

# Υδρομετεωρολογία Ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα

Νίκος Μαμάσης και Δημήτρης Κουτσογιάννης  
Τομέας Υδατικών Πόρων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αθήνα 2012

## **ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ:**

### *Ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα*

- **ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ**
- **ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ**
- **ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ**
- **ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ**
- **ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ – ΤΡΥΠΑΣ ΟΖΟΝΤΟΣ**
- **ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

## ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

### ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

#### Αγωγή (conduction)

Η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται από μόριο σε μόριο, ενώ η ταχύτητα μεταφοράς, εξαρτάται από την δομή των μορίων του υλικού (καλοί-κακοί αγωγοί θερμότητας)

#### Μεταγωγή (convection)

Η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται με μετακίνηση μαζών (π.χ αέρα ή νερού)

#### Ακτινοβολία (radiation)

Όλα τα αντικείμενα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν ακτινοβολία, η οποία προέρχεται από την ισχυρή ταλάντωση των ηλεκτρονίων των μορίων. Η ακτινοβολία ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός υπό τη μορφή κυμάτων που απελευθερώνουν ενέργεια όταν απορροφώνται από κάποιο σώμα. Ορισμένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας είναι:

- Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος μεταφέρουν λιγότερη ενέργεια
- Το εκπεμπόμενο μήκος κύματος εξαρτάται από την θερμοκρασία του αντικειμένου
- Τα αντικείμενα με μεγάλη θερμοκρασία εκπέμπουν περισσότερη ακτινοβολία
- Τα θερμότερα αντικείμενα εκπέμπουν σε ευρύτερη περιοχή του φάσματος σε σχέση με τα ψυχρότερα

## ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

### ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ - ΕΚΠΟΜΠΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΜΟΡΙΑ

Κάθε μόριο κατέχει μία ποσότητα ενέργειας, εκτός από αυτή που οφείλεται στην κίνησή του στο χώρο. Αυτή η ενέργεια περιλαμβάνει τρεις κύριες μορφές:

- Κινητική και ηλεκτροστατική δυναμική ενέργεια από ηλεκτρόνια που περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα κάθε ατόμου
- Ενέργεια που συνδέεται με την δόνηση των ατόμων γύρω από τη μέση θέση τους
- Ενέργεια που συνδέεται με την περιφορά των μορίων γύρω από το κέντρο βάρους τους

Η κβαντομηχανική προβλέπει ότι για κάθε μόριο επιτρέπονται συγκεκριμένες τροχιές ηλεκτρονίων, εύρος δονήσεων και ρυθμός περιστροφής. Κάθε πιθανός συνδυασμός των τριών μπορεί να προσδιοριστεί με ένα **επίπεδο ενέργειας** το οποίο είναι το άθροισμα των τριών ενεργειών. Κάθε μόριο ανεβαίνει ή κατεβαίνει σε κάποιο επίπεδο ενέργειας απορροφώντας ή εκπέμποντας ακτινοβολία. Η θεωρία προβλέπει συγκεκριμένες μετακινήσεις στα επίπεδα οι οποίες παραμένουν ίδιες στην εκπομπή και στη λήψη. Δεδομένου ότι ένα μόριο απορροφά και ακτινοβολεί ενέργεια σε διαχωρισμένες ποσότητες (που αντιστοιχούν στις επιτρεπόμενες αλλαγές στο επίπεδο ενέργειας του), **συνεπάγεται ότι μπορεί να αντιδράσει με ακτινοβολία που έχει συγκεκριμένα μήκη κύματος**

## ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

### Ενέργεια ακτινοβολίας

Η ενέργεια που μεταφέρεται με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σχεδόν ποτέ δεν είναι ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος (μονοχρωματική), αλλά αποτελείται από ένα σύνολο μονοχρωματικών ακτινοβολιών. Η κατανομή της ενέργειας ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το μήκος κύματος ονομάζεται **φάσμα**. Η ακτινοβολία στις διάφορες περιοχές του φάσματος (κάθε περιοχή αντιστοιχεί σε ένα διάστημα τιμών του μήκους κύματος), έχει συγκεκριμένες ιδιότητες. Για παράδειγμα η ορατή ακτινοβολία αντιστοιχεί στην περιοχή με μήκη κύματος από 0.39 έως 0.72  $\mu\text{m}$  (ιώδες και ερυθρό αντίστοιχα)

### Μελανό σώμα

Ένα υποθετικό σώμα το οποίο περιλαμβάνει ένα ικανό αριθμό μορίων και που απορροφά και εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε όλα τα μέρη του φάσματος, έτσι ώστε:

- να απορροφάται το σύνολο της εισερχόμενης ακτινοβολίας
- να εκπέμπεται η μέγιστη δυνατή ακτινοβολία σε όλα τα μήκη κύματος και σε όλες τις διευθύνσεις

### Γκρίζο σώμα (graybody)

Ένα υποθετικό σώμα στο οποίο η ακτινοβολία που απορροφά ή εκπέμπει είναι ανεξάρτητη από το μήκος κύματος

## ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ

Τυπικό  
Μήκος  
κύματος  
( $\mu\text{m}$ )

$10^{-7}$

Ακτίνες Γάμα

$10^{-4}$

Ακτίνες X

$10^{-1}$

Υπεριώδης

0.5

Ορατό φώς

2

Υπέρυθρο

$10^3$

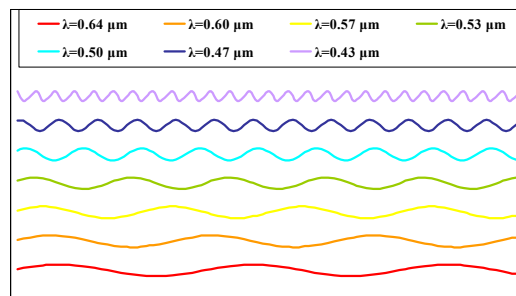
Μικροκύματα

$10^6$

Τηλεόραση

$10^8$

Ραδιοκύματα



## ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΜΟΝΟΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

### Νόμος του Planck

Η ένταση μονοχρωματικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μελανό σώμα σε μήκος κύματος  $\lambda$ , εξαρτάται αποκλειστικά από τη θερμοκρασία του σώματος και δίδεται από τη σχέση:

$$E_{b\lambda} = c_1 / [\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)]$$

όπου:

$$c_1 = 3.74 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$$

$$c_2 = 1.44 \cdot 10^{-2} \text{ m K}$$

$\lambda$  το μήκος κύματος σε m

$T$  η θερμοκρασία του σώματος σε βαθμούς Kelvin

### Νόμος της μετατόπισης του Wien (displacement law)

Η μέγιστη ένταση ακτινοβολίας μελανού σώματος εκπέμπεται σε συγκεκριμένο μήκος κύματος, το οποίο δίδεται από τη σχέση:

$$\lambda_m = 2897 / T$$

όπου:

$\lambda_m$  το μήκος κύματος σε  $\mu\text{m}$

$T$  η θερμοκρασία του σώματος σε βαθμούς Kelvin

## ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

### ΕΝΤΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

#### Νόμος των Stefan-Boltzman

Η ένταση ακτινοβολίας μελανού σώματος δίδεται από τη σχέση:

$$E_b = \sigma T^4$$

όπου:

$\sigma$  η σταθερά Stefan-Boltzman που ισούται με  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

$T$  η θερμοκρασία του σώματος σε βαθμούς Kelvin

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από την ολοκλήρωση της σχέσης του **Planck** σε όλο το πεδίο ορισμού του μήκους κύματος. Η ένταση ακτινοβολίας έχει μονάδες ισχύος ανά επιφάνεια, και συνήθως υπολογίζεται σε  $\text{W m}^{-2}$ , ή  $\text{J s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  ή  $\text{cal min}^{-1} \text{ m}^{-2}$

## ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

### ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Η ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα εξασθενεί από την σκέδαση, την ανάκλαση και την απορρόφηση, διεργασίες που πραγματοποιούνται από τα μόρια και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας

#### Σκέδαση-διάχυση (scattering-diffusion)

Το φαινόμενο όπου η προσπίπτουσα σε ένα σώμα ακτινοβολία, στη συνέχεια κατευθύνεται προς όλες τις διευθύνσεις, ομοιόμορφα ή ανομοιόμορφα. Η ακτινοβολία μετά τη σκέδαση ονομάζεται διάχυτη. Η σκέδαση στην ατμόσφαιρα μπορεί να πραγματοποιηθεί από μόρια ή μικρά σωματίδια, είναι επιλεκτική και εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας

#### Ανάκλαση (reflection)

Η επιστροφή ενός τμήματος της ηλιακής ακτινοβολίας πίσω στο διάστημα. Ανάκλαση πραγματοποιείται από σωματίδια μεγαλύτερα από 0.7 μm

#### Απορρόφηση (absorption)

Η μεταβολή της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα η οποία πραγματοποιείται από τα μόρια των ατμοσφαιρικών αερίων

## ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

### ΕΚΠΟΜΠΗ-ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ

#### Ικανότητα εκπομπής (emissivity)

Μέτρο του πόσο ισχυρά εκπέμπει ένα σώμα σε δεδομένο μήκος κύματος

$$\varepsilon_{\lambda} = E_{\lambda} / E_{b\lambda}$$

όπου:

$E_{\lambda}$  η μονοχρωματική ακτινοβολία του σώματος

$E_{b\lambda}$  η μονοχρωματική ακτινοβολία του μελανού σώματος

#### Ικανότητα εκπομπής γκριζου σώματος (graybody emissivity)

$$\varepsilon = E / E_b$$

όπου:

$E$  η ακτινοβολία του σώματος

$E_b$  η ακτινοβολία του μελανού σώματος

#### Ικανότητα απορρόφησης (absorptivity)

Αντίστοιχοι ορισμοί με την ικανότητα εκπομπής ( $\alpha_{\lambda}$ ,  $\alpha$ )

#### Νόμος του Kirchhoff

Υλικά που έχουν υψηλή ικανότητα απορρόφησης σε ένα μήκος κύματος έχουν και υψηλή ικανότητα εκπομπής σε αυτό το μήκος κύματος, ενώ η ικανότητα εκπομπής ισούται με την ικανότητα απορρόφησης:  $\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$

## ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

### Γενική περιγραφή

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

### Στρώματα του ηλίου

**Φωτόσφαιρα (photosphere).** Ένα στρώμα σε ακτίνα  $7 \cdot 10^5$  km, πάχους μερικών εκατοντάδων km και θερμοκρασία περίπου 6000 K

**Χρωμόσφαιρα (chromosphere).** 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

**Ηλιακός άνεμος (solar wind).** Το ακανόνιστο ρεύμα από εξαιρετικά ζεστά ιονισμένα σωματίδια που προέρχονται από την χρωμόσφαιρα. Αντιδρούν με το μαγνητικό πεδίο της γης και την ανώτερη ατμόσφαιρα. Στην τροχιά της γης οι ταχύτητες είναι της τάξης των 500 m/s και οι θερμοκρασίες  $10^6$  K

**Ηλιακό στέμμα (corona).** Το πυκνότερο εσωτερικό τμήμα του ηλιακού ανέμου στο οποίο διαχέεται φωτοσφαιρική ακτινοβολία και προκαλεί διάχυτο φως

### Φαινόμενα στην επιφάνεια του ηλίου

Κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας από μεταγωγικές διεργασίες (convective granules), ηλιακές κηλίδες (sunspots), φωτεινές κηλίδες (faculae) και αναλαμπές (flares)

## ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

### ΓΕΝΙΚΑ

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

Τα αέρια στην εξωτερική **χρωμόσφαιρα** και στο ηλιακό στέμμα εκπέμπουν στην μακρά υπεριώδη περιοχή του φάσματος ( $<0.1 \mu\text{m}$ ). Η ακτινοβολία αυτή εξαρτάται από την ηλιακή δραστηριότητα και αυξάνεται πολύ αν υπάρχουν αναλαμπές, αλλά πρακτικά είναι το 1 προς 100.000 της συνολικής ακτινοβολίας  
Η **φωτόσφαιρα** εκπέμπει στην ορατή και υπέρυθη περιοχή του φάσματος

### ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

**Ακτινοβολία φωτόσφαιρας:**  $2.33 \cdot 10^{25}$  kJ/min ή  $3.9 \cdot 10^{26}$  Watt (για  $T = 5800$  K)

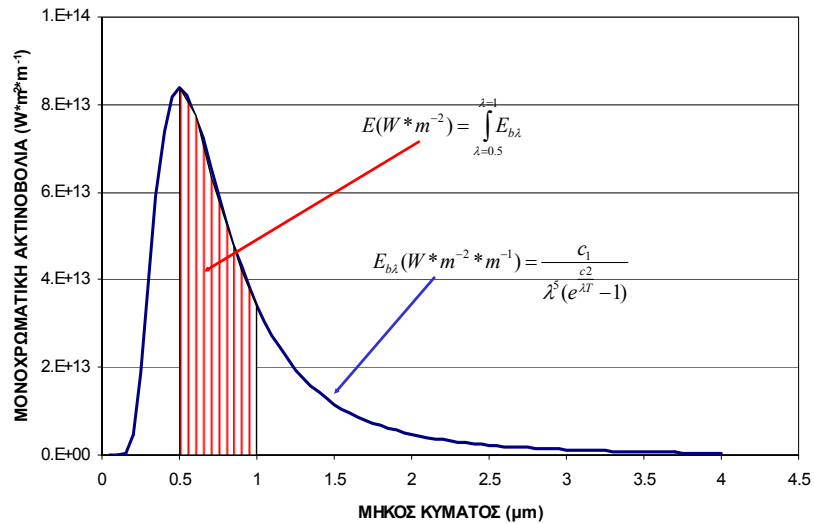
**Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (irradiance) στη φωτόσφαιρα:**  $63.3 \cdot 10^6$  Watt/m<sup>2</sup>

**Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στη γη (εξωτερικό όριο ατμόσφαιρας):** 1367 W /m<sup>2</sup>

**Σύνθεση ηλιακής ακτινοβολίας:** 8% υπεριώδης ( $<0.4 \mu\text{m}$ ), 39% ορατή (0.4-0.7  $\mu\text{m}$ ), 53% υπέρυθη ( $>0.7$ ), μέγιστο (0.5  $\mu\text{m}$ )

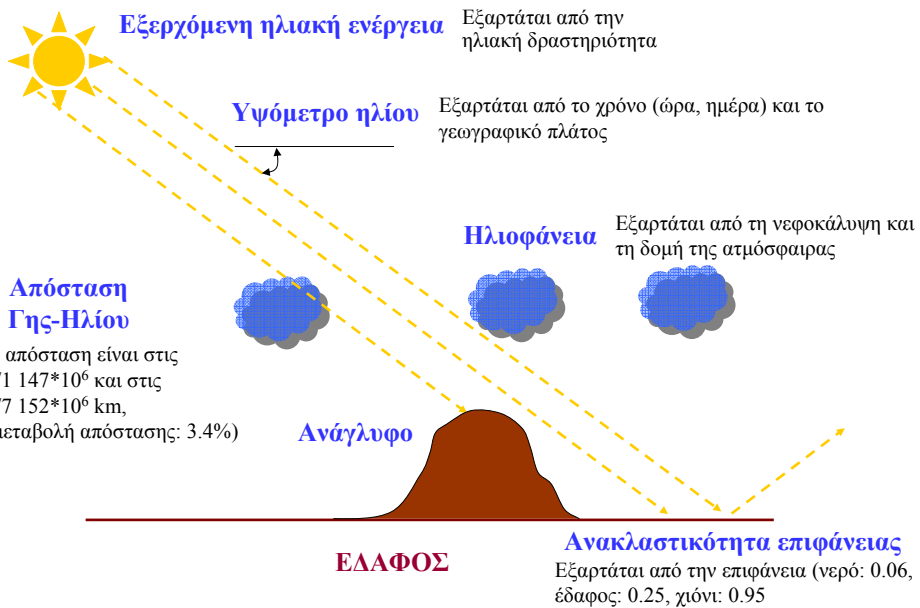
## ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

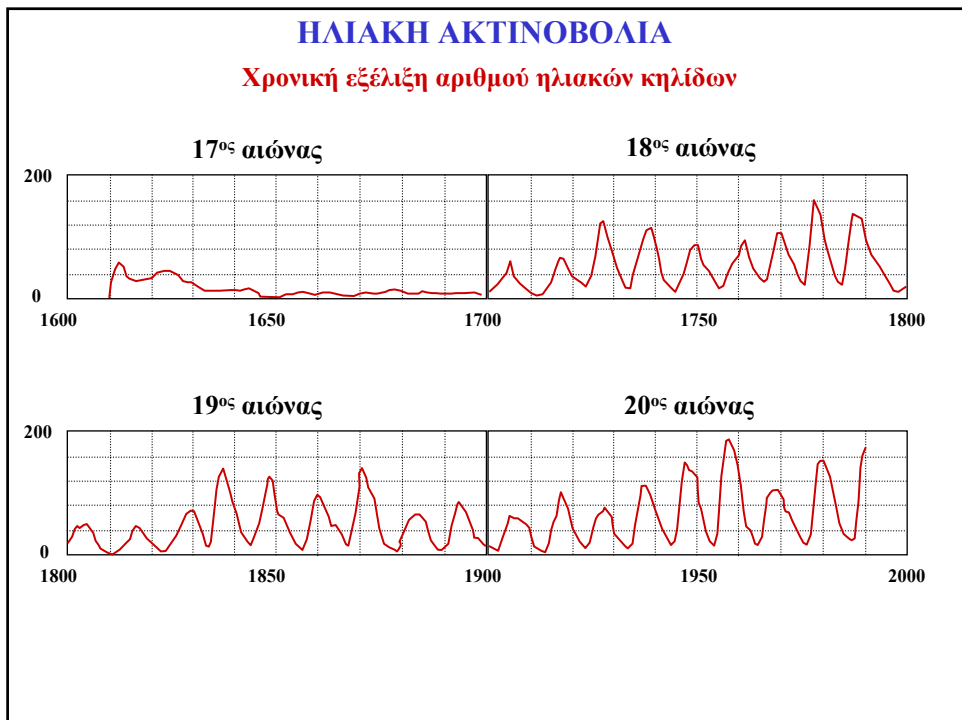
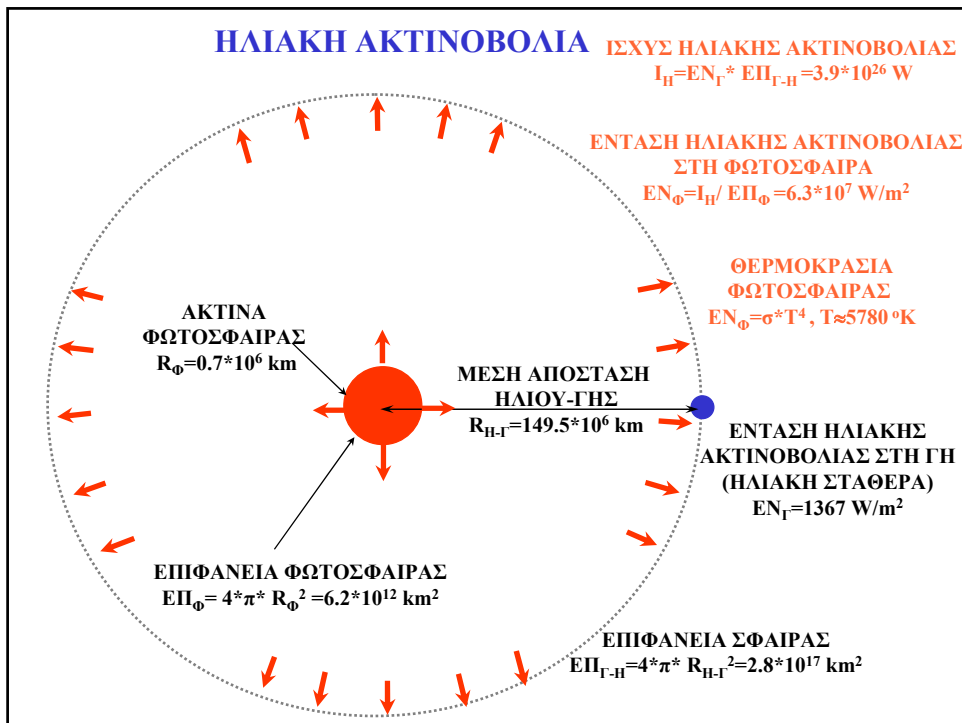
Ένταση μονοχρωματικής ακτινοβολίας από μελανό σώμα που έχει τη θερμοκρασία του ηλίου



## ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Παράγοντες που επιδρούν στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία







## ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

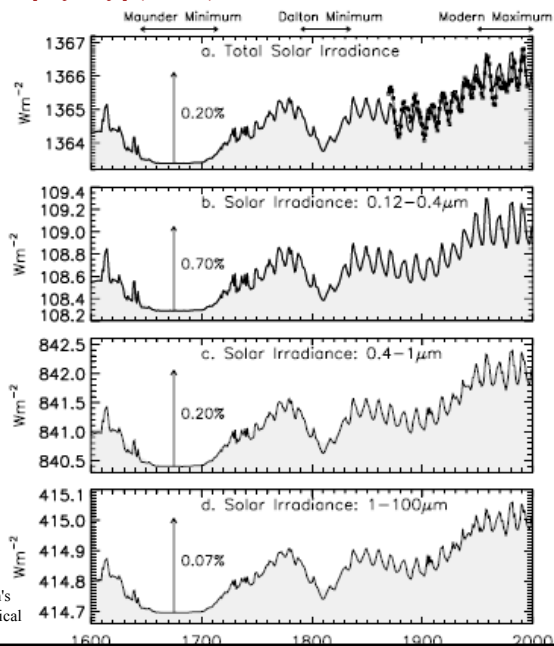
Χρονική εξέλιξη ( $W/m^2$ )

Συνολική

Μήκη κύματος από 0.12-0.4  $\mu m$

Μήκη κύματος από 0.4-1  $\mu m$

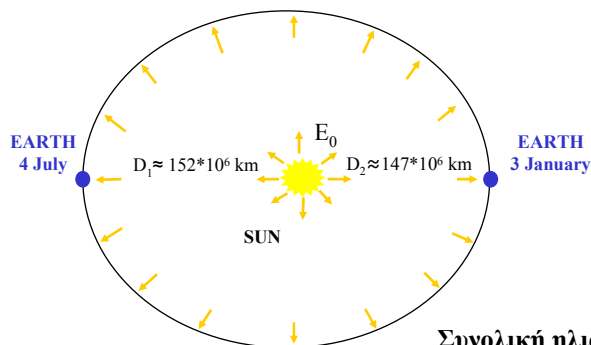
Μήκη κύματος από 1-100  $\mu m$



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

## ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

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



Συντελεστής εκκεντρότητας

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

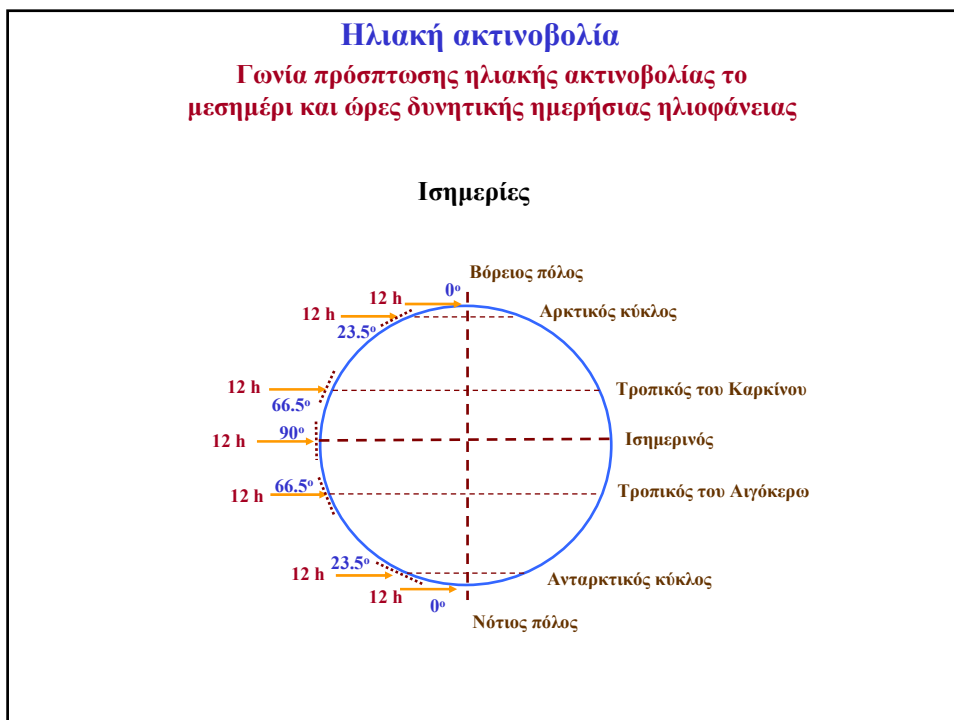
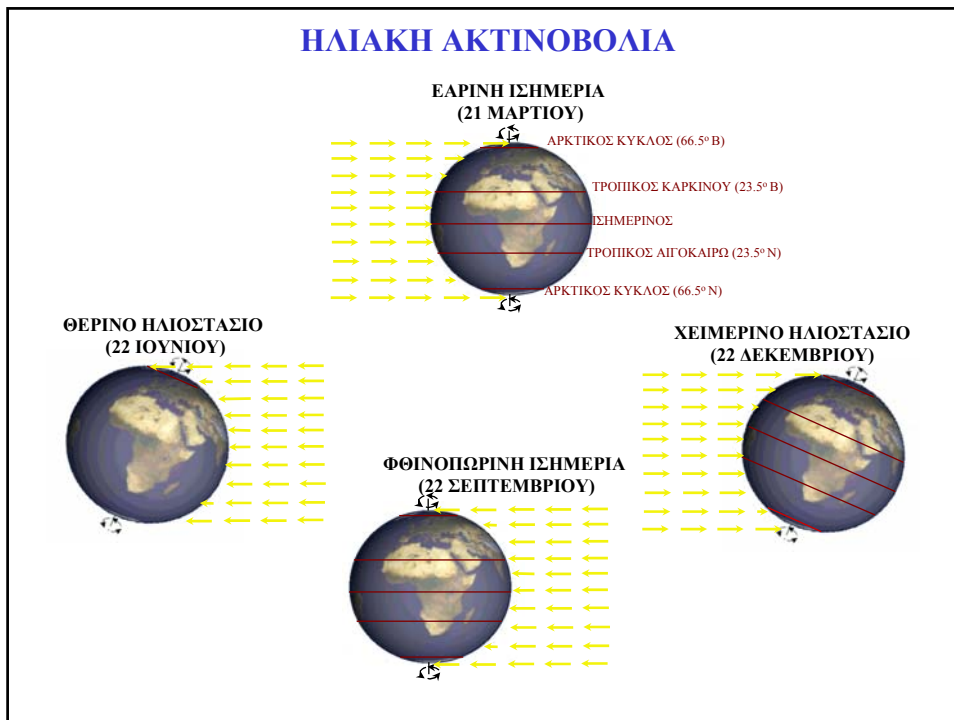
$D_{mean}$  Η μέση απόσταση γης-ηλίου ( $\approx 149.6 * 10^6$  km)

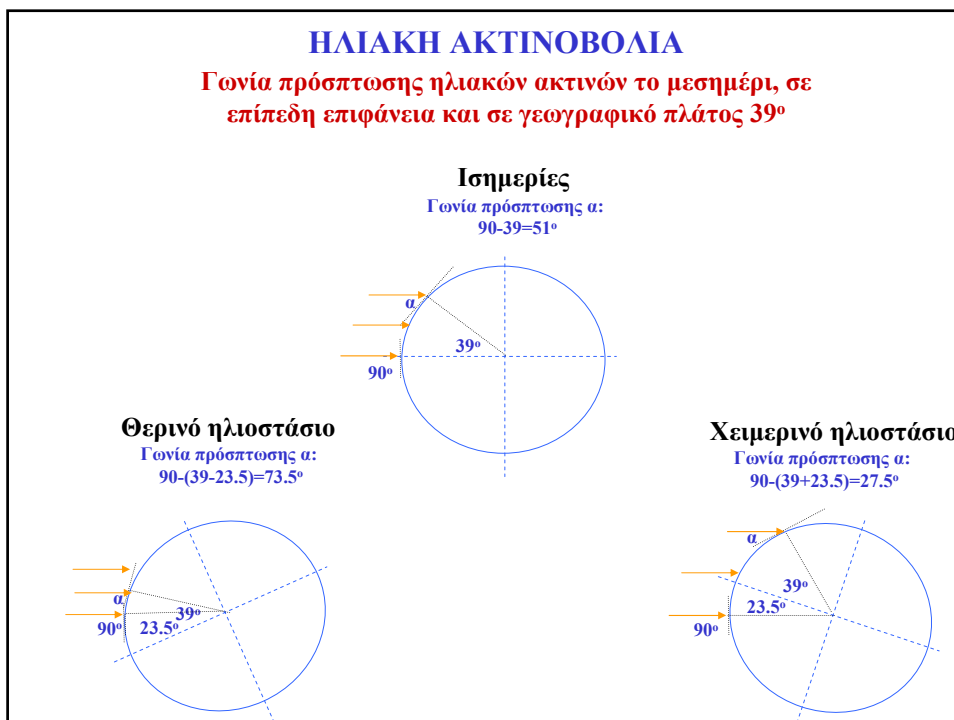
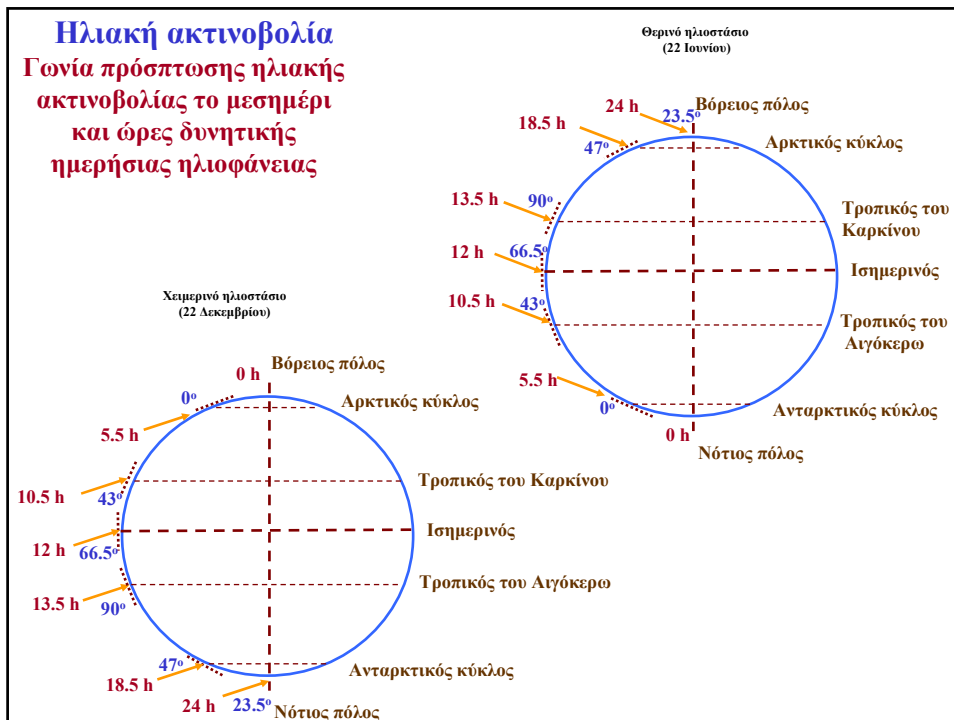
$D_j$  η απόσταση γης-ηλίου την ημέρα  $J$

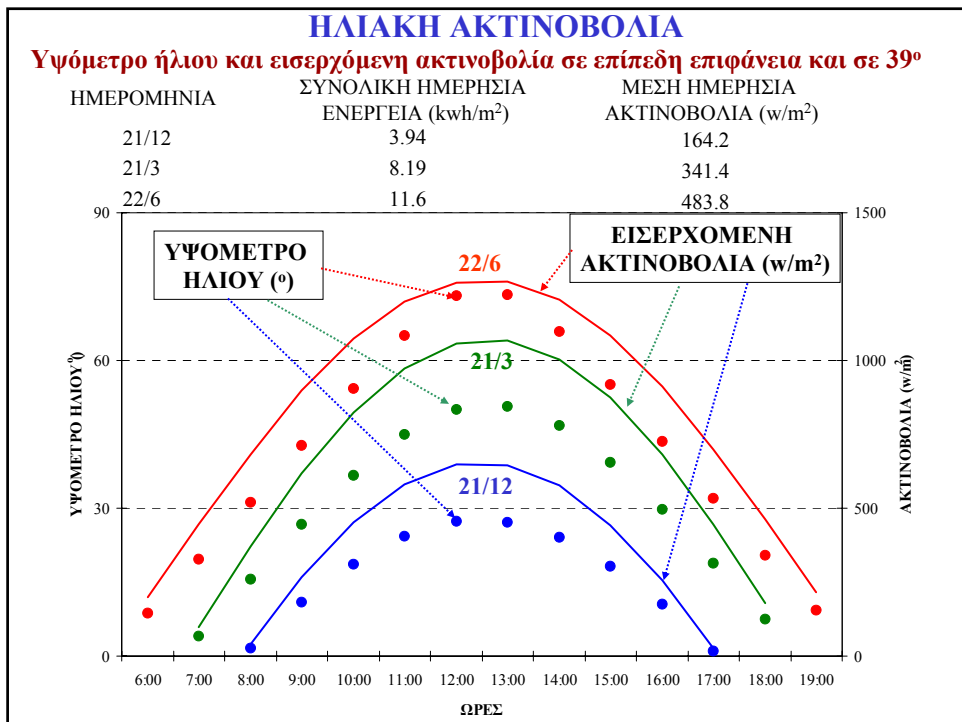
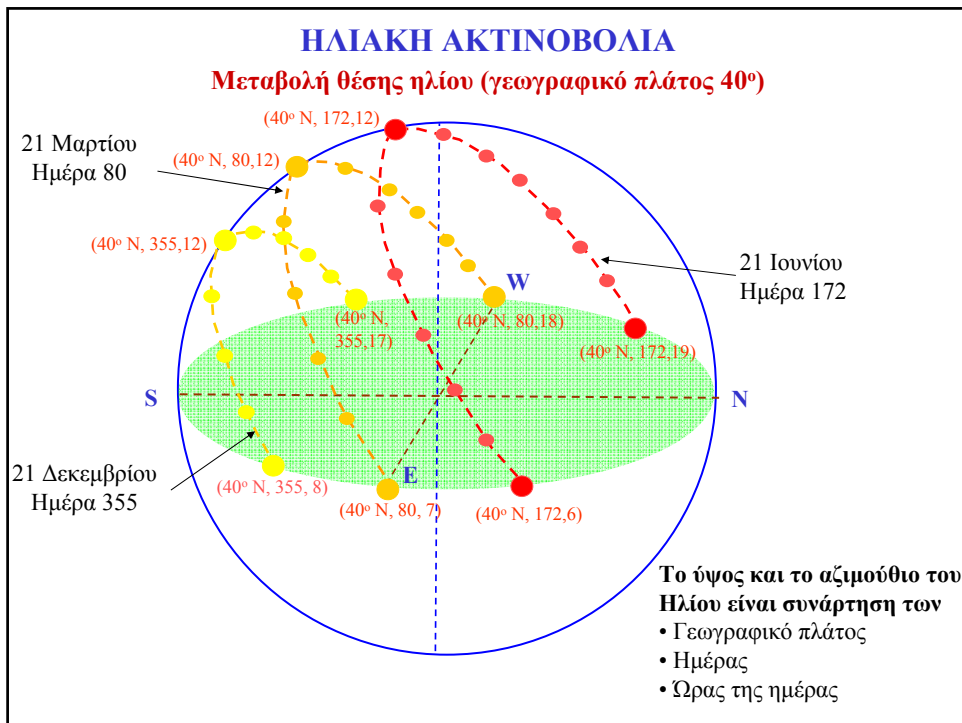
Συνολική ηλιακή ενέργεια  
 $E = 3.9 * 10^{26}$  W

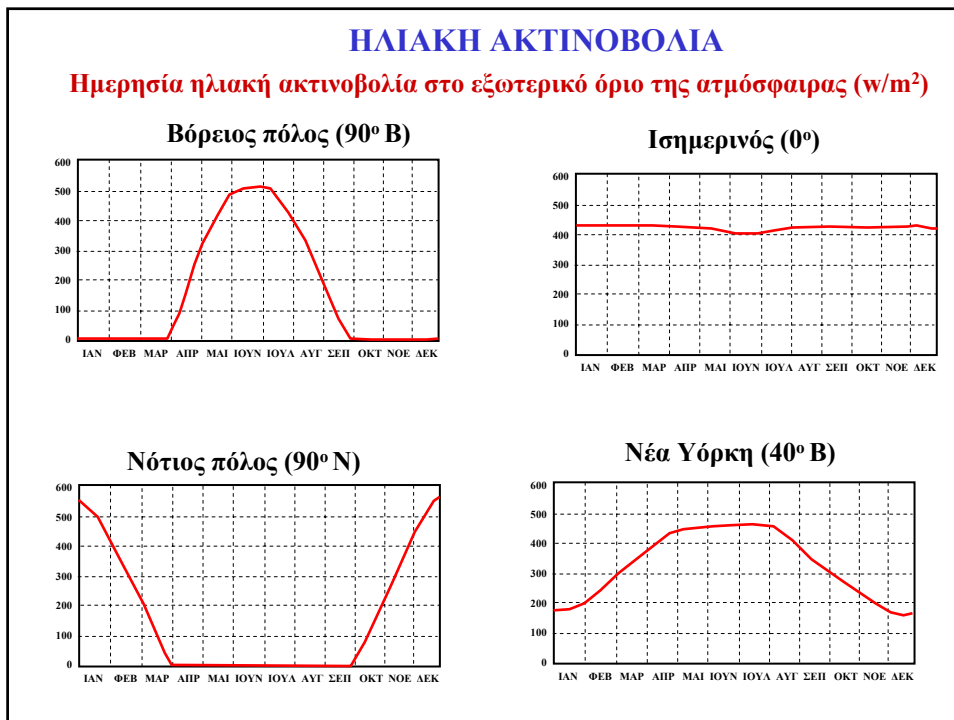
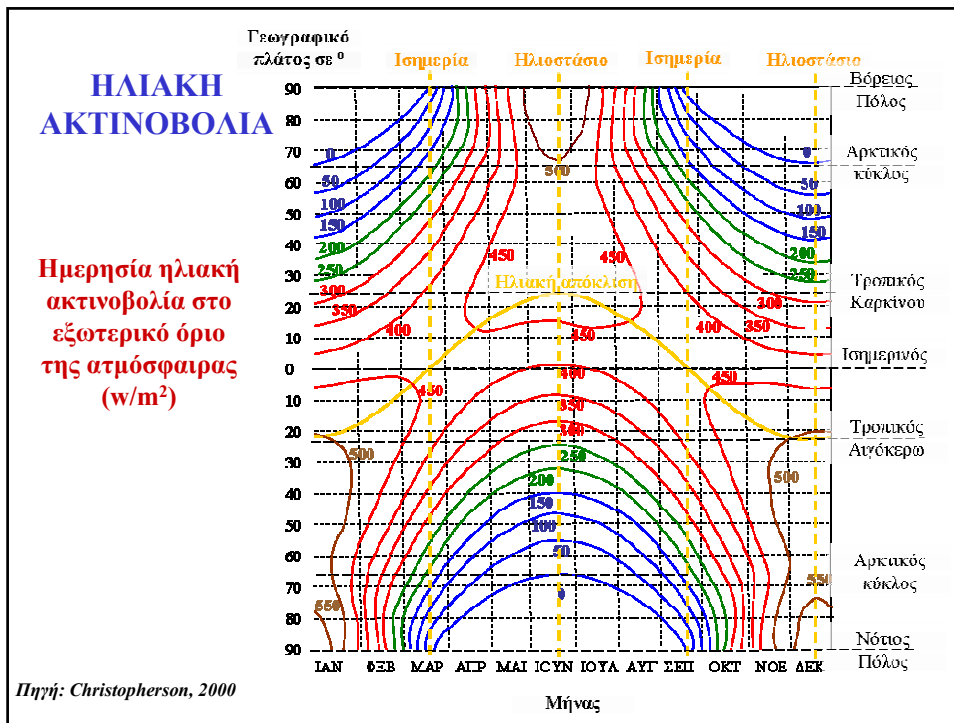
Ηλιακή ακτινοβολία στη γη  
 $I = E / (4 * \pi * D^2)$   $W/m^2$

$$\text{Ηλιακή σταθερά } I_0 = E / (4 * \pi * D_{mean}^2) \text{ W/m}^2$$









## ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

### 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

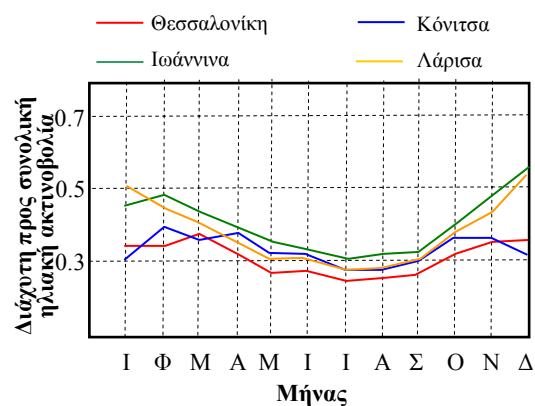
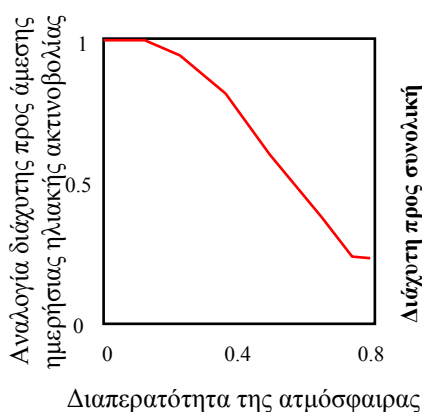
#### Διάχυτη (diffuse)

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

## ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

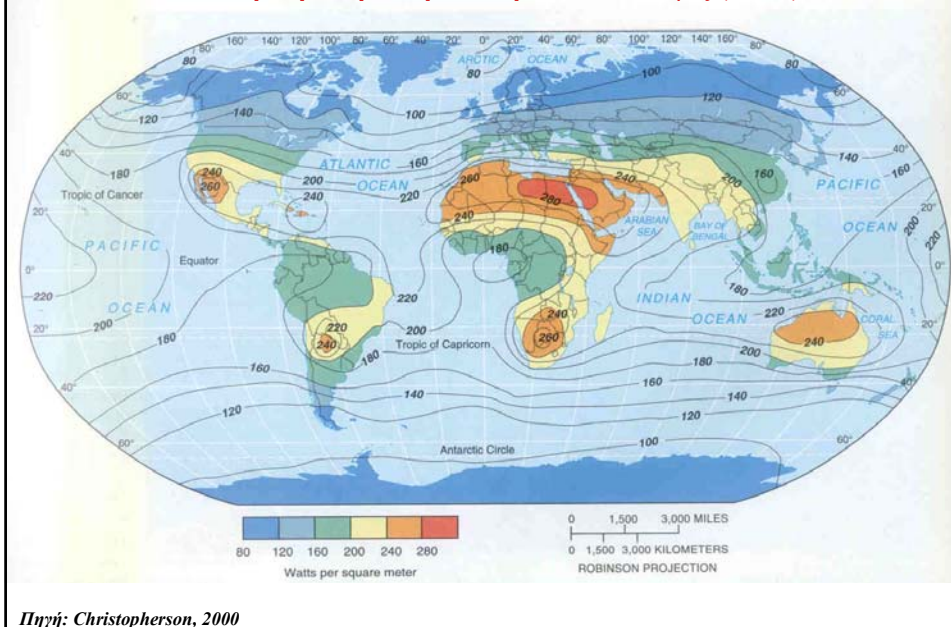
### Άμεση –διάχυτη ακτινοβολία



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

## ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος (W/m<sup>2</sup>)



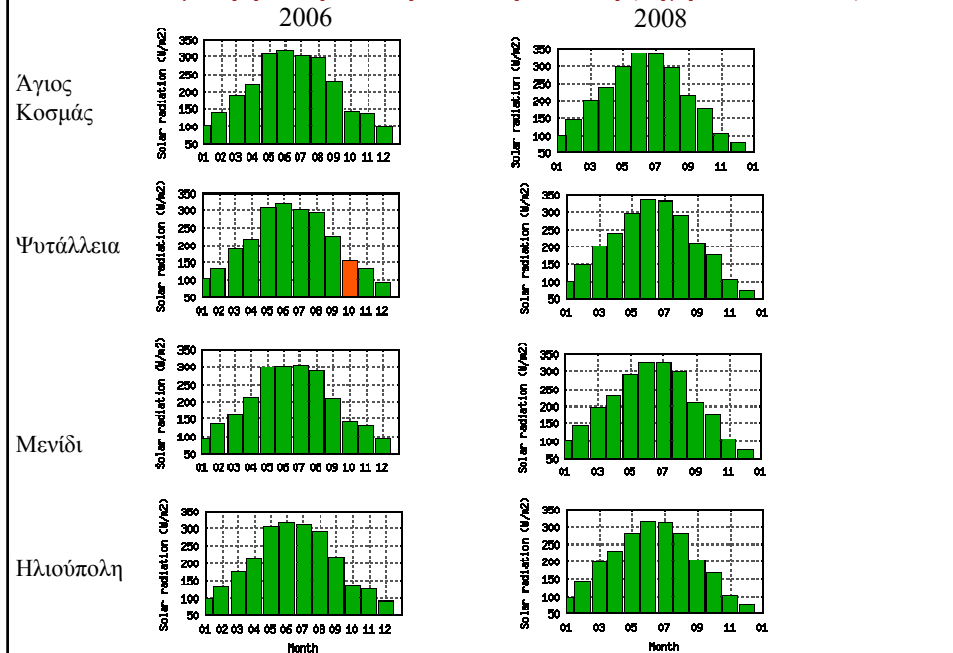
## ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Ηλιακή ισχύς και ενέργεια στο έδαφος

	Βόρεια Ελλάδα		Αιγαίο		Κρήτη	
	kWh/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
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
<b>ΕΤΟΣ</b>	<b>1416</b>	<b>161</b>	<b>1817</b>	<b>207</b>	<b>1951</b>	<b>222</b>

Πηγή: RETScreen Data, NASA

**ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ**  
**Άμεση ηλιακή ακτινοβολία στην Αττική (πηγή ΜΕΤΕΟΝΕΤ)**



**ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ**  
**Υπολογισμός της δνητικής ηλιακής ακτινοβολίας (W/m<sup>2</sup>)**

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

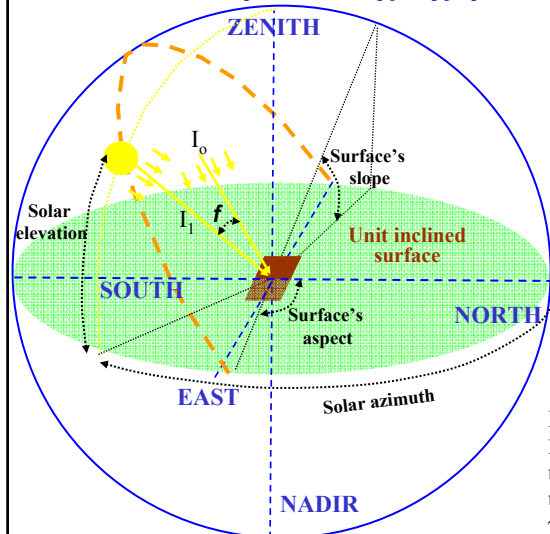
$$I_0 \approx 1367 \text{ W/m}^2$$

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

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



## Παράγοντες που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας



### Αζιμούθιο ηλίου-azimuth ( $Azm$ )

Η γωνία μεταξύ ( $\alpha$ ) του επιπέδου που περνάει από τον ήλιο, τον παρατηρητή και το zenith του και ( $\beta$ ) 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 ( $\alpha$ ) της γραμμής του οριζοντα του παρατηρητή και ( $\beta$ ) της γραμμής που συνδέει τον παρατηρητή και τον ήλιο. Η γωνία μετριέται από τον οριζοντα προς τα πάνω σε μοίρες (0-90).

### Κλίση κντάρων -Slope ( $Slp$ )

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

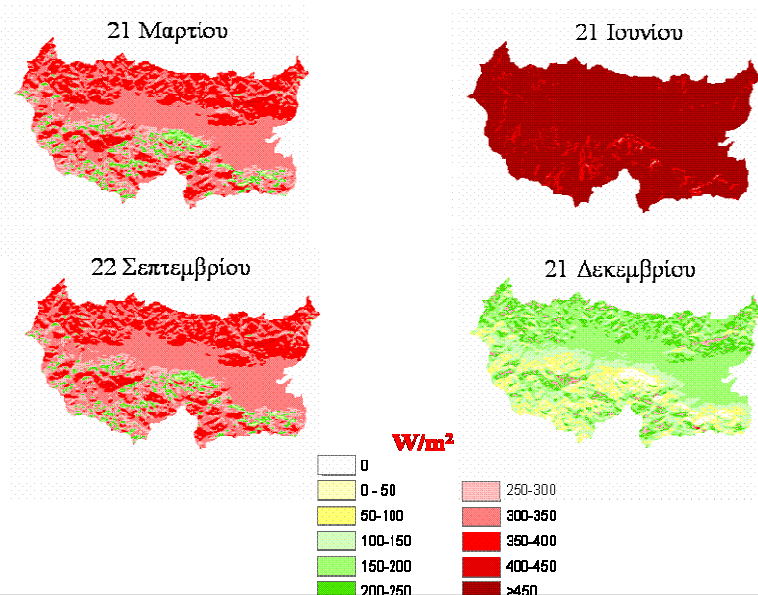
### Διεύθυνση κντάρων-Aspect ( $Asp$ )

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

## ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

### Επίδραση ανάγλυφου στη γωνία πρόσπτωσης

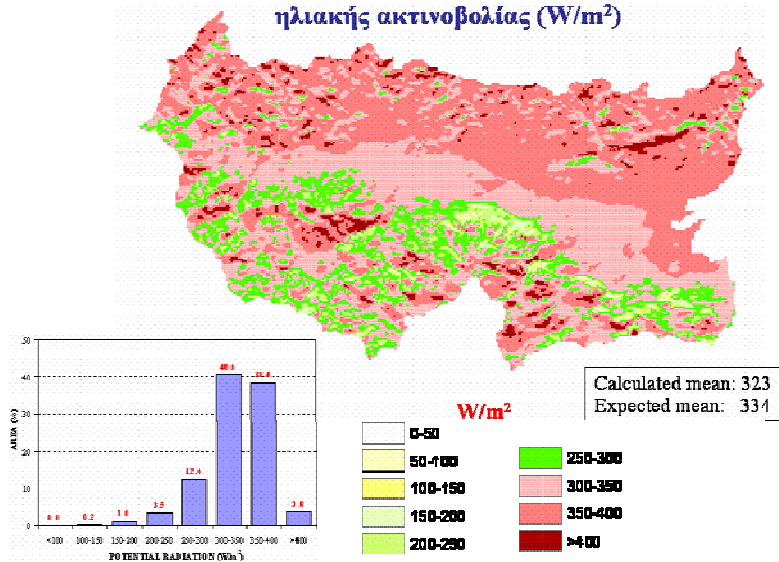
### Ημερήσιες κατανομές δυνητικής ηλιακής ακτινοβολίας ( $W/m^2$ )



## ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Επίδραση ανάγλυφου στη γωνία πρόσπτωσης

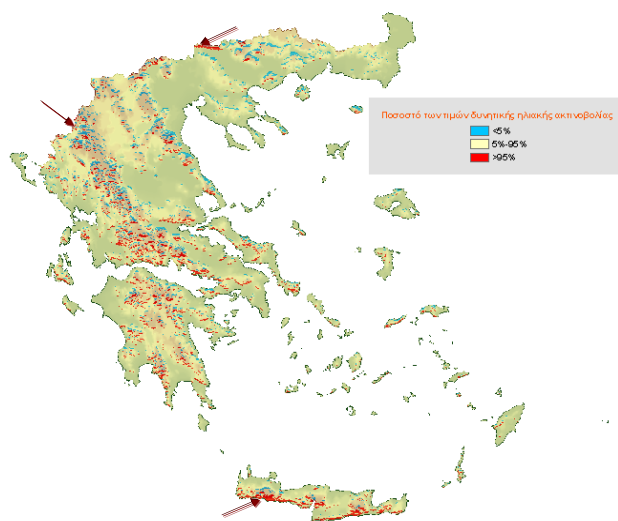
Ετήσια κατανομή δυνητικής ηλιακής ακτινοβολίας (W/m<sup>2</sup>)



## ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Επίδραση αναγλύφου στη γωνία πρόσπτωσης

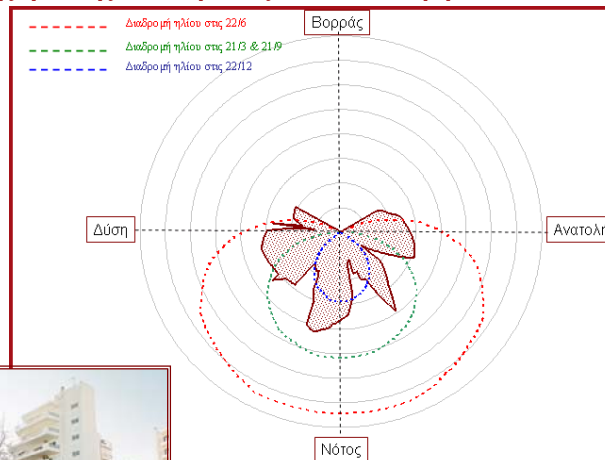
ΔΥΝΗΤΙΚΗ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ



## ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Εκτίμηση δυνητικής ηλιακής ακτινοβολίας σε αστικό περιβάλλον

ΜΗΝΑΣ	Δείκτης $I_f / I_0$
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



Σε αστικό περιβάλλον παρατηρείται επιπλέον σκίαση από διάφορα εμπόδια

## ΦΩΣ ΚΑΙ ΧΡΩΜΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

**Χρώμα ουρανού.** Όταν ο ήλιος είναι ψηλά έχουμε επιλεκτική σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας στα μικρότερα μήκη κύματος (ιώδες) από ότι στα μεγαλύτερα (ερυθρό), από τα μόρια (οξυγόνου και αζώτου) και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Όταν ο ήλιος είναι χαμηλά οι ακτίνες περνάνε από περισσότερη ατμοσφαιρική μάζα, και σχεδόν όλη η ιώδης ακτινοβολία σκεδάζεται ενώ παραμένει η ερυθρά.

**Άλως (halo).** Η παρουσία κρυστάλλων πάγου προκαλεί την διάθλαση του ηλιακού ή σεληνιακού φωτός με αποτέλεσμα να παρατηρείται ένας δακτύλιος φωτός γύρω από αυτά τα ουράνια σώματα.

**Αχλός (haze).** Η παρουσία σωματιδίων με μέγεθος τέτοιο ώστε να σκεδάζουν το ηλιακό φως ανεξάρτητα από το μήκος κύματος, έχει σαν αποτέλεσμα ο ουρανός να φαίνεται γαλακτώδης.

**Βόρειο-νότιο σέλλας (aurora borealis-australis).** Διέγερση των μορίων των ατμοσφαιρικών αερίων της ανώτερης ατμόσφαιρας από συγκρούσεις με τα φορτισμένα σωματίδια του ηλιακού ανέμου, με αποτέλεσμα την εκπομπή ορατού φωτός.

**Ουράνιο τόξο (rainbow).** Συμβαίνει όταν βρέχει σε ένα μέρος του ουρανού (το οποίο κοιτά ο παρατηρητής) ενώ ο ήλιος λάμπει στο άλλο μέρος (πίσω από τον παρατηρητή). Το φαινόμενο πραγματοποιείται όταν η ορατή ακτινοβολία εισέρχεται στις σταγόνες βροχής και για κάθε χρώμα συμβαίνει ανάκλαση με διαφορετική γωνία.

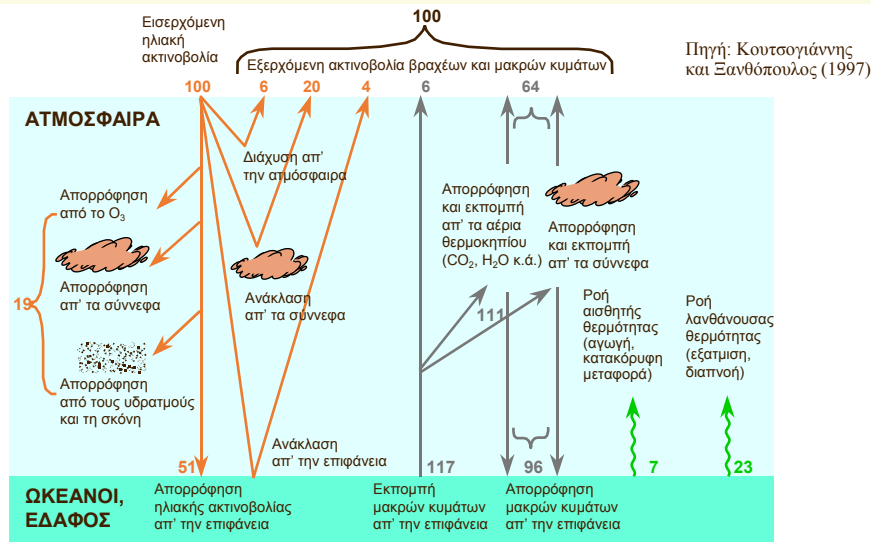
**Μεταβολή της φωτεινότητας των αστεριών.** Ο παρατηρητής βλέπει τα αστερία να τρεμοσβήνουν καθώς παρεμβάλλονται ποικίλες μάζες αέρα με διαφορετικές ιδιότητες, που μεταβάλλουν προσωρινά τα χαρακτηριστικά της εισερχόμενης ακτινοβολίας.

## ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΗΣ ΓΗΣ

ΔΙΑΣΤΗΜΑ

← ΒΡΑΧΕΑ ΚΥΜΑΤΑ →

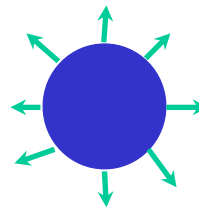
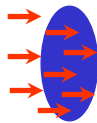
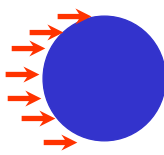
← ΜΑΚΡΑ ΚΥΜΑΤΑ →



## ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΗΣ ΓΗΣ

ΕΙΣΕΡΧΟΜΕΝΗ ΗΛΙΑΚΗ ΙΣΧΥΣ  
 $(1-\rho) \cdot E_{\Gamma} \cdot \pi \cdot R_{\Gamma}^2$

ΙΣΧΥΣ ΓΗΙΝΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ  
 $E_{\Xi} \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_{\Gamma}^2$



$$(1-\rho) \cdot E_{\Gamma} \cdot \pi \cdot R_{\Gamma}^2 = E_{\Xi} \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_{\Gamma}^2$$

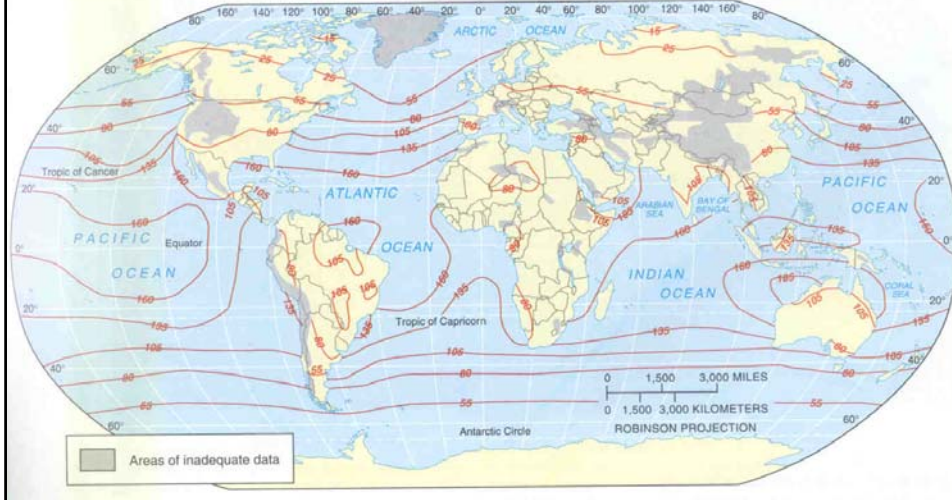
$$E_{\Xi} = (1/4) \cdot (1-0.3) \cdot E_{\Gamma} = 243 \text{ w/m}^2$$

**ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΓΗΣ 256 °K**

**ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΦΩΤΟΣΦΑΙΡΑΣ: 0.5 μm**  
**ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΓΗΣ: 11.4 μm**

## ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΗΣ ΓΗΣ

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

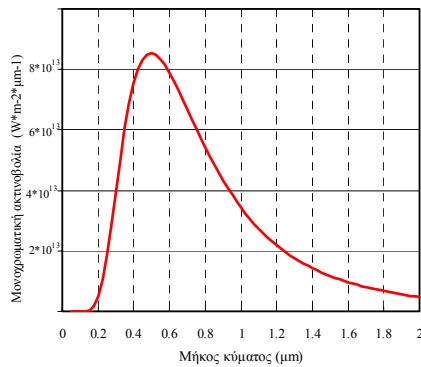


Πηγή: Christopherson, 2000

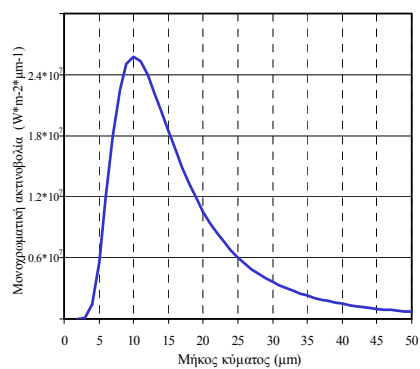
## ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΗΣ ΓΗΣ

Θεωρητική ακτινοβολία ήλιου και γης

ΦΑΣΜΑ ΜΕΛΑΝΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ (5800 K)  
ΕΝΤΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ:  $6.3 \cdot 10^7 W m^{-2}$

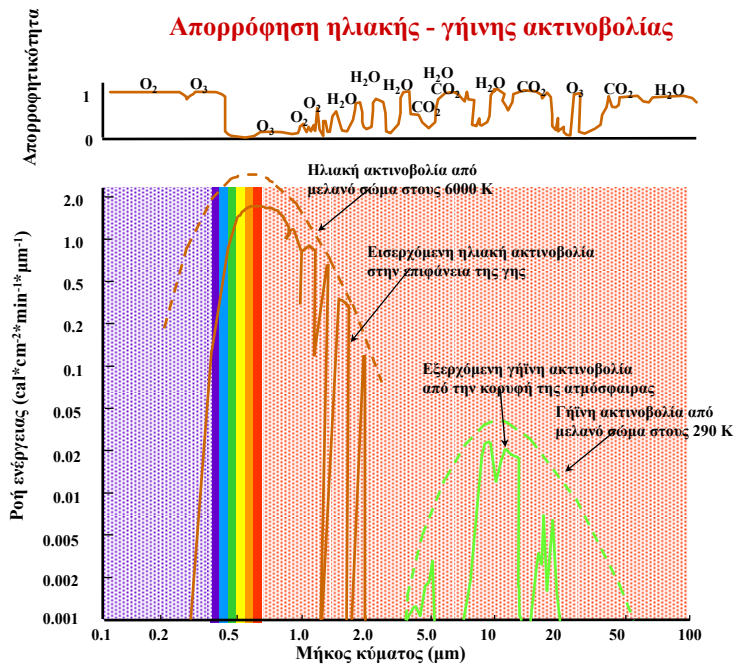


ΦΑΣΜΑ ΜΕΛΑΝΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ (288 K)  
ΕΝΤΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ:  $390 W m^{-2}$



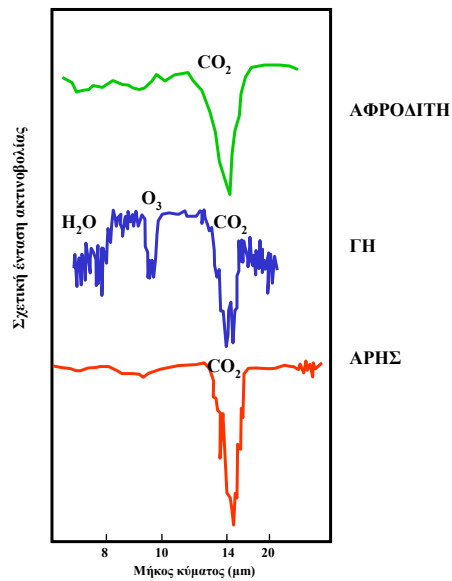
## ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΗΣ ΓΗΣ

### Απορρόφηση ηλιακής - γήινης ακτινοβολίας



## ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΗΣ ΓΗΣ

### Απορρόφηση ακτινοβολίας σε σχέση με Αφροδίτη και Άρη



## ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

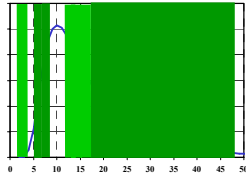
Αέρια θερμοκηπίου

ΟΝΟΜΑ-ΟΓΚΟΣ (%)

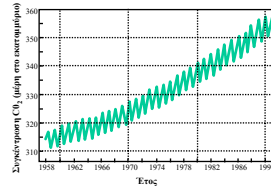
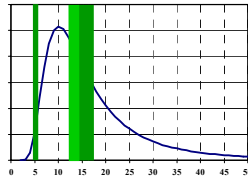
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΓΗΪΝΗΣ  
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

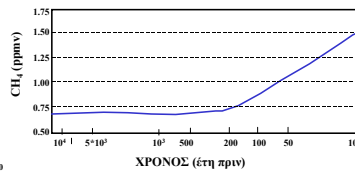
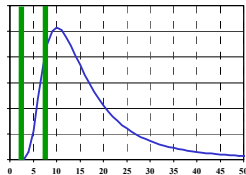
ΥΔΡΑΤΜΟΙ (H<sub>2</sub>O)  
0-4%



ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ  
ΑΝΘΡΑΚΑ (CO<sub>2</sub>)  
0.035%



ΜΕΘΑΝΙΟ (CH<sub>4</sub>)  
0.00017%



## ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

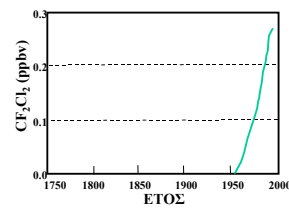
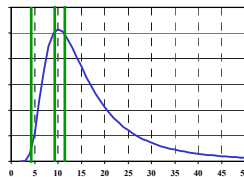
Αέρια θερμοκηπίου

ΟΝΟΜΑ-ΟΓΚΟΣ (%)

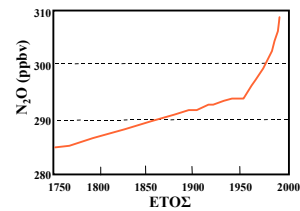
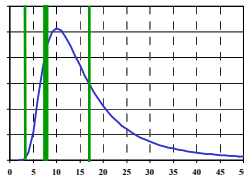
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΓΗΪΝΗΣ  
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

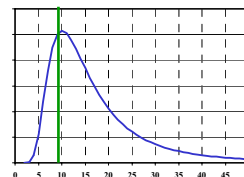
ΧΛΩΡΟΦΘΟΡΑΝ-  
ΘΡΑΚΕΣ (CFCs)  
0.00000001%



ΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ  
ΑΖΩΤΟΥ (N<sub>2</sub>O)  
0.00003%



ΟΖΟΝ (O<sub>3</sub>)  
Τροποσφαιρικό  
0.000004%



## ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

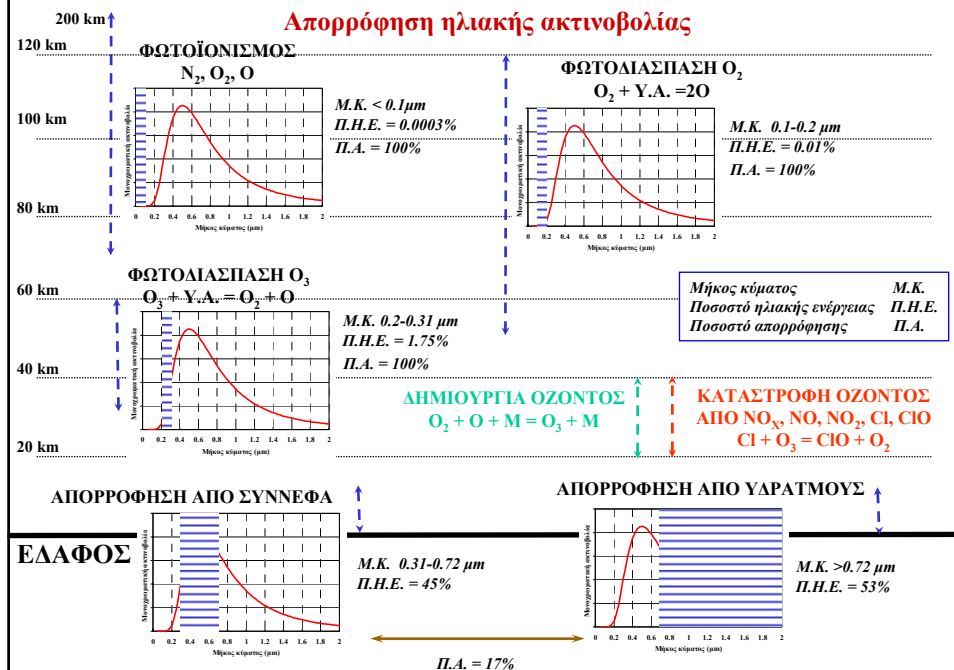
### Πρόσφατες ατμοσφαιρικές μεταβολές

Αέριο	Συγκέντρωση (1750)*	Συγκέντρωση (2004)	Επίδραση στην αύξηση της ακτινοβολίας (W/m <sup>2</sup> )	Αιτίες μεταβολής
CO <sub>2</sub>	280 ppm	377.3 ppm	1.66	Καύσεις
CH <sub>4</sub>	688 ppb	1730 ppb	0.5	Ορυζώνες, αγελάδες, σκουπιδότοποι
N <sub>2</sub> O	270 ppb	319 ppb	0.16	Λιπάσματα, καύσεις, μικρόβια
Τροποσφαιρικό O <sub>3</sub>	25 ppb	34 ppb	0.35	Φωτοχημικές αντιδράσεις
CFC-11	0	253 ppt	0.34	Φρέον (από 1930)
CFC-12	0	545 ppt		Φρέον (από 1930)
CCl <sub>4</sub>	0	93 ppt		
CH <sub>2</sub> CCl <sub>3</sub>	0	23 ppt		
HCFC-22	0	174 ppt		
HFC-23	0	14 ppt		
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	0	3 ppt		
SF <sub>6</sub>	0	5.22 ppt	0.002	
SF <sub>5</sub> CF <sub>3</sub>	0	0.12 ppt	< 0.0001	

\* Τα μεγέθη του 1750 προσδιορίζονται κύρια από μετρήσεις φυσαλίδων αέρα οι οποίες παγιδεύτηκαν σε πυρήνες πάγου, όπως συσσωρεύονταν το χιόνι στις πολικές περιοχές

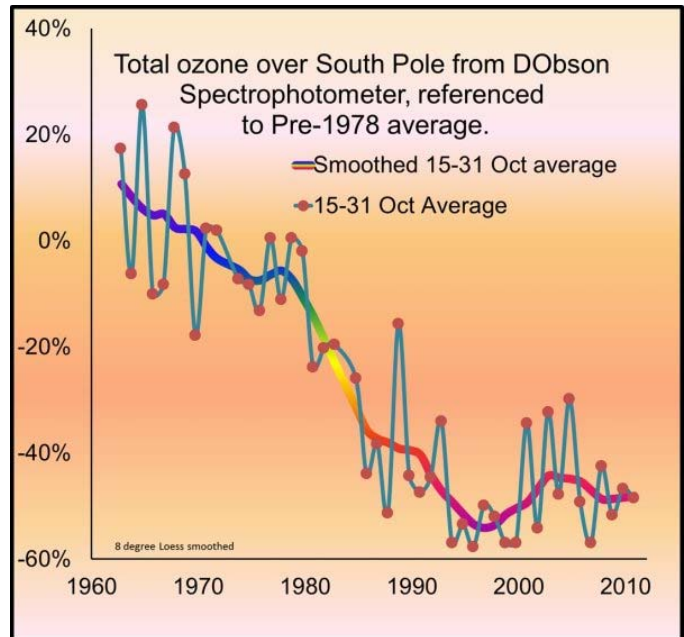
## ΤΟ ΟΖΟΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

### Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας



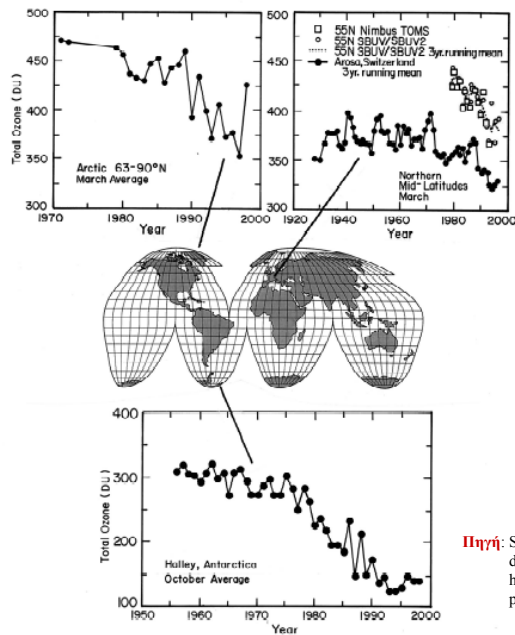


## ΤΟ ΟΖΟΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ Χρονική εξέλιξη όζοντος



Πηγή: NOAA

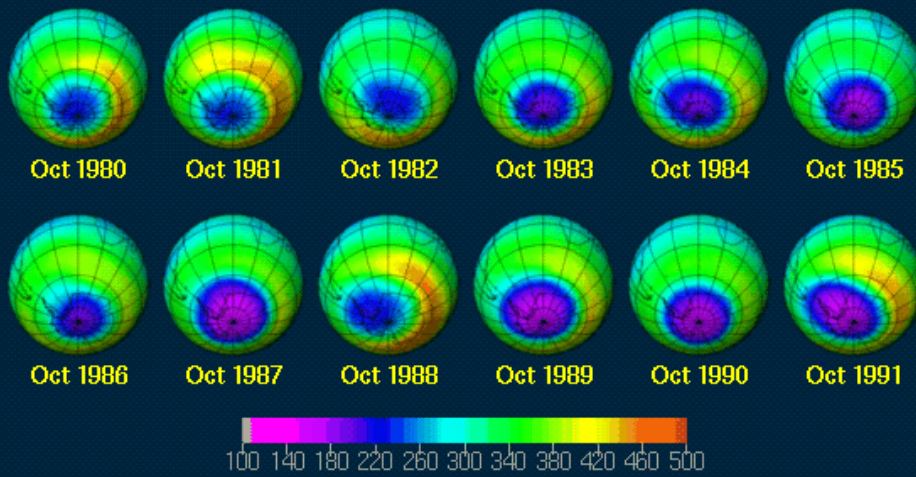
## ΤΟ ΟΖΟΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ Χρονική εξέλιξη όζοντος



Πηγή: Solomon, S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history, Reviews of Geophysics, 37, 3, pp 275-316, 1999

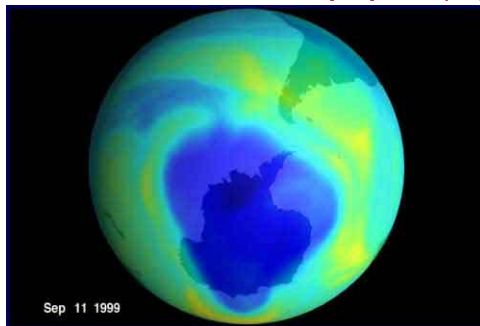
## ΤΟ ΟΖΟΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Μείωση στρατοσφαιρικού όζοντος

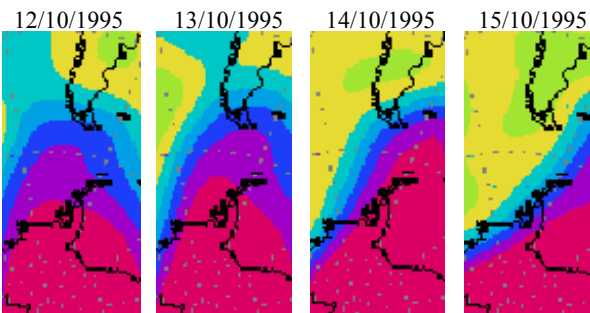


## ΤΟ ΟΖΟΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Μείωση στρατοσφαιρικού όζοντος



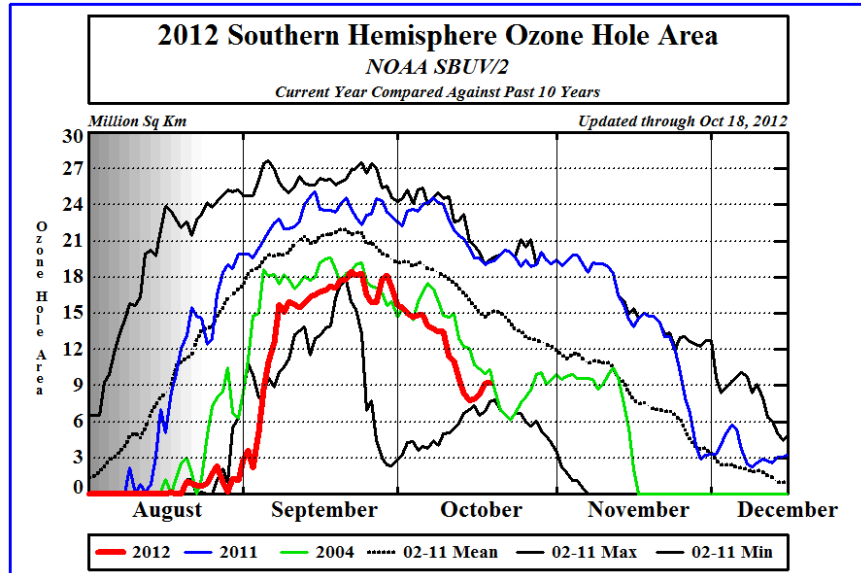
Η μείωση του όζοντος στην Ανταρκτική στις 11/9/1999 όπως φαίνεται από δορυφόρους της NASA (τα χαμηλά επίπεδα φαίνονται με μπλε). Η τρύπα αναπτύσσεται μεταξύ τέλος Αυγούστου και αρχών Οκτωβρίου



Δορυφορικές φωτογραφίες της μείωσης του όζοντος από 12-15/10/1995. Με σκούρο μπλε το κρίσιμο όριο της συγκέντρωσης (210-240 μονάδες Dobson)

## ΤΟ ΟΖΟΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

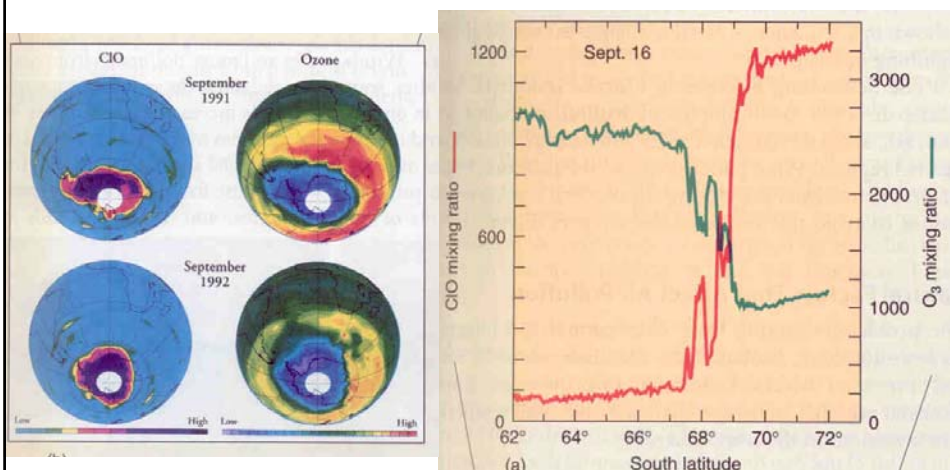
Χωρική-χρονική εξέλιξη όζοντος



Πηγή: NOAA

## ΤΟ ΟΖΟΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Αλληλεπίδραση όζοντος και ενώσεων χλωρίου



Πηγή: Christopherson, 2000

## ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### Παθητικά-ενεργητικά συστήματα

**Τα παθητικά συστήματα** ενσωματώνονται στα κτίρια με στόχο την αξιοποίηση των περιβαλλοντικών πηγών (ήλιος, άνεμος, βλάστηση, νερό, έδαφος, υπέδαφος) για την **θέρμανση, ψύξη και φωτισμό**. Λειτουργούν χωρίς μηχανολογικά εξαρτήματα και δεν παράγουν πρόσθετη ενέργεια.

Τα **ενεργητικά συστήματα**, χρησιμοποιούν μηχανικά μέσα για τη θέρμανση και το δροσισμό, αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια ή τους φυσικούς μηχανισμούς ψύξης. Στη κατηγορία αυτή ανήκουν τα ηλιακά πλαίσια και οι ανεμογεννήτριες.

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 θερμοσίφοντας, αποτελείται από σωληνώσεις νερού, γυαλί και μόνωση και έχει ως στόχο τη θέρμανση ενός ρευστού (συνήθως νερού ή αέρα).

## ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 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

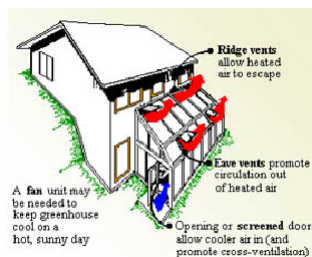
#### Τοίχος Trombe

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.



#### Θερμοκήπιο

Αποθηκεύει θερμική ενέργεια λόγω ακτινοβολίας και ζεσταίνεται, ενώ ο αέρας κυκλοφορεί μέσα στο σπίτι. Την νύχτα το θερμοκήπιο απομονώνεται από τον εσωτερικό χώρο.



## ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### Ενεργητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης

Αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση νερού χρήσης και χώρων μέσω συστημάτων μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμική ισχύ

<b>Ηλιακοί συλλέκτες:</b>	Συσκευές μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα
<b>Επίπεδοι</b>	Η συνηθέστερη και φτηνότερη τεχνολογία. Η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται κατ' ευθείαν σε θερμότητα στην απορροφητική επιφάνεια
<b>Συγκεντρωτικοί</b>	Συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας με οπτικά μέσα απορρόφηση σε σωλήνα κενού και μετατροπή σε θερμική. Υψηλές θερμοκρασίες και αποδόσεις
<b>Επίπεδοι με ανακλαστήρα</b>	Αύξηση απόδοσης επίπεδων με χρήση επιφάνειας που οδηγεί μέσω ανάκλασης περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία στο συλλέκτη
<b>Δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας:</b>	Καλά μονωμένες δεξαμενές που περιέχουν νερό και θερμαίνονται από τους ηλιακούς συλλέκτες

## ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

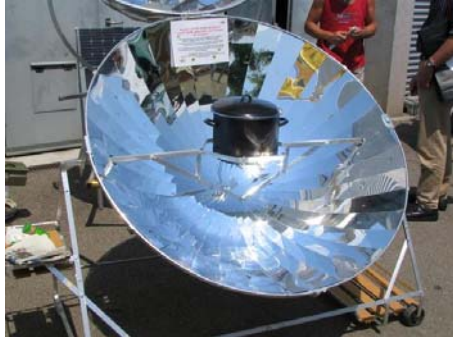
### Ηλιακός φούρνος



Ο ηλιακός φούρνος στο Odeillo των Πυρηνάων (Γαλλία) κατασκευάστηκε το 1969 από τον Felix Trombe και είναι ο μεγαλύτερος στον κόσμο. Αποτελείται από 63 κάτοπτρα συνολικής επιφάνειας 2840 m<sup>2</sup> για να συγκεντρώσει ηλιακές ακτίνες σε μία επιφάνεια από επάργυρο γυαλί η θερμοκρασία της οποίας μπορεί να φτάσει τους 3200 βαθμούς. Η μέγιστη ισχύς είναι 1 MW.

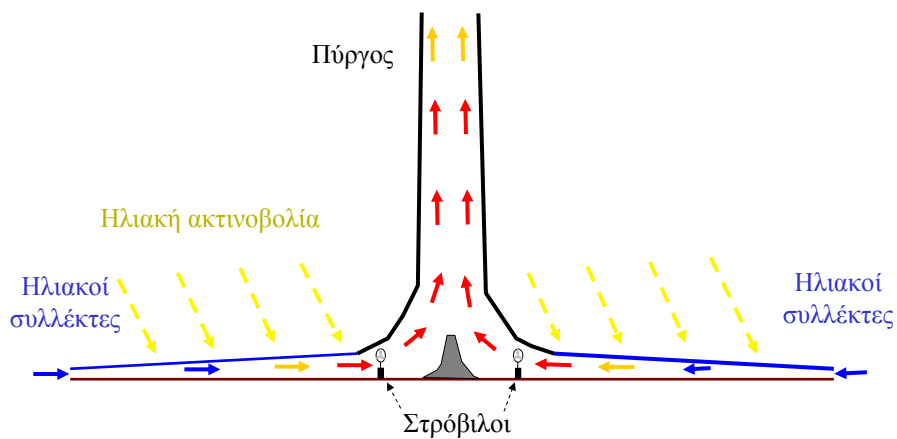
## ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### Ηλιακή εστία



## ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### Ηλιακός πύργος

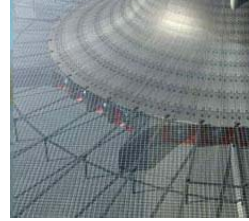


## ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 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 m<sup>2</sup> (διάμετρος 244 m). Μέγιστη ισχύς 50 kW. Καταστράφηκε σε καταιγίδα το 1989.

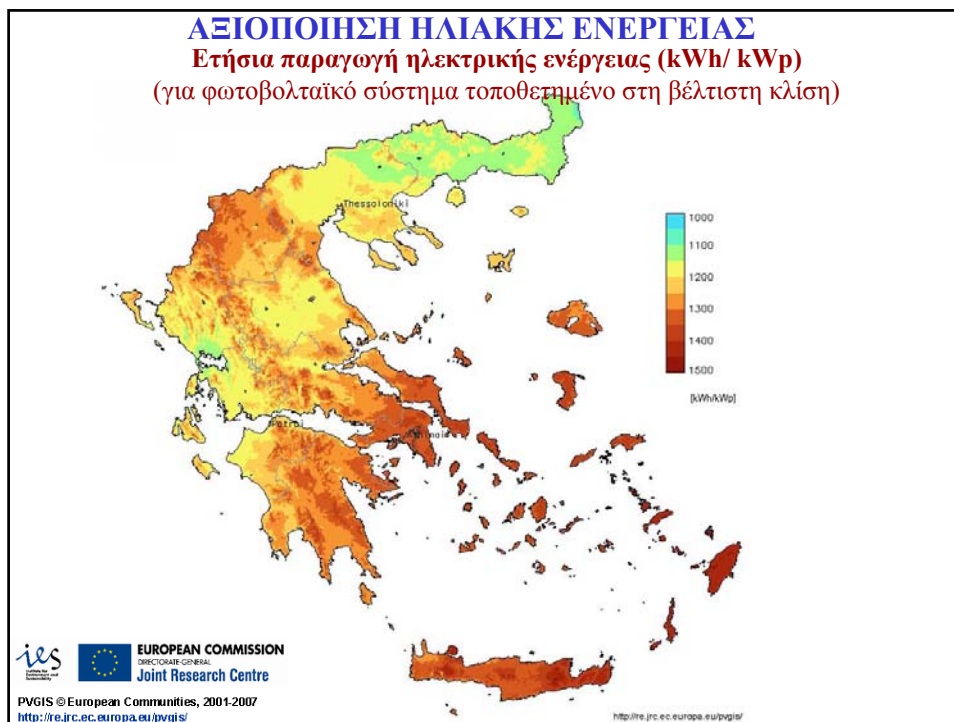


Αυστραλία (υπό κατασκευή). Πύργος ύψους 1100 m και διαμέτρου 150 m. Επιφάνεια συλλεκτών 20 km<sup>2</sup> (διάμετρος 5 km). Μέγιστη ισχύς 200 MW. Κόστος 800 εκ. \$

## ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 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.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γραμματικάκης, Γ., *Η κόμη της Βερενίκης*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, 1992.
- Κουτσογιάννης, Δ. και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.
- Ahrens, C. D., *Essentials of Meteorology, An Invitation to the Atmosphere*, West Publishing, Minneapolis, 1993.
- Barry, R.G, and R.J. Chorley, *Atmosphere, weather and climate*, Routledge, New York, 1992.
- Christopherson, W.R., *Geosystems*, Prentice Hall, New Jersey, 2000.
- McIlveen, R., *Fundamentals of Weather and Climate*, Chapman, 1992.
- Riehl, H., *Introduction to the Atmosphere*, McGraw Hill, 1978
- Wallace, J. M., and P. V. Hobbs, *Atmospheric Science, An Introductory Survey*, Academic Press, San Diego, Ca., 1977.