

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΗΛΙΑΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Μάθημα 2ο

Διδάσκων: Αν. Καθηγητής Ε. Αμανατίδης

ΤΕΤΑΡΤΗ 16/10/2019
Τμήμα Χημικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Πατρών

Περίληψη

- **Ηλιακή Ενέργεια**

- Ο Ήλιος ως πηγή ενέργειας
- Κατανομή ενέργειας στη γή
- Ηλιακό φάσμα και ηλιακή σταθερά

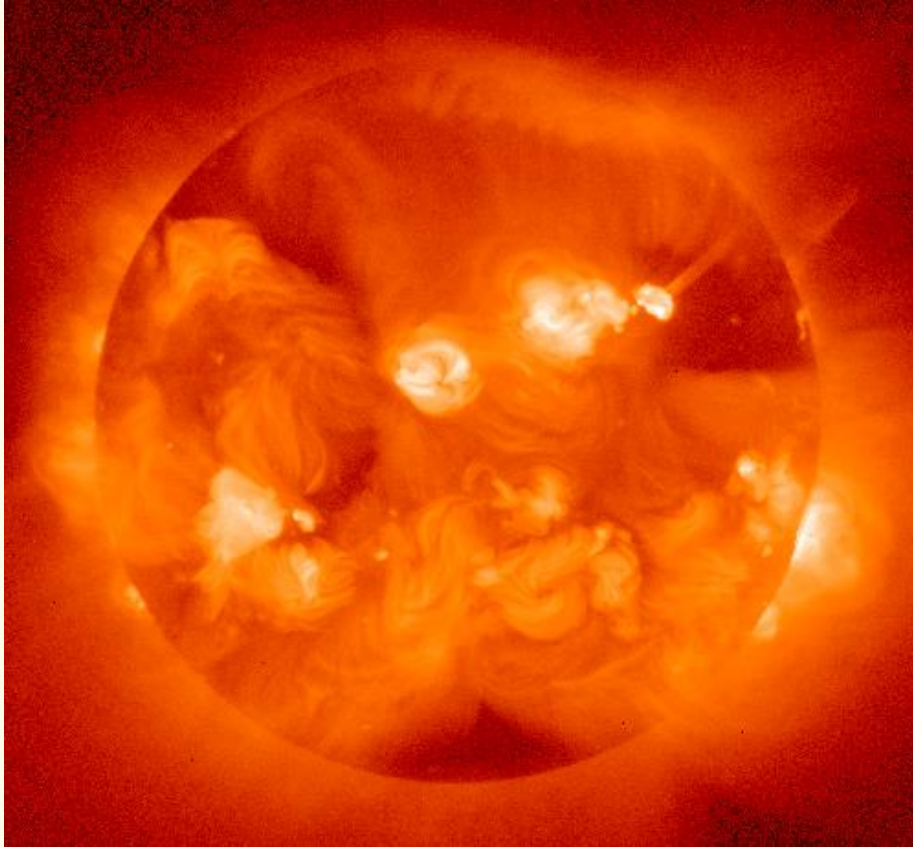
- **Κίνηση Γης - Ηλίου**

- Βασικές έννοιες: Αληθής ηλιακός χρόνος, απόκλιση, ύψος ήλιου, ωριαία γωνία ήλιου, ζενιθία γωνία, αζιμούθια γωνία

- **Ηλιακή Ακτινοβολία**

- Άμεση - διάχυτη ακτινοβολία
 - Υπολογισμός προσπίπτουσας ενέργειας και ισχύος σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο
-

Ο Ήλιος ως πηγή ενέργειας



Πηγή Wikipedia

Ο Ήλιος είναι ο αστέρας του ηλιακού μας συστήματος και το λαμπρότερο σώμα του ουρανού.

Είναι σχεδόν τέλεια σφαίρα με διάμετρο 1,4 εκατομμύρια χιλιόμετρα (109 φορές περισσότερο από τη Γη), και η μάζα του (2×10^{30} κιλά) αποτελεί το 99.86% της μάζας του ηλιακού συστήματος.

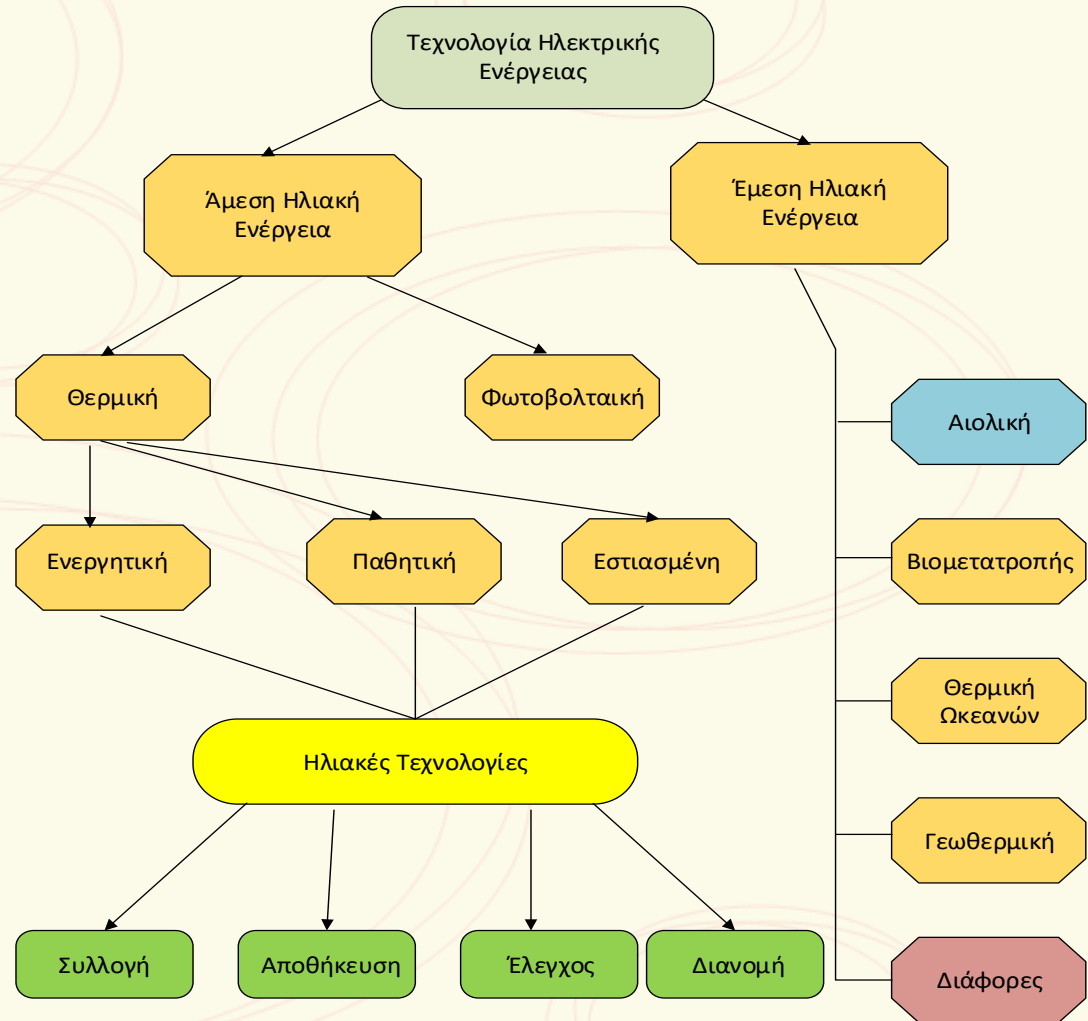
Μπορεί να θεωρηθεί ως αντιδραστήρας σύντηξης που μετατρέπει H_2 σε He ακτινοβολώντας ενέργεια με βάση την εξίσωση ενέργειας – μάζας $E=mc^2$

Η ενέργεια της ακτινοβολίας του ήλιου που φτάνει στα όρια της ατμόσφαιρας του πλανήτη μας ισοδυναμεί κατά μέσο όρο με $1.5 \cdot 10^{18}$ kWh

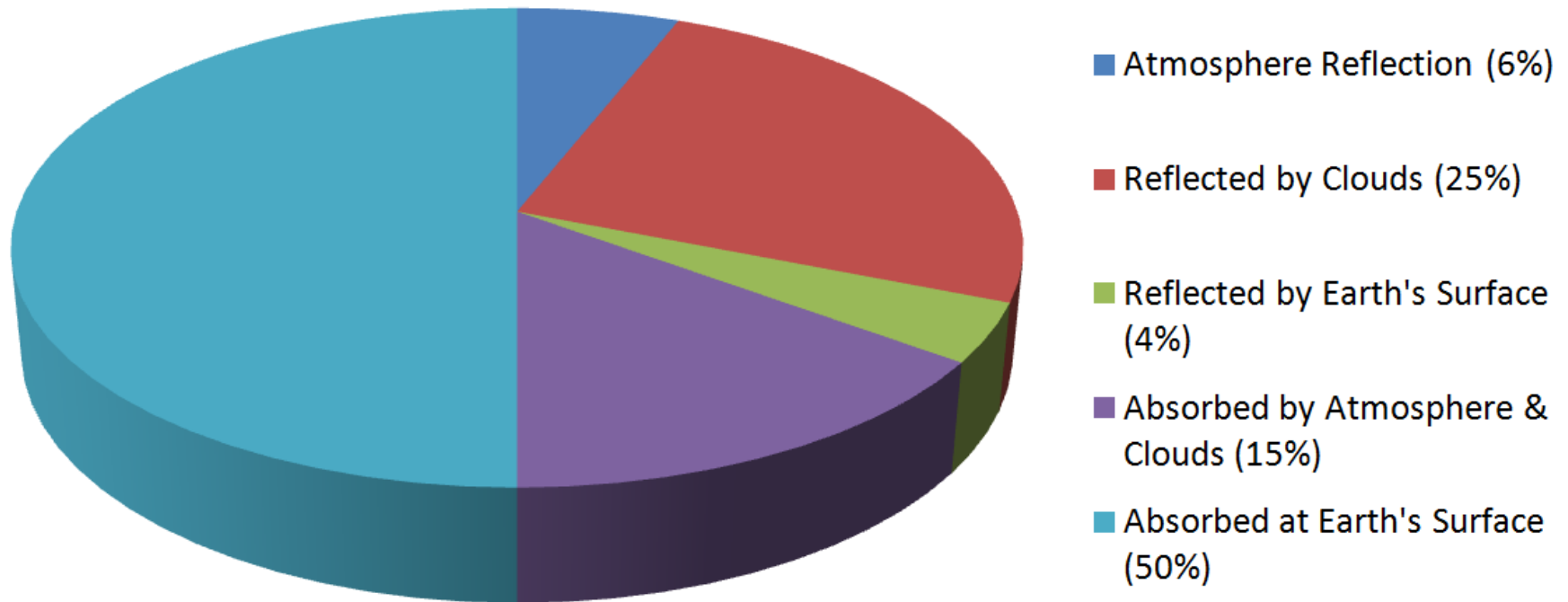
Ηλιακή Ενέργεια

✓ Οι περισσότερες ήπιες μορφές ενέργειας προέρχονται άμεσα ή έμμεσα από τον ήλιο:

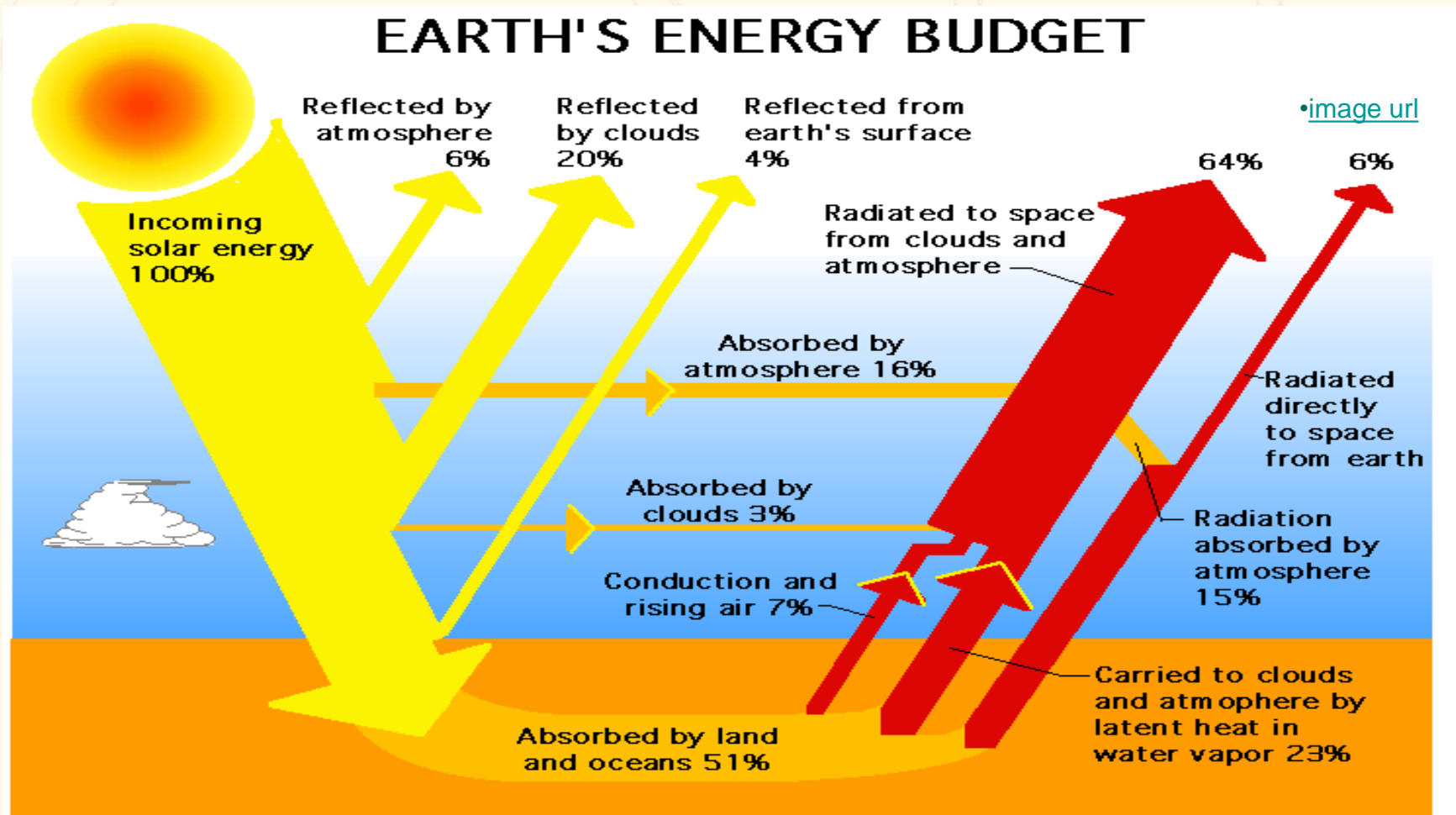
- ✓ Ήλιος
- ✓ Ήλιος → Άνεμος
- ✓ Ήλιος + Άνεμος → Εξάτμιση
- ✓ Ήλιος + Νερό → Βλάστηση



Distribution of Sun's Energy

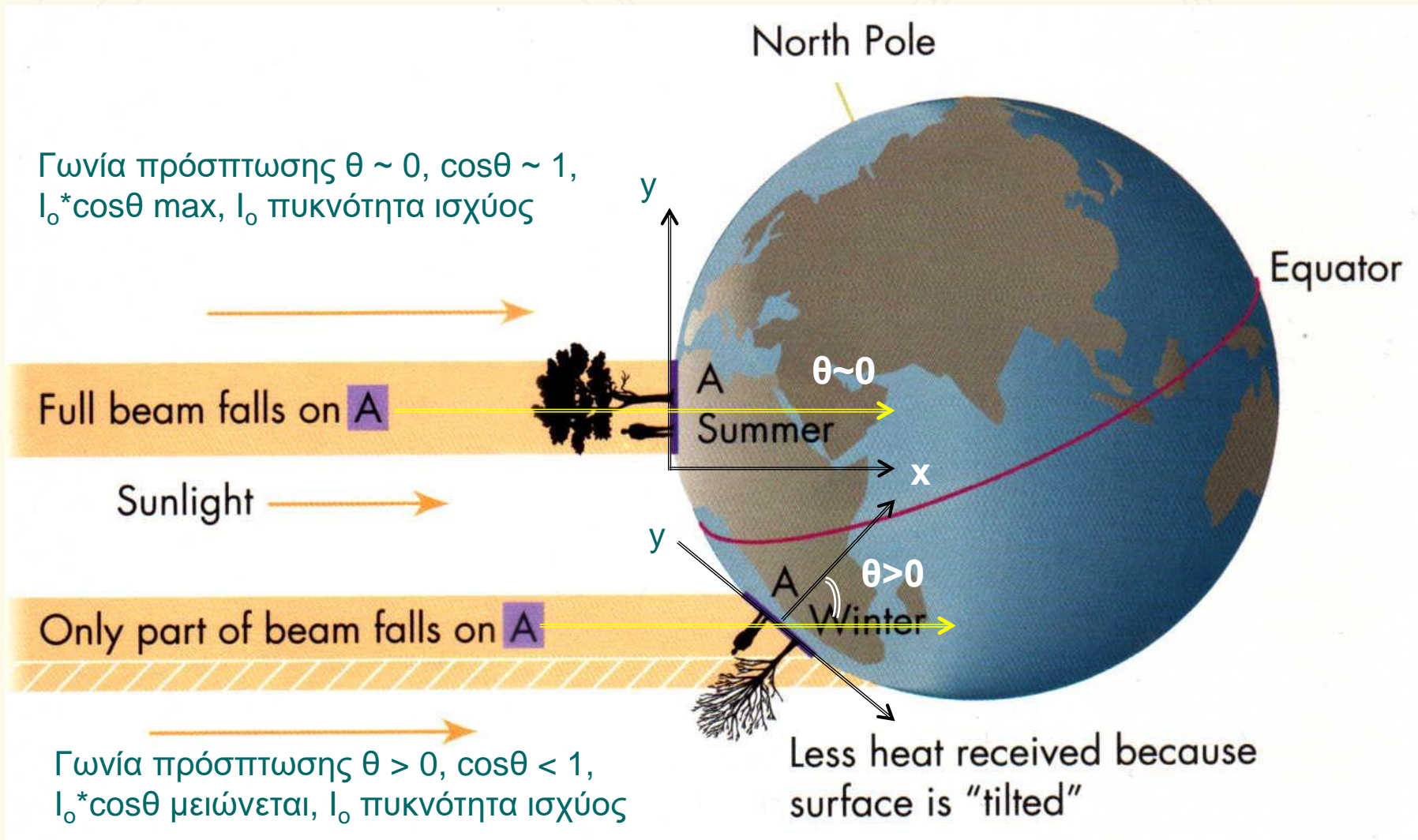


Ηλιακή Ενέργεια



Καλοκαίρι vs Χειμώνας

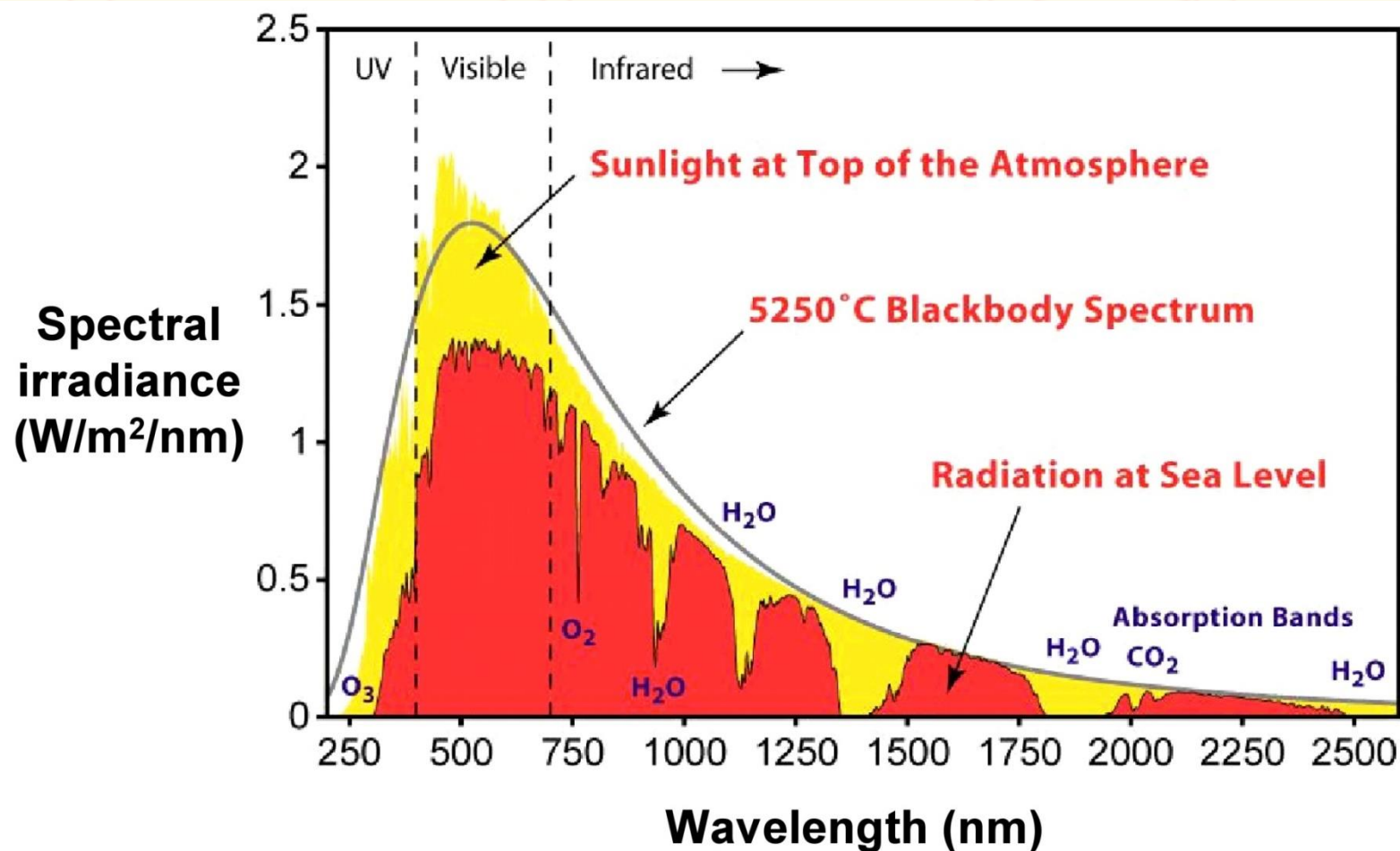
Προσανατολισμός γης σε σχέση με τον ήλιο



Ηλιακή Ενέργεια

- Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από την θερμοκρασία του ήλιου που είναι περίπου 5900°K
 - Το 99% της ηλιακής ενέργειας εμφανίζεται σε μήκος κύματος από 0.25 έως 4.0 μm
 - Σύμφωνα με την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας:
 - Ορατό [λ : 0.39-0.77 μm] περιέχει το 46.41% της ενέργειας
 - Υπεριώδες [$\lambda < 0.4\mu\text{m}$] περιέχει το 2.03% της ενέργειας
 - Υπόλοιπο [$\lambda > 0.77\mu\text{m}$] περιέχει το ~ 51 % της ενέργειας
-

Ηλιακή Ενέργεια (Φάσμα)



Ορατό Φάσμα



Ηλιακή Ενέργεια – Ηλιακή Σταθερά

- ✓ Ως ηλιακή σταθερά ορίζεται η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ήλιου στο όριο της ατμόσφαιρας:

$$I_{sc'} = 1367 \text{ W/m}^2$$

- ✓ Οι τιμές στην βιβλιογραφία κυμαίνονται από 1353 έως 1395 W/m²
- ✓ Λόγω της μεταβολής της απόστασης ήλιου-γης κατά την διάρκεια του έτους χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό της διαχρονικής μεταβολής της ηλιακής σταθεράς:

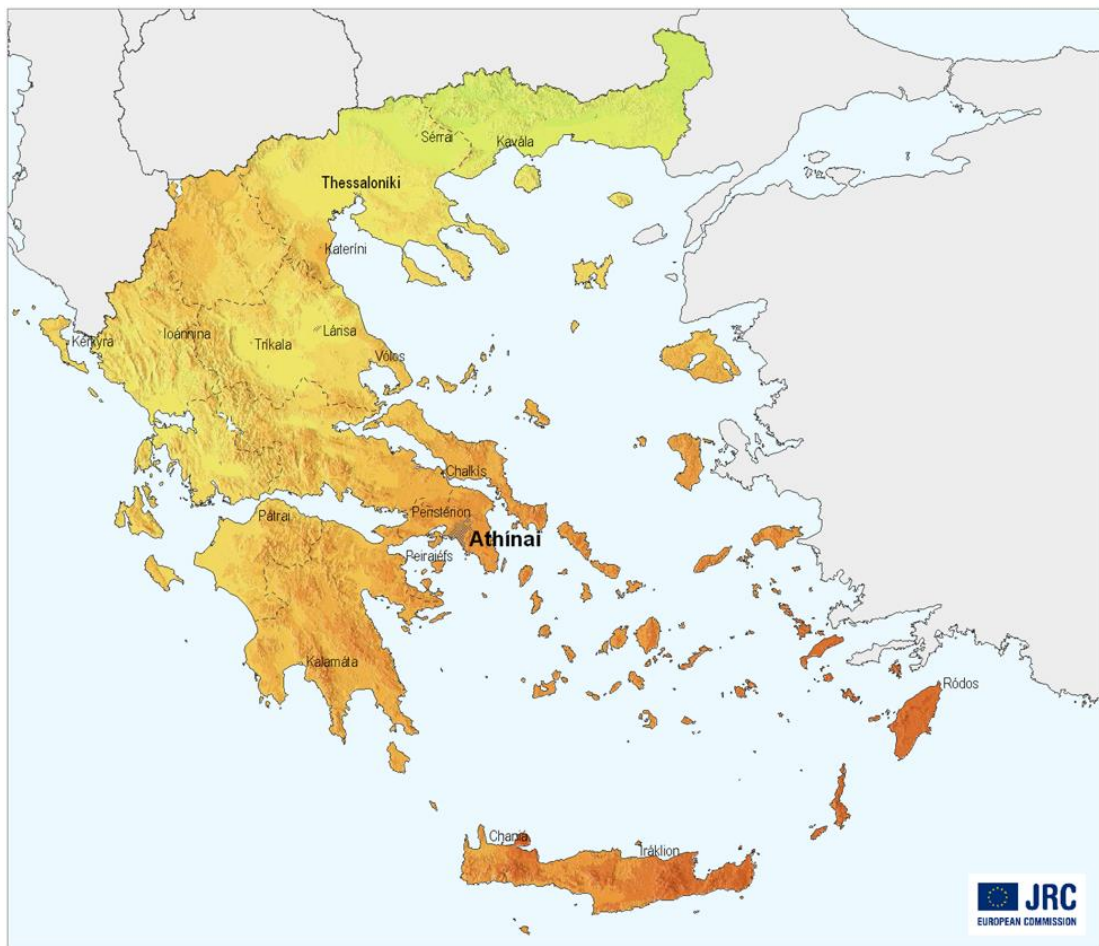
$$I_{sc} = I_{sc'} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot dn}{365}\right) \right)$$

$$dn = \text{Ιουλιανή μέρα, 1 την 1/1 ... 365 τη 31/12}$$

Ηλιακή Ενέργεια σε διάφορες περιοχές της Ελλάδος

Global irradiation and solar electricity potential
Horizontally mounted photovoltaic modules

Greece



Yearly sum of global irradiation [kWh/m²]

<1300 1400 1500 1600 1700 1800



<975 1050 1125 1200 1275 1350

Yearly electricity generated by 1kW_{peak} system with performance ratio 0.75 [kWh/kW_{peak}]

Authors: M. Šúri, T. Cebecauer, T. Huld, E. D. Dunlop
PVGIS © European Communities, 2001-2008
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

0 50 100 200 km

- ✓ Άθροισμα ηλιακής ακτινοβολίας (άμεση και διάχυτη) στην Ελλάδα μεταβάλεται από ~1300 kWh/m² στο βορρά έως ~ 1800 kWh/m² στο νότο
- ✓ Κρήτη (Σητεία και Ιεράπετρα) μαζί με Ρόδο, οι περιοχές με τη μεγαλύτερη ηλιοφάνεια



ΚΙΝΗΣΗ ΓΗΣ - ΗΛΙΟΥ

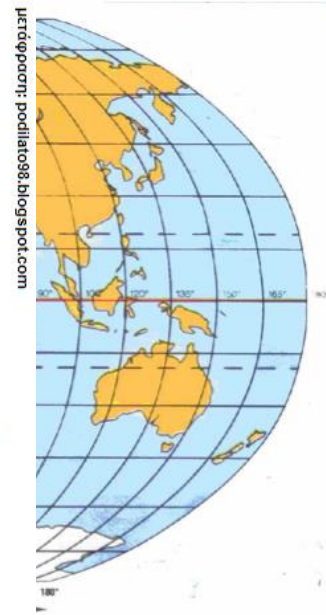
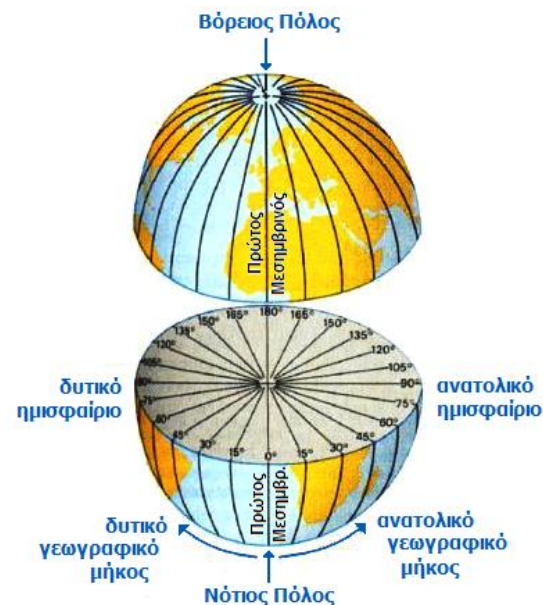
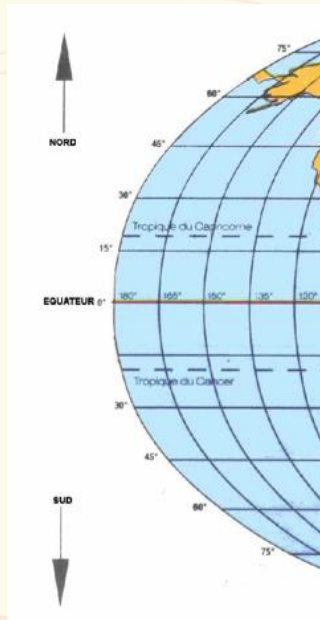
Βασικές Έννοιες

- Γεωγραφικό πλάτος και μήκος
 - Απόκλιση Ηλίου
 - Αληθής Ηλιακός Χρόνος
 - Ύψος και αζιμούθιο Ηλίου
 - Ωριαία γωνία Ηλίου
-

Γεωγραφικό Πλάτος και Μήκος

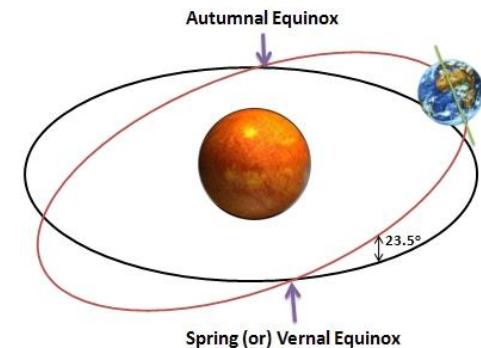
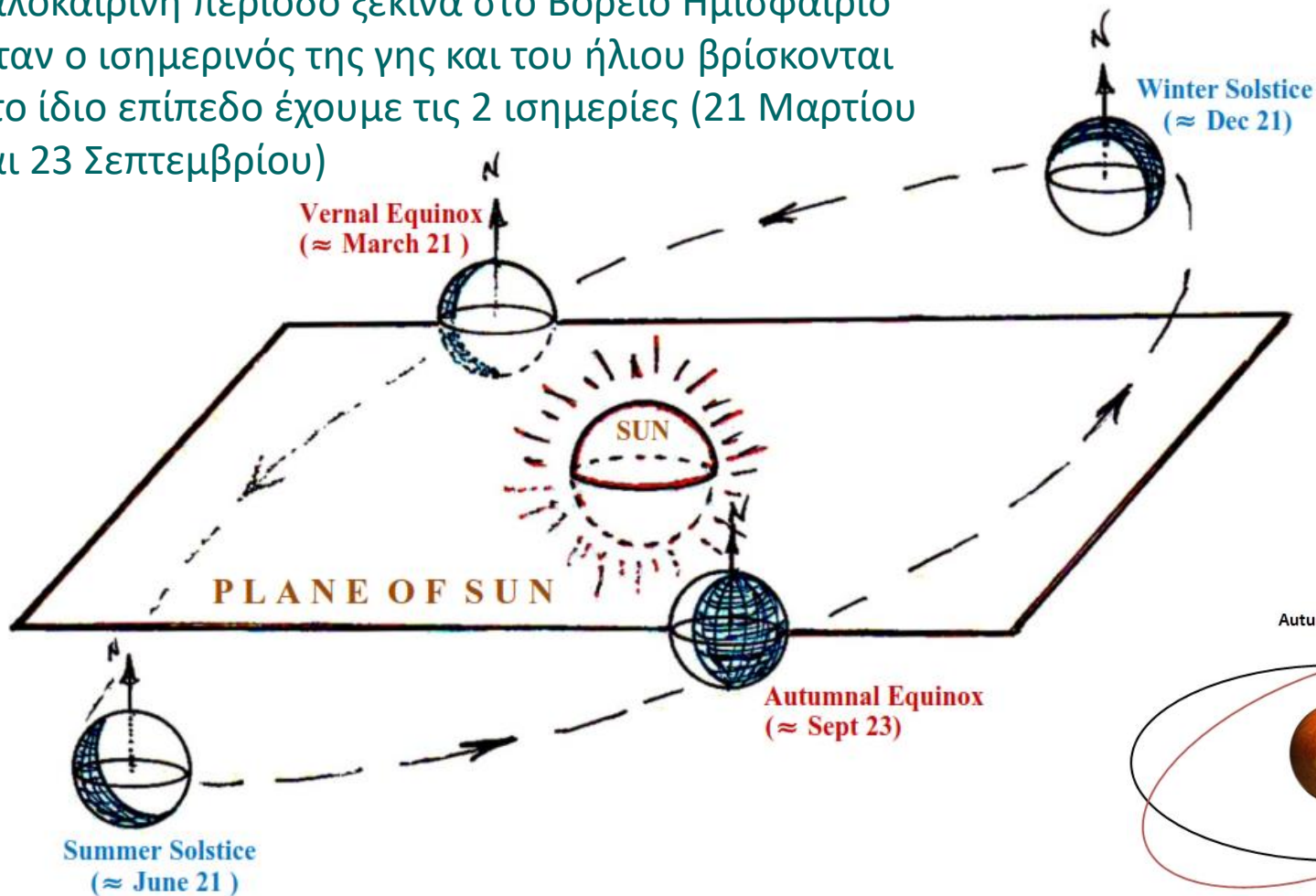
• Το **γεωγραφικό πλάτος (latitude)** είναι ένα από τα δύο μεγέθη των γεωγραφικών συντεταγμένων με τα οποία προσδιορίζεται η θέση των διαφόρων τόπων στην επιφάνεια της γης. Συγκεκριμένα, προσδιορίζει την γωνιακή απόσταση των διάφορων τόπων από τον Ισημερινό, ο οποίος έχει γεωγραφικό πλάτος ίσο με 0.

• Το **γεωγραφικό μήκος** έχει οριστεί κατά σύμβαση να μετριέται από τον Μεσημβρινό που διέρχεται από το Αστεροσκοπείο του Γκρίνουιτς στην Μεγάλη Βρετανία καλούμενος **πρώτος μεσημβρινός** ή αριθμητικά **000° 00' 00"**. Το γεωγραφικό μήκος αποδίδεται σε μοίρες, πρώτα και δεύτερα της μοίρας ή και ως δεκαδικός αριθμός επί των προηγουμένων.



Κίνηση Γης – Ηλίου: Ισημερίες - Ηλιοστάσια

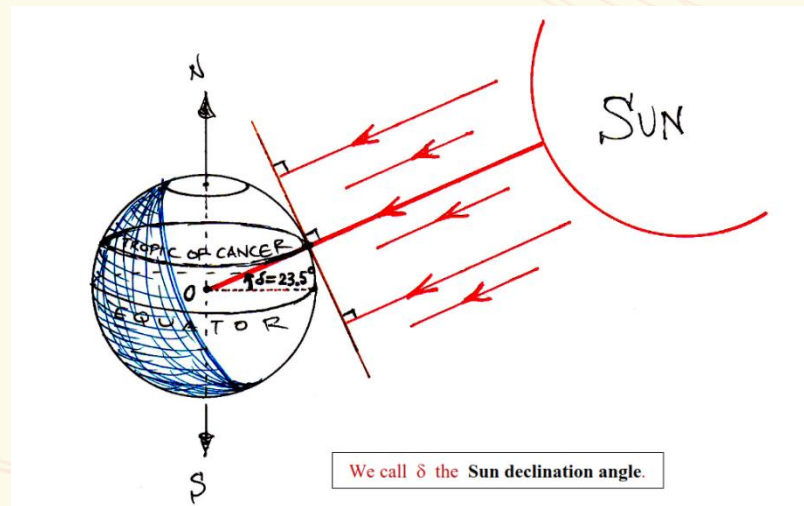
- Όταν η γη πέσει κάτω από το επίπεδο του Ήλιου η καλοκαιρινή περίοδο ξεκινά στο Βόρειο Ημισφαίριο
- Όταν ο ισημερινός της γης και του ήλιου βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο έχουμε τις 2 ισημερίες (21 Μαρτίου και 23 Σεπτεμβρίου)



Απόκλιση ηλίου

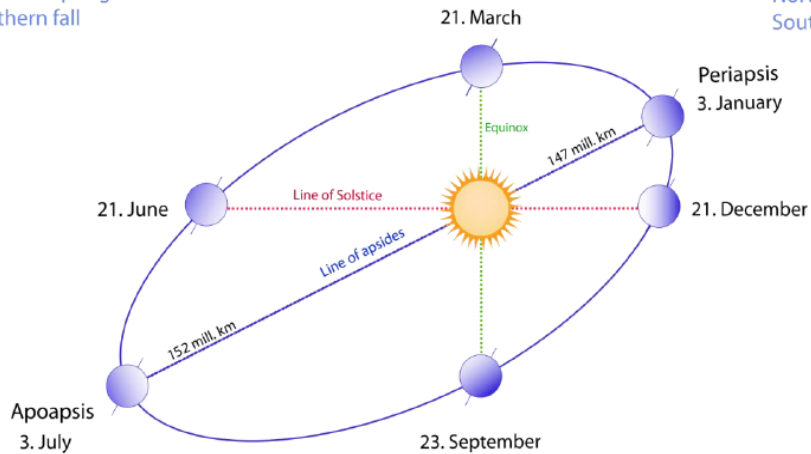
- Απόκλιση δ του ηλίου ορίζεται η γωνία ανάμεσα στην ευθεία ήλιου-γης και την προβολή της στο επίπεδο του ισημερινού
 - ✓ Η μέγιστη τιμή της, κατά το θερινό ηλιοστάσιο, είναι: 23.45°
 - ✓ Η ελάχιστη τιμή της, κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο, είναι: -23.45°

$$\delta = -23.45 \cdot \cos\left(\frac{360}{365}(dn + 10)\right)$$



Μεταβολή της γωνίας απόκλισης κατά τη διάρκεια του έτους

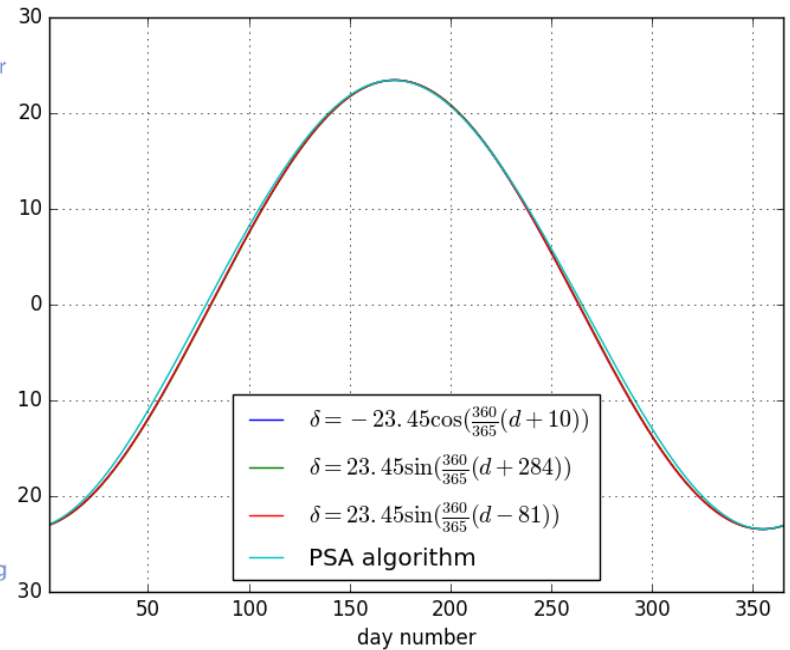
Northern spring/
Southern fall



Northern summer/
Southern winter

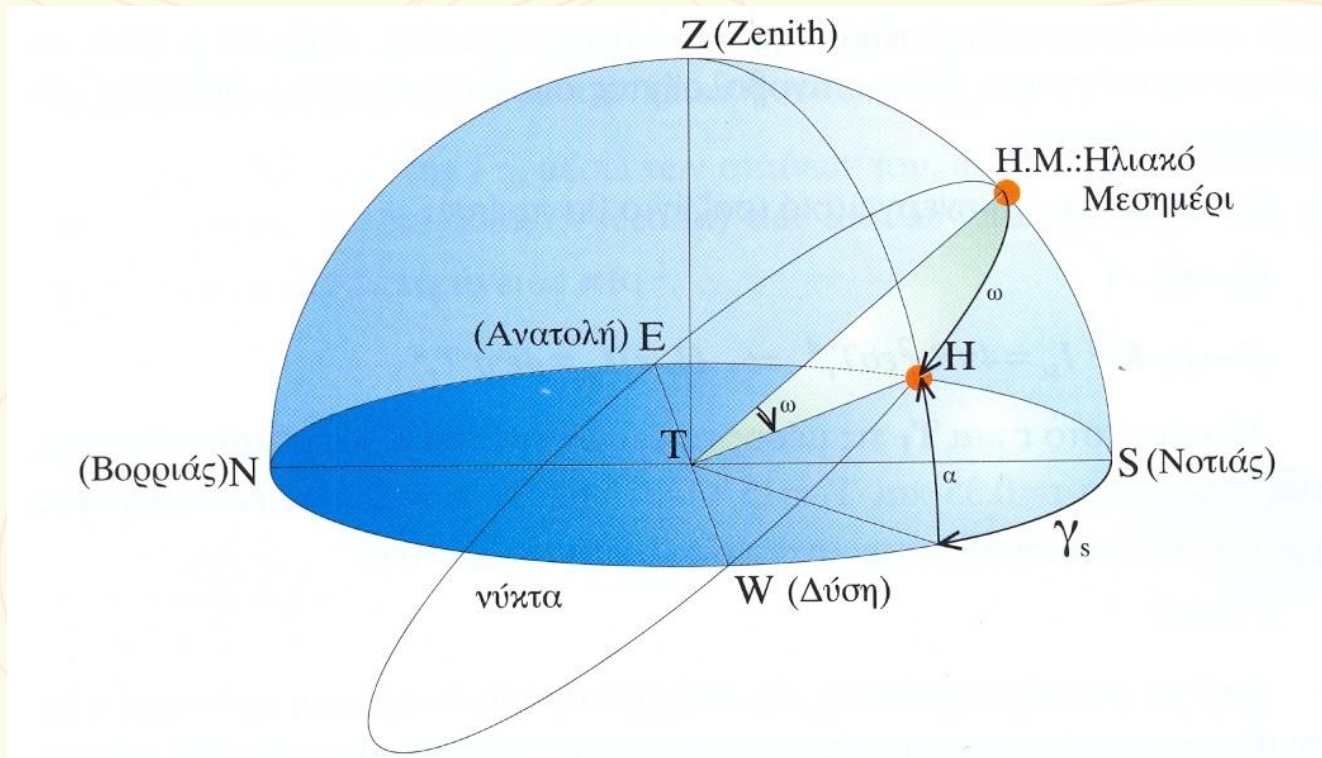
Northern winter/
Southern summer

Northern fall/
Southern spring



Αληθής Ηλιακός Χρόνος

Είναι ο χρόνος του οποίου η μέτρηση και ο προσδιορισμός βασίζεται στη γωνιακή μετακίνηση του ηλίου



ΔΕ ΣΥΜΠΙΠΤΕΙ ΜΕ ΤΟΝ ΤΟΠΙΚΟ ΗΛΙΑΚΟ ΧΡΟΝΟ ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΙΔΙΟΣ ΣΕ ΜΙΑ ΧΩΡΑ

Αληθής Ηλιακός Χρόνος vs Τοπικό Χρόνο

• Διόρθωση 1: Λόγω διαφοράς Γεωγραφικού μήκους του μεσημβρινού του τόπου (L_e) με το κατά συνθήκη γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού της ατράκτου στην οποία βρίσκεται η χώρα (L_s)

• Διόρθωση 2: Εξίσωση του χρόνου

Διόρθωση 1

- Πλήρη Περιστροφή 360° σε 24h
 - Γη χωρισμένη σε 24 ατράκτους (15° ανά άτρακτο)
 - 15° ανά μία ώρα \leftrightarrow 4min/μοίρα
 - Διόρθωση $\pm 4\text{min}/\text{μοιρα} * (L_s - L_e)$
 - Στο ανατολικό ημισφαίριο (-) στο δυτικό ημισφαίριο (+)
-

Αληθής Ηλιακός Χρόνος

- ✓ Εξίσωση του χρόνου: Το αίτιο της μεταβολής της χρονικής διάρκειας της ηλιακής ημέρας (ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο ήλιος να συμπληρώσει ένα πλήρη κύκλο γύρω από ένα στάσιμο παρατηρητή στην γη) οφείλεται στους ακόλουθους παράγοντες:
 - ✓ Κάλυψη άνισων αποστάσεων κατά την περιστροφή της γης γύρω από το ήλιο
 - ✓ Κλίση του άξονα της γης ως προς το επίπεδο περιστροφής
- ✓ Ο ήλιος βρίσκεται στην ίδια θέση διαφορετικές ώρες κατά την διάρκεια του χρόνου. Αυτή η διαφορά της ώρας υπολογίζεται (σε λεπτά):

$$E_t = \left(\begin{array}{l} 0.000075 + 0.001868 \cdot \cos \Gamma - 0.032077 \cdot \sin \Gamma - \\ 0.0014615 \cdot \cos 2\Gamma - 0.04089 \cdot \sin 2\Gamma \end{array} \right) \cdot (229.18)$$

Αληθής Ηλιακός Χρόνος

- ✓ Όπου Γ είναι μία συνάρτηση που ορίζεται:

$$\Gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot (dn - 1)}{365}$$

- ✓ Τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας καταγράφονται σε πραγματικό ηλιακό χρόνο. Ο πραγματικός ηλιακός χρόνος ΠΗΧ υπολογίζεται σαν συνάρτηση του τοπικού χρόνου και τον δύο διορθώσεων:

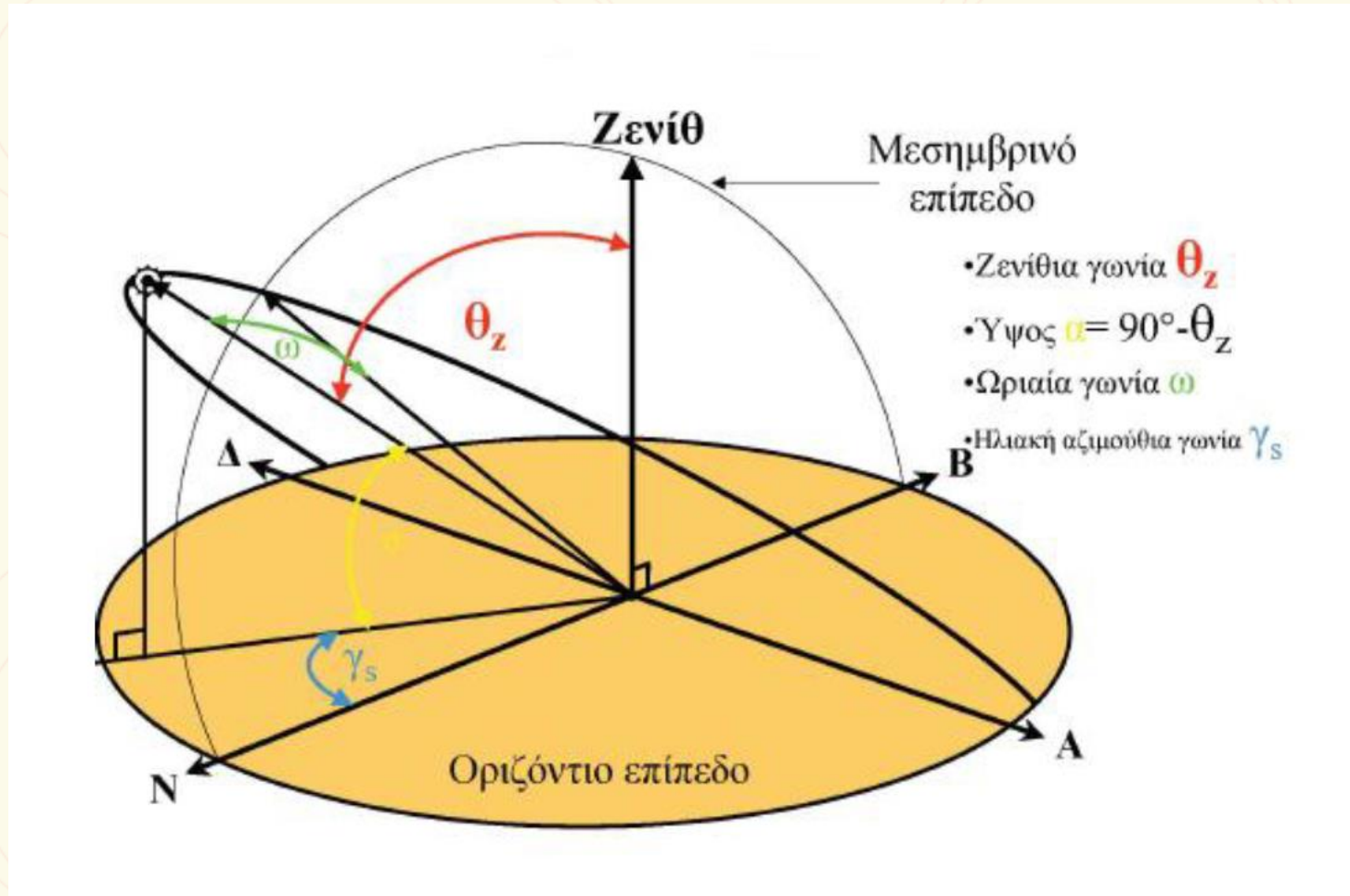
$$\text{ΠΗΧ} = \text{ΤΧ} \pm 4 \cdot (L_s - L_e) + E_t$$

όπου (+) για το δυτικό ημισφαίριο και (-) για το ανατολικό

Ζενίθια γωνία – Ύψος Ηλίου – Ωριαία γωνία

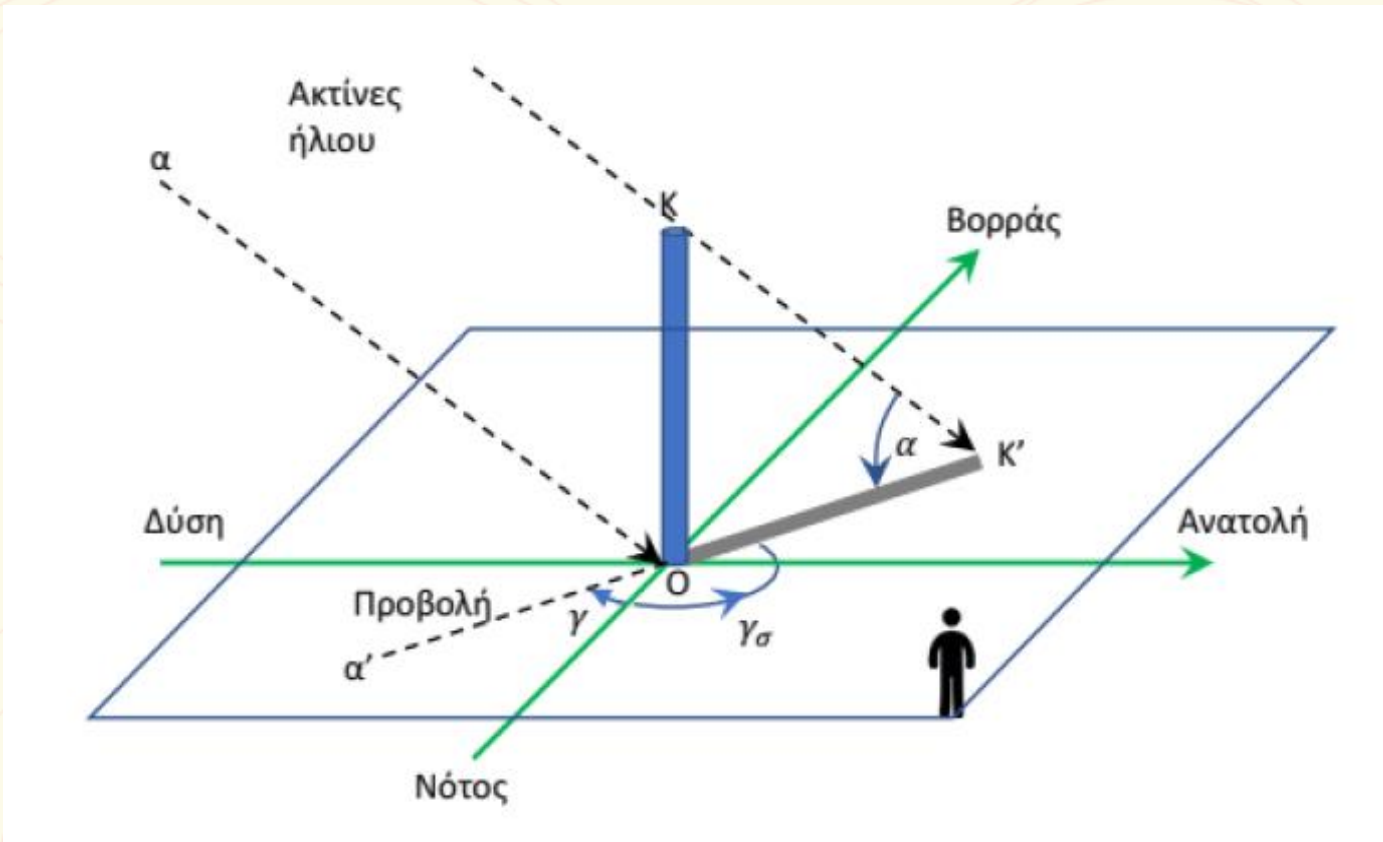
- Για τον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια τυχαίου προσανατολισμού και κλίσης, η οποία βρίσκεται στην επιφάνεια της γης ορίζονται οι ακόλουθοι παράμετροι:
 - ✓ **Αζιμούθια γωνία γ_s** : Γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του μεσημβρινού του τόπου και της προβολής στο οριζόντιο επίπεδο της ευθείας που συνδέει τον ήλιο με τον παρατηρητή
 - ✓ **Ζενίθια γωνία θ_z** : η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του τοπικού ζενίθ και την ευθεία παρατηρητή-ήλιου ($0 < \theta_z < 90$)
 - ✓ **Ύψος ηλίου α** : η γωνιακή απόσταση του ήλιου με τον ορίζοντα του τόπου (συμπληρωματική γωνία της θ_z)
 - ✓ **Ωριαία γωνία ω** : η γωνιακή απόσταση του ηλίου από την ηλιακή μεσημβρία
 - ✓ Στην ηλιακή μεσημβρία $\omega = 0^\circ$, ενώ κάθε ώρα η ω μεταβάλλεται κατά 15°
 - ✓ Τις πρωινές ώρες $\omega \rightarrow (-)$ και κατά τις απογευματινές $\omega \rightarrow (+)$
-

Ζενίθια γωνία – Ύψος Ηλίου – Ωριαία γωνία



$\omega = 15^\circ(t-12)$, t ο χρόνος σε ακέραιες ώρες
Επίσης ισχύει $\omega_{\text{ανατολής}} = -\omega_{\text{δυσης}}$

Αζιμούθια γωνία γ_s



Η γωνία που σχηματίζει στο οριζόντιο έδαφος η προβολή της ακτινοβολίας του Ήλιου με την κατεύθυνση του Νότου

Θετική προς τη δύση, αρνητική προς ανατολή

Λίγη τριγωνομετρία

- Για μια δεδομένη περιοχή γεωγραφικού πλάτους ϕ , η ζενίθια γωνία θ_z για οριζόντια επιφάνεια υπολογίζεται:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega = \sin \alpha$$

- Η ωριαία γωνία δύσης $\omega_s = \omega_{\text{δύσης}}$ είναι:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta)$$

- Η διάρκεια της ημέρας (σε ώρες) είναι:

$$N_d = \frac{2}{15} \cdot \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta)$$

- Η αζιμούθια γωνία του ηλίου για κάθε χρονική στιγμή

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\sin \theta_z}$$

Κίνηση του ήλιου σε σχέση με κεκλιμένο επίπεδο

- ✓ Σε ότι αφορά στην θέση μίας επιφάνειας μελέτης ορίζουμε:
 - ✓ Κλίση β : την κλίση της επιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο
 - ✓ Αζιμούθιο γ : η γωνία που σχηματίζει η προβολή του κάθετου διανύσματος της επιφάνειας στο οριζόντιο επίπεδο με τον άξονα Βορράς-Νότος
 - ✓ Για νότιο προσανατολισμό $\gamma=0$
 - ✓ Για γωνίες δυτικά $\gamma \rightarrow (+)$
 - ✓ Για γωνίες ανατολικά $\gamma \rightarrow (-)$
-

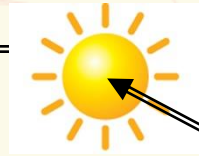
Κίνηση του ήλιου σε σχέση με κεκλιμένο επίπεδο



Ζενίθια γωνία θ_z

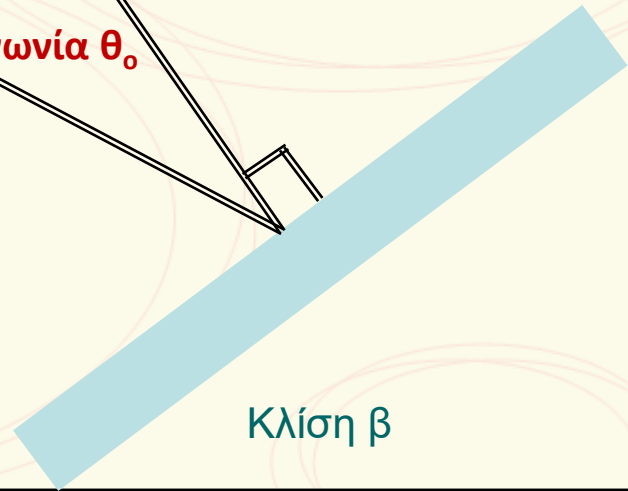


Οριζόντιο επίπεδο



γωνία θ_o

Κεκλιμένο επίπεδο



Κλίση β

Λίγη Τριγωνομετρία

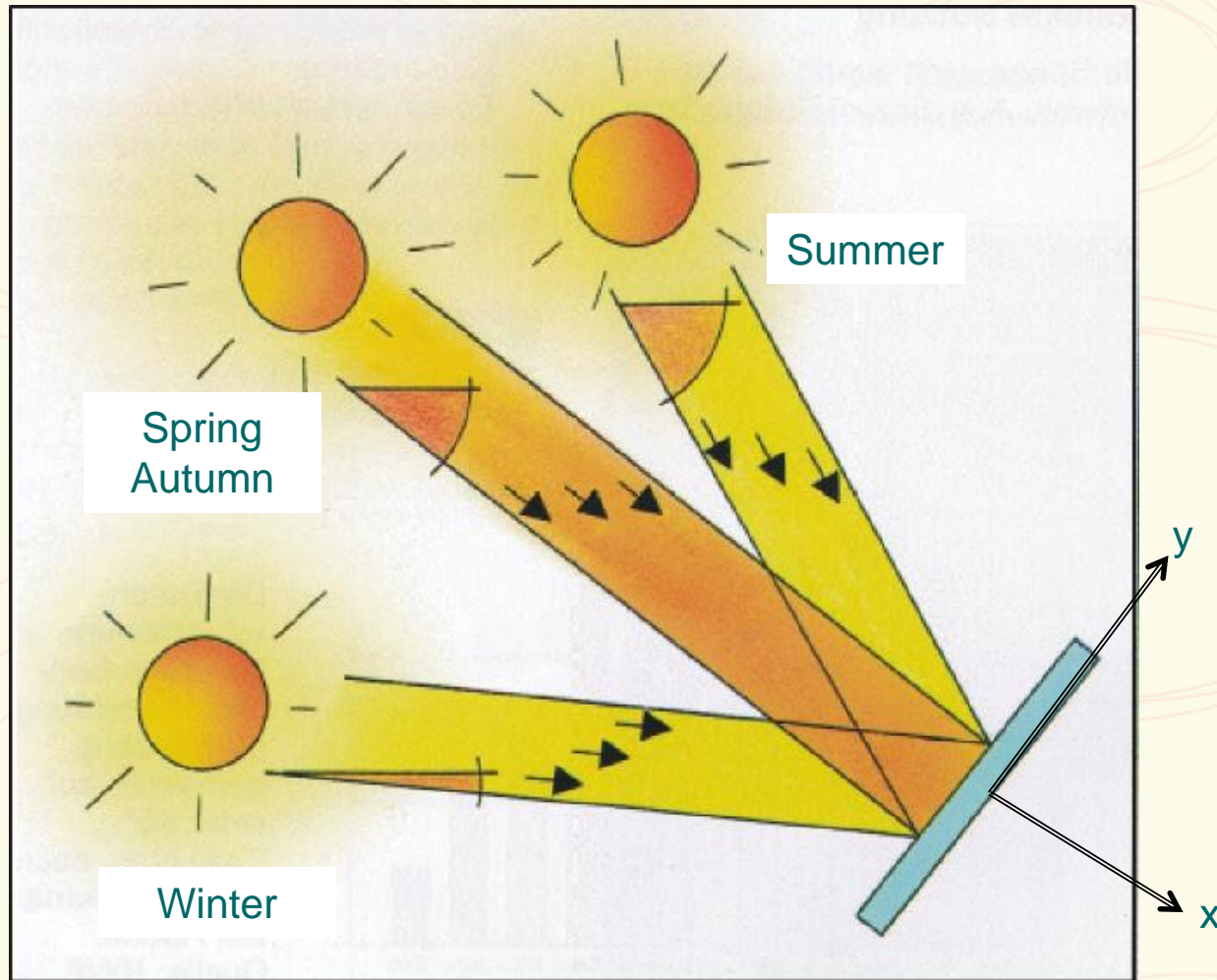
- Για την περίπτωση επιφάνειας η οποία έχει κλίση β και αζιμούθιο μηδέν (νότιος προσανατολισμός) η γωνία πρόσπτωσης θ_o είναι:

$$\cos \theta_o = \sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \omega$$

- Η ωριαία γωνία δύσης ω_s είναι:

$$\omega_s' = \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \cdot \tan \delta)$$

Λίγη Τριγωνομετρία



Ανάλογα με την περίοδο του έτους πρέπει να μεταβάλλουμε τη γωνία κεκλιμένου επιπέδου για ν ; α επιτύχουμε μέγιστη άμεση πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας!!



ΠΡΟΣΠΙΠΤΟΥΣΑ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

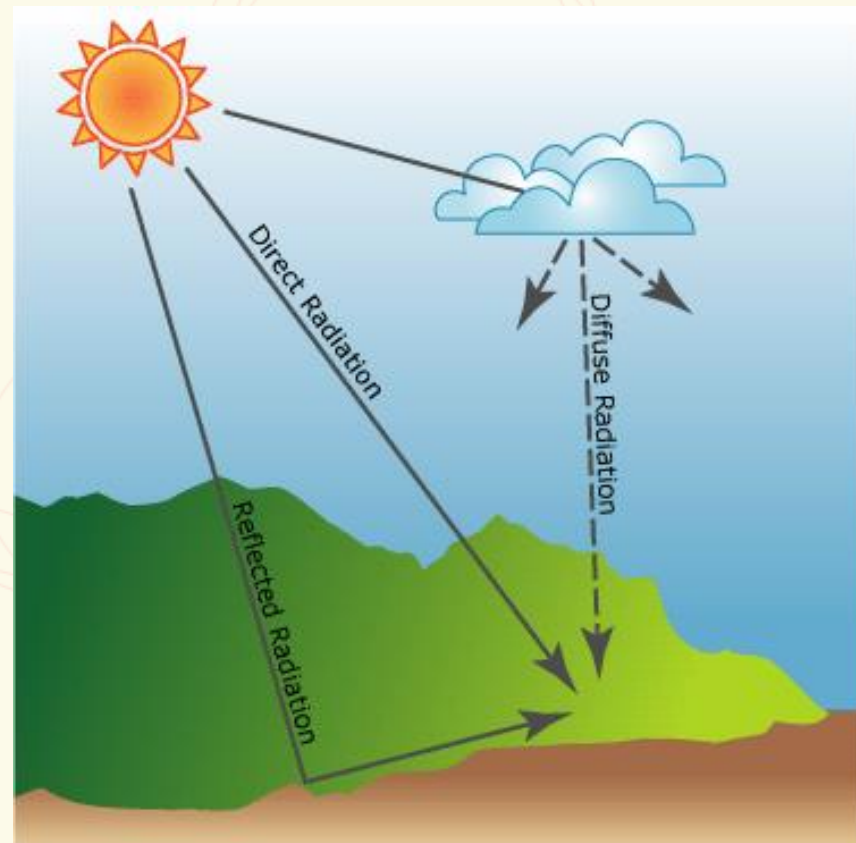
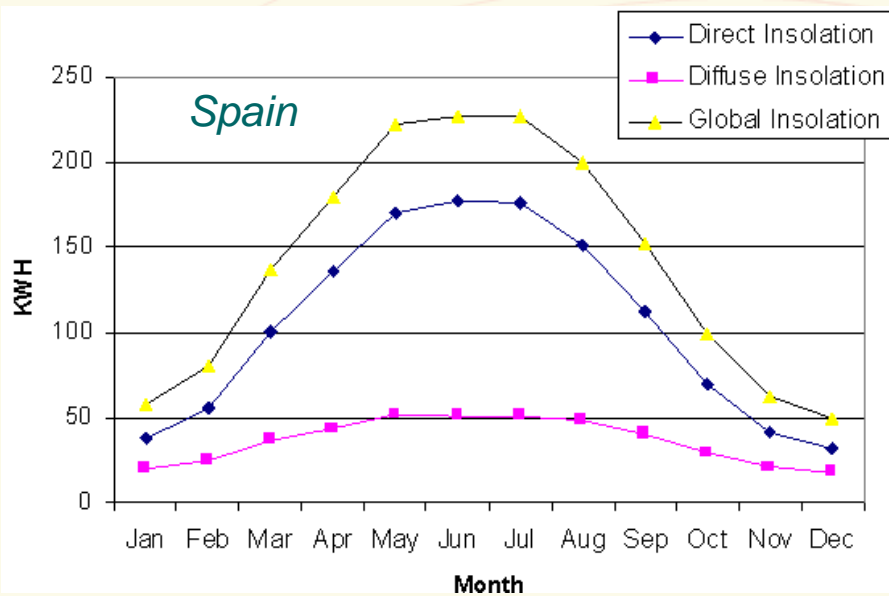
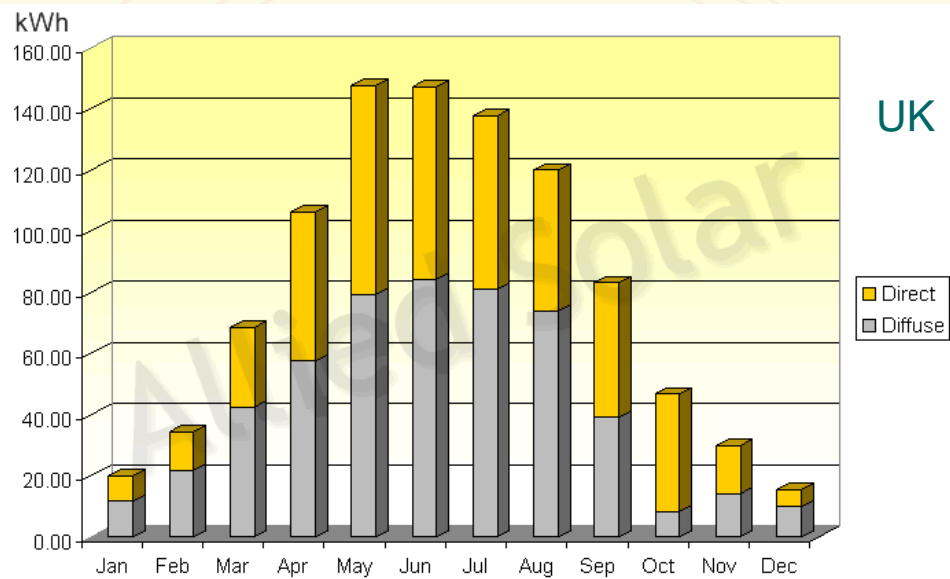
Ηλιακή Ακτινοβολία

- Άμεση ηλιακή ακτινοβολία: είναι η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση στην ατμόσφαιρα
 - Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία: είναι η ηλιακή ακτινοβολία που έχει υποστεί σκέδαση στην ατμόσφαιρα
 - Ολική ηλιακή ακτινοβολία: είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνεται σε μία επιφάνεια
 - Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας I (irradiance, W/m^2): είναι ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια που ακτινοβολείται πέφτει σε μία επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας
 - Πυκνότητα ενέργειας ακτινοβολίας H (irradiation, J/m^2): είναι η προσπίπτουσα σε μία επιφάνεια ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και υπολογίζεται με την ολοκλήρωση της πυκνότητας ισχύος σε κάποιο χρονικό διάστημα (1 ώρα, 1 μέρα)
-

Ηλιακή Ακτινοβολία

- ✓ Η γήινη ατμόσφαιρα αποτελείται από (κατ' όγκο):
 - ✓ 78% άζωτο
 - ✓ 20.9% οξυγόνο
 - ✓ 0.9% αργό
 - ✓ 0.33% διοξείδιο του άνθρακα
 - ✓ Υδρατμούς και σωματία
 - ✓ Η ηλιακή ακτινοβολία κατά την είσοδό της στην ατμόσφαιρα υπόκειται απορρόφηση και σκέδαση (κυριότεροι απορροφητές: νέφη, υδρατμοί, O_3 , SO_2)
 - ✓ Η ακτινοβολία που σκεδάζεται είναι η διάχυτη και ένα μέρος της επιστρέφει στο διάστημα
 - ✓ Η ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος χωρίς σκέδαση και μόνο με απορρόφηση είναι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία
-

Ηλιακή Ακτινοβολία



Σχετική συνεισφορά της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας στη συνολική εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την περιοχή

Ηλιακή Ακτινοβολία

Η ισχύς της ακτινοβολίας I_o (W/m²) σε οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_o = I_{sc} \left[1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \cdot \cos \theta_z$$

Και η ενέργεια που προσπίπτει σε μια επιφάνεια από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου από τη σχέση

$$H_o = \frac{24 \cdot 3600 \cdot I_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \cdot \left(\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \varphi \sin \delta \right)$$

όπου $I_{sc} = 1367$ W/m², n η Ιουλιανή ημέρα, φ το γεωγραφικό πλάτος, δ η απόκλιση, ω_s η ωριαία γωνία δύσης του ηλίου, ω_1 και ω_2 οι ωριαίες γωνίες στην αρχή και στο τέλος της ώρας

Ηλιακή Ακτινοβολία

- Για τον υπολογισμό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος και προσπίπτει σε επιφάνειες κλίσης β και αζιμουθίου $\gamma=0$:

$$I_{b\beta} = I_o \cdot r_b$$

όπου I_o είναι η άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο και r_b είναι ο διορθωτικός παράγοντας που δίνεται από την σχέση:

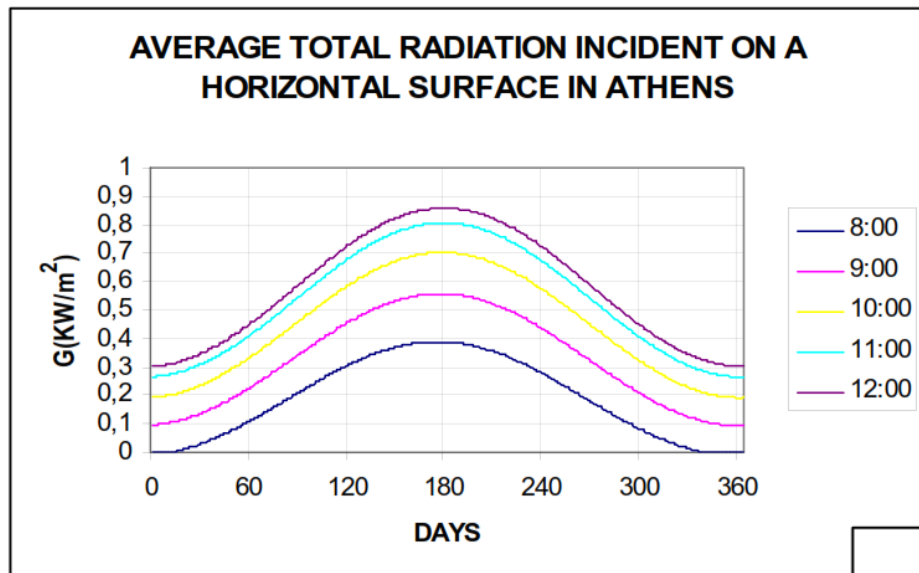
$$r_b = \frac{\cos \theta_o}{\cos \theta_z}$$

όπου θ_z είναι η ζενίθια γωνία και θ_o είναι η γωνία πρόσπτωσης στην κεκλιμένη επιφάνεια

$$\cos \theta_o = \sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \omega$$

Μεγιστοποίηση του $r_b \rightarrow$ Μεγιστοποίηση πρόσπτωσης ακτινοβολίας

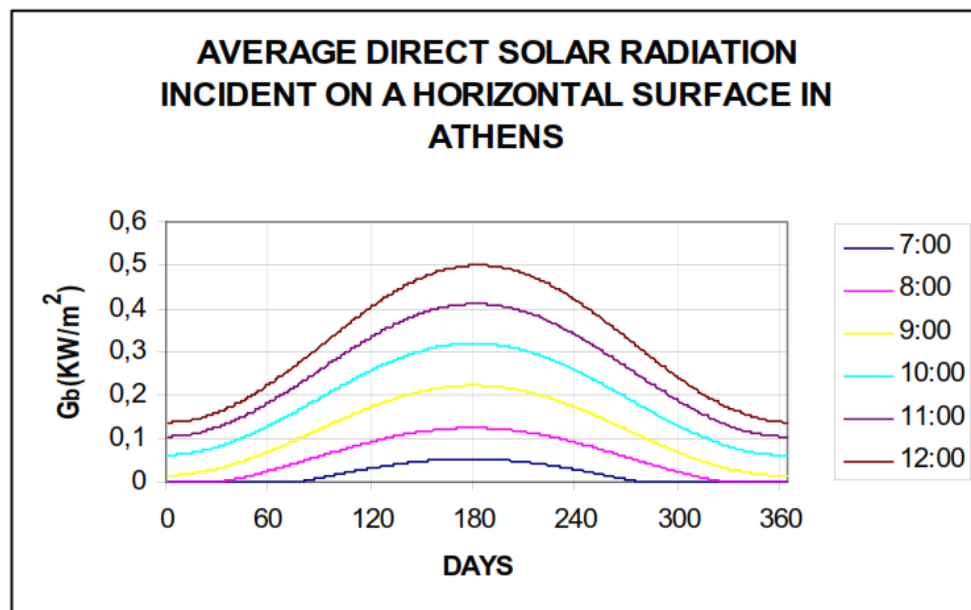
Παραδείγματα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας



$\varphi \sim 38^\circ$, $\lambda \sim 23^\circ$

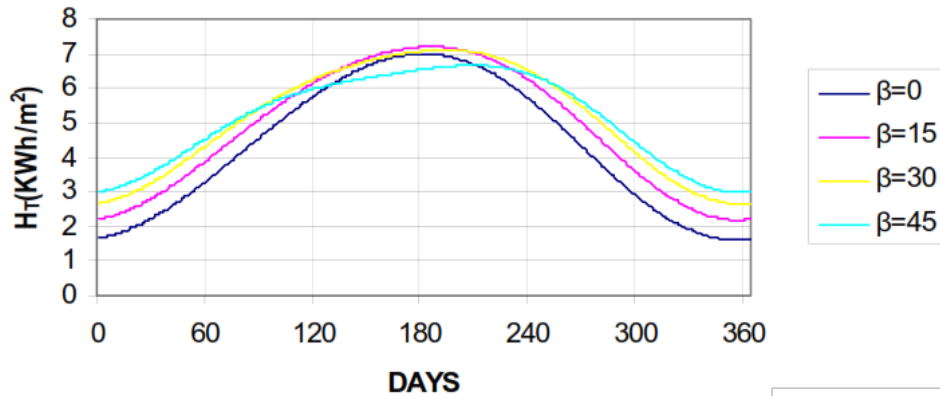
Μέση άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία

Μέση ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία



Παραδείγματα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

TOTAL DAILY SOLAR ENERGY ON A TILTED SURFACE IN ATHENS ($\gamma=0^\circ$)



$\varphi \sim 38^\circ$, $\lambda \sim 23^\circ$

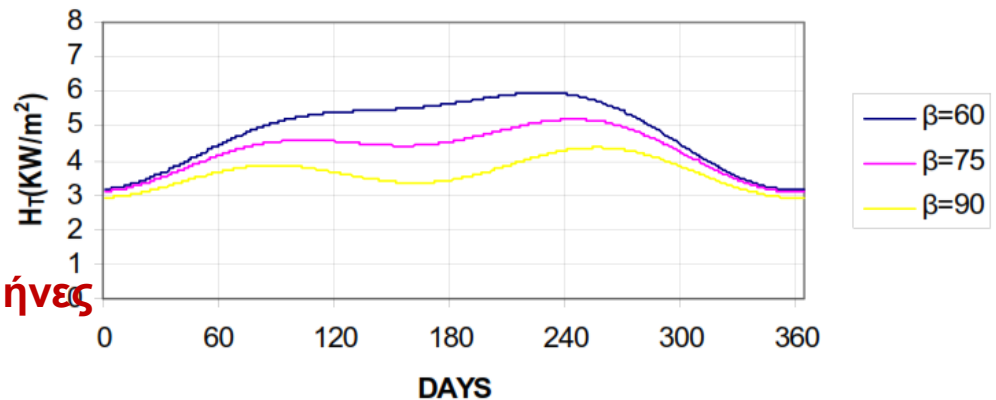
Μέση ημερήσια ενέργεια σε κεκλιμένα επίπεδα

Μέση ημερήσια ενέργεια σε κεκλιμένα επίπεδα

Βέλτιστο $\sim 30^\circ$

Μικρές γωνίες ευνοούν καλοκαιρινούς μήνες
Μεγάλες γωνίες τους χειμερινούς μήνες

TOTAL DAILY SOLAR ENERGY ON A TILTED SURFACE IN ATHENS ($\gamma=0^\circ$)

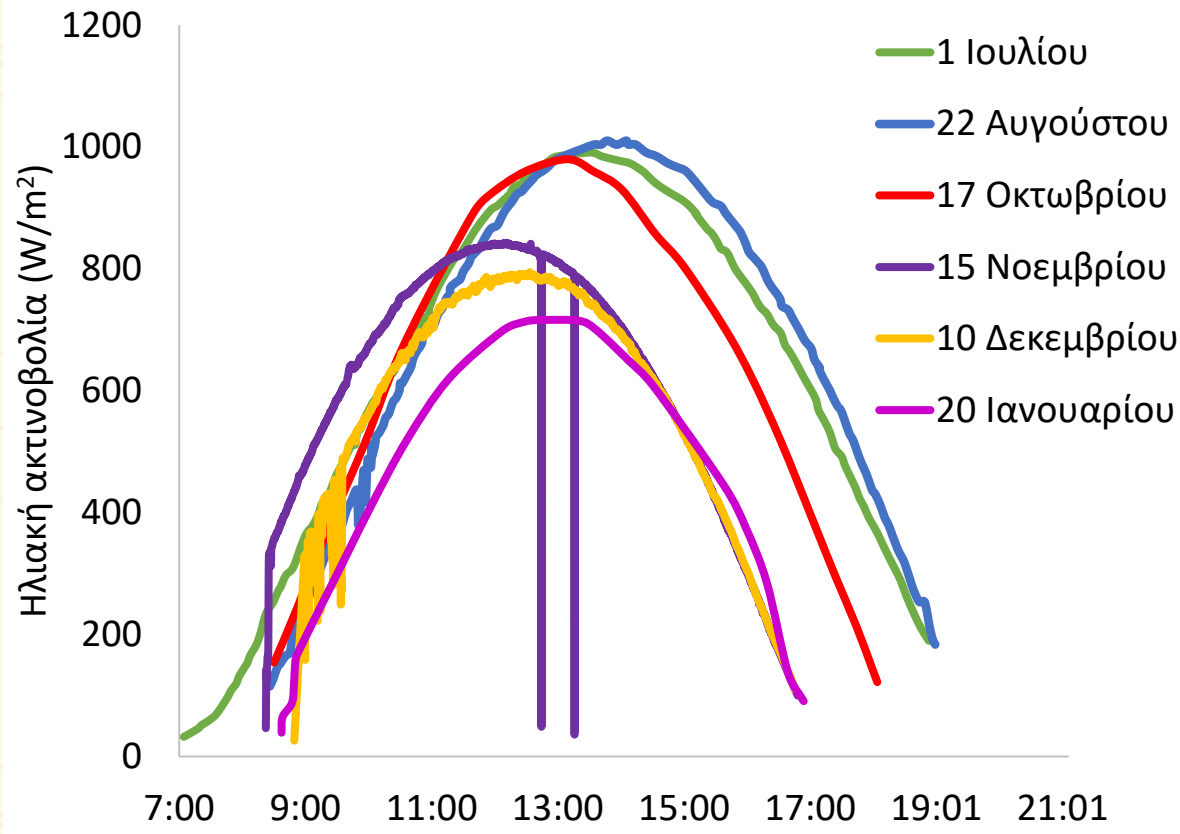


Παραδείγματα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Κτήριο Χημικών Μηχανικών Πάτρα

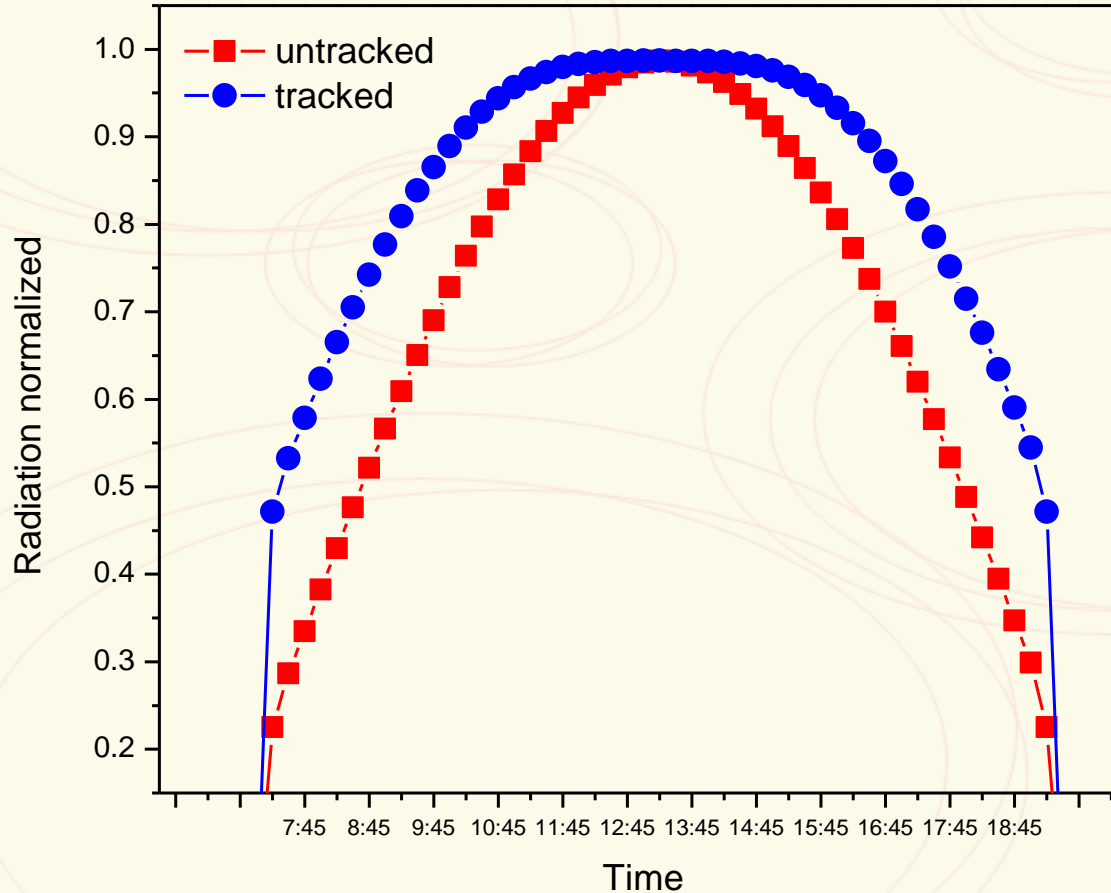
$\varphi \sim 38.14^\circ$, $\lambda \sim 21.4^\circ$

Καμπύλη ηλιακής ακτινοβολίας



Inclination =28o

Παραδείγματα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας



Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε σταθερό κεκλιμένο επίπεδο 30° και σε επιφάνεια προσαρμοσμένη σε δισδιάστατους ηλιοπαρακολουθητές