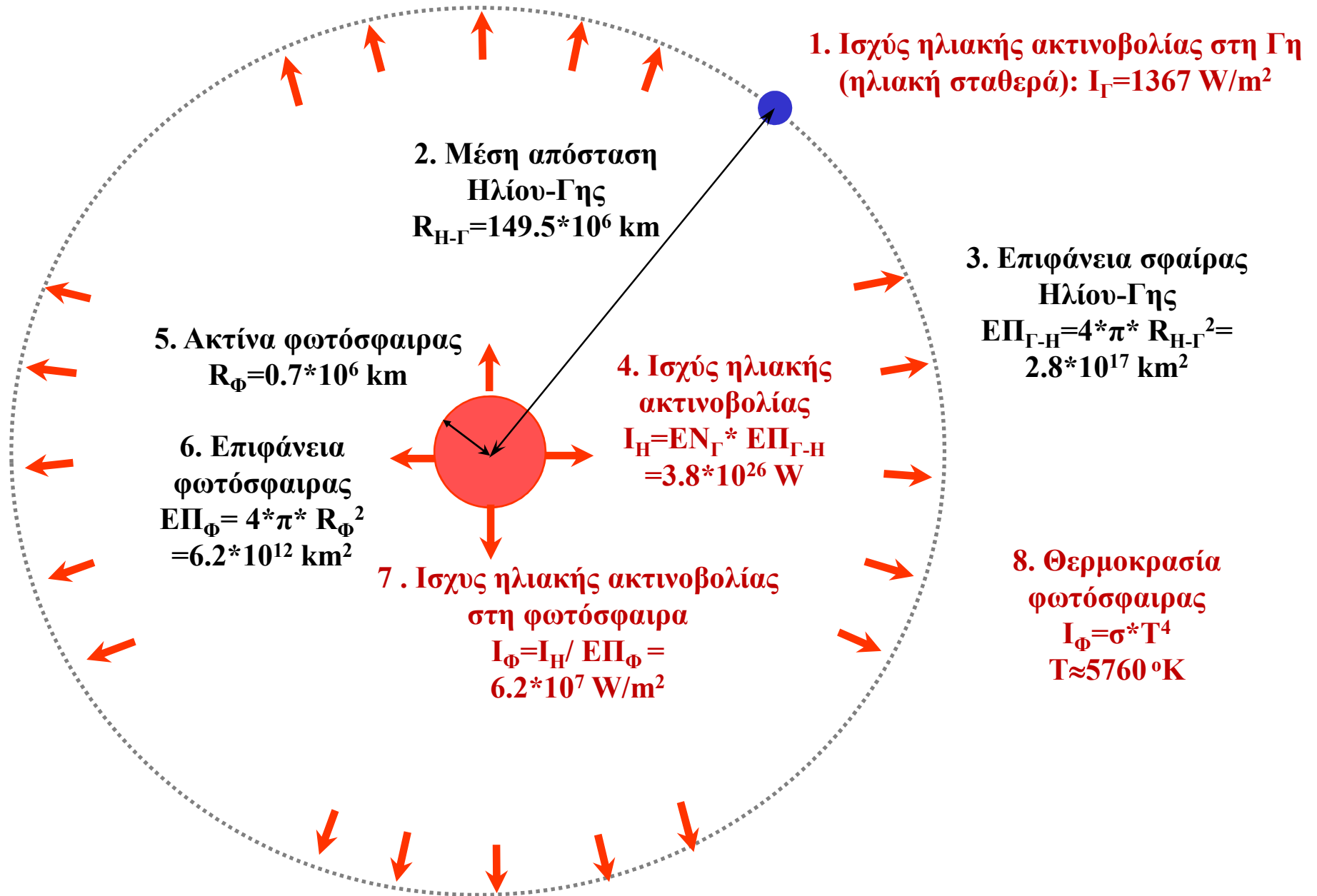
Η **χρωμόσφαιρα** είναι ένα στρώμα πάχους 2500 km, πάνω από τη φωτόσφαιρα, με θερμοκρασία που αυξάνει από 4300 K στο κάτω όριο μέχρι 10^5 K στο εξωτερικό όριο. Τα αέρια στην εξωτερική **χρωμόσφαιρα** εκπέμπουν στην μακρά υπεριώδη περιοχή του φάσματος (<100 nm). Η ακτινοβολία αυτή εξαρτάται από την ηλιακή δραστηριότητα αλλά πρακτικά είναι το **1 προς 100.000** της συνολικής ακτινοβολίας



Πηγή σχήματος: <http://klimat.czn.uj.edu.pl>

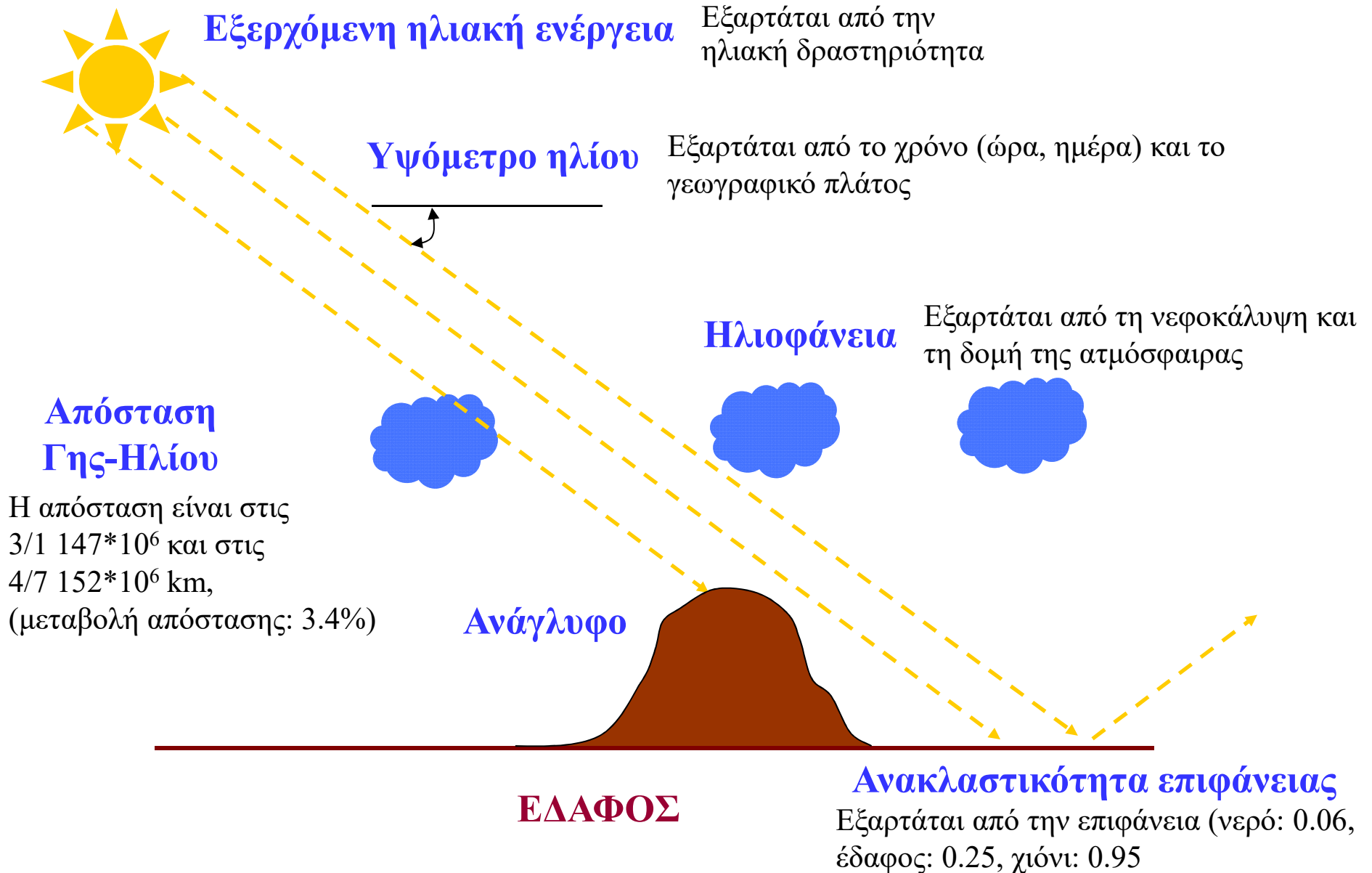
Ηλιακή ακτινοβολία

Βασικά μεγέθη



Ηλιακή ακτινοβολία

Παράγοντες που επιδρούν στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία



Ηλιακή ακτινοβολία

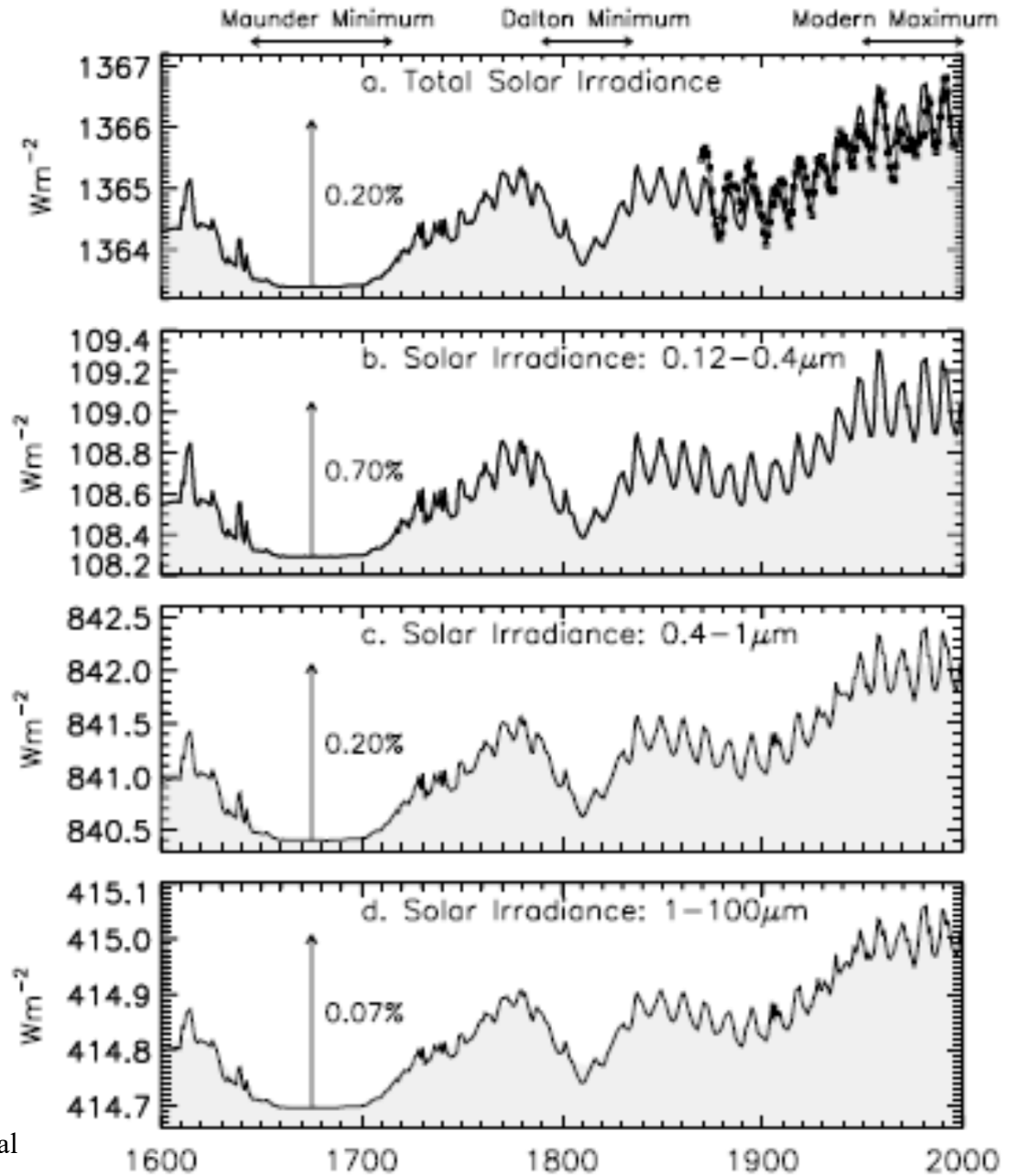
Χρονική εξέλιξη ηλιακής
ενέργειας στη Γη (W/m^2)

Συνολική

Μήκη κύματος από 0.12-0.4 μm

Μήκη κύματος από 0.4-1 μm

Μήκη κύματος από 1-100 μm



Πηγή: Judith Lean and E. O. Hulburt, Evolution of the Sun's Spectral Irradiance Since the Maunder Minimum, Geophysical Research Letters, Vol. 27, no. 16, Pages 2425-2428, 2000

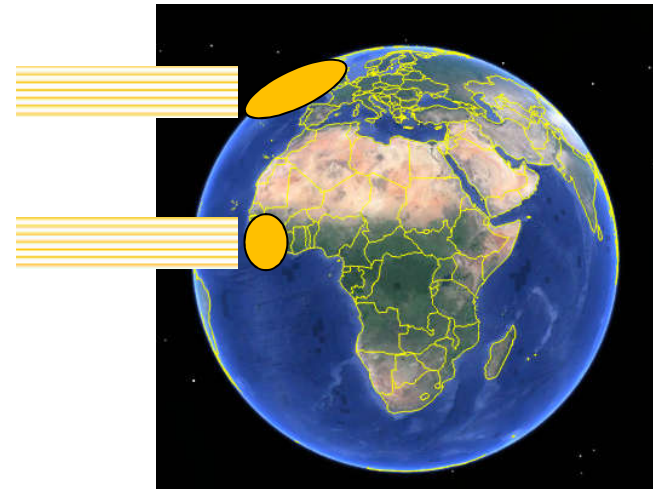
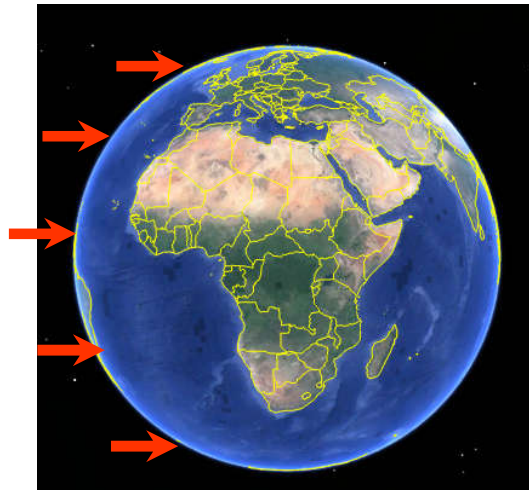
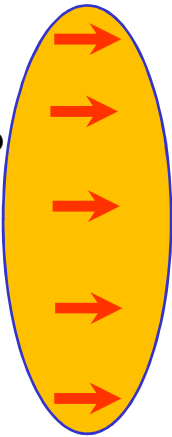
Ηλιακή ακτινοβολία

Βασικά μεγέθη

Η επιφάνεια γής, υπολογίζεται ως $4\pi R^2$
 Άρα η μέση ηλιακή ισχύς είναι που πέφτει
 στη Γη είναι το 25% της ηλιακής σταθερά.

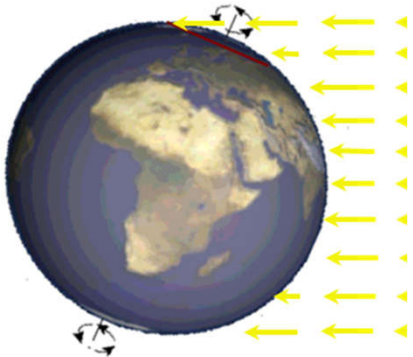
Υπάρχει ανισοκατανομή στο χώρο ανάλογα
 με το γεωγραφικό πλάτος αφού η ίδια
 ενέργεια πέφτει σε μεγαλύτερη επιφάνεια

Σε κάθε χρονική
 στιγμή η
 ακτινοβολία που
 θα πέσει (1367
 W/m^2) στη Γη
 αντιστοιχεί σε
 επιφάνεια
 κύκλου πR^2

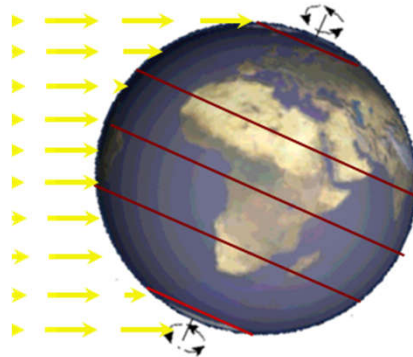


Ηλιοστάσια

22/6



22/12



Στις 45° η έκταση είναι 40% μεγαλύτερη
 στις 60° διπλάσια και στις 80° εξαπλάσια σε
 σχέση με τον ισημερινό

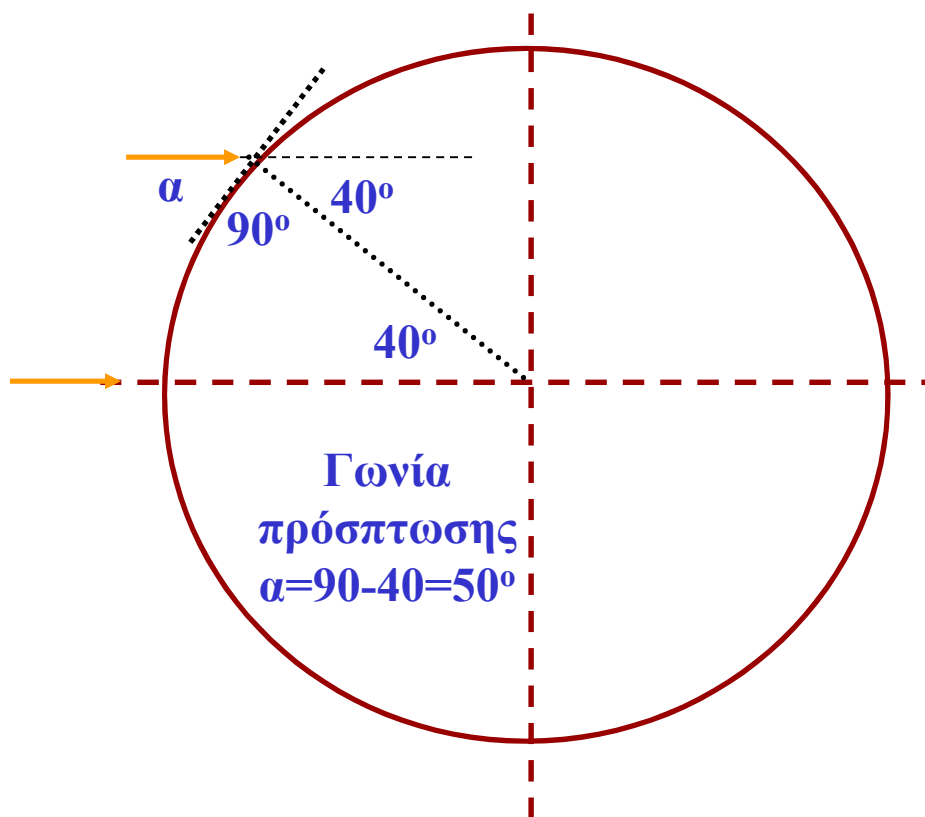
Ισημερίες



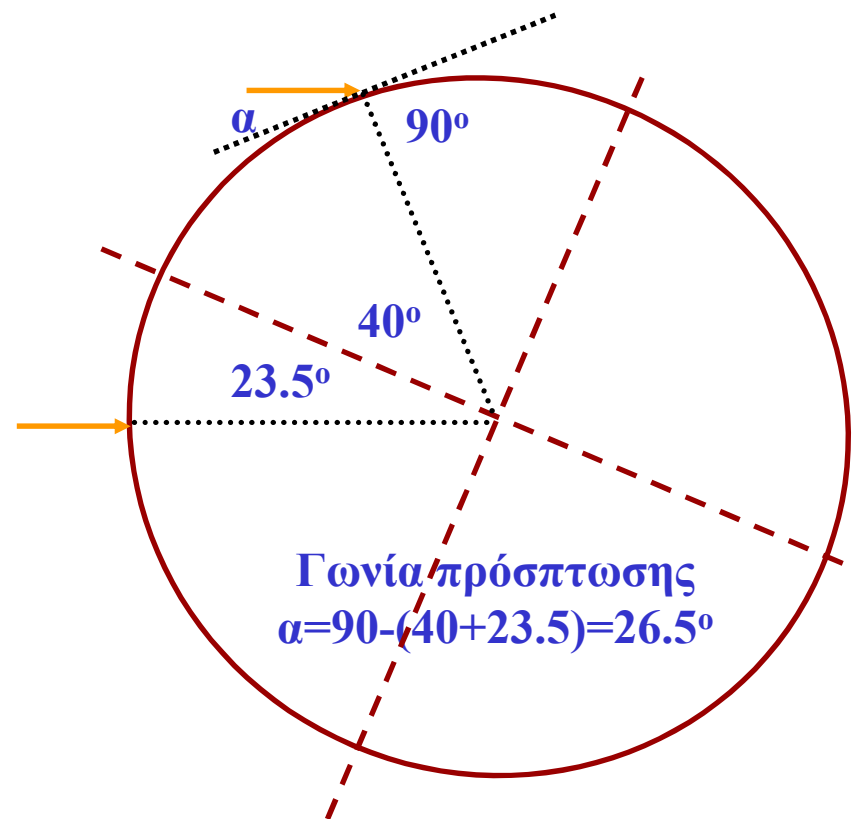
Ηλιακή ακτινοβολία

Γωνία πρόσπτωσης ηλιακών ακτίνων το μεσημέρι, σε επίπεδη επιφάνεια και σε γεωγραφικό πλάτος 40°

Ισημερίες



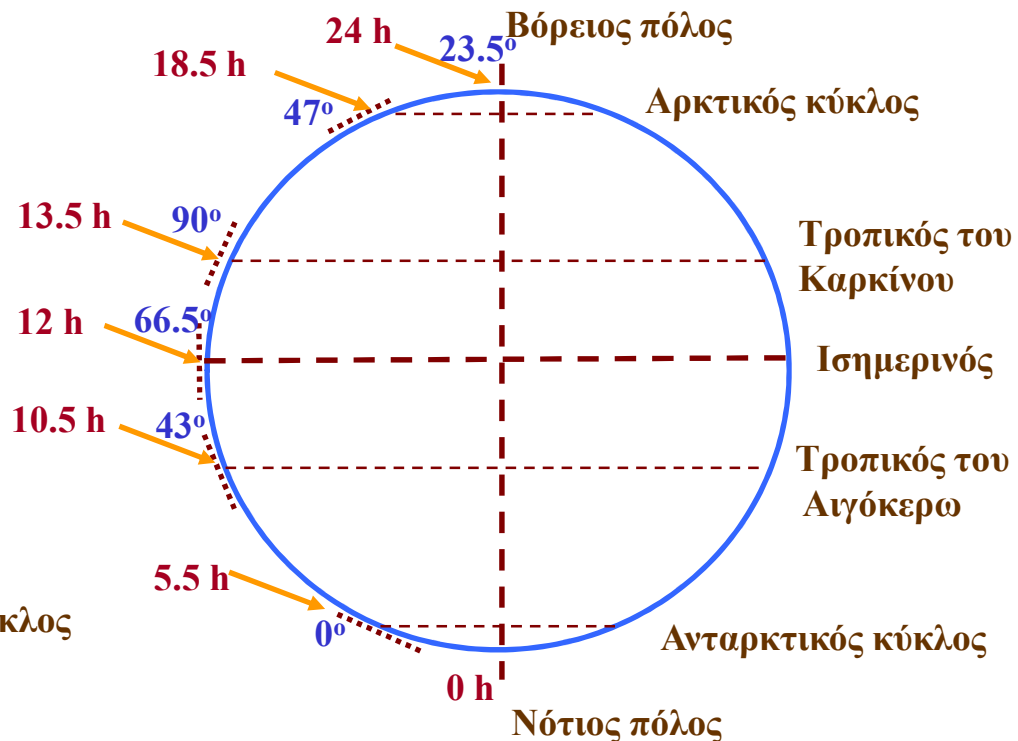
Χειμερινό ηλιοστάσιο



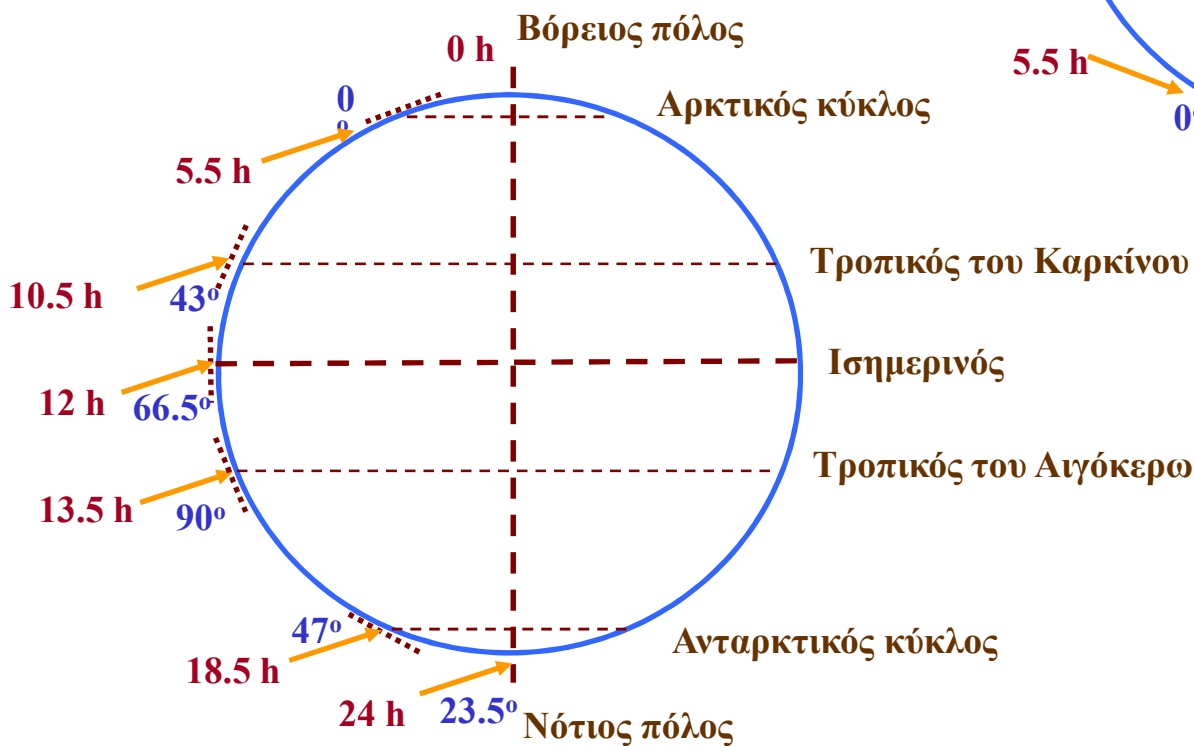
Ηλιακή ακτινοβολία

Γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας το μεσημέρι και ώρες δυνητικής ημερήσιας ηλιοφάνειας

Θερινό ηλιοστάσιο (22 Ιουνίου)



Χειμερινό ηλιοστάσιο (22 Δεκεμβρίου)

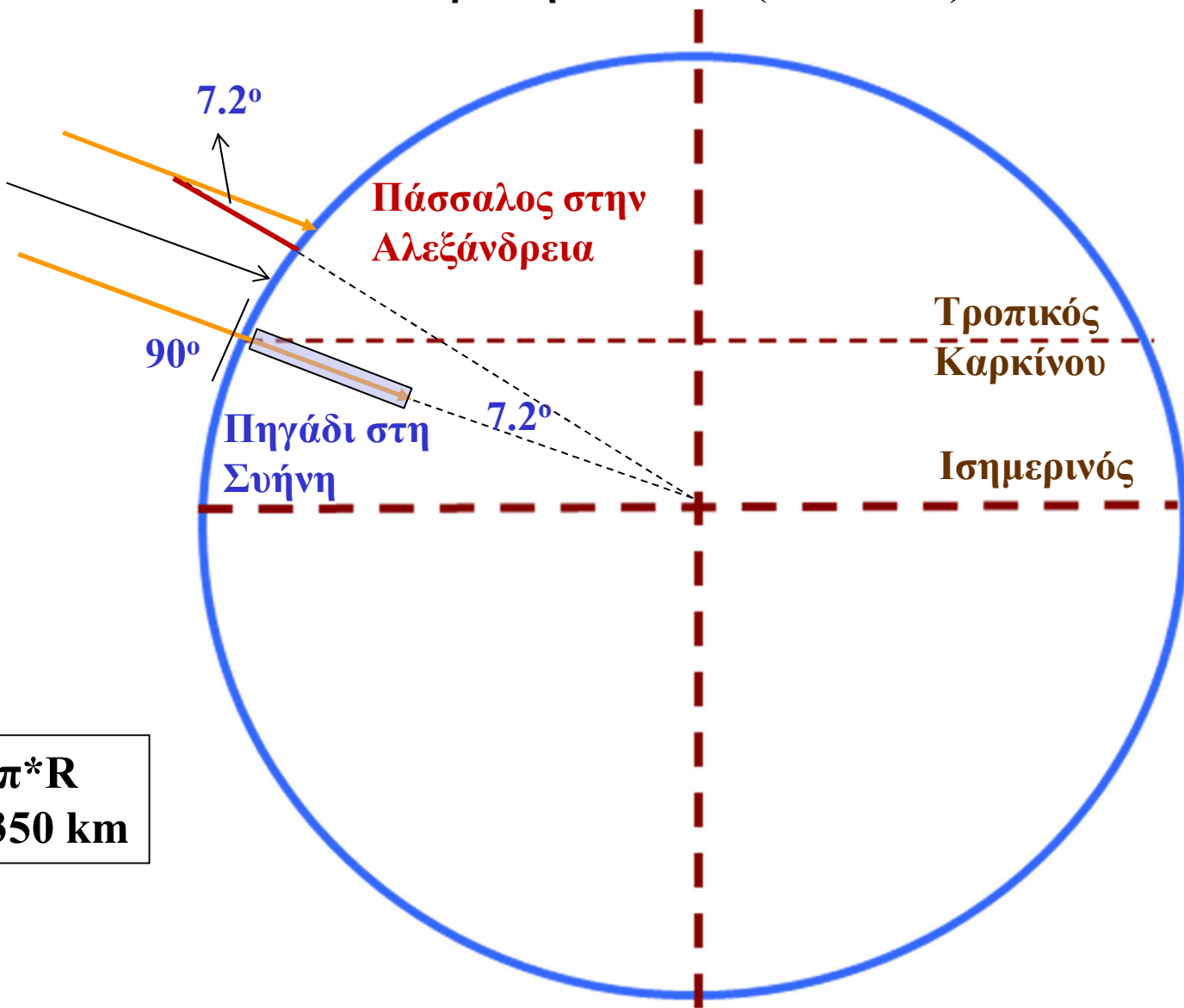


Ηλιακή ακτινοβολία

Υπολογισμός της ακτίνας της Γης από τον Ερατοσθένη (276-194 π.Χ.) με βάση τις γωνίες πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων σε 2 τόπους

Θερινό ηλιοστάσιο (22 Ιουνίου)

Απόσταση
Αλεξάνδρειας-Συήνης:
 $L=5040$ στάδια ≈ 800 km



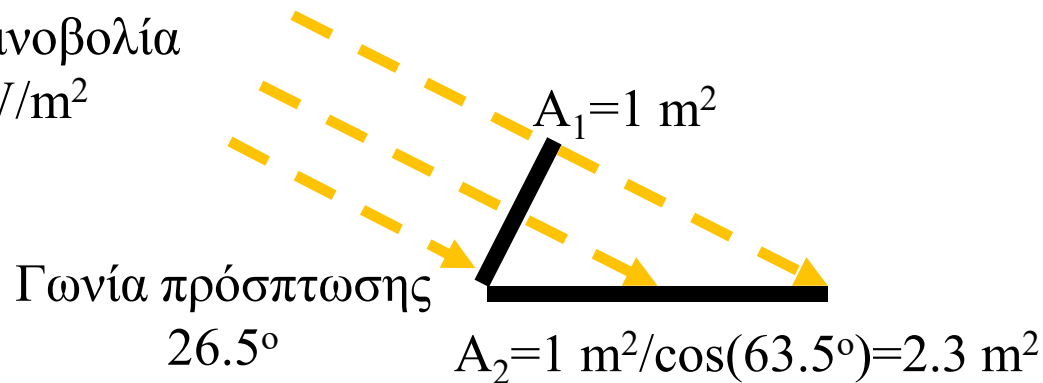
$$L = \left(\frac{7.2^\circ}{360^\circ}\right) * 2 * \pi * R$$

R (ακτίνα Γης) ≈ 6350 km

Ηλιακή ακτινοβολία

Γωνίες πρόσπτωσης σε φωτοβολταϊκά πλαίσια

Ηλιακή ακτινοβολία
 1000 W/m^2



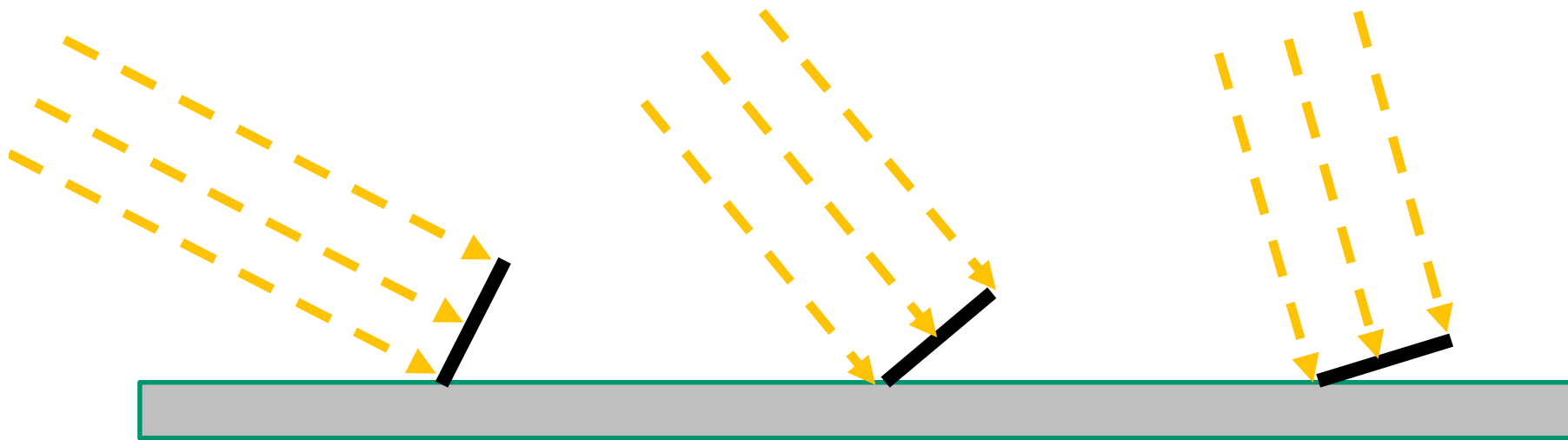
Προσπίπτουσα
ακτινοβολία
 440 W/m^2

Γεωγραφικό πλάτος 40°

22/12
Γωνία πρόσπτωσης 26.5°

21/3, 21/9
Γωνία πρόσπτωσης 50°

22/6
Γωνία πρόσπτωσης 73.5°



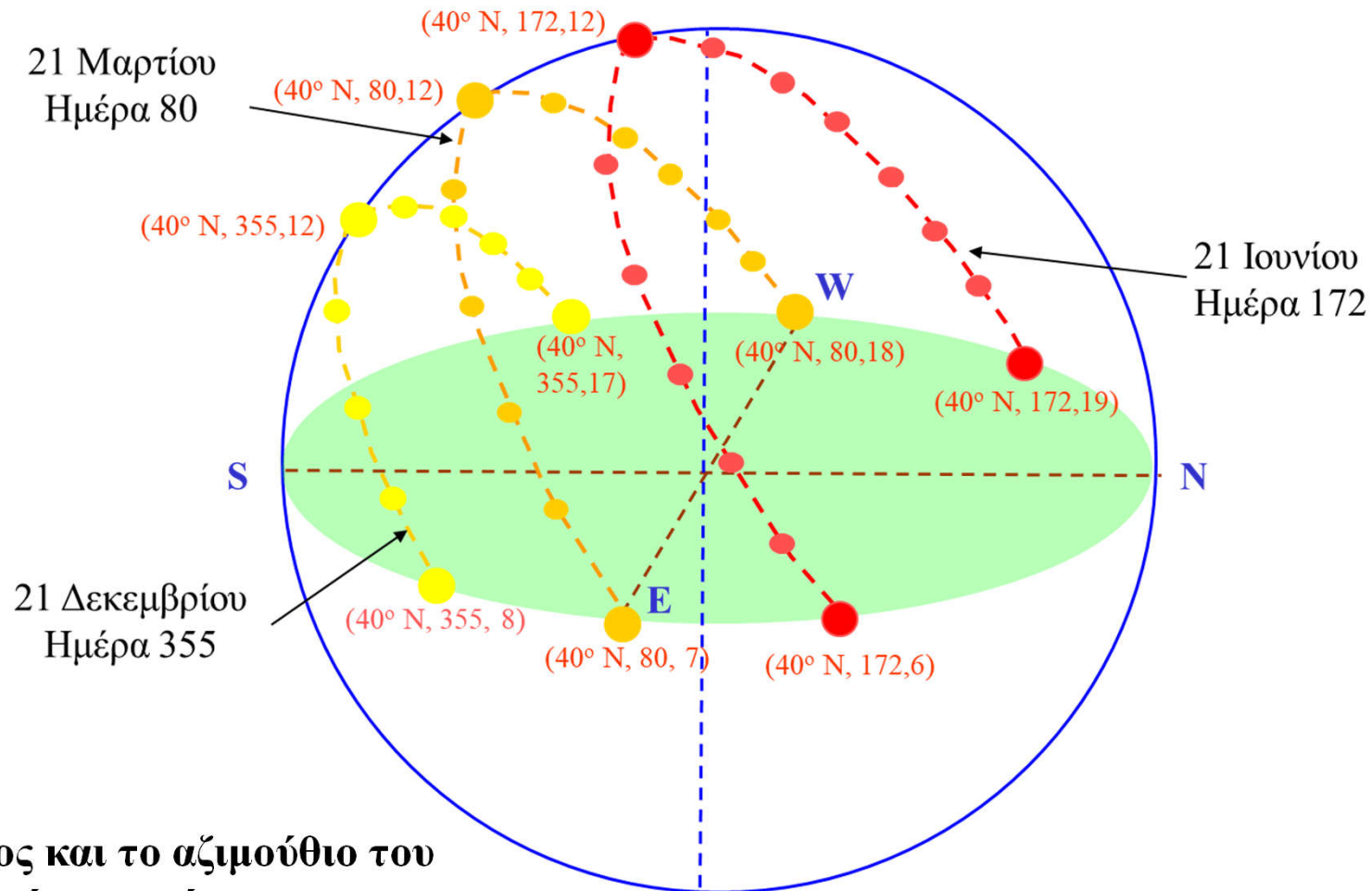
Κλίση πλαισίου 63.5°

Κλίση πλαισίου 40°

Κλίση πλαισίου 16.5°

Ηλιακή ακτινοβολία

Μεταβολή θέσης ήλιου (γεωγραφικό πλάτος 40°)

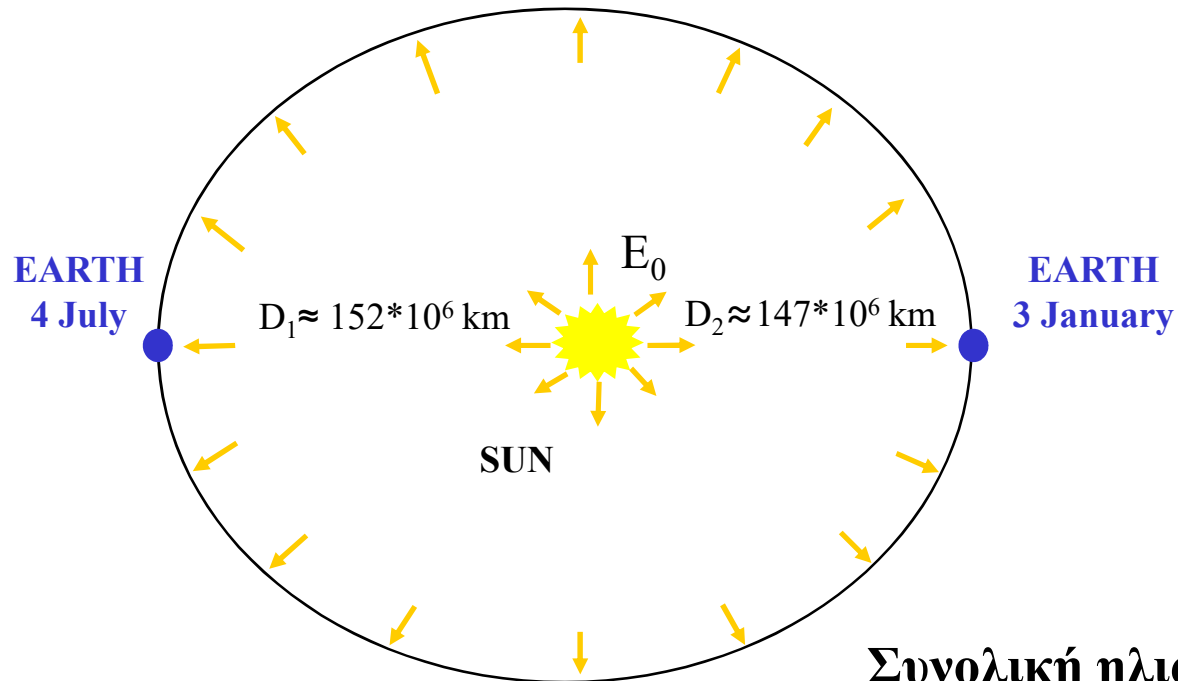


Το ύψος και το αζιμούθιο του Ηλίου είναι συνάρτηση των

- Γεωγραφικό πλάτος
- Εποχής
- Ώρας της ημέρας

Ηλιακή ακτινοβολία

Υπολογισμός της εκκεντρότητας (eccentricity) και της ηλιακής σταθεράς (solar constant)



Συντελεστής εκκεντρότητας

$$d = (D_{mean}/D_j)^2$$

D_{mean} Η μέση απόσταση γης-ηλίου ($\approx 149.6 * 10^6$ km)

D_j η απόσταση γης-ηλίου την ημέρα J

Συνολική ηλιακή ενέργεια
 $E = 3.9 * 10^{26}$ W

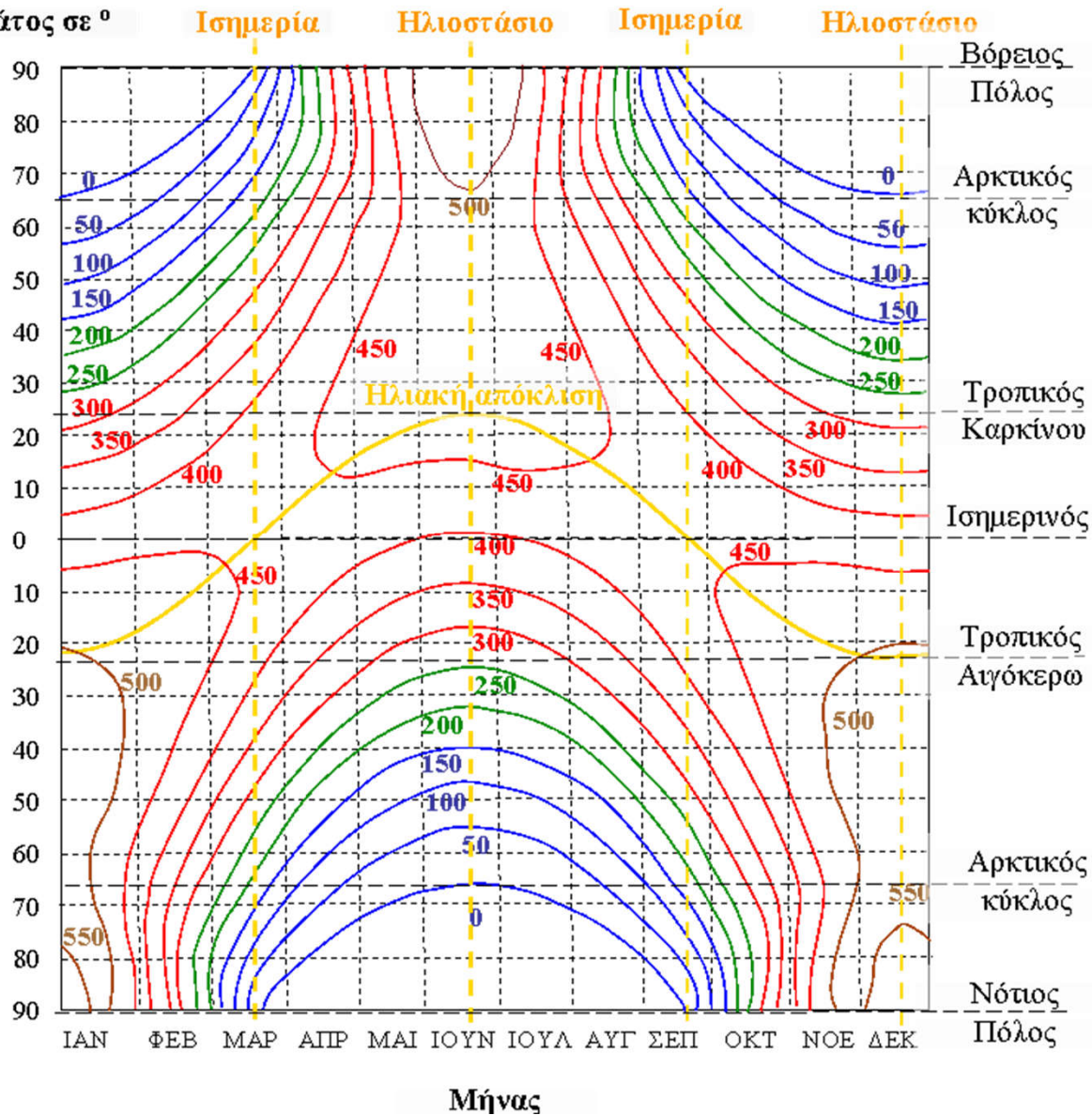
Ηλιακή ακτινοβολία στη γη
 $I = E / (4 * \pi * D^2)$ W/m²

Ηλιακή σταθερά $I_o = E / (4 * \pi * D_{mean}^2)$ W/m²

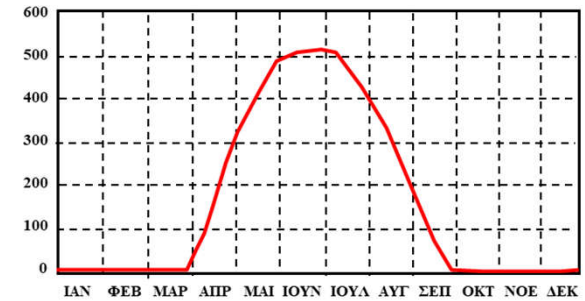
Ηλιακή ακτινοβολία

Ημερησία ηλιακή ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας (W/m^2)

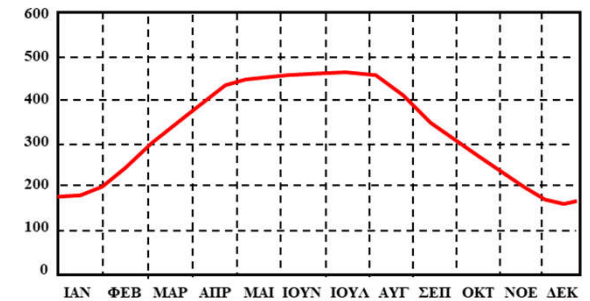
Γεωγραφικό πλάτος σε °



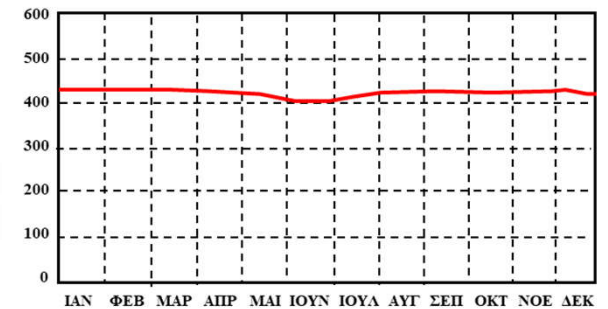
Βόρειος πόλος (90° Β)



Νέα Υόρκη (40° Β)



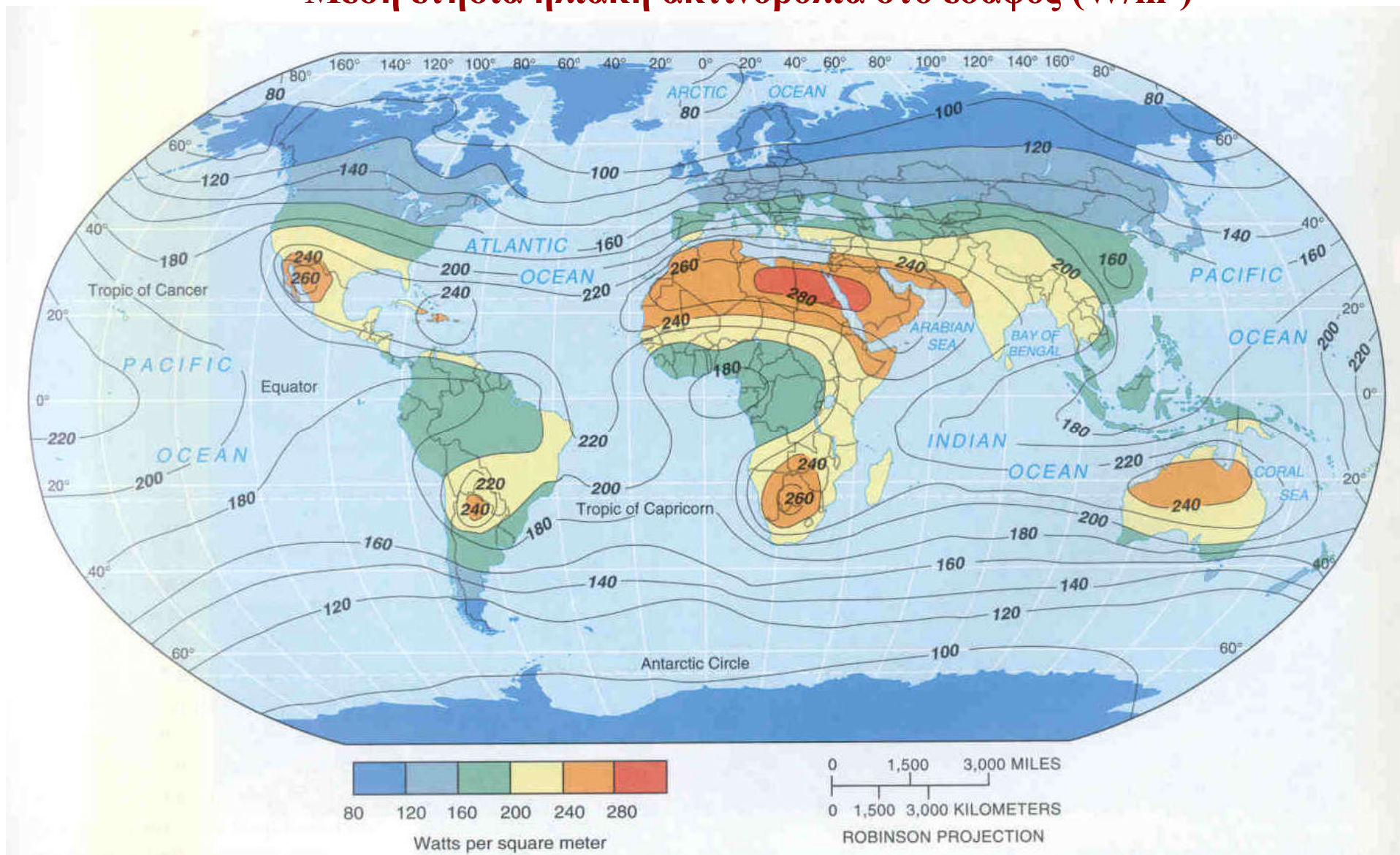
Ισημερινός (0°)



Πηγή: Christopherson, 2000

Ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα

Μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος (W/m^2)

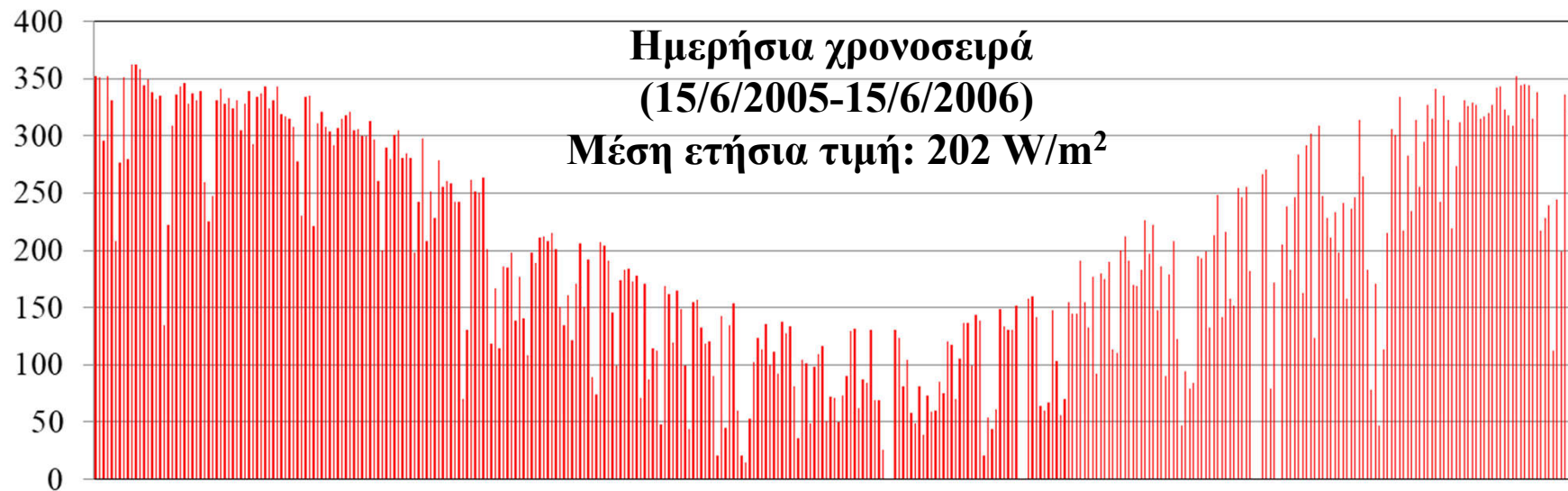
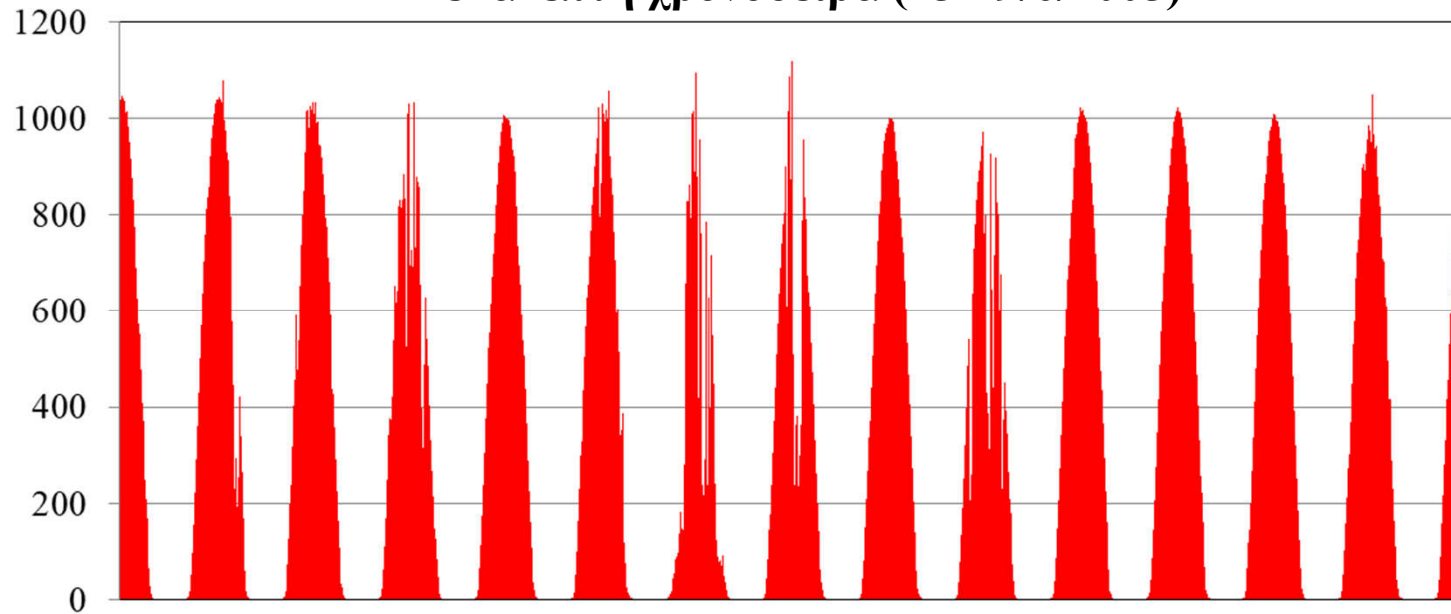


Πηγή: Christopherson, 2000

Ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα

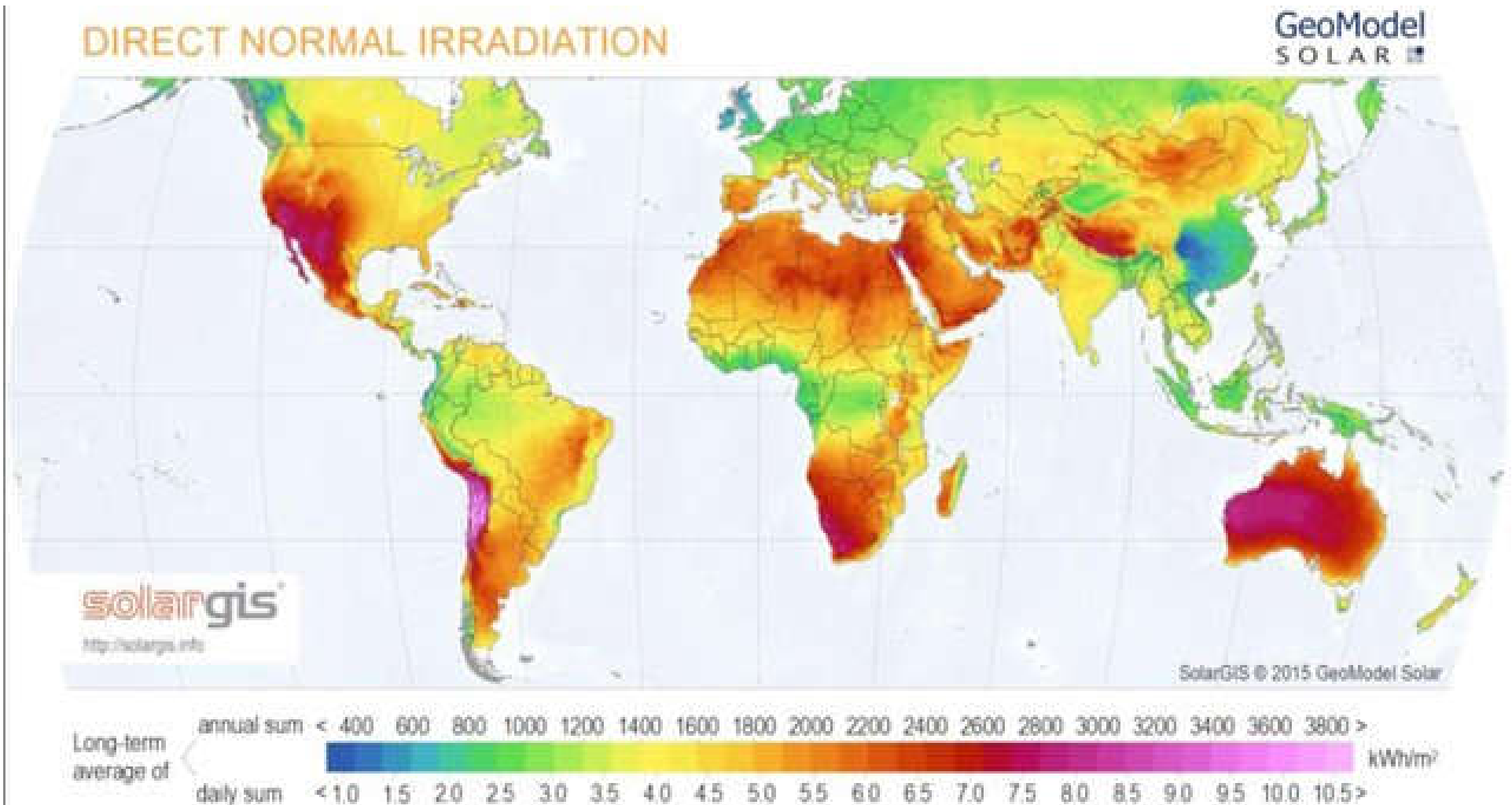
Ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2) στο έδαφος (σταθμός Γαλάτσι)

Δεκάλεπτη χρονοσειρά (15-29/6/2005)



Ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα

Μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος (kWh/m²)



Ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα

Ηλιακή ισχύς και ενέργεια στο έδαφος

	Βόρεια Ελλάδα		Αιγαίο		Κρήτη	
	kWh/m ²	W/m ²	kWh/m ²	W/m ²	kWh/m ²	W/m ²
ΙΑΝ	60	81	62	83	74	100
ΦΕΒ	75	112	81	120	93	138
ΜΑΡ	113	152	130	175	145	195
ΑΠΡ	132	183	173	241	189	262
ΜΑΙΟΣ	161	216	223	300	232	312
ΙΟΥΝ	181	251	249	346	254	353
ΙΟΥΛ	190	255	254	341	261	351
ΑΥΓ	171	230	227	305	235	316
ΣΕΠ	131	183	174	242	186	258
ΟΚΤ	94	126	121	162	134	180
ΝΟΕ	60	83	71	99	83	115
ΔΕΚ	49	65	52	70	65	87
ΕΤΟΣ	1416	161	1817	207	1951	222

Πηγή: RETScreen Data, NASA

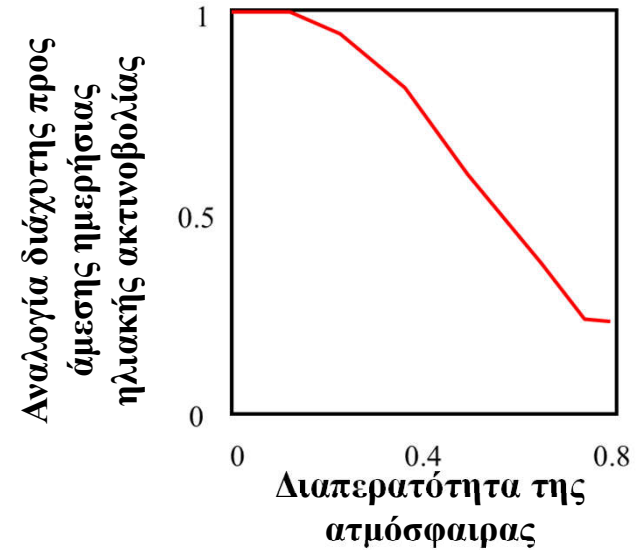
Ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα

Άμεση-διάχυτη ακτινοβολία

Άμεση (direct)

Η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης χωρίς να σκεδαστεί στην ατμόσφαιρα. Εξαρτάται από:

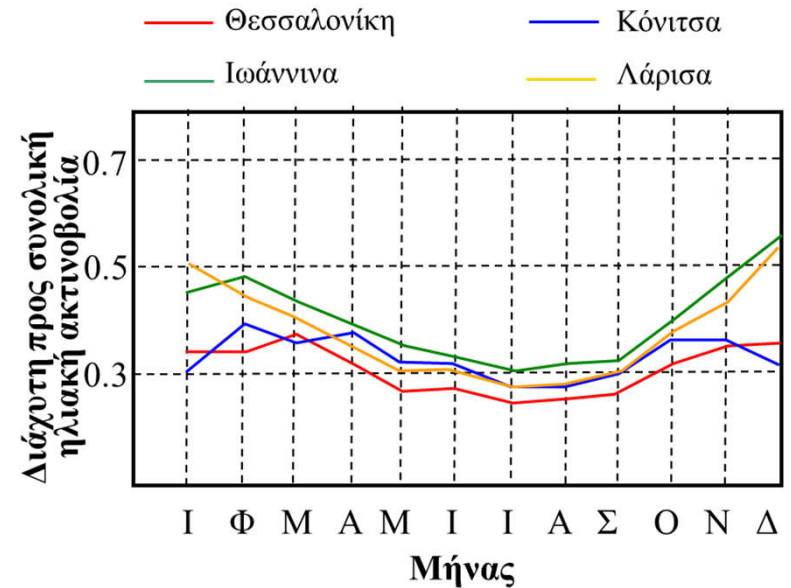
- την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα
- το ύψος του ηλίου
- την απόσταση του ηλίου
- το υψόμετρο της θέσης
- την κλίση της επιφάνειας



Διάχυτη (diffuse)

Η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης αφού έχει αλλάξει η διεύθυνση της από ανάκλαση ή σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Εξαρτάται από:

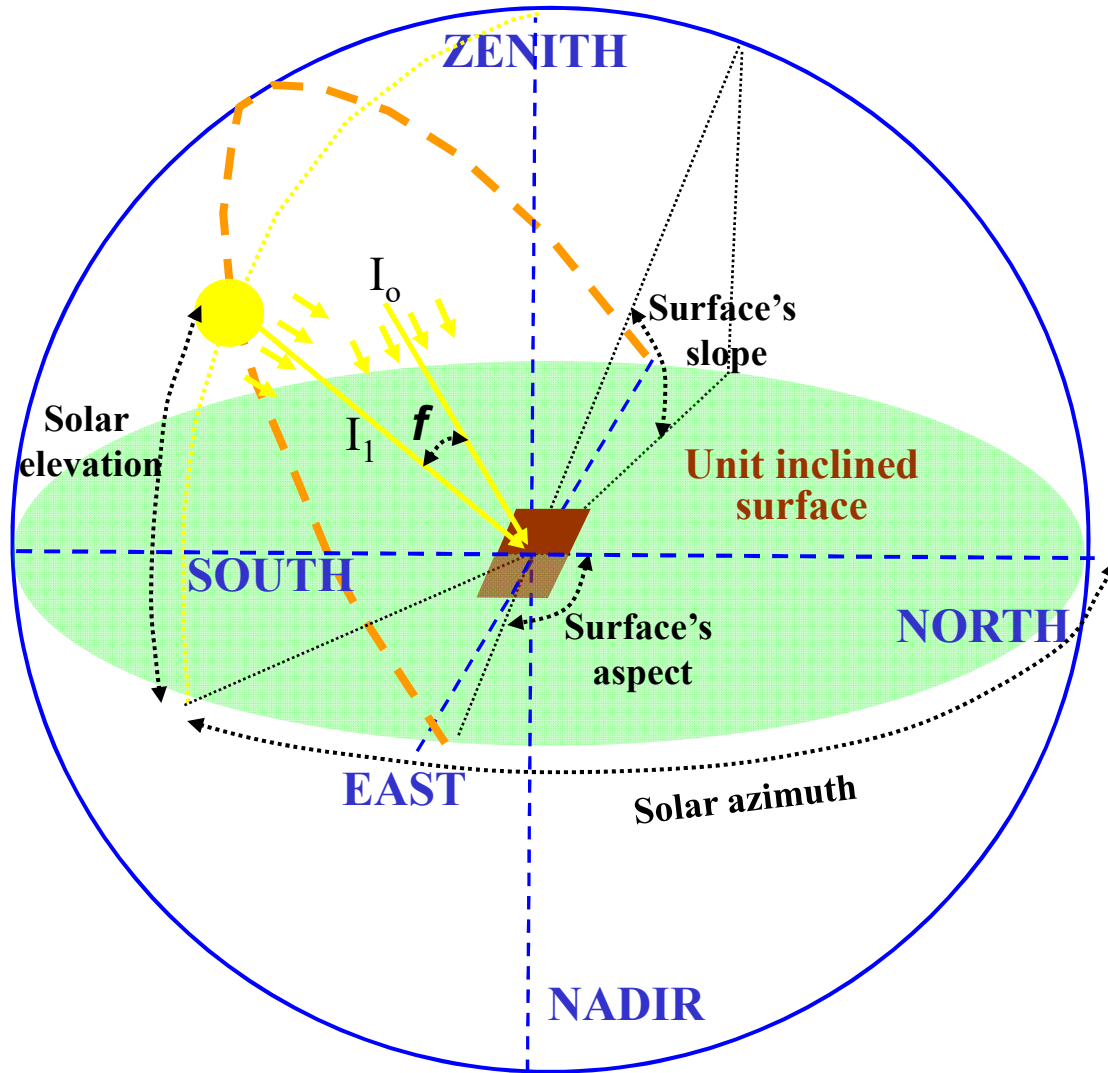
- την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα
- το ύψος του ηλίου
- το υψόμετρο της θέσης
- την ανακλαστικότητα του εδάφους
- το ποσό και το είδος των νεφών
- τη σύνθεση των σωματιδίων και των αερίων της ατμόσφαιρας



Πηγή: B. D. Katsoulis, A Comparison of Several Diffuse Solar Radiation, Theor. Appl. Climatol. 44, 181-186 (1991)

Ηλιακή ενέργεια στην ατμόσφαιρα

Υπολογισμός γωνίας πρόσπτωσης 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 (Elv).

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).

$$I = I_0 * d * \cos f$$

$$I_0 \approx 1367 \text{ W/m}^2$$

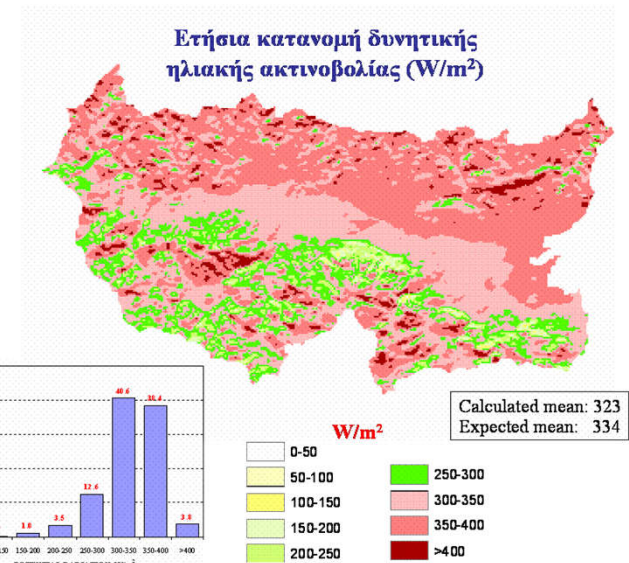
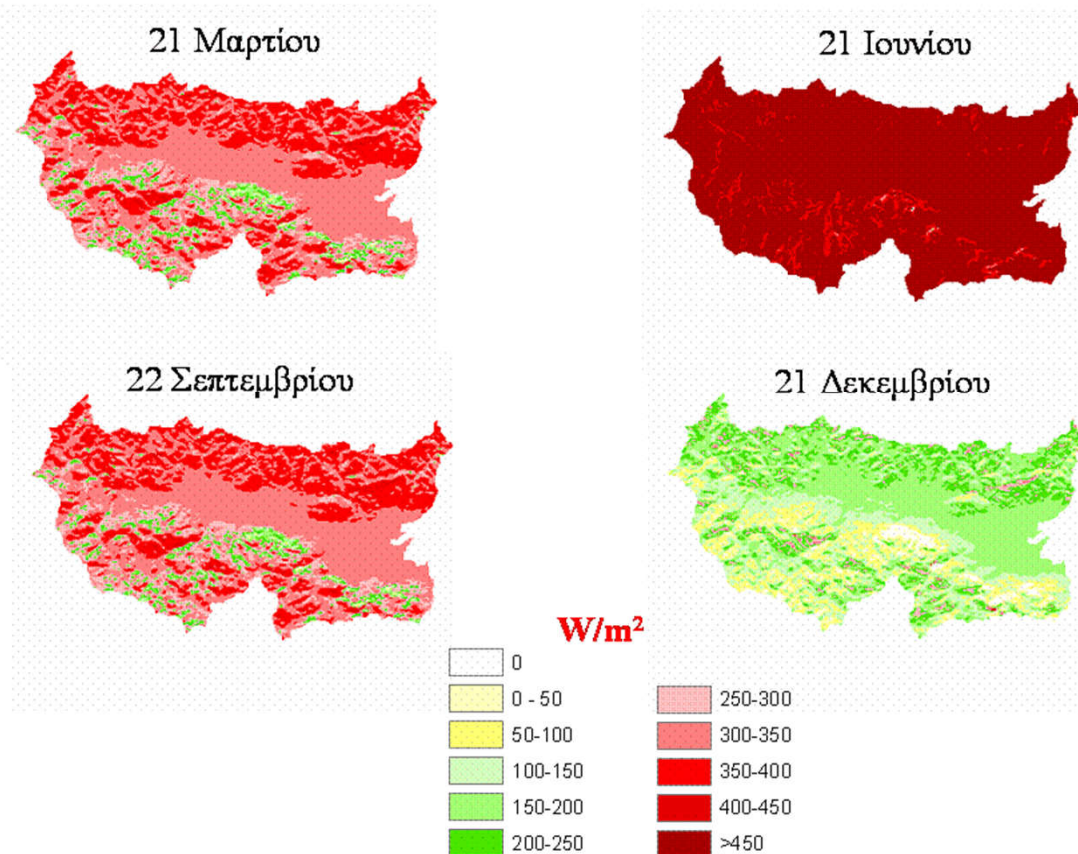
$$d = 1 + 0.034 * \cos(2 * \pi * J / 365 - 0.05)$$

$$\cos f = \sin Azm * \cos Elv * \cos(90 - Slp) * \sin Asp + \cos Azm * \cos Elv * \cos(90 - Slp) * \cos Asp + \sin Elv * \sin(90 - Slp)$$

Ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα

Επίδραση αναγλύφου στη γωνία πρόσπτωσης

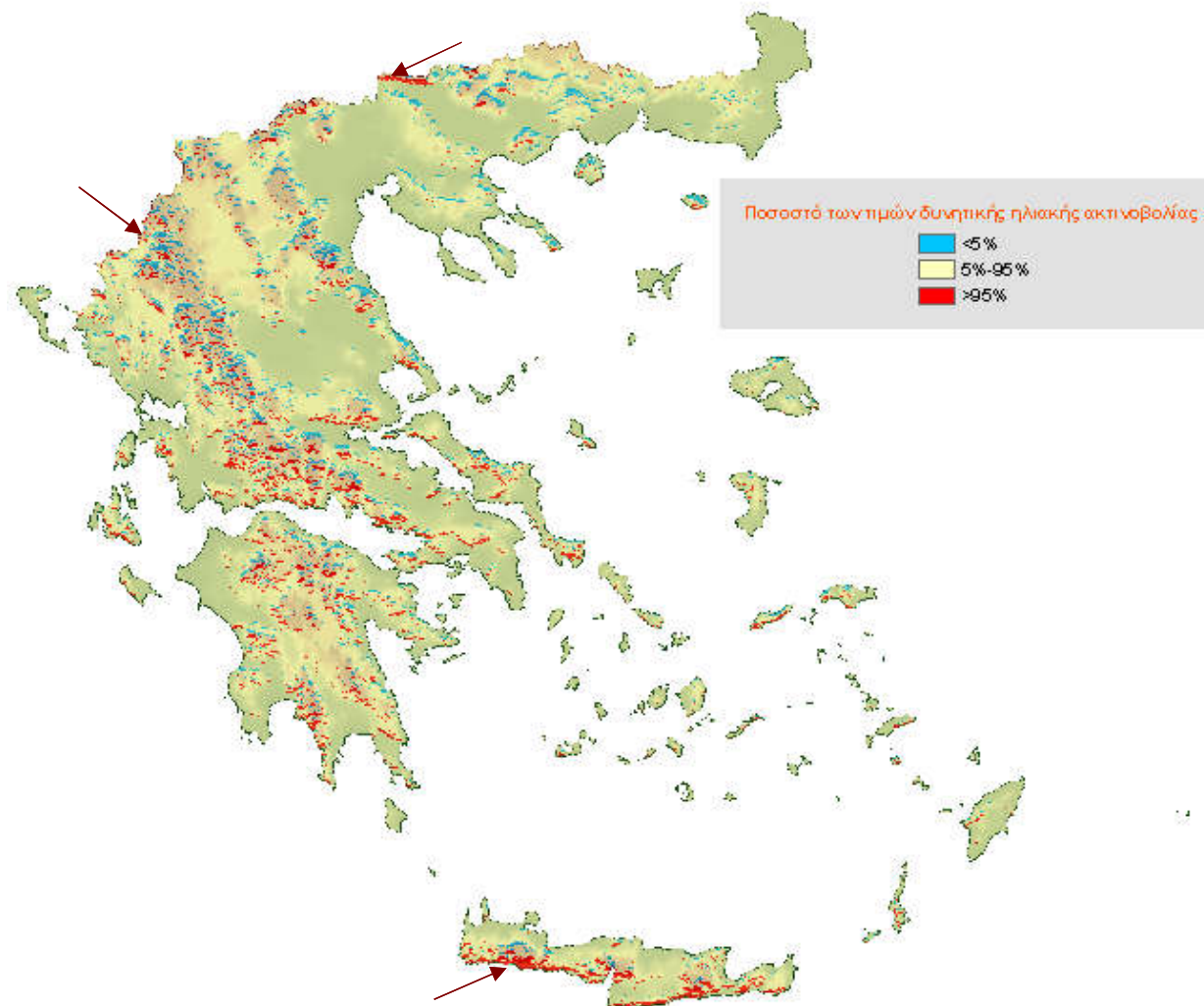
Ημερήσιες κατανομές δυνητικής ηλιακής ακτινοβολίας (W/m²)



Ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα

Επίδραση αναγλύφου στη γωνία πρόσπτωσης

ΔΥΝΗΤΙΚΗ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

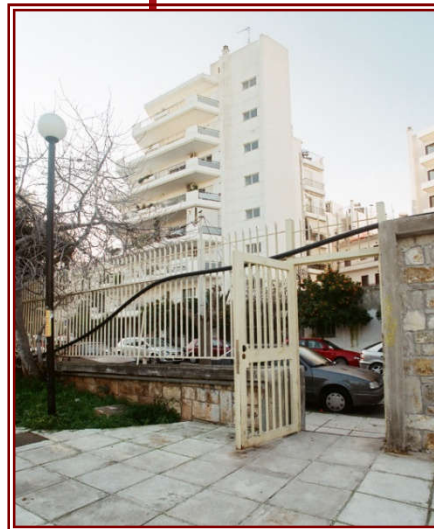
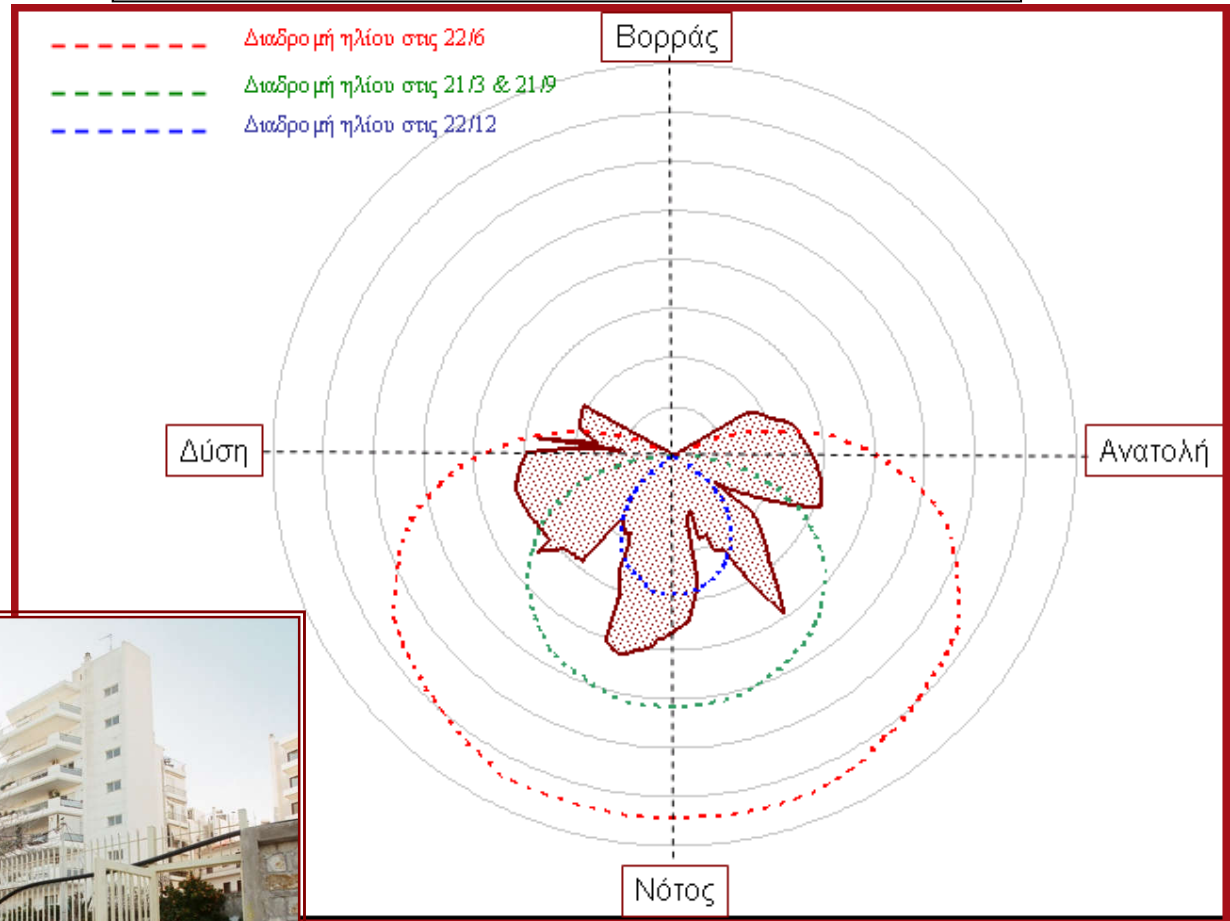


Ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα

Εκτίμηση δυνητικής ηλιακής ακτινοβολίας σε αστικό περιβάλλον

Σε αστικό περιβάλλον υπάρχει επιπλέον σκίαση από διάφορα εμπόδια

ΜΗΝΑΣ	Δείκτης I_E / I_0
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	0,41
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	0,74
ΜΑΡΤΙΟΣ	0,79
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	0,83
ΜΑΙΟΣ	0,88
ΙΟΥΝΙΟΣ	0,92
ΙΟΥΛΙΟΣ	0,93
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	0,83
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	0,80
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	0,70
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	0,34
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	0,26
ΕΤΟΣ	0,77



Αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας

Παθητικά-ενεργητικά συστήματα

Τα παθητικά συστήματα ενσωματώνονται στα κτίρια με στόχο την αξιοποίηση του ηλίου για την **θέρμανση και τον φωτισμό**. Λειτουργούν χωρίς μηχανολογικά εξαρτήματα και δεν παράγουν πρόσθετη ενέργεια.

Τα *ενεργητικά συστήματα*, χρησιμοποιούν μηχανικά μέσα για τη θέρμανση αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια. Στη κατηγορία αυτή ανήκουν τα ηλιακά πλαίσια.

Υπάρχουν δύο τύποι ηλιακών πλαισίων: **το ηλεκτρικό** και το **θερμικό**.

- Το **ηλεκτρικό πλαίσιο**, το οποίο αποτελείται από μια διάταξη ή σύνολο διατάξεων που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια αναφέρεται ως “φωτοβολταϊκό”.
- Το **θερμικό πλαίσιο**, το οποίο αποκαλείται ως “ηλιακός συλλέκτης” ή ηλιακός θερμοσίφωνας, αποτελείται από σωληνώσεις νερού, γυαλί και μόνωση και έχει ως στόχο τη θέρμανση ενός ρευστού (συνήθως νερού ή αέρα).

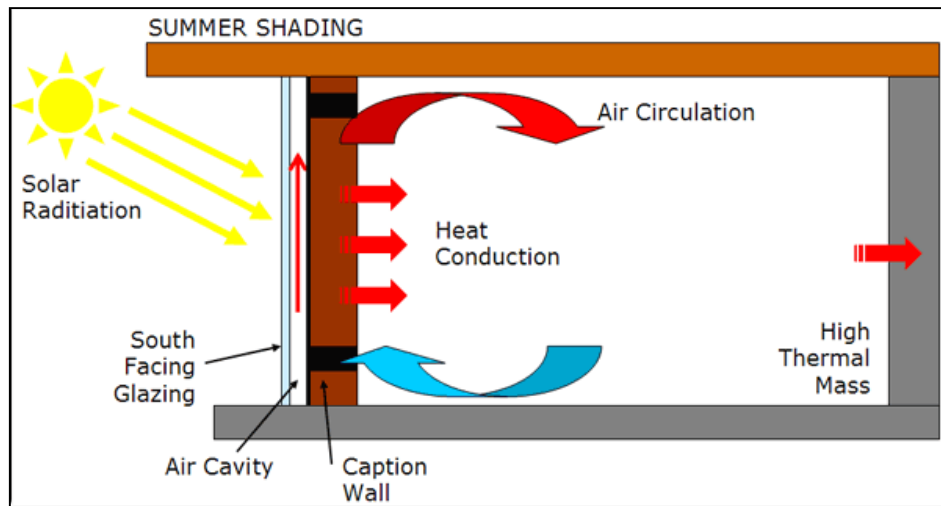
Αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας

Θέρμανση κτιρίων με παθητικά ηλιακά συστήματα

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αξιοποιούν την θερμική μάζα ενός κτιρίου. Σε ημερήσια βάση η θερμική μάζα αποθηκεύει ηλιακή-θερμική ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία, την οποία απελευθερώνει κατά την διάρκεια της νύχτας. Συνήθως οι κατασκευές αυτές γίνονται στο νότιο τμήμα του κτιρίου όπου το καλοκαίρι είναι ευκολότερο να περιορισθεί η ηλιακή ακτινοβολία

Τοίχος Trombe

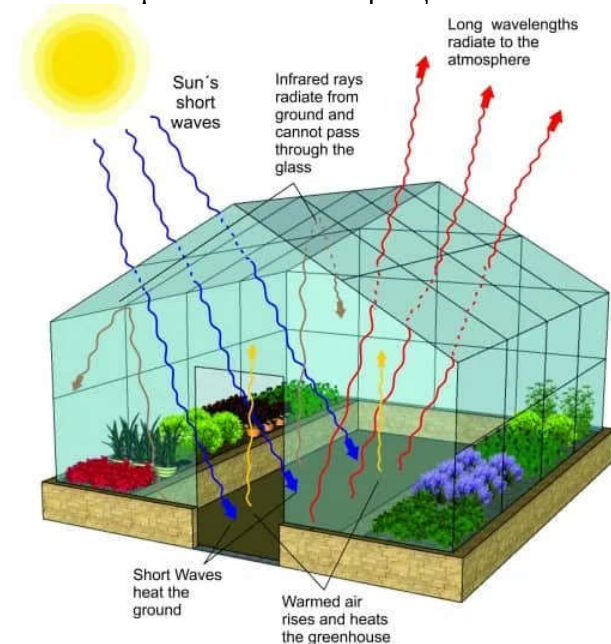
Εξωτερικά του τοίχου κατασκευάζεται γυάλινο πέτασμα που εγκλωβίζει την θερμική ενέργεια, ενώ παράλληλα στον τοίχο υπάρχουν ανοίγματα από όπου κυκλοφορεί αέρας που διοχετεύει την θερμότητα μέσα στο κτίριο.



Πηγή: <https://suryaurza.com/trombe-wall/>

Θερμοκήπιο

Εκμεταλλεύει την εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια για να γίνει η φωτοσύνθεση και παγιδεύει την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπει το έδαφος



Αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας

Ηλιακή εστία



Αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας

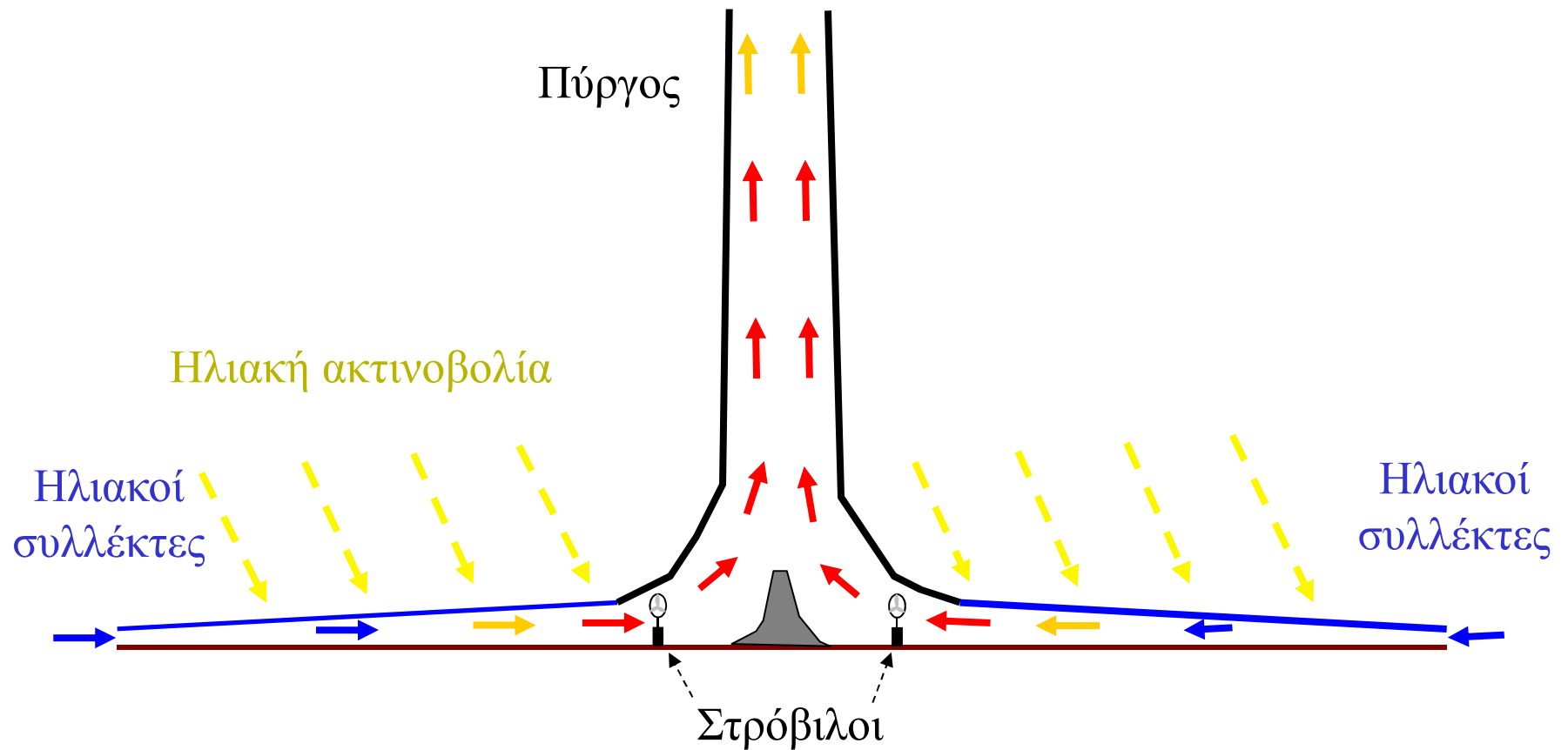
Ηλιακός φούρνος



Ο ηλιακός φούρνος στο Odeillo των Πυρηναίων (Γαλλία) κατασκευάστηκε το 1969 από τον Felix Trombe και ήταν ο μεγαλύτερος στον κόσμο. Αποτελείται από 63 κάτοπτρα συνολικής επιφάνειας 2840 m² για να συγκεντρώσει ηλιακές ακτίνες σε μία επιφάνεια από επάργυρο γυαλί η θερμοκρασία της οποίας μπορεί να φτάσει τους 3200 βαθμούς.

Αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας

Ηλιακός πύργος



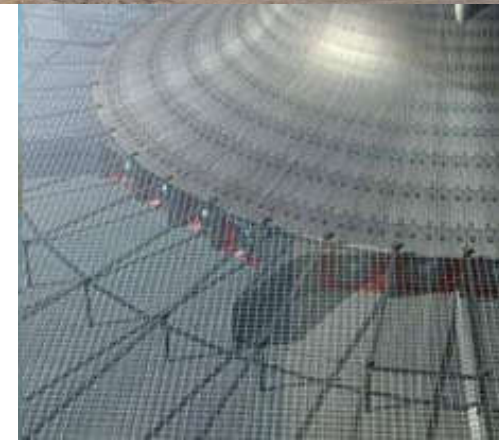
Αρχική ιδέα: Leonardo da Vinci

Αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας

Ηλιακός πύργος



Πειραματική διάταξη στην Ισπανία (Manzanares, Ciudad Real) η οποία κατασκευάστηκε το 1982. Πύργος ύψους 195 m και διαμέτρου 10 m. Επιφάνεια συλλεκτών 46000 m² (διάμετρος 244 m). Μέγιστη ισχύς 50 kW. Καταστράφηκε σε καταιγίδα το 1989.

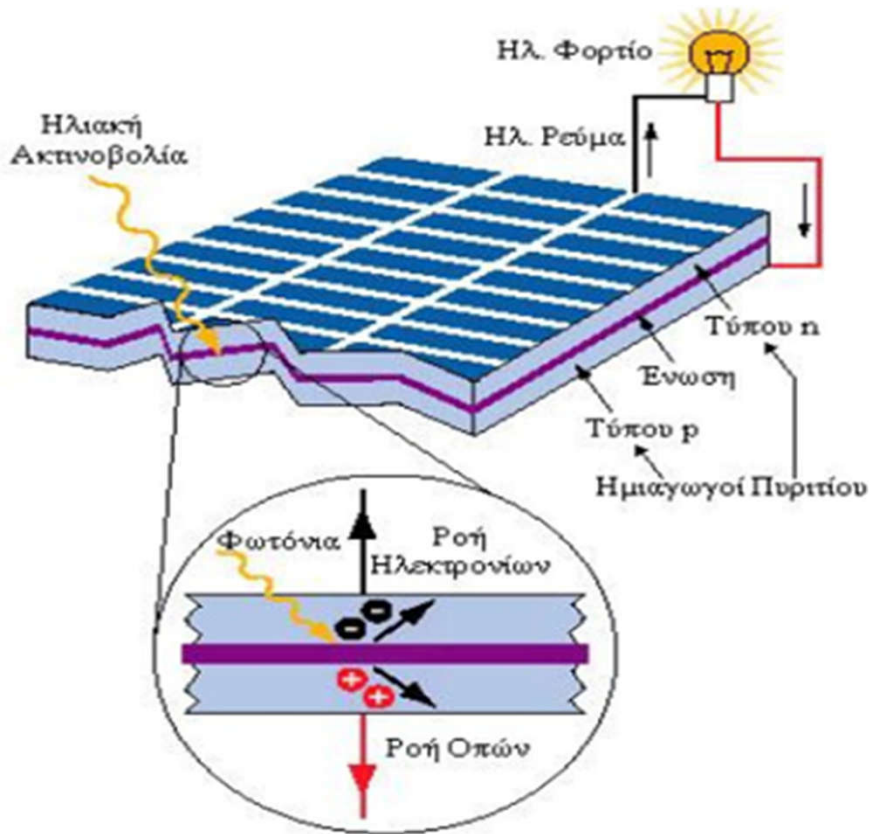


Αυστραλία (υπό κατασκευή). Πύργος ύψους 1100 m και διαμέτρου 150 m. Επιφάνεια συλλεκτών 20 km² (διάμετρος 5 km). Μέγιστη ισχύς 200 MW. Κόστος 800 εκ. \$

Φωτοβολταϊκά συστήματα

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Η συνήθης, εμπορική τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, βασίζεται στο **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**



Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο αφορά τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Becquerel. Στηρίζεται στην άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Το ηλιακό φως είναι ουσιαστικά μικρές δέσμες ενέργειας (φωτόνια) που περιέχουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος. Όταν τα φωτόνια προσκρούσουν σε ένα Φ/Β στοιχείο (που είναι ουσιαστικά ένας “ημιαγωγός”) άλλα ανακλώνται, άλλα το διαπερνούν και άλλα απορροφώνται από αυτό. Αυτά τα τελευταία είναι που παράγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Συγκεκριμένα, τα φωτόνια που απορροφώνται από το ημιαγωγίμο υλικό δημιουργούν ζεύγη οπών ηλεκτρονίου-ηλεκτρονίου κάτω από την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου και καθοδηγούνται μέσω εξωτερικού κυκλώματος. Πιο απλά, τα φωτόνια αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια του Φ/Β να μετακινηθούν σε άλλη θέση και όπως γνωρίζουμε ο ηλεκτρισμός δεν είναι τίποτε άλλο παρά κίνηση ηλεκτρονίων.

Δεδομένου ότι από το ευρύ φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, η ροή ηλεκτρονίων παρατηρείται μόνο σε συγκεκριμένα μήκη κύματος **υπάρχει περιορισμένη απόδοση**. Το κύριο υλικό που χρησιμοποιείται είναι το πυρίτιο σε τρεις μορφές: μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό και άμορφο

Αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας

Ιστορική ανάδρομη στα Φ/Β

- 1839 Ο Γάλλος Φυσικός Edmond Becquerel παρατηρεί το Φ/Β φαινόμενο
- 1873 Ο Willoughby Smith ανακαλύπτει την φωτοαγωγιμότητα του σεληνίου
- 1883 Ο Αμερικανός εφευρέτης Charles Fritts περιγράφει την κατασκευή Φ/Β στοιχείων από σελήνιο.
- 1915 Ο Πολωνός επιστήμονας Czochralski ανέπτυξε μέθοδο για παραγωγή μονοκρυσταλλικού πυριτίου.
- 1954 Οι Rappaport, Loferski και Jenny ανακοινώνουν την εφαρμογή του Φ/Β φαινομένου με υλικά από κάδμιο (Cd). Στα εργαστήρια Bell οι ερευνητές Pearson, Charin και Fuller ανακοινώνουν την επίτευξη απόδοσης Φ/Β Πυριτίου στο 6%.
- 1955 Η εταιρεία Hoffman Electronics ανακοινώνει την εμπορική διάθεση Φ/Β με 2% απόδοση, κόστους \$25/στοιχείο, 14 mW το καθένα δηλ. με κόστος ενέργειας \$1500/W.
- 1957 Η εταιρεία Hoffman Electronics κατασκευάζει Φ/Β στοιχεία με απόδοση 8%.
- 1958 Εκτοξεύεται από τις ΗΠΑ ο πρώτος δορυφόρος με Φ/Β. Λειτουργήσε για 8 έτη.
- 1960 Η εταιρεία Hoffman Electronics κατασκευάζει Φ/Β στοιχεία με 14% απόδοση.
- 1963 Στην Ιαπωνία εγκαθίσταται το μεγαλύτερο για την εποχή Φ/Β πεδίου 242 W σε ένα φάρο.
- 1964 Εκτοξεύεται από τις ΗΠΑ το διαστημόπλοιο Nimbus εξοπλισμένο με Φ/Β 470 W.
- 1977 Η παγκόσμια εγκατάσταση Φ/Β ξεπερνάει τα 500 kW.
- 1979 Το πρώτο Φ/Β σύστημα για οικισμό εγκαθίσταται από ερευνητικό κέντρο της NASA Lewis Research Center ισχύος 3,5 kW στον Ινδιάνικο οικισμό Parago στην Αριζόνα.
- 1983 Η παγκόσμια εγκατάσταση Φ/Β ξεπερνάει τα 21 MW.
- 2004 Η παγκόσμια εγκατάσταση Φ/Β ξεπερνάει τα 1200 MW.
- 2012 Η παγκόσμια εγκατάσταση Φ/Β ξεπερνάει τα 100 GW.
- 2018 Η παγκόσμια εγκατάσταση Φ/Β ξεπερνάει τα 500 GW.

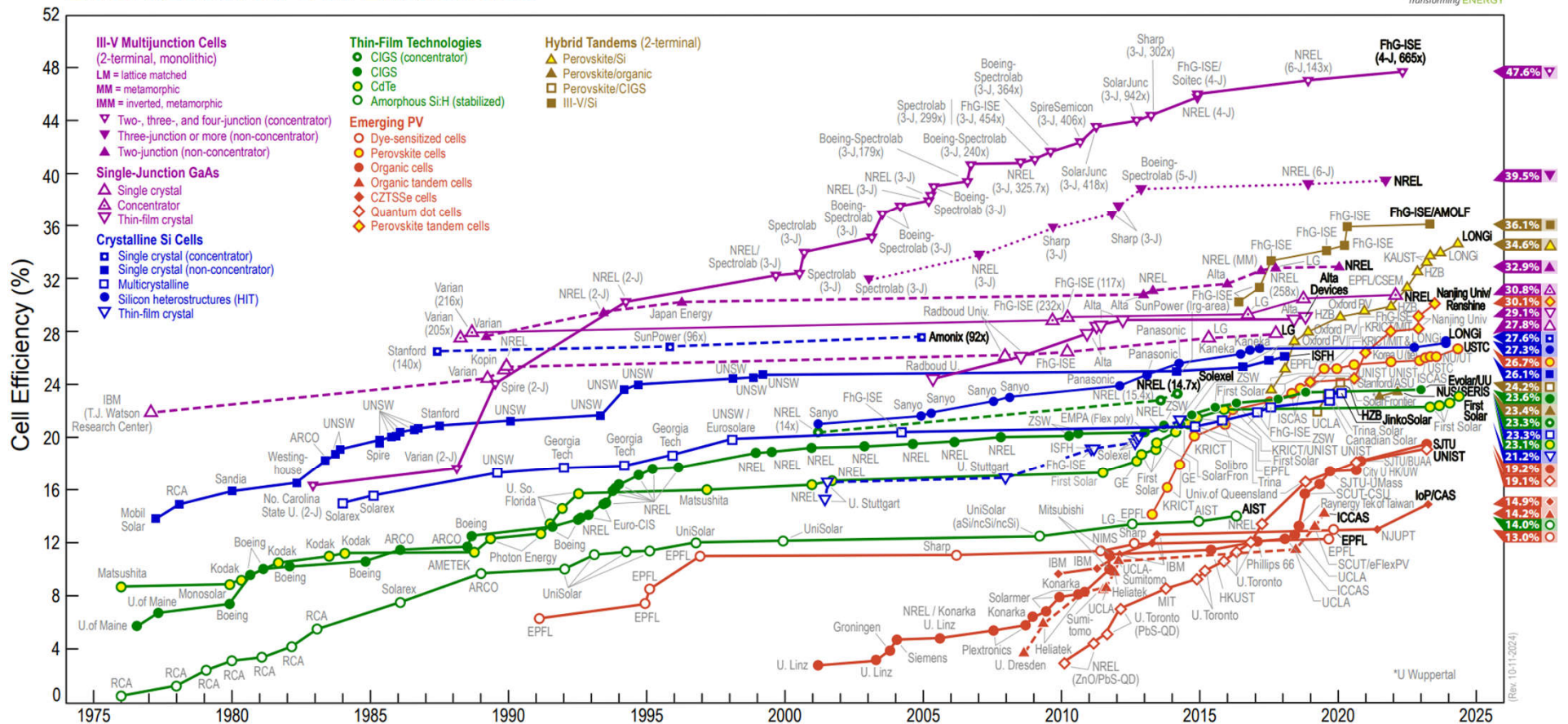
Φωτοβολταϊκά συστήματα

Εξέλιξη συντελεστή απόδοσης (%) για διάφορες τεχνολογίες

Ο βαθμός απόδοσης εκφράζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Τα πρώτα Φ/Β στοιχεία είχαν 1-2% απόδοση, και τη δεκαετία του 1950 είχαν 6%,

Best Research-Cell Efficiencies



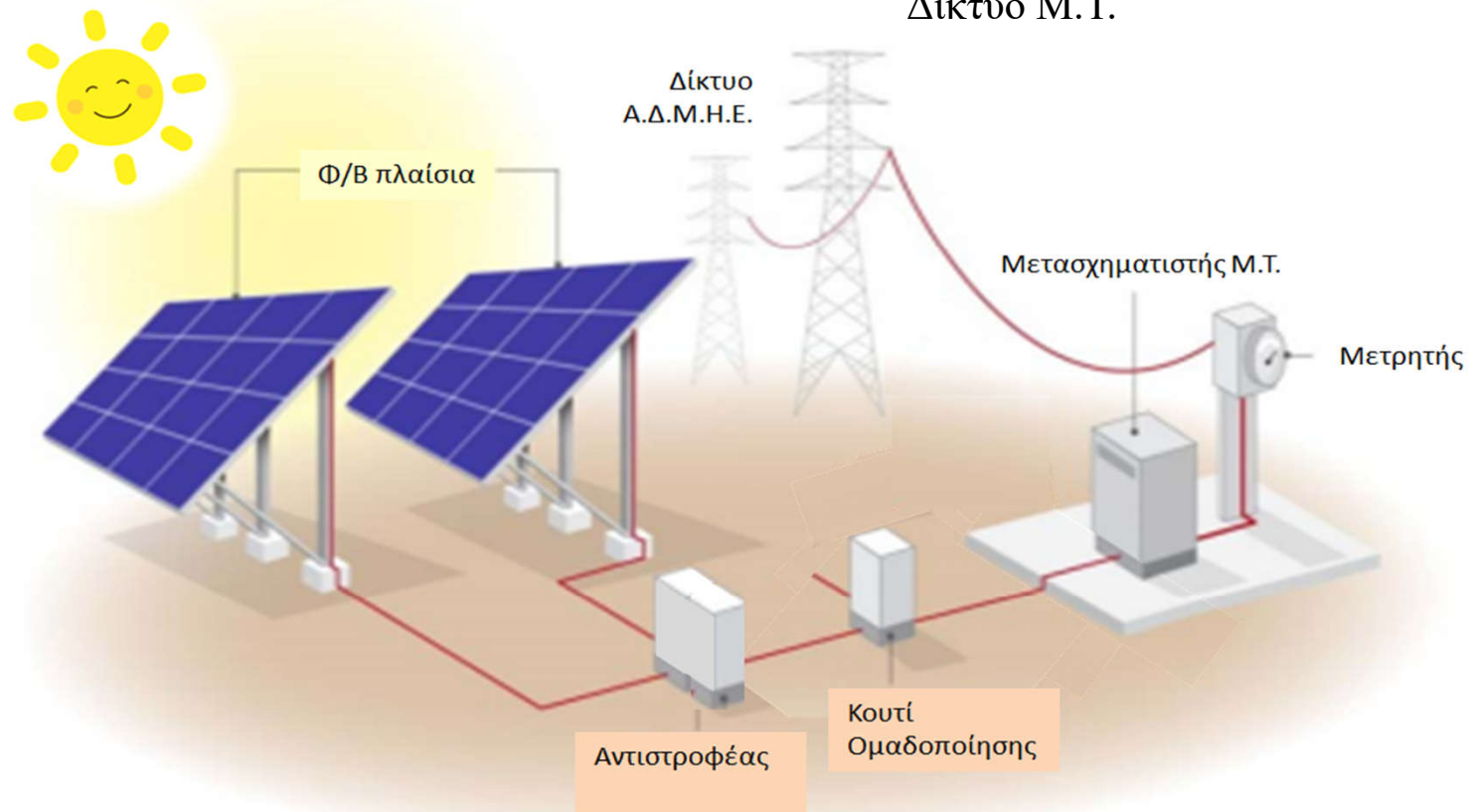
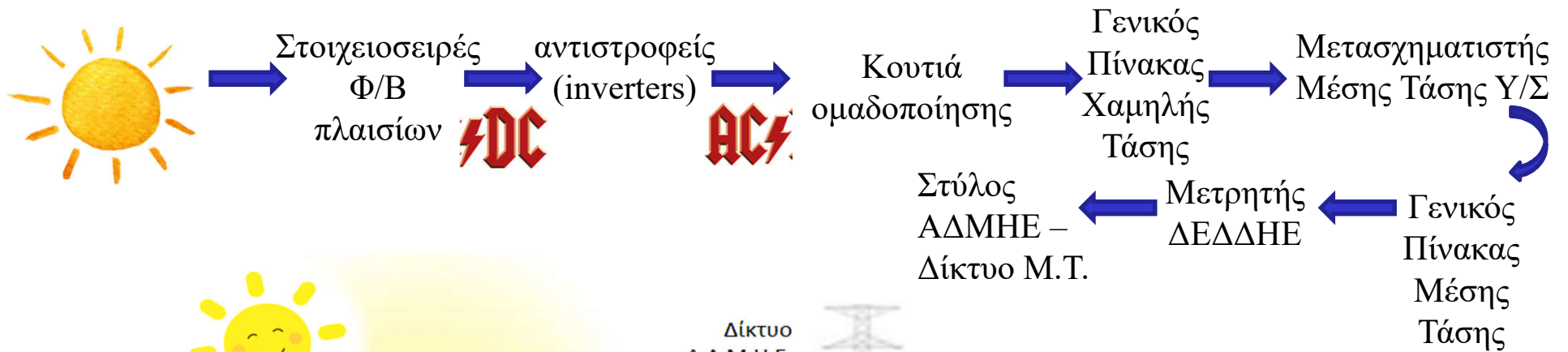
Φωτοβολταϊκά συστήματα

Παράγοντες απόδοσης

- **Είδος του Φ/Β στοιχείου:** (κρυσταλλικού ή άμορφου πυριτίου)
- **Ημερήσια διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας:** (λόγω εποχής και ώρας)
- **Τοποθεσία περιοχής:** Βορειότερο γεωγραφικό πλάτος → μικρότερη απόδοση
- **Κλίση:** (κατακόρυφη τοποθέτηση → μικρότερη απόδοση)
- **Σκίαση** (φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, γειτονικά κτίρια ή αρχιτεκτονικά στοιχεία της ίδιας κατασκευής)
- **Απόκλιση από νότιο προσανατολισμό** (απόκλιση έως και 20° → απόδοση έως και 95% της μέγιστης)
- **Σωστή καλωδίωση και Η/Μ εξοπλισμός** (υδατοστεγανότητα, ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες, γείωση του συστήματος)
- **Αερισμός της πίσω πλευράς των Φ/Β στοιχείων:** η αύξηση της θερμοκρασίας τους αντιστρόφως ανάλογη της απόδοσής τους (*για κάθε 1°C άνω των 25°C → η απόδοση μειώνεται κατά 0,4-0,5%*)
- **Σκόνη:** Η συσσώρευση σκόνης μειώνει την απόδοση των Φ/Β
- **Υγρασία:** Η υγρασία στην επιφάνεια των στοιχείων μειώνει την απόδοσή τους

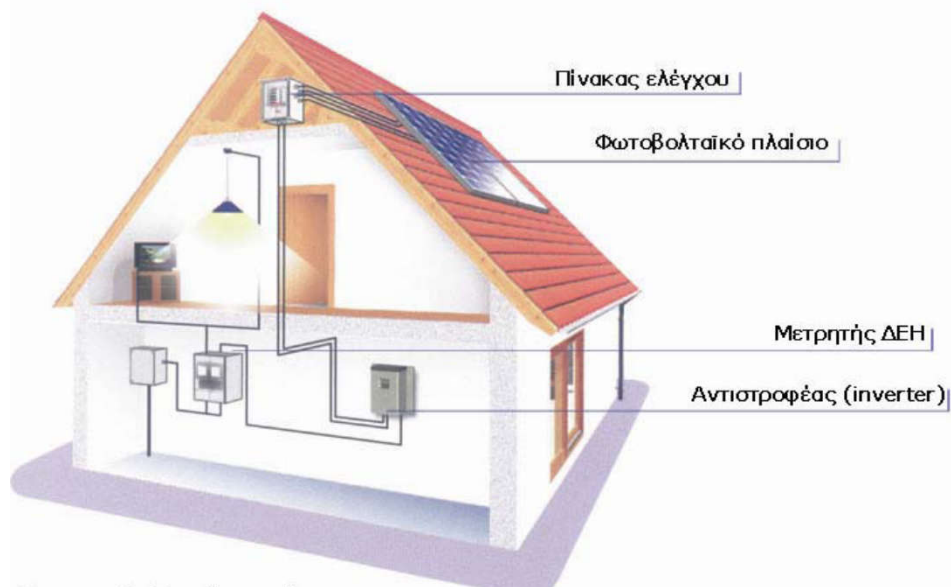
Φωτοβολταϊκά συστήματα

Δομή διασυνδεδεμένης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης



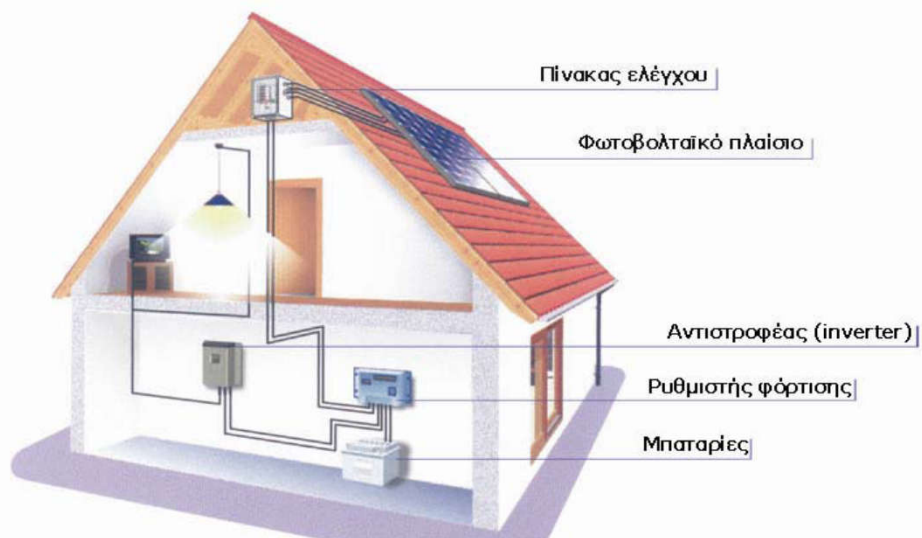
Αποτίμηση Λειτουργίας Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού,
Γκριτζιά Α. Διπλωματική εργασία, Οκτώβριος 2023

Φωτοβολταϊκά συστήματα



Διασυνδεδεμένα: το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το δίκτυο της Δ.Ε.Η.

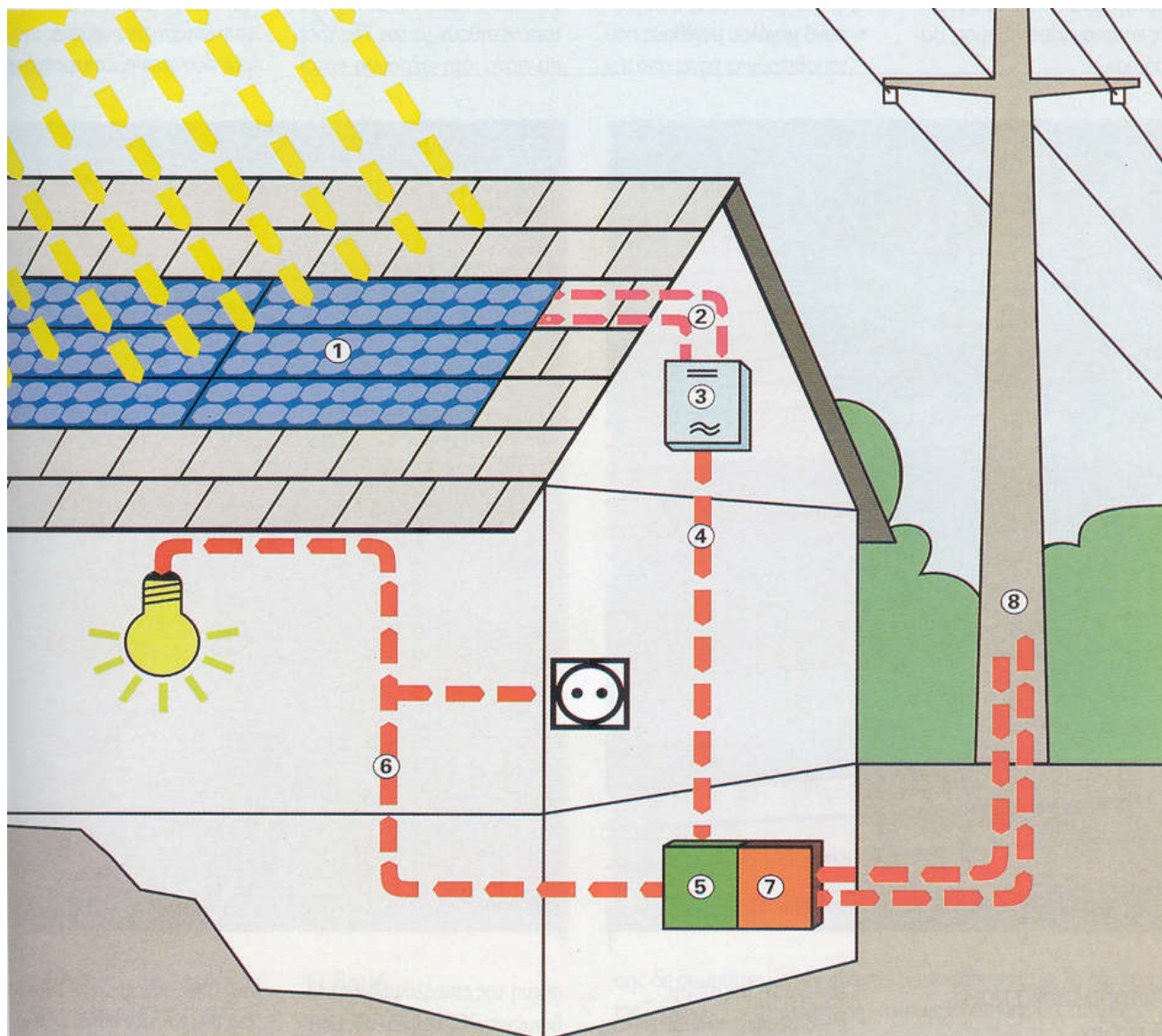
Τοποθετείται διπλός μετρητής για καταμέτρηση εισερχόμενης και εξερχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας)



Αυτόνομα: για τη συνεχή εξυπηρέτηση, η εγκατάσταση πρέπει να περιλαμβάνει και μια μονάδα αποθήκευσης (μπαταρίες) και διαχείρισης της ενέργειας

Φωτοβολταϊκά συστήματα

Σχηματική παράσταση ολοκληρωμένου συστήματος Φ/Β



1. Σύστημα Φ/Β στοιχείων
2. Αγωγός χαμηλής τάσης
3. Μετατροπέας συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο
4. Αγωγός τάσης δικτύου
5. Πίνακας διανομής
6. Ηλεκτρική εγκατάσταση δικτύου
7. Πίνακας με μετρητή ενέργειας διπλής κατεύθυνσης για λήψη και απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας
8. Δίκτυο ηλεκτροδότησης της περιοχής

Πηγή: περιοδικό ΚΤΙΡΙΟ, Οκτώβριος 2000)

Φωτοβολταϊκά συστήματα

Στάδια κατασκευής



Καθαρισμός & διαμόρφωση περιβάλλοντος χώρου



Οικοδομικές εργασίες



Συναρμολόγηση μεταλλικού σκελετού βάσεων



Σύνδεση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού

Φ/Β σταθμός Αγνάντια

Ο σταθμός είναι εγκατεστημένος σε γήπεδο 11000 m², υψομέτρου 38 m. Ονομαστική ισχύς: **100 kWp**
Διαθέτει σύστημα ηλιακής ιχνηλάτησης. Συνδέθηκε στο δίκτυο της Δ.Ε.Η. στις 22 Ιανουαρίου 2011.

Φ/Β σταθμός Μοναστηράκι

Ο σταθμός είναι εγκατεστημένος σε γήπεδο 11000 m², υψομέτρου 32 m. Ονομαστική ισχύς: **100 kWp**
Χρησιμοποιούνται σταθερές βάσεις για τη στήριξη των φ/β πλαισίων. Συνδέθηκε στο δίκτυο της Δ.Ε.Η. στις 30 Ιουνίου 2011.

Αποτίμηση λειτουργίας Φωτοβολταϊκών σταθμών, Φ. Μαλτέζος, Διπλωματική εργασία, 2013

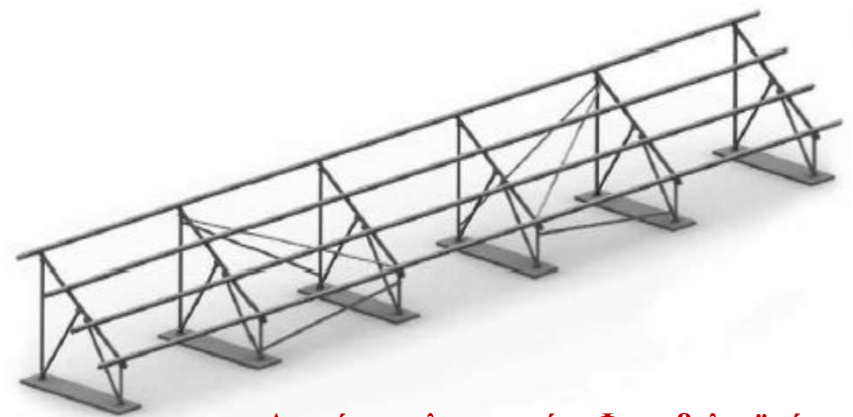
Φωτοβολταϊκά συστήματα

Συστήματα στήριξης πλαισίων

Σύστημα ηλιακής ιχνηλάτησης



Σταθερές βάσεις



Αποτίμηση λειτουργίας Φωτοβολταϊκών
σταθμών, Φ. Μαλτέζος, Διπλωματική
εργασία, 2013

Φωτοβολταϊκά συστήματα

Εναλλακτικές διατάξεις Φ/Β συστημάτων

Φ/Β πάνω από καλλιέργειες (αγροβολταϊκά)



Φ/Β σε χώρους στάθμευσης

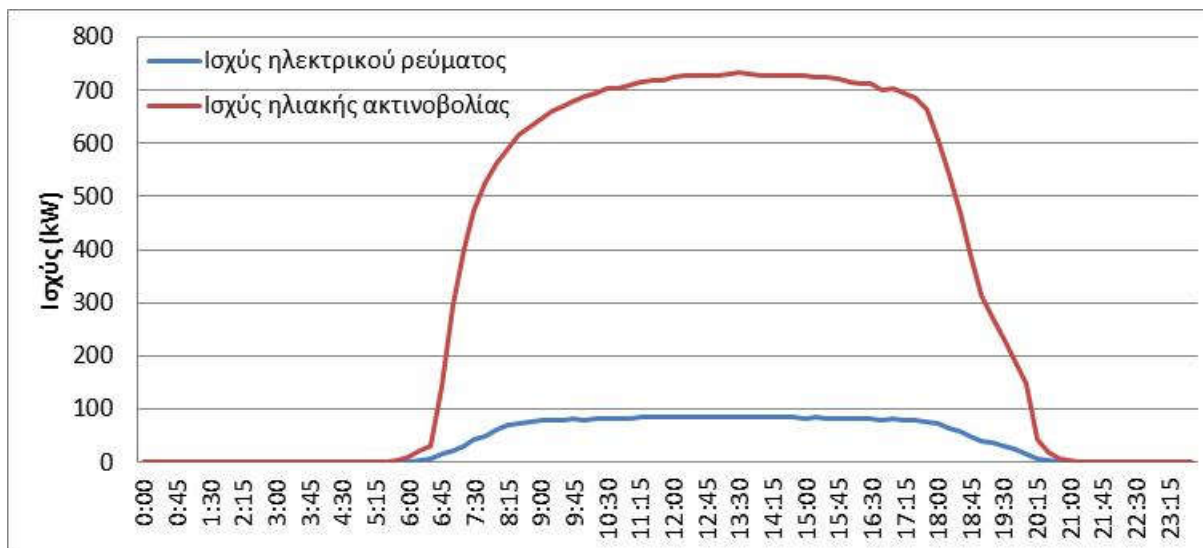


Φ/Β σε πεζοδρόμια

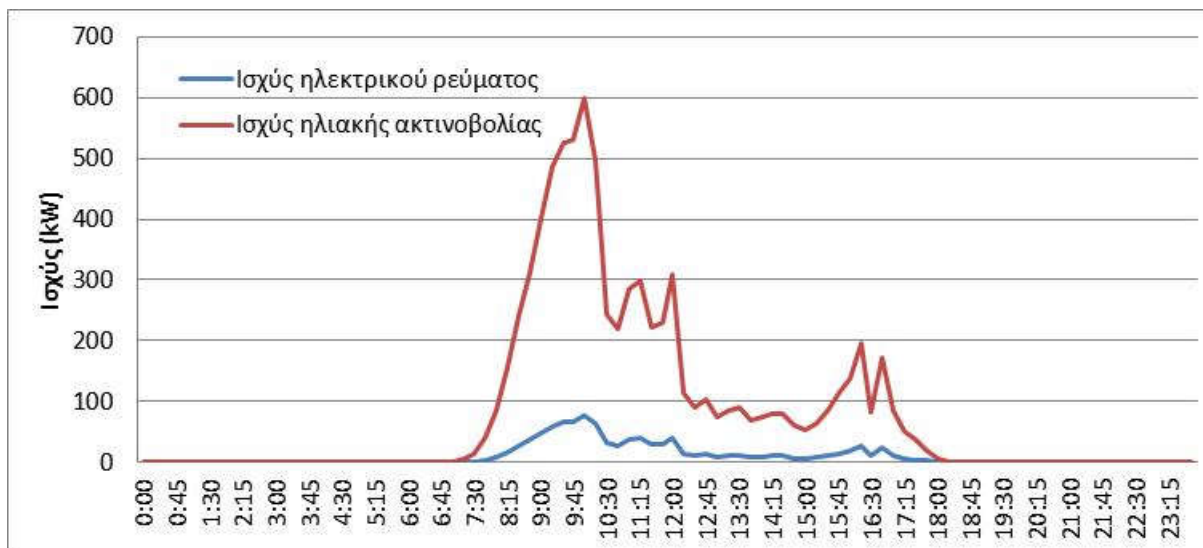


Φωτοβολταϊκά συστήματα

Απόδοση



21/6/2013

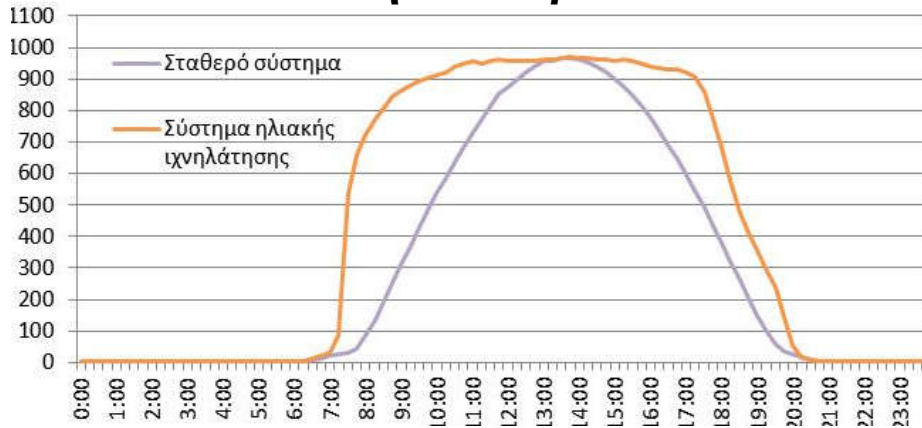


17/2/2013

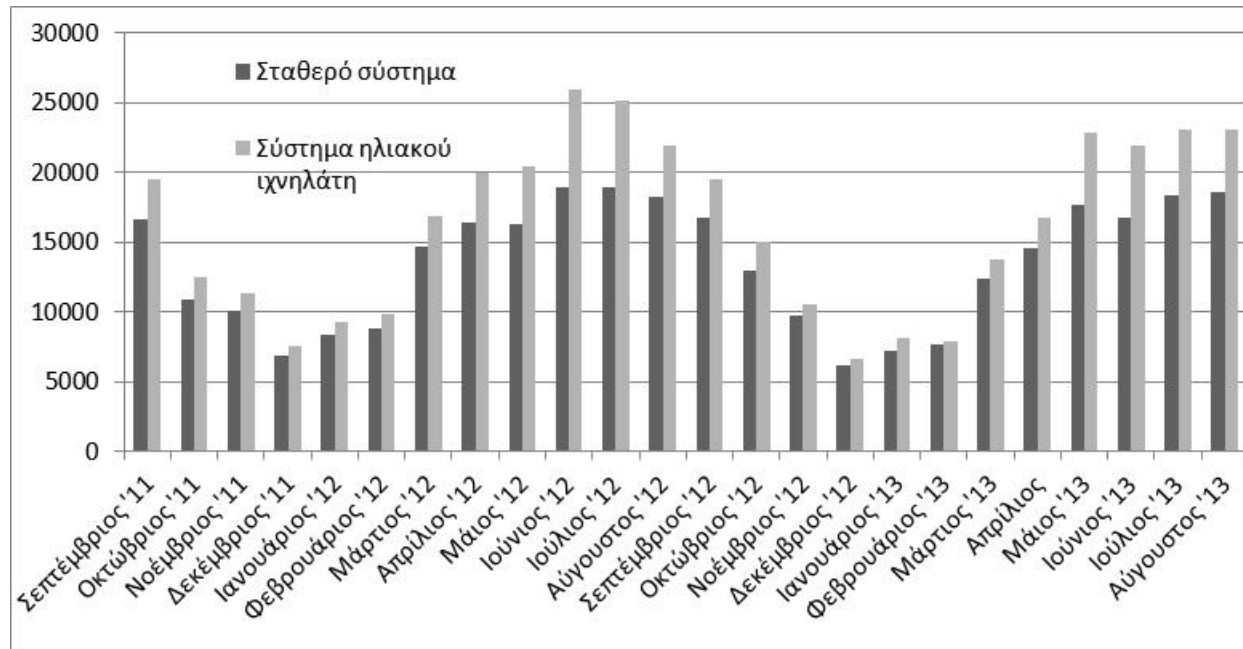
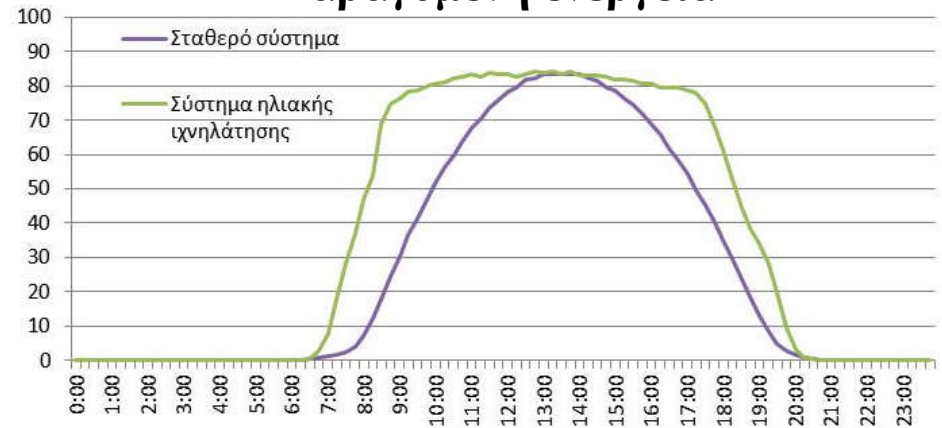
Φωτοβολταϊκά συστήματα

Σύγκριση σταθερών συστημάτων με συστήματα ηλιακής ιχνηλάτησης

Ηλιακή ακτινοβολία

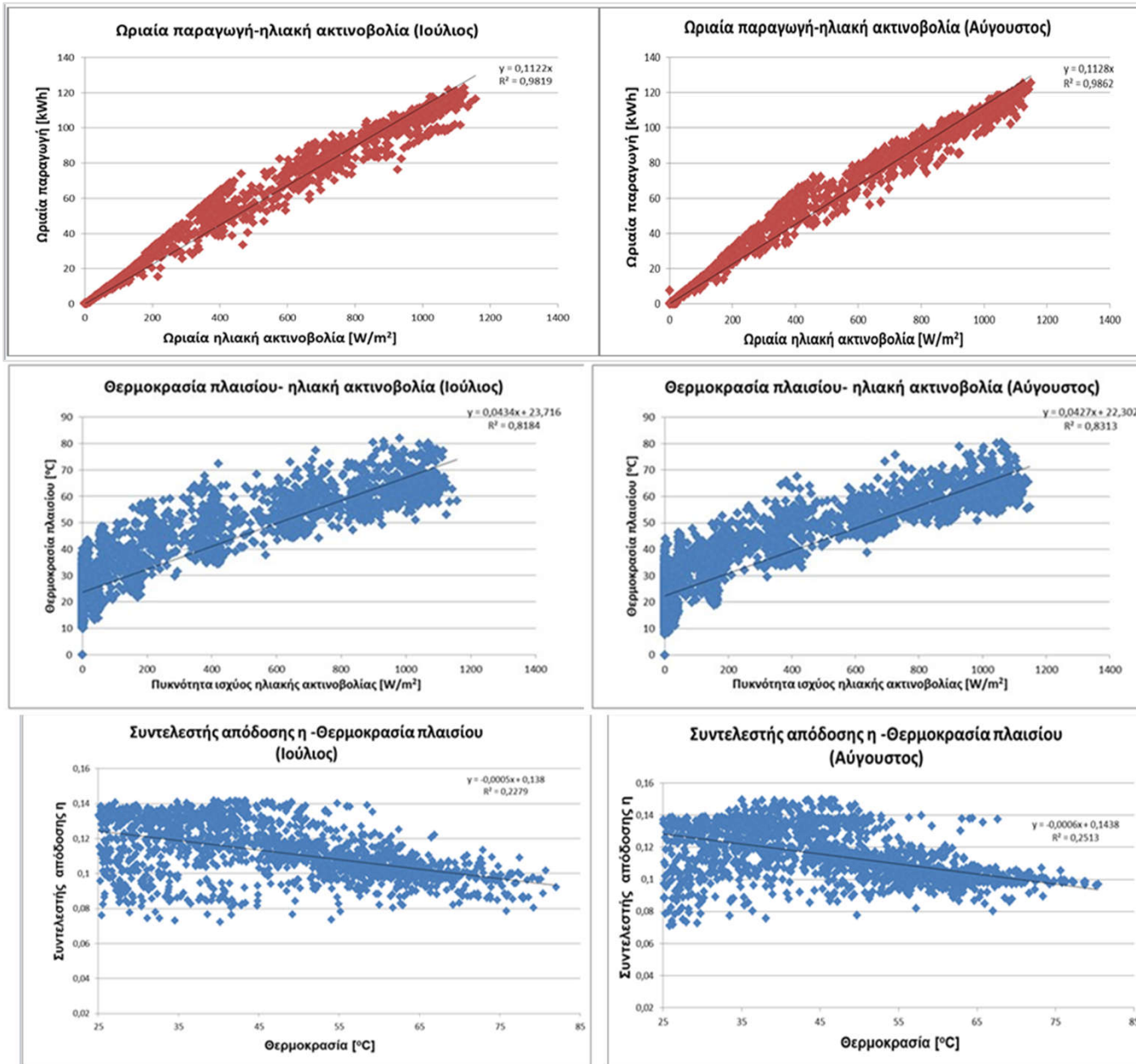


Παραγόμενη ενέργεια



Φωτοβολταϊκά συστήματα

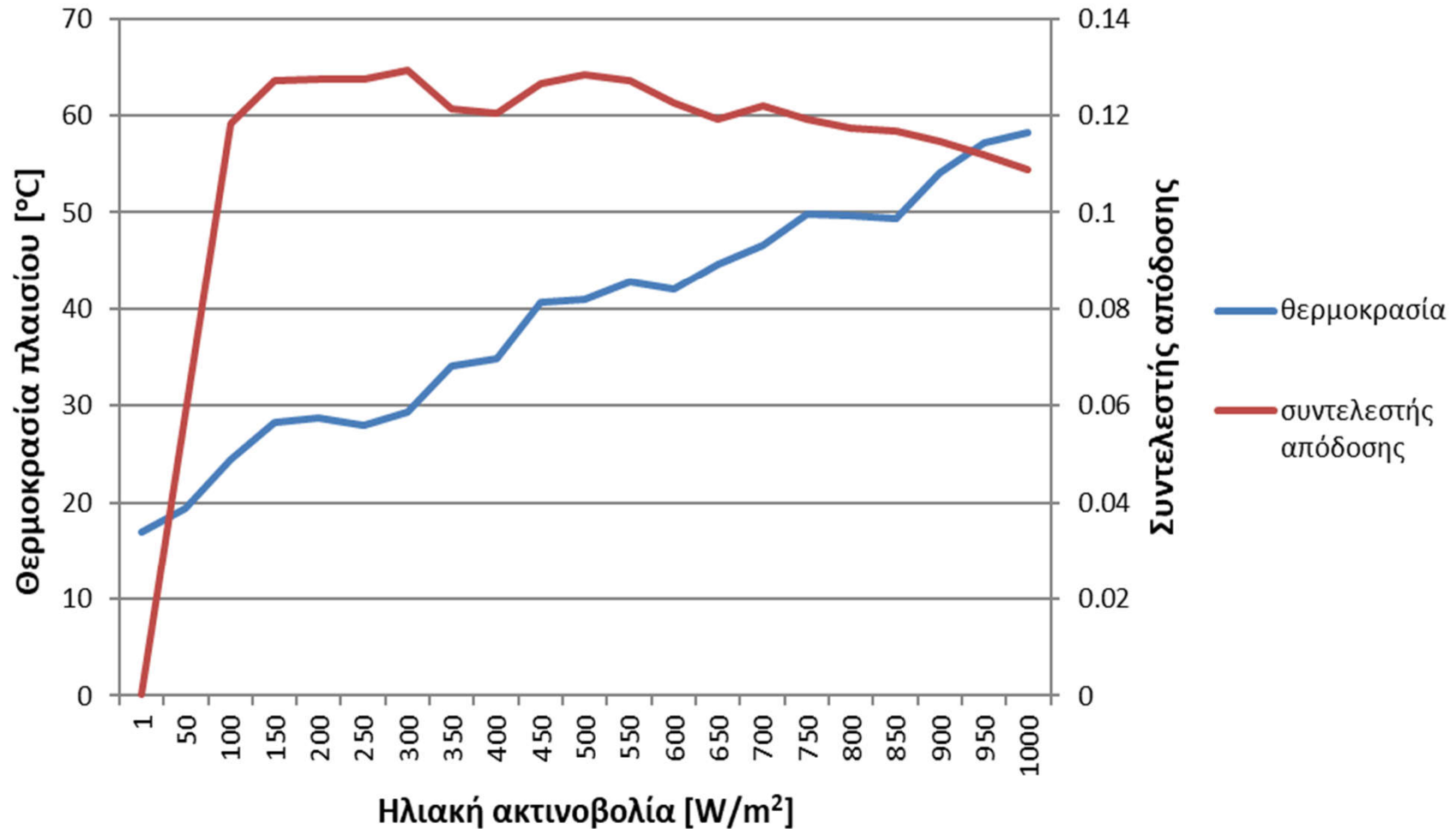
Σχέση ακτινοβολίας-παραγωγής-θερμοκρασίας πλαισίου-συντελεστή απόδοσης



Αποτίμηση Λειτουργίας
Διασυνδεδεμένου
Φωτοβολταϊκού Σταθμού,
Γκριτζια Α. Διπλωματική
εργασία, Οκτώβριος 2023

Φωτοβολταϊκά συστήματα

Μέσες τιμές συντελεστή απόδοσης και θερμοκρασία πλαισίου ανά διάστημα τιμών ηλιακής ακτινοβολίας

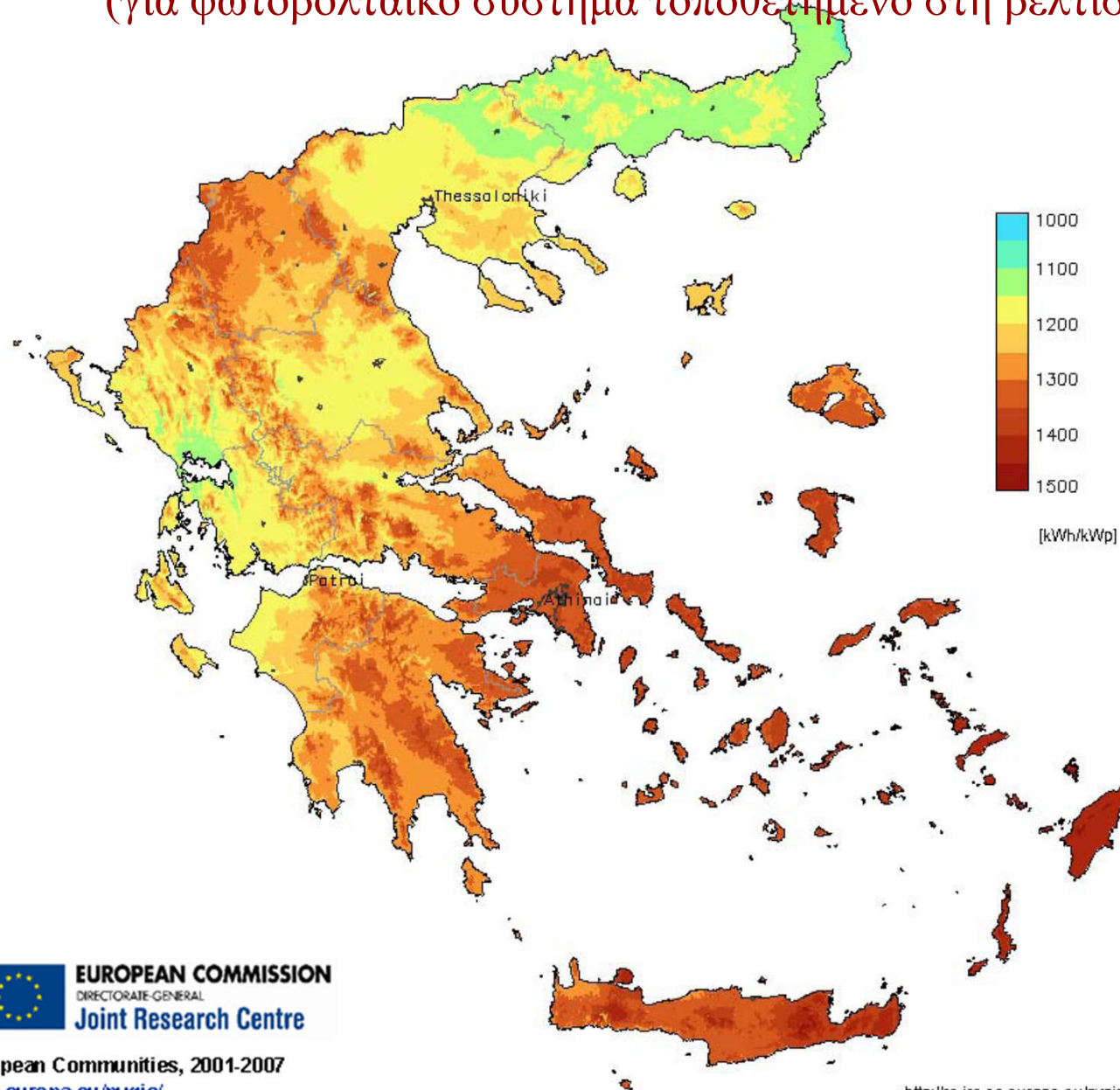


Αποτίμηση Λειτουργίας Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού,
Γκριτζια Α. Διπλωματική εργασία, Οκτώβριος 2023

Φωτοβολταϊκά συστήματα

Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (kWh/ kWp)

(για φωτοβολταϊκό σύστημα τοποθετημένο στη βέλτιστη κλίση)



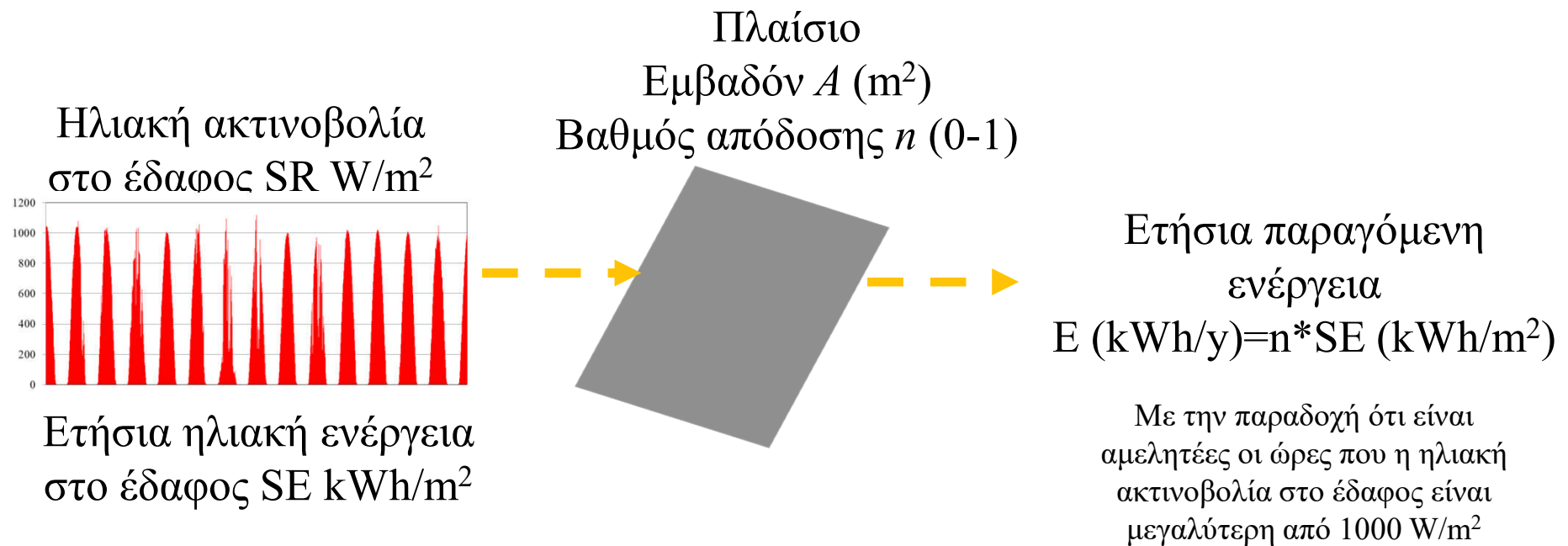
Φωτοβολταϊκά συστήματα

Υπολογισμοί

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κατασκευάζονται ώστε η ονομαστική ισχύς να παράγεται όταν $SR \geq 1000 \text{ W/m}^2$

Εγκατεστημένη ισχύς πλαισίων: $I \text{ (kW)} = 1000 \text{ W/m}^2 * A \text{ m}^2 * n$

	Εμβαδόν (m ²)	Συντελεστής απόδοσης
Εμβαδόν και συντελεστής απόδοσης πλαισίων για 1 kW	8	0.125
	7	0.143
	6	0.168
	5	0.20



Φωτοβολταϊκά συστήματα

Πλαίσια



Φωτοβολταϊκά πλαίσια

- Ονομαστική ισχύς : 210 W
- Απόδοση φ/β γεννήτριας : 13.4 %
- Θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος: -0.44 %/ °C
- Διαστάσεις (Μ x Π x Υ) : 1650,5×951,3×46 (mm)

Υπολογισμοί:

Επιφάνεια πλαισίου:

$$1650.5 \text{ mm} \times 951.3 \text{ mm} = \mathbf{1.57 \text{ m}^2}$$

Αν η μέγιστη ισχύς επιτυγχάνεται στα 1000 W/m² τότε σε κάθε πλαίσιο προσπίπτουν 1570 W και παράγονται 210 W.

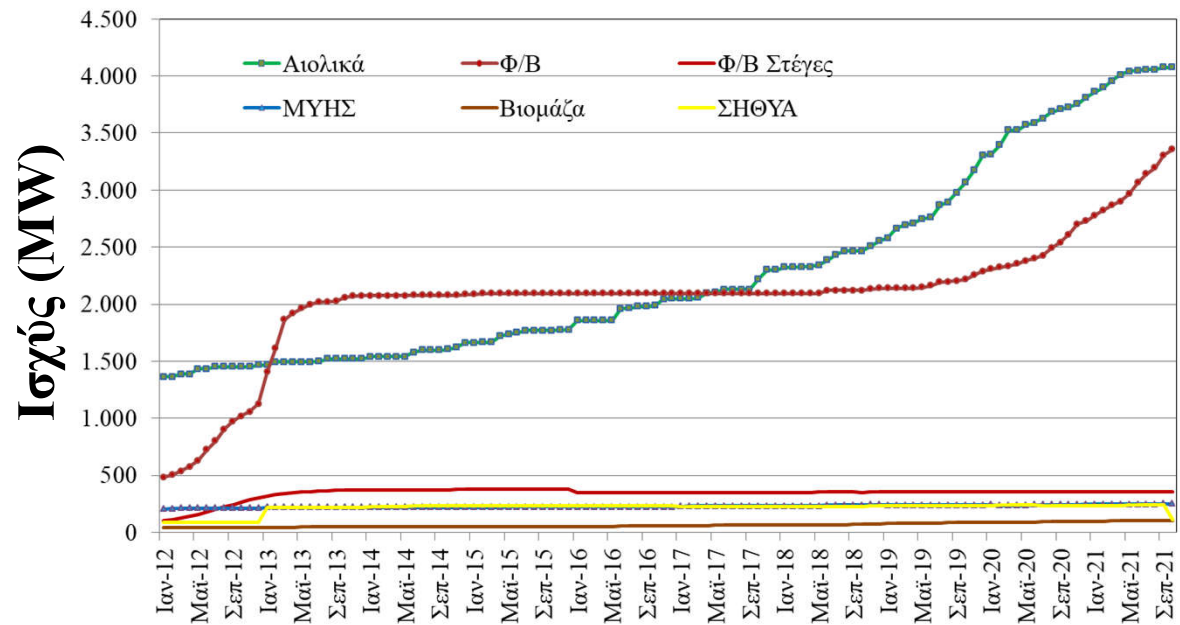
Άρα συντελεστής απόδοσης $\mathbf{210/1570=13.4\%}$



Η «φούσκα» των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα

Χρονική εξέλιξη εγκατάστασης ΑΠΕ

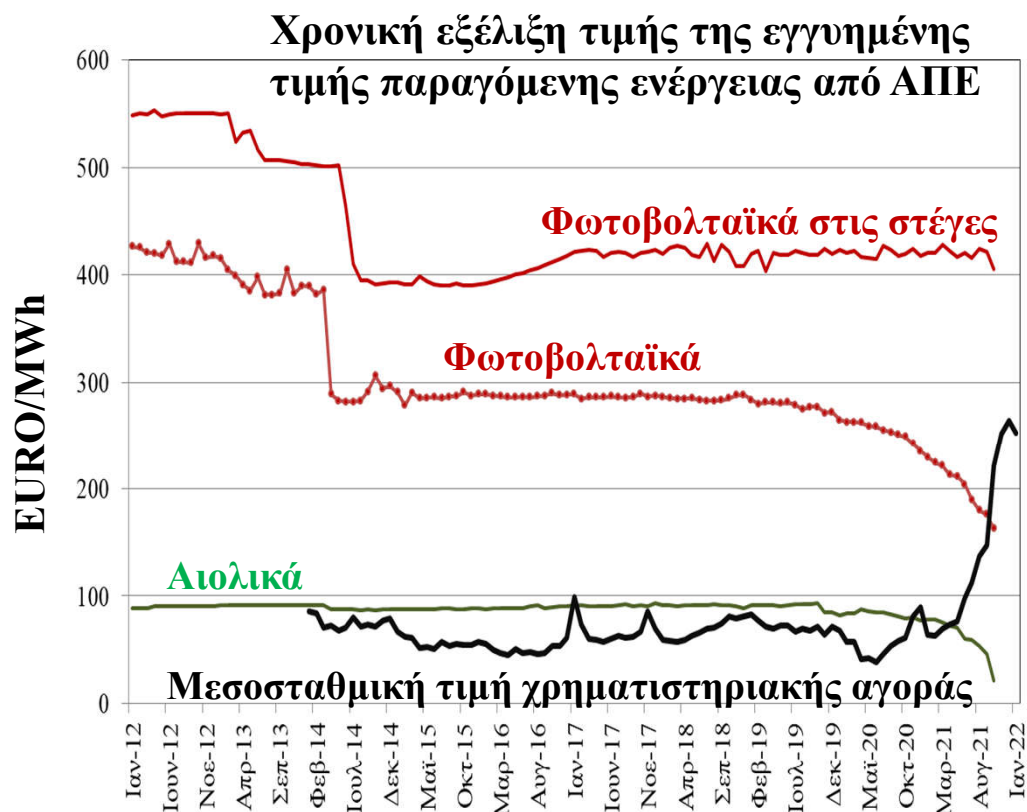
1. Κατά τα έτη 2012 και 2013 επιλέχτηκε η απότομη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων συνολικής ισχύος περίπου 2 GW. Εκείνη την εποχή η συνολική εγκατεστημένη ισχύς θερμικών και υδροηλεκτρικών σταθμών ήταν της τάξης των 12.7 GW. Η αντίστοιχη διείσδυση της αιολικής ενέργειας ήταν σταδιακή



2. Η τεχνολογία εκείνης της εποχής δεν ήταν αρκετά ώριμη ώστε να ανταγωνιστεί τις άλλες πηγές ενέργειας. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι συντελεστές απόδοσης ήταν της τάξης του 12-13%, ενώ το κόστος εγκατάστασης ξεπερνούσε τα 3000 ΕΥΡΩ/kW
3. Η εγκατάσταση 1 kW θα παρήγαγε ενέργεια της τάξης των 1.75 MWh/έτος (συντελεστής δυναμικότητας 0.2) . Εκείνη την εποχή η χρηματιστηριακή τιμή της MWh ήταν πάντα κάτω από 90 ΕΥΡΩ. Αρά για εγκατάσταση που κόστιζε π.χ. 3000 ΕΥΡΩ οι ετήσιες εισπράξεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα ήταν της τάξης των 150 ΕΥΡΩ
4. Δεδομένου ότι ο χρόνος ζωής των φωτοβολταϊκών είναι της τάξης των 20 ετών, επιλέχθηκε η νομοθέτηση υπερογκων εγγυημένων τιμών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολαϊκά

Η «φούσκα» των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα

5. Οι εγγυημένες τιμές αρχικά ήταν της τάξης των 400 ΕΥΡΩ/MWh για φωτοβολταϊκά και 550 ΕΥΡΩ/MWh για φωτοβολταϊκά στις στέγες. Οι εγγυημένες τιμές για την αιολική ενέργεια ήταν εύλογες (της τάξης των 90 ΕΥΡΩ/MWh)
6. Στη συνέχεια και λόγω της οικονομικής κρίσης οι τιμές μειώθηκαν με νομοθετικές ρυθμίσεις, αλλά παρέμεναν αρκετά υψηλές σε σχέση με τις άλλες ΑΠΕ
7. Αν τα φωτοβολταϊκά πληρωνόντουσαν με τιμές π.χ. αιολικών θα είχαν εξοικονομηθεί 7.8 δισεκατομμύρια EURO κατά το χρονικό διάστημα 2012-2021
8. Τη διαφορά χρηματιστηριακής και εγγυημένης τιμής την πλήρωσαν οι καταναλωτές στους λογαριασμούς ρεύματος ως **ειδικό τέλος ΑΠΕ** το οποίο σήμερα ονομάζεται **ΕΤΜΕΑΡ**



Ανάλυση λογαριασμού ΔΕΗ (19/6-20/10/2015)

Ενέργεια (kWh)	1864	Ημερήσια: 1253 Νυχτερινή: 611
Χρέωση προμήθειας ρεύματος (€)	166 (49%)	Πάγιο: 5+2 Ημερήσια: 119 (0.095 €/kWh) Νυχτερινή: 40 (0.066 €/kWh)
Ρυθμιζόμενες χρεώσεις (€)	104 (31%)	Ελληνικό σύστημα μεταφοράς: 8 Ελληνικό σύστημα διανομής: 32 Υπηρεσίες κοινής ωφέλειας: 14 Ειδικό τέλος ΑΠΕ: 49 (0.026 €/kWh) Λοιπές χρεώσεις: 1
Χρεώσεις που αποδίδονται στο κράτος (€)	29 (9%)	Ειδικό τέλος 5%/οο: 1 ΕΦΚ:4 ΦΠΑ: 24
Άλλες χρεώσεις (€)	38 (11%)	Δήμος: 33 ΝΕΡΙΤ: 6 ΕΕΤΑ: 0
Σύνολο λογαριασμού (€)	337	

Η «φούσκα» των φωτοβολταϊκών στην Ισπανία

Παραγωγή ηλιακής ενέργειας χωρίς ήλιο

Spanish nighttime solar energy fraud 'unlikely in UK'

Ecologist

16th April, 2010



In the month that renewable energy incentives are introduced in the UK, Spanish authorities are investigating companies who claim to have produced solar energy at night

Authorities in Spain have launched an investigation into solar energy installations that have been selling electricity apparently generated at night.

The Spanish government called on the National Energy Commission (CNE) to look into the matter after a newspaper investigation discovered irregularities in the times at which solar energy was being generated.

Spanish newspaper *El Mundo* found that between November and January, 4500 megawatt hours (MWh) of solar energy were sold to the electricity grid between midnight and seven in the morning.

It has been suggested that some plants in the regions of Castilla-La-Mancha, Canarias and Andalucía have been using diesel generators connected to their solar panel arrays to illegally benefit from government subsidies.

FOTOVOLTAICAS QUE 'PRODUCEN' DE NOCHE

Industria pide a la CNE que adopte las medidas oportunas contra el fraude de la energía solar

- Sospechas sobre el uso de generadores de gasoil para cobrar las primas
- La Asociación de la Industria Fotovoltaica pide 'limpiar' su imagen

Actualizado miércoles 14/04/2010 12:59

Baltasar Montaña

Madrid.- El secretario de Estado de Energía, Pedro Marín, ha remitido una carta a la Comisión Nacional de la Energía (CNE) en la que le pide la adopción de las medidas que sean necesarias contra el gran fraude detectado en el sector de la energía fotovoltaica.

Hay plantas solares en Castilla-La Mancha, Canarias y Andalucía, principalmente, que están toda la noche produciendo energía pese a que el Sol se ha ido a las antípodas, según los datos de Industria [revelados por EL MUNDO](#).

La Asociación de la Industria Fotovoltaica (Asif) se ha sumado a la "exigencia" de una investigación acerca de las "supuestas actuaciones ilícitas" en la actividad fotovoltaica y asegura que "hay que identificar a los culpables para limpiar la imagen del sector", según ha denunciado en un comunicado.

Según los datos del Gobierno, entre noviembre y enero, en pleno invierno, **el sistema eléctrico recibió 4.500 megavatios/hora producidos por plantas solares entre la medianoche y las siete de la mañana**, más otros 1.500 entre las 19.00 y las 23.00 horas.

¿Cómo se generaron estos megavatios? Según los primeros indicios,

Εφαρμογές

Στο ενεργειακό στέγαστρο του Κέντρου Πολιτισμού του Ιδρύματος Σταύρος Νιάρχος έχουν τοποθετηθεί 5700 φωτοβολταϊκά πλαίσια, ισχύος 285 W, έκαστο, που παράγουν 2.2 GWh ετησίως. Η επιφάνεια του κάθε πλαισίου είναι 1.61 m². Με βάση τα στοιχεία αυτά εκτιμήστε και σχολιάστε: (α) τον βαθμό απόδοσης των πλαισίων, και (β) τον συντελεστή δυναμικότητας του συστήματος. Ποιο από τα δύο μεγέθη θα επηρεαζόταν αν άλλαζε η κλίση του στεγάστρου;

Απάντηση

Ισχύς συστήματος: $5700 \times 285 \text{ W} = 1\,624\,500 \text{ W} = 1.625 \text{ MW}$

Η ονομαστική ισχύς των 285 W αποδίδεται, εξ ορισμού, σε ηλιακή ακτινοβολία ίση η μεγαλύτερη των 1000 W/m²

Βαθμός απόδοσης: $285 \text{ W} / (1000 \text{ W/m}^2 \times 1.61 \text{ m}^2) = 0.177$

Ο βαθμός απόδοσης είναι εύλογος για το έτος εγκατάστασης

Συντελεστής δυναμικότητας: $2.2 \times 1000 \text{ MWh} / (1.625 \text{ MW} \times 8760 \text{ h}) = 0.155$

Ο ΣΔ είναι αρκετά μικρός, καθώς σε ένα τυπικό Φ/Β έργο στην Αττική αναμένεται να υπερβαίνει το 20%.

Αν άλλαζε η κλίση του συστήματος αναμένεται ότι θα αυξανόταν ο συντελεστής δυναμικότητας.

Εφαρμογές

Από έρευνα στο διαδίκτυο βρήκατε σε προσφορά φωτοβολταϊκά πάνελ, διαστάσεων $2279 \times 1134 \times 35$ mm, ονομαστικής ισχύος 550 W και βαθμού απόδοσης 21.53%, σε τιμή 180 € (χωρίς τα κόστη εγκατάστασης και διασύνδεσης). Ελέγξτε την εγκυρότητα των ως άνω τεχνικών και οικονομικών μεγεθών (βαθμός απόδοσης και τιμή πώλησης), και εκτιμήστε την ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια τοποθετώντας 10 τέτοια στοιχεία στη στέγη του σπιτιού σας.

Απάντηση

Επιφάνεια πλαισίου: $2.279 \times 1.134 = 2.58 \text{ m}^2$

Η ονομαστική ισχύς των 550 W αποδίδεται, εξ ορισμού, σε ηλιακή ακτινοβολία ίση η μεγαλύτερη των 1000 W/m^2

Βαθμός απόδοσης: $550 \text{ W} / (1000 \text{ W/m}^2 \times 2.58 \text{ m}^2) = 0.213$

Η τιμή είναι έγκυρη (και εύλογη για Φ/Β σύγχρονης τεχνολογίας), ενώ η μικρή απόκλιση σχετικά με την τιμή του εμπορίου οφείλεται στο γεγονός ότι η καμπύλη ισχύος είναι κατά προσέγγιση γραμμική.

Η μοναδιαία τιμή πώλησης είναι $180 \text{ €} / 0.55 \text{ kW} = 327 \text{ €/kW}$, η οποία επίσης χαρακτηρίζεται ως εύλογη, αφού αφορά μόνο στο κόστος του εξοπλισμού

Θεωρώντας συντελεστή δυναμικότητας 20%, που είναι μια τυπική τιμή μιας ικανοποιητικής τοποθεσίας στην Ελλάδα, η ετήσια παραγωγή ενέργειας από τα 10 Φ/Β πάνελ, εκτιμάται σε:

$10 \times 0.55 \text{ kW} \times 0.20 \times 8760 \text{ h} = 9636 \text{ kWh}$.