



ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

# Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ενότητα 1.1: Ηλιακή Γεωμετρία & Ηλιακή  
Ακτινοβολία

Δρ. Γεώργιος Μητσόπουλος

# Γιατί είναι απαραίτητη η Ηλιακή Γεωμετρία

- ▶ Η ηλιακή γεωμετρία καθορίζει:
  - ▶ τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στους συλλέκτες,
  - ▶ το ποσοστό εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας,
  - ▶ τη θερμική απόδοση του συστήματος.
- ▶ Κάθε λάθος στον προσανατολισμό ή στην κλίση οδηγεί σε:
  - ▶ άμεσα ενεργειακές απώλειες,
  - ▶ οικονομική υποβάθμιση του έργου.
- ▶ Η μελέτη ηλιακής γεωμετρίας είναι **απολύτως απαραίτητη** πριν από:
  - ▶ διαστασιολόγηση συλλεκτών,
  - ▶ επιλογή επιφάνειας,
  - ▶ υπολογισμό ετήσιας παραγωγής.

# Γεωγραφικό Πλάτος $\varphi$ (Latitude)

- ▶ Το γεωγραφικό πλάτος  $\varphi$  είναι η γωνία: μεταξύ του ισημερινού και της κάθετης στο σημείο εγκατάστασης.
- ▶ Παίρνει τιμές:
  - ▶  $0^\circ$  στον Ισημερινό
  - ▶  $90^\circ$  στον Βόρειο Πόλο
- ▶ Για την Ελλάδα:
  - ▶ Αθήνα:  $\varphi \approx 37.98^\circ$
  - ▶ Θεσσαλονίκη:  $\varphi \approx 40.64^\circ$
- ▶ Το  $\varphi$  επηρεάζει:
  - ▶ το ύψος του ήλιου στον ουρανό,
  - ▶ τη μέγιστη απόδοση των ηλιακών συλλεκτών.

# Ηλιακή Απόκλιση $\delta$ (Solar Declination)

- ▶ Η ηλιακή απόκλιση  $\delta$  είναι:

η γωνία μεταξύ των ακτίνων του ήλιου και του επιπέδου του ισημερινού.

- ▶ Μεταβάλλεται μέσα στο έτος λόγω της κλίσης του άξονα της Γης.
- ▶ **Μαθηματικός ορισμός:**

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin\left(\frac{360^\circ}{365}(284 + n)\right)$$

Όπου:

- ▶  $n$  = αριθμός ημέρας του έτους (1 έως 365)
- ▶ μέγιστο:  $+23.45^\circ$  (21 Ιουνίου)
- ▶ ελάχιστο:  $-23.45^\circ$  (21 Δεκεμβρίου)

**Φυσική σημασία:**

- ▶ Καθορίζει τη διάρκεια της ημέρας,
- ▶ Καθορίζει την ένταση της ακτινοβολίας.

# Ωριαία Γωνία $\omega$ (Hour Angle)

Η ωριαία γωνία  $\omega$  εκφράζει:

τη φαινομενική περιστροφή του ήλιου γύρω από τη Γη.

Ορισμός:

- ▶  $\omega = 0^\circ$  στο ηλιακό μεσημέρι
- ▶ κάθε ώρα  $\Rightarrow$  μεταβολή  $15^\circ$

Μαθηματικά:

$$\omega = 15^\circ \cdot (t_{solar} - 12)$$

Όπου:

- ▶  $t_{solar}$  =ηλιακή ώρα σε ώρες

Παράδειγμα:

- ▶ 10:00  $\rightarrow \omega = -30^\circ$
- ▶ 14:00  $\rightarrow \omega = +30^\circ$

# Γωνία Πρόσπτωσης $\theta$ (Incidence Angle)

Η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  είναι:

η γωνία μεταξύ της κάθετης στο συλλέκτη και της ηλιακής ακτίνας.

Είναι η σημαντικότερη γωνία για την απόδοση.

Γενική σχέση (για νότιο προσανατολισμό):

$$\cos\theta = \sin\delta \sin(\phi - \beta) + \cos\delta \cos(\phi - \beta) \cos\omega$$

Όπου:

- ▶  $\phi$  = γεωγραφικό πλάτος
- ▶  $\beta$  = κλίση συλλέκτη
- ▶  $\delta$  = απόκλιση
- ▶  $\omega$  = ωριαία γωνία

Όσο μικρότερη η  $\theta$ , τόσο μεγαλύτερη η απορροφούμενη ακτινοβολία.

# Κλίση Συλλέκτη Β (Tilt Angle)

Η κλίση Β είναι:

η γωνία μεταξύ του συλλέκτη και του οριζόντιου επιπέδου.

Τυπικές επιλογές:

- ▶ Για ετήσια βέλτιστη απόδοση:

$$\beta \approx \phi$$

- ▶ Για χειμερινή βελτιστοποίηση:

$$\beta \approx \phi + 10^\circ$$

- ▶ Για θερινή βελτιστοποίηση:

$$\beta \approx \phi - 10^\circ$$

Για Αθήνα:

- ▶  $\Phi = 38^\circ$
- ▶ Ετήσια:  $\beta \approx 38^\circ$
- ▶ Χειμώνας:  $\beta \approx 48^\circ$

# Αζιμούθιο Συλλέκτη $\gamma$ (Surface Azimuth)

Το αζιμούθιο  $\gamma$  είναι:

η απόκλιση του συλλέκτη από τον ακριβή Νότο.

- ▶ Νότιος προσανατολισμός  $\rightarrow \gamma = 0^\circ$
- ▶ Δυτικός  $\rightarrow \gamma < 0^\circ$
- ▶ Ανατολικός  $\rightarrow \gamma > 0^\circ$

Αποκλίσεις:

- ▶ έως  $\pm 10^\circ$   $\rightarrow$  αμελητέες απώλειες
- ▶  $\pm 30^\circ$   $\rightarrow$  απώλειες 5-10%
- ▶  $\pm 60^\circ$   $\rightarrow$  απώλειες  $> 20\%$

# Εξωατμοσφαιρική Ακτινοβολία $I_0$

Η  $I_0$  είναι:

η ηλιακή ακτινοβολία πριν εισέλθει στην ατμόσφαιρα.

Ωριαία εξίσωση:

$$I_0 = I_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta)$$

Όπου:

- ▶  $I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$  (ηλιακή σταθερά)
- ▶  $n$  = ημέρα έτους

Χρησιμοποιείται για:

- ▶ υπολογισμό  $H_0$
- ▶ προσδιορισμό συντελεστή αιθριότητας.

# Ημερήσια Εξωατμοσφαιρική Ενέργεια $H_0$

Η  $H_0$  είναι:

η ολοκληρωμένη  $I_0$  για όλη τη διάρκεια της ημέρας.

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] (\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \phi \sin \delta)$$

Όπου:

►  $\omega_s$  =γωνία δύσης του ήλιου

Η  $H_0$  αποτελεί τη βάση όλων των υπολογισμών ακτινοβολίας.

# Δείκτης Αιθριότητας $k_t$ (Clearness Index)

Ο δείκτης αιθριότητας  $k_T$  ορίζεται ως:

$$k_T = \frac{H}{H_0}$$

Όπου:

- ▶  $H$ : πραγματική ημερήσια ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο ( $Wh/m^2$ )
- ▶  $H_0$ : ημερήσια εξωατμοσφαιρική ακτινοβολία ( $Wh/m^2$ )

**Φυσική σημασία:**

- ▶  $k_T \approx 0.2-0.3$  :συννεφιά, έντονη σκέδαση
- ▶  $k_T \approx 0.5-0.6$  :μέτριες συνθήκες
- ▶  $k_T \approx 0.7-0.8$  :καθαρός ουρανός  
→ Ο  $k_T$  περιγράφει πόσο “καθαρή” είναι η ατμόσφαιρα ως προς τη διέλευση της ακτινοβολίας.

# Συνιστώσες Ηλιακής Ακτινοβολίας

Η ολική ακτινοβολία  $G$  στο οριζόντιο επίπεδο αποτελείται από:

$$G = G_b + G_d$$

Όπου:

- ▶  $G_b$  : άμεση (beam) ακτινοβολία
- ▶  $G_d$  : διάχυτη (diffuse) ακτινοβολία

Στο κεκλιμένο επίπεδο προστίθεται και η ανακλώμενη:

$$G_T = G_b + G_d + G_\rho$$

**Φυσική ερμηνεία:**

- ▶ Άμεση → προέρχεται κατευθείαν από τον ήλιο
- ▶ Διάχυτη → έχει σκεδαστεί από την ατμόσφαιρα
- ▶ Ανακλώμενη → προέρχεται από το έδαφος, τοίχους κ.λπ.

# Κλασματική Διάκριση Άμεσης & Διάχυτης Ακτινοβολίας

Η διάκριση γίνεται μέσω εμπειρικών μοντέλων (π.χ. Erbs):

$$\frac{H_d}{H} = f(k_T)$$

Όπου:

- ▶  $H_d$  : ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία
- ▶  $H$  : ημερήσια ολική
- ▶  $k_T$  : δείκτης αιθριότητας

Σημασία:

- ▶ Σε χαμηλό  $k_T$  → κυριαρχεί η διάχυτη
- ▶ Σε υψηλό  $k_T$  → κυριαρχεί η άμεση  
→ Απαιτείται για ακριβή υπολογισμό του  $G_T$ .

# Μετατροπή Ακτινοβολίας σε Κεκλιμένο Επίπεδο

Η ολική ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο:

$$G_T = G_b R_b + G_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + G_r \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

Όπου:

- ▶  $R_b$  : συντελεστής γεωμετρικής μετατροπής της άμεσης
- ▶  $\beta$ : κλίση συλλέκτη
- ▶  $\rho$ : συντελεστής ανάκλασης εδάφους (0.2-0.3 για αστικό περιβάλλον)

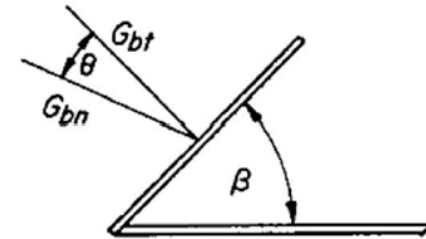
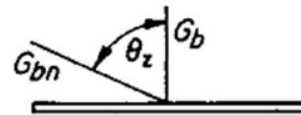
**Φυσική ερμηνεία όρων:**

- ▶ 1ος όρος → άμεση σε κεκλιμένο
- ▶ 2ος όρος → διάχυτη σε κεκλιμένο
- ▶ 3ος όρος → ανακλώμενη από έδαφος

# Συντελεστής $R_b$ : Ορισμός

Ο συντελεστής:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$



Όπου:

- ▶  $\theta$ : γωνία πρόσπτωσης στον συλλέκτη
- ▶  $\theta_z$ : ζενίθια γωνία (γωνία ήλιου με την κατακόρυφο)

**Φυσική σημασία:**

- ▶ Μετράει πόσο ευνοεί η κλίση την άμεση ακτινοβολία
- ▶ Τιμές:
  - ▶  $R_b > 1$  → ο συλλέκτης “βλέπει” καλύτερα τον ήλιο
  - ▶  $R_b < 1$  → δυσμενής προσανατολισμός

# R\_b για Νότιο Προσανατολισμό

Για συλλέκτη στραμμένο ακριβώς νότια ( $\gamma = 0$ ):

$$R_b = \frac{\sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \cos \omega}{\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega}$$

Όπου:

- ▶  $\phi$ : γεωγραφικό πλάτος
- ▶  $\beta$ : κλίση
- ▶  $\delta$ : απόκλιση
- ▶  $\omega$ : ωριαία γωνία

→ Αυτή είναι η βασική εξίσωση σχεδιασμού.

# Πώς Μεταβάλλεται το $R_b$ με την Ώρα

- ▶ Πρωί και απόγευμα:

- ▶  $|\omega|$  μεγάλο
- ▶  $R_b$  μικρότερο

- ▶ Μεσημέρι:

- ▶  $\omega \approx 0$
- ▶  $R_b$  μέγιστο

→ Γι' αυτό η μέγιστη θερμική ισχύς εμφανίζεται κοντά στο ηλιακό μεσημέρι.

# Τυπικές Τιμές Συντελεστή Ανάκλασης $\rho$

Επιφάνεια	$\rho$
Άσφαλτος	0.10
Χώμα	0.15-0.20
Σκυρόδεμα	0.25
Χιόνι	0.70-0.85

Όσο μεγαλύτερο το  $\rho$ , τόσο πιο σημαντική η ανακλώμενη συνιστώσα.

# Πραγματικές Τιμές Ακτινοβολίας στην Ελλάδα

Μέσες ετήσιες τιμές:

- ▶ Αθήνα: 1600-1700 kWh/m<sup>2</sup>
- ▶ Κρήτη: 1800-1900 kWh/m<sup>2</sup>
- ▶ Θεσσαλονίκη: 1500-1600 kWh/m<sup>2</sup>

→ Η Ελλάδα ανήκει στις πιο ηλιοφανεές χώρες της Ευρώπης.

# Μεταβατική Διαφάνεια προς Υπολογισμούς

Σε αυτή την ενότητα μάθαμε:

- ▶ Πώς ορίζεται η θέση του ήλιου στον ουρανό
- ▶ Πώς διαχωρίζεται η ακτινοβολία
- ▶ Πώς μεταφέρεται από οριζόντιο σε κεκλιμένο επίπεδο
- ▶ Πώς υπολογίζεται η πραγματική διαθέσιμη ακτινοβολία στον συλλέκτη

# Παράδειγμα Υπολογισμού για Αθήνα

Δεδομένα:

- ▶ Τοποθεσία: Αθήνα  $\rightarrow \phi = 38^\circ$
- ▶ Ημέρα: 21 Μαρτίου  $\rightarrow n = 80 \Rightarrow \delta \approx 0^\circ$
- ▶ Ώρα: 12:00  $\rightarrow \omega = 0^\circ$
- ▶ Κλίση συλλέκτη:  $\beta = 35^\circ$
- ▶ Προσανατολισμός: Νότιος  $\rightarrow \gamma = 0^\circ$
- ▶ Οριζόντια ωριαία ακτινοβολία:
  - ▶  $G = 700 \text{ W/m}^2$
  - ▶  $G_d = 150 \text{ W/m}^2$
- ▶ Στόχος:
  - ✓ Υπολογισμός  $G_T$  στο κεκλιμένο επίπεδο.

# Βήμα 1: Υπολογισμός R\_b

- ▶ Γενικός τύπος για νότιο συλλέκτη:

$$R_b = \frac{\sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \cos \omega}{\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega}$$

- ▶ Αντικατάσταση:

- ▶  $\delta = 0^\circ \rightarrow \sin \delta = 0, \cos \delta = 1$

- ▶  $\phi = 38^\circ, \beta = 35^\circ \rightarrow \phi - \beta = 3^\circ$

- ▶  $\omega = 0^\circ$

$$R_b = \frac{\cos(3^\circ)}{\cos(38^\circ)} = \frac{0.9986}{0.7880} = 1.267$$

## Βήμα 2: Διαχωρισμός $G$ σε $G_b$ και $G_d$

Από δεδομένα:

$$G = G_b + G_d \Rightarrow G_b = G - G_d$$
$$G_b = 700 - 150 = 550 \text{ W/m}^2$$

# Βήμα 3: Ολική Ακτινοβολία σε Κεκλιμένο Επίπεδο

Τύπος:

$$G_T = G_b R_b + G_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + G\rho \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

Αντικατάσταση:

►  $\rho = 0.2$

►  $\cos 35^\circ = 0.819$

1ος όρος:

$$550 \cdot 1.267 = 697 \text{ W/m}^2$$

2ος όρος:

$$150 \cdot \frac{1 + 0.819}{2} = 150 \cdot 0.9095 = 136.4$$

3ος όρος:

$$700 \cdot 0.2 \cdot \frac{1 - 0.819}{2} = 12.6$$

# Τελικό Αποτέλεσμα για $G_T$

$$G_T = 697 + 136.4 + 12.6 = 846 \text{ W/m}^2$$

Άρα ο συλλέκτης “βλέπει”:

$$G_T \approx 846 \text{ W/m}^2$$

→ Χωρίς σωστή κλίση θα είχαμε μόνο  $700 \text{ W/m}^2$ .

# Ενεργειακή Ερμηνεία του $R_b$

- ▶  $R_b = 1.267 \rightarrow$  ενίσχυση της άμεσης ακτινοβολίας
- ▶ Αν είχα  $\beta \neq$  σωστή:
  - ▶ μικρότερο  $R_b$
  - ▶ μικρότερη παραγόμενη θερμότητα
  - ▶ ανάγκη για περισσότερους συλλέκτες

# Απώλειες από Λανθασμένη Κλίση

Τυπικά σφάλματα:

- ▶  $|\beta - \phi| > 20^\circ \rightarrow$  απώλεια 10-20%
- ▶ Οριζόντια τοποθέτηση χειμώνα  $\rightarrow$  απώλεια έως 35%

# Σκιάσεις: Φυσική Ερμηνεία

Σκίαση σημαίνει:

- ▶ μερική ή ολική αποκοπή της άμεσης ακτινοβολίας
- ▶ δραστική μείωση του  $G_b$
- ▶ σε θερμικά συστήματα:
  - ▶ πτώση θερμοκρασίας
  - ▶ αυξημένη λειτουργία του βοηθητικού καυσίμου

# Συνθήκη Μη Σκίασης μεταξύ Σειρών Συλλεκτών

Γεωμετρική σχέση:

$$d \geq \frac{h}{\tan(\alpha_{min})}$$

Όπου:

- ▶  $d$ : απόσταση μεταξύ σειρών
- ▶  $h$ : ύψος συλλέκτη
- ▶  $\alpha_{min}$ : ελάχιστο ύψος ήλιου (χειμερινό μεσημέρι)

Για Αθήνα:

$$\alpha_{min} = 90^\circ - (\phi + 23.45^\circ) = 90^\circ - 61.45^\circ = 28.55^\circ$$

# Παράδειγμα Σκίασης

Αν:

$$h = 1.2 \text{ m}$$
$$d \geq \frac{1.2}{0.545} = 2.2 \text{ m}$$

Άρα κάτω από 2.2 m υπάρχει σκίαση τον χειμώνα.

# Άσκηση

Σε κτίριο στην Αθήνα:

- ▶  $\phi = 38^\circ$
- ▶  $\beta = 40^\circ$
- ▶  $\rho = 0.2$
- ▶  $G = 650 \text{ W/m}^2$
- ▶  $G_d = 180 \text{ W/m}^2$
- ▶ Ώρα: 13:00  $\rightarrow \omega = +15^\circ$
- ▶  $\delta = 10^\circ$

Ζητούνται:

- ▶ Υπολογισμός  $R_b$
- ▶ Υπολογισμός  $G_T$
- ▶ Σχολιασμός προσανατολισμού

# Λύση Βήμα 1: $R_b$

$$R_b = \frac{\sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \cos \omega}{\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega}$$

Αντικατάσταση:

- ▶  $\phi - \beta = -2^\circ$
- ▶  $\omega = 15^\circ$
- ▶  $\delta = 10^\circ$

$$R_b = 1.11$$

# Λύση Βήμα 2&3

Υπολογισμός  $G_b$

$$G_b = G - G_d = 650 - 180 = 470 \text{ W/m}^2$$

Υπολογισμός  $G_T$

$$G_T = 470 \cdot 1.11 + 180 \cdot \frac{1 + \cos 40^\circ}{2} + 650 \cdot 0.2 \cdot \frac{1 - \cos 40^\circ}{2}$$

$$G_T = 522 + 160 + 25 \Rightarrow \boxed{707 \text{ W/m}^2}$$

# Τελικό Συμπέρασμα Άσκησης

- ▶ Ο συλλέκτης δέχεται:

$$G_T > G \Rightarrow \text{ενεργειακό κέρδος}$$

- ▶ Ο προσανατολισμός είναι:

- ✓ θερμικά αποδεκτός
- ✓ όχι ιδανικός για μέγιστο χειμερινό φορτίο