



ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

ΑΣΠΑΙΤΕ

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ενότητα 2: Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Δρ. Γεώργιος Μητσόπουλος

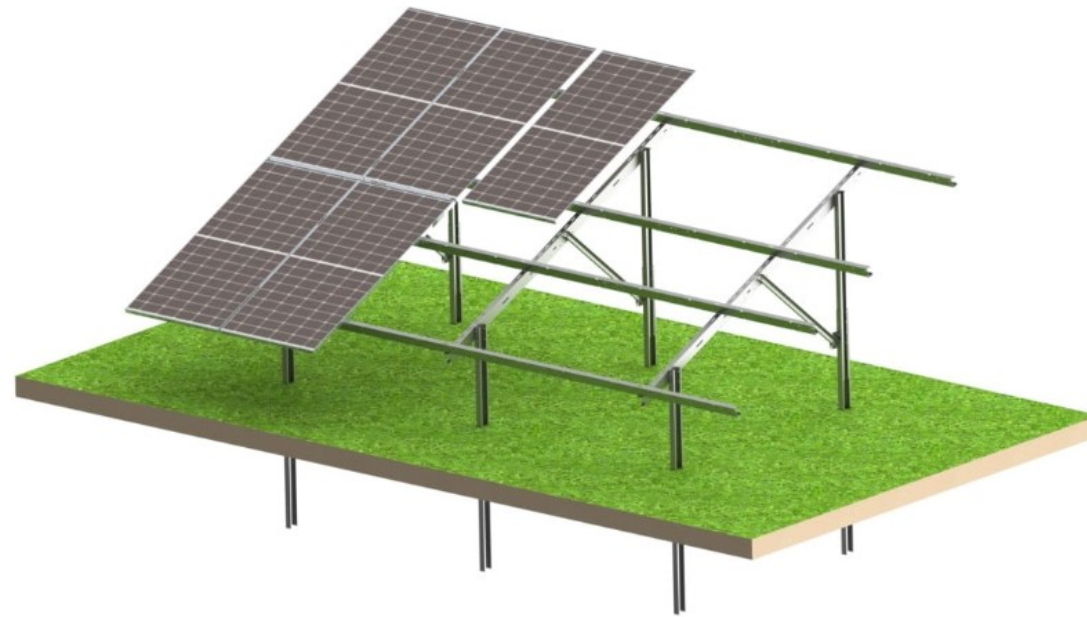
Μαθησιακοί στόχοι

Με το τέλος της ενότητας θα μπορείς:

- ▶ να εξηγείς το Φ/Β φαινόμενο (ζώνες ενέργειας, ζεύγη e-h),
- ▶ να ερμηνεύεις καμπύλες $I-V$ και $P-V$ και την έννοια MPP,
- ▶ να υπολογίζεις ετήσια παραγωγή (με PR, θερμοκρασία, απώλειες),
- ▶ να αξιολογείς επίδραση κλίσης/προσανατολισμού/σκιάσεων,
- ▶ να περιγράφεις βασικά στοιχεία σχεδιασμού (inverter, καλώδια, ασφάλειες).

Τι είναι ένα φωτοβολταϊκό σύστημα

Ορισμός: σύστημα που μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ισχύ DC μέσω Φ/Β γεννήτριας (modules) και στη συνέχεια σε AC μέσω inverter.



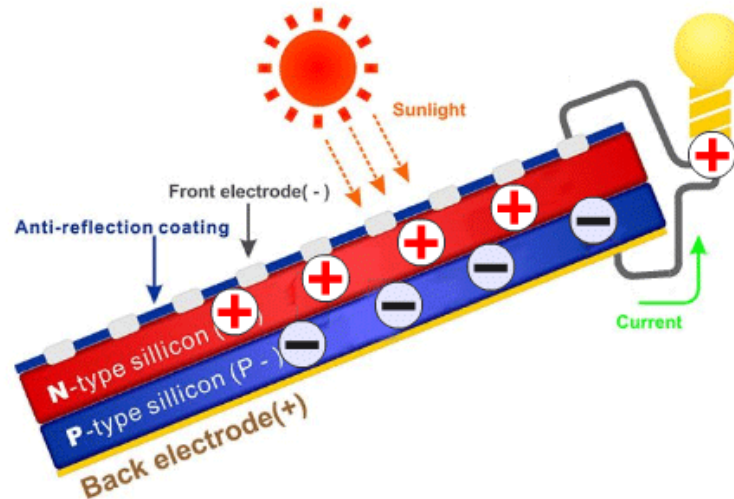
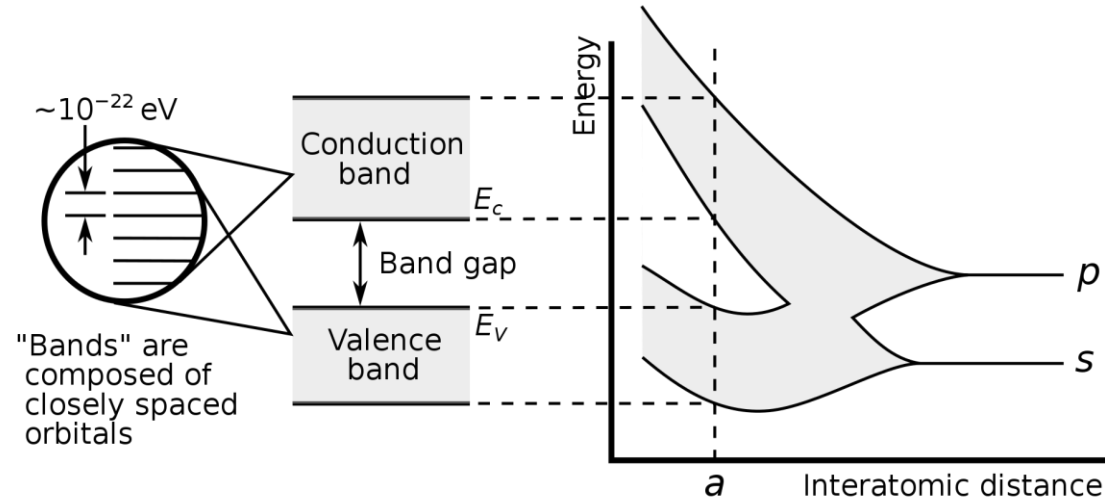
Περιλαμβάνει: πλαίσια, βάσεις, inverter/ρυθμιστές, μετρητές, καλωδίωση, γειώσεις, προστασίες, και (προαιρετικά) αποθήκευση.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο (σε επίπεδο υλικού)

Η ακτινοβολία με ενέργεια $h\nu \geq E_g$ διεγείρει ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Η ένωση p-n δημιουργεί εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που «χωρίζει» τα φορτία και παράγει ρεύμα όταν το κύτταρο φορτιστεί.

Όροι:

- ▶ $h\nu$: ενέργεια φωτονίου, E_g : ενεργειακό χάσμα (eV),
- ▶ e^-/h^+ : ηλεκτρόνιο/οπή, p-n: ένωση θετικού-αρνητικού ημιαγωγού.



Eg Ενεργειακό Χάσμα

Το ενεργειακό χάσμα (E_g) band gap) είναι η ελάχιστη ενέργεια που χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο για να φύγει από τη ζώνη σθένους και να περάσει στη ζώνη αγωγιμότητας. Ένα φωτόνιο μπορεί να απορροφηθεί **μόνο** αν η ενέργειά του $E_{ph} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ είναι **μεγαλύτερη ή ίση** από το E_g . Αν είναι μικρότερη, περνάει «διάφανο» μέσα από το υλικό χωρίς να δημιουργήσει ρεύμα.

Κόψιμο φάσματος (ποια μήκη κύματος απορροφώνται):

Οριακό μήκος κύματος που ακόμη απορροφάται:

$$\lambda_{cut} [nm] \approx \frac{1240}{E_g [eV]}$$

Άρα:

Si, $E_g = 1.12 \text{ eV} \Rightarrow \lambda_{cut} \approx \frac{1240}{1.12} \approx 1107 \text{ nm}$ (απορροφά μέχρι το κοντινό υπέρυθρο).

CdTe, $E_g = 1.45 \text{ eV} \Rightarrow \lambda_{cut} \approx 855 \text{ nm}$.

GaAs, $E_g = 1.43 \text{ eV} \Rightarrow \lambda_{cut} \approx 867 \text{ nm}$.

Γιατί το E_g συνδέεται με το «θεωρητικό όριο απόδοσης»»

Αν το φωτόνιο έχει **ενέργεια μεγαλύτερη** από το E_g , μόνο **περίπου E_g** μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια· το «παραπάνω» γίνεται θερμότητα (thermalization loss). Αν έχει **λιγότερη** από E_g , **δεν** απορροφάται (απώλεια μετάδοσης). Έτσι υπάρχει θεμελιώδης «δίκοπο μαχαίρι»:

Με **μεγάλο E_g** αυξάνεται το θεωρητικό V_{oc} αλλά «κόβεις» πολλά κόκκινα/IR φωτόνια → μικρότερο ρεύμα.

Με **μικρό E_g** απορροφάς πολλά φωτόνια (μεγαλύτερο ρεύμα), αλλά πέφτει το V_{oc} και αυξάνουν οι θερμικές απώλειες.

Η ισορροπία αυτών των δύο μηχανισμών δίνει το **όριο Shockley-Queisser** για μονή ένωση υπό ηλιασμό 1 sun (AM1.5G): μέγιστη θεωρητική απόδοση ~**33%** κοντά σε $E_g \sim 1.3-1.4$ eV. Γι' αυτό υλικά όπως **GaAs (1.43 eV)** ή συστήματα που «μιμούνται» αυτό το εύρος εμφανίζουν πολύ υψηλές θεωρητικές αποδόσεις. Το **Si (1.12 eV)** έχει χαμηλότερο E_g , άρα υψηλό ρεύμα αλλά χαμηλότερο δυνατό V_{oc} και περισσότερη θερμοποίηση, ενώ το **CdTe (1.45 eV)** βρίσκεται πιο κοντά στο «γλυκό σημείο» του θεωρητικού ορίου.

Μικρό αριθμητικό παράδειγμα thermalization:

Σε κελί Si, $E_g = 1.12$ eV. Ένα φωτόνιο 2.0 eV απορροφάται, αλλά το πολύ **1.12 eV** μπορεί να αξιοποιηθεί ηλεκτρικά· το **0.88 eV** χάνεται ως θερμότητα.

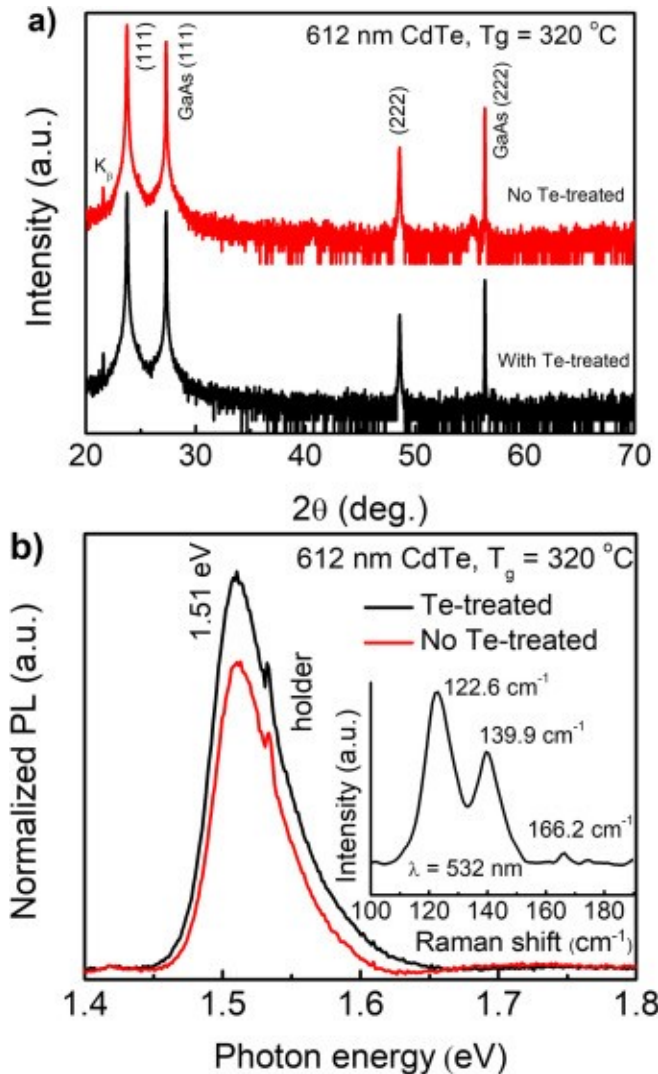
Ενεργειακό χάσμα και υλικά

Το E_g καθορίζει ποια μήκη κύματος απορροφώνται και το θεωρητικό όριο απόδοσης.

Παράδειγμα: Si 1.12 eV, CdTe 1.45 eV, GaAs 1.43 eV.

Μικρό E_g → καλή απορρόφηση, μεγαλύτερες θερμικές απώλειες

Μεγάλο E_g → λιγότερη απορρόφηση, υψηλότερη V_{oc} .



Si Πυρίτιο (Silicon)

Χημικός τύπος: Si

Ενεργειακό χάσμα: ≈ 1.12 eV (έμμεσο band gap)

Είδος υλικού: Κρυσταλλικός ημιαγωγός (μονο- ή πολυ-κρυσταλλικός).

Κύρια πλεονεκτήματα:

- Πολύ ώριμη τεχνολογία,
- άφθονο στη φύση (από διοξείδιο του πυριτίου / άμμο),
- μεγάλη διάρκεια ζωής (> 25 έτη),
- καλή μηχανική αντοχή.

Μειονεκτήματα:

- Λόγω του έμμεσου E_g χρειάζεται σχετικά παχιά πλάκα (~ 180 μm) για να απορροφήσει αρκετό φως,
- θερμικές απώλειες υψηλές σε ζεστά κλίματα.

Τύποι εφαρμογών: Τα περισσότερα εμπορικά Φ/Β σήμερα είναι μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά **Si**.

CdTe - Τελλουριούχο Κάδμιο (Cadmium Telluride)

Χημικός τύπος: CdTe

Ενεργειακό χάσμα: ≈ 1.45 eV (άμεσο band gap)

Είδος υλικού: Ημιαγωγός λεπτού υμενίου.

Πλεονεκτήματα:

- Ιδανικό E_g (1.4–1.5 eV) \rightarrow κοντά στο θεωρητικό όριο Shockley–Queisser (33%),
- Άμεσο E_g \rightarrow ισχυρή απορρόφηση \rightarrow μικρό πάχος (~ 3 μm),
- Καλή θερμική συμπεριφορά και χαμηλό κόστος παραγωγής.

Μειονεκτήματα:

- Περιέχει κάδμιο (τοξικό) \rightarrow απαιτείται ανακύκλωση,
- περιορισμένη διαθεσιμότητα τελλουρίου.

Τύποι εφαρμογών: Μεγάλα πεδία λεπτού υμενίου (π.χ. First Solar).

GaAs - Αρσενιούχο Γάλλιο (Gallium Arsenide)

Χημικός τύπος: GaAs

Ενεργειακό χάσμα: ≈ 1.43 eV (άμεσο band gap)

Είδος υλικού: Κρυσταλλικός III–V ημιαγωγός (ένωση Ga + As).

Πλεονεκτήματα:

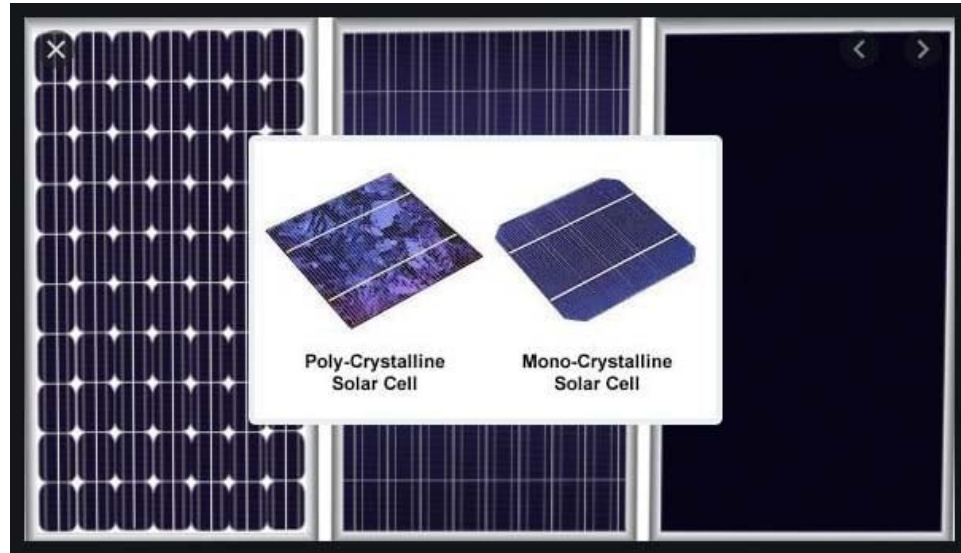
- Υψηλή απόδοση ($> 29\%$ σε single junction),
- Άμεσο $E_g \rightarrow$ πολύ λεπτό στρώμα απορρόφησης,
- Ανθεκτικό σε υψηλές θερμοκρασίες και ακτινοβολία \rightarrow ιδανικό για δορυφορικά Φ/Β.

Μειονεκτήματα:

- Πολύ υψηλό κόστος παραγωγής μονοκρυστάλλων GaAs,
- Το αρσενικό είναι τοξικό.
- **Τύποι εφαρμογών:** Διαστημικά Φ/Β, πολυενωσιακές (tandem) κυψέλες, περοβσκίτικα-GaAs stack.

Τύποι κυψελών και modules

- ▶ **Μονοκρυσταλλικό Si:** υψηλές αποδόσεις (22-25% στα modules TOPCon/PERC).
- ▶ **Πολυκρυσταλλικό Si:** 18-22%.
- ▶ **Λεπού υμενίου (CdTe, CIGS, a-Si):** χαμηλότερες αποδόσεις αλλά καλύτερη συμπεριφορά διάχυτης ακτινοβολίας.
- ▶ **Νεότερα: Perovskite και tandem (Si+perovskite)** με αυξανόμενα ρεκόρ.

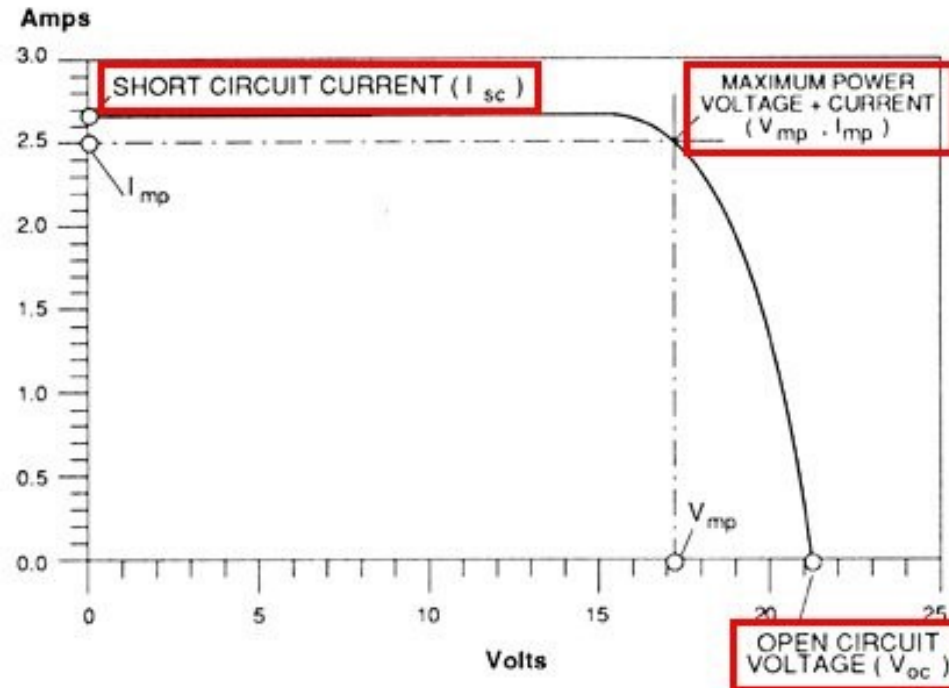


Ηλεκτρικά μεγέθη κυψέλης και module

- ▶ Βασικά σημεία στην καμπύλη I-V:
 - I_{sc} (βραχυκύκλωσης), V_{oc} (ανοικτού κυκλώματος),
 - (V_{mp}, I_{mp}) στο MPP.Η μέγιστη ισχύς $P_{max} = V_{mp} I_{mp}$ και η απόδοση:

- ▶
$$\eta = \frac{P_{max}}{G \cdot A}$$

Όροι: G : ακτινοβολία (W/m^2), A : επιφάνεια (m^2).



Ρεύμα βραχυκύκλωσης

Ορισμός:

Το I_{sc} είναι το ρεύμα που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο όταν τα άκρα του είναι βραχυκυκλωμένα, δηλαδή όταν η τάση είναι $V = 0 \text{ V}$.

Φυσική σημασία:

Εκφράζει πόσοι φορείς φορτίου (ηλεκτρόνια/οπές) παράγονται και συλλέγονται από το ηλιακό φως. Είναι άμεσα ανάλογο της έντασης της ακτινοβολίας και εξαρτάται επίσης από το φάσμα και τη θερμοκρασία.

Μαθηματικά (απλοποιημένα):

$$\blacktriangleright I_{sc} \approx I_{ph} \propto G$$

όπου

I_{ph} : φωτόρευμα (ρεύμα που δημιουργείται από φωτόνια),

G : προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2).

Άρα, αν η ακτινοβολία διπλασιαστεί, περίπου διπλασιάζεται και το I_{sc} .

Παράδειγμα:

Σε κυψέλη $156 \times 156 \text{ mm}$, για $G = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$, $I_{sc} \approx 9 \text{ A}$.

Αν πέσει η ακτινοβολία στα $500 \text{ W}/\text{m}^2$, τότε $I_{sc} \approx 4.5 \text{ A}$.

Τάση ανοικτού κυκλώματος

Ορισμός:

Η V_{oc} είναι η τάση στα άκρα της κυψέλης όταν δεν υπάρχει ροή ρεύματος ($I = 0$). Είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να αναπτυχθεί, και εξαρτάται από το υλικό και τη θερμοκρασία.

Μαθηματική σχέση (από εξίσωση διόδου):

$$V_{oc} = nV_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right)$$

όπου

n : ιδανικότητα διόδου (1-2),

$V_T = \frac{kT}{q}$: θερμοκή τάση (~25.7 mV στους 25 °C),

I_{ph} : φωτόρευμα,

I_0 : ρεύμα κόρου (εξαρτάται εκθετικά από T).

Φυσική σημασία:

Η V_{oc} καθορίζεται από το ενεργειακό χάσμα E_g του υλικού – όσο μεγαλύτερο το E_g , τόσο μεγαλύτερη η δυνατή V_{oc} .

Αυξάνει λογαριθμικά με την ακτινοβολία, αλλά μειώνεται περίπου κατά $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ανά κυψέλη Si με την αύξηση θερμοκρασίας.

Παράδειγμα:

Για κρυσταλλικό Si module 60 κυψελών:

$V_{oc} @ 25^\circ\text{C} \approx 37 \text{ V}$

$V_{oc} @ 60^\circ\text{C} \approx 37 - (35 \times 2 \text{ mV}) \approx 36.3 \text{ V}$ (πτώση ~2%).

Συντελεστής πλήρωσης (FF)

- ▶ Συντελεστής πλήρωσης (FF)

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{V_{mp}I_{mp}}{V_{oc}I_{sc}}$$

- ▶ Τυπικά **0.75-0.82** για Si modules. Μεγαλύτερο FF → «τετραγωνικότερη» I-V → υψηλότερη αξιοποιήσιμη ισχύς.
- ▶ Όροι: βλέπε παραπάνω.

Θερμοκρασιακή εξάρτηση ισχύος

Η θερμοκρασία κυψέλης T_c επηρεάζει αρνητικά την ισχύ:

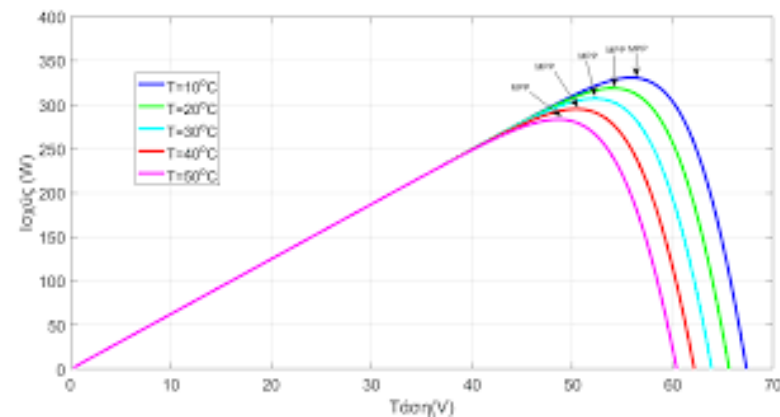
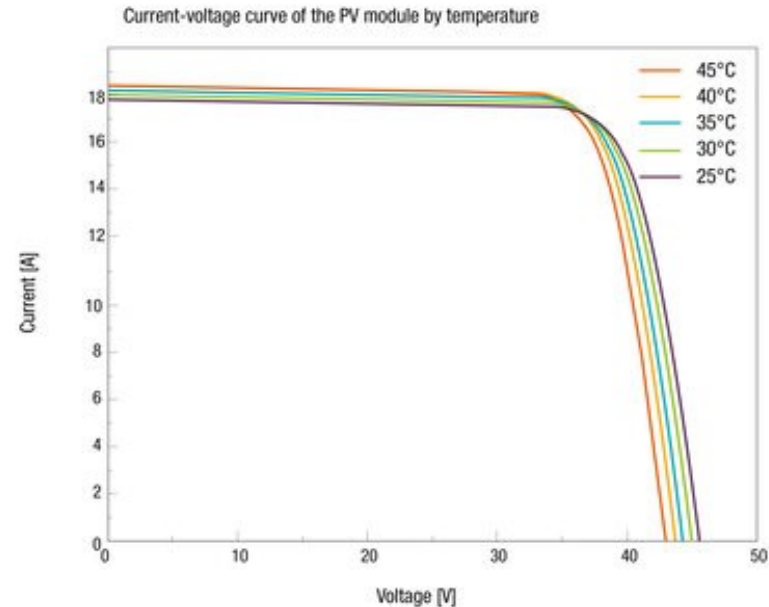
► $P(T_c) \approx P_{STC} [1 - \beta (T_c - 25^\circ C)]$

Όροι:

β : θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος (%/°C),

P_{STC} : ισχύς σε STC ($G=1000$ W/m², AM1.5, 25°C).

Για Si, $\beta \approx -0.40 \dots -0.45$ %/°C.



Φυσική & καμπύλες I-V

Μοντέλο “single-diode”:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

Όροι:

- ▶ I_{ph} : φωτόρευμα (\approx ανάλογο του G).
- ▶ I_0 : ρεύμα κόρου διόδου (επηρεάζεται έντονα από T).
- ▶ R_s : ωμική αντίσταση σειράς (καλωδιώσεις/μεταλλώσεις).
- ▶ R_{sh} : παράλληλη αντίσταση (διαρροές).
- ▶ n : ιδανικότητα διόδου ($\approx 1-2$).
- ▶ $V_T = \frac{kT}{q}$: θερμική τάση (≈ 25.7 mV στους 25 °C).

Συνεπαγωγές:

- ▶ Αύξηση **G** $\uparrow \Rightarrow \uparrow I_{ph} \uparrow \Rightarrow I_{sc}$, μικρή επίδραση στη **Voc**.
- ▶ Αύξηση **T** $\uparrow \Rightarrow \uparrow I_0 \Rightarrow$ πτώση **Voc**, μικρή αύξηση **Isc** \Rightarrow καθαρή πτώση **Pmax**.
- ▶ Μεγάλο **R_s** «στρογγυλεύει» το γόνατο \rightarrow μικρό **FF**.
- ▶ Μικρό **R_{sh}** αυξάνει διαρροές \rightarrow μικρό **FF**.

Θερμοκρασία λειτουργίας (NOCT)

Πρακτική εκτίμηση T_c από NOCT:

$$\blacktriangleright T_c \approx T_{amb} + \frac{G}{800} (NOCT - 20^\circ C)$$

Όροι:

T_{amb} : θερμοκρασία περιβάλλοντος,

G : ακτινοβολία,

NOCT: Nominal Operating Cell Temperature (συνθήκες αναφοράς: 800 W/m², 20° C, 1 m/s, στήριξη open-rack).

Θερμοκρασιακές επιδράσεις

Προσεγγίσεις συντελεστών:

$$\frac{dV_{oc}}{dT} \approx -2.1 \text{ mV}/^\circ\text{C} \text{ ανά κελί Si, } \frac{1}{P} \frac{dP}{dT} = \beta \approx -0.40 \dots -0.45\%/^\circ\text{C}$$
$$P(T_c) \approx P_{STC} [1 - \beta (T_c - 25^\circ\text{C})]$$

Μεγάλη σημασία έχει η **T κυψέλης** T_c (όχι μόνο περιβάλλοντος). Χρήσιμος εμπειρικός υπολογισμός:

$$T_c \approx T_{amb} + \frac{G}{800} (NOCT - 20^\circ\text{C})$$

Απόδοση συστήματος (Performance Ratio, PR)

$$PR = \frac{E_{AC}}{G_{POA} P_{nom}/1000}$$

Ενσωματώνει όλες τις απώλειες (θερμικές, inverter, DC/AC, mismatch, ρύπανση).
Στην Ελλάδα συχνά **0.78-0.82**.

Όροι:

E_{AC} : ετήσια AC παραγωγή (kWh),

G_{POA} : ακτινοβολία στο επίπεδο των πάνελ (kWh/m²),

P_{nom} : εγκατεστημένη kWp.

Απώλειες του PR

Σπάσε το PR σε απώλειες:

PR

$$= (1 - L_{jrr}) (1 - L_T) (1 - L_{soiling}) (1 - L_{mismatch}) (1 - L_{ohmic}) \eta_{inv} (1 - L_{aux})$$

Ενδεικτικά για καλή ελληνική εγκατάσταση:

Ίριση/φασματικές $L_{jrr} \sim 1\%$,Θερμοκρασίας $L_T \sim 6 - 9\%$,Ρύπανση 3-5%,
Mismatch 1-2%, Ωμικές 1-2%, $\eta_{inv} \sim 97\%$ (δηλ. 3% απώλεια), Βοηθητικά 1%.
Προκύπτει $PR \approx 0.78-0.82$.

Κλίση (β) & προσανατολισμός (αζιμούθιο γ)



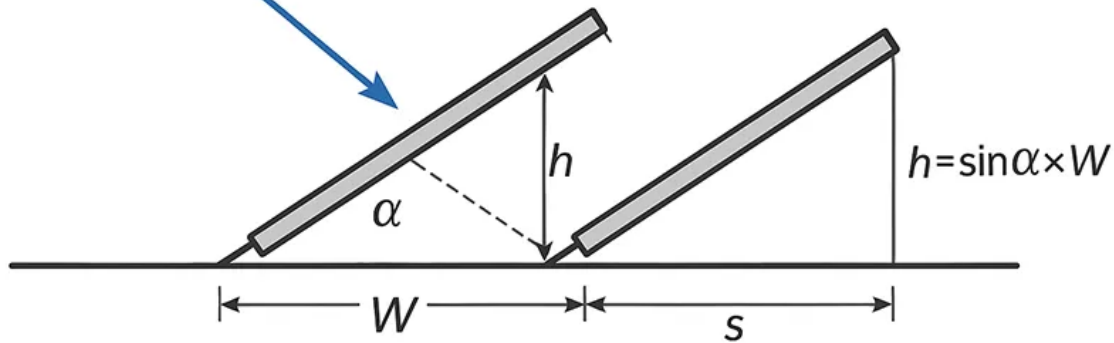
β



Η βέλτιστη κλίση για ετήσια παραγωγή προσεγγίζει το γεωγραφικό πλάτος.

Λάρισα ($\varphi=39.6^\circ$) \rightarrow
 $\beta_{opt} \approx 35^\circ$, $\gamma \approx 0^\circ$
(νότος).

Οι αποκλίσεις $\pm 15^\circ$ έχουν μικρή επίπτωση (<3-4%).



Minimum spacing between rows

$$s = h / \tan \beta$$

Γεωμετρία πρόσπτωσης & γωνία πρόσπτωσης (AOI)

Η **AOI θ** είναι η γωνία ανάμεσα στο κάθετο της επιφάνειας και τη διεύθυνση της ακτινοβολίας.

Μεγάλη AOI \rightarrow αυξημένες ανακλάσεις \rightarrow μειωμένο (**τα**) (διαπερατότητα-απορρόφηση).

Αντιμετώπιση: σωστή κλίση, αντιανακλαστικές επιστρώσεις, ιχνηλάτηση.

Οι οπτικές απώλειες λόγω **AOI** συχνά προσεγγίζονται από **ASHRAE IAM**:

$$IAM(\theta) = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right), 0 \leq \theta \leq 80^\circ$$

Όροι: θ : γωνία πρόσπτωσης, b_0 : εμπειρική παράμετρος υάλωσης ($\approx 0.05-0.20$).

Για γωνίες $> 60^\circ$ οι απώλειες αυξάνουν έντονα

αντι-ανακλαστικές επιστρώσεις βελτιώνουν το IAM.

Σκιάσεις: φαινόμενο & επιπτώσεις

Σκίαση ενός μέρους ενός string μπορεί να μειώσει **δυσανάλογα** την ισχύ (mismatch). Χρήση **bypass** διόδων ανά σειρά κυψελών περιορίζει την απώλεια.

Σχεδιασμός: αποστάσεις αποφυγής σκίασης (χειμερινό ήλιο), διάταξη string.

Κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο (ή σειρά πλαισίων) **προβάλλει σκιά** πίσω του λόγω του ύψους του και της γωνίας ύψους του Ήλιου (**h**).

Η σκιά είναι **μακρύτερη** το χειμώνα, επειδή ο Ήλιος βρίσκεται χαμηλά στον ορίζοντα, και **κοντύτερη** το καλοκαίρι.

Όταν ο Ήλιος είναι χαμηλά (μικρή **h**) \Rightarrow μακριά σκιά \Rightarrow κίνδυνος να καλύψει την επόμενη σειρά.

Όταν ο Ήλιος είναι ψηλά (μεγάλη **h**) \Rightarrow μικρή σκιά \Rightarrow δεν υπάρχει σκίαση.

Ακόμα και μερική σκίαση λίγων κυψελών σε ένα module μπορεί να μειώσει **όλη** την ισχύ της σειράς λόγω της σύνδεσης σε σειρά (series connection).

Οι **bypass** διόδοι προστατεύουν, αλλά δεν εξαλείφουν τις απώλειες.

Γεωμετρική σχέση για σκίαση

Ας ορίσουμε:

H : το καθαρό ύψος του πίσω μέρους του πάνελ πάνω από το μπροστινό (σε κάθετη προβολή).

Αν τα πάνελ έχουν κλίση β , και το μήκος τους (ύψος πλευράς) είναι L , τότε

$$H=L\sin(\beta)$$

D : η οριζόντια απόσταση (βάση προς βάση) μεταξύ δύο σειρών.

h : η γωνία ύψους του Ήλιου (solar elevation angle) τη στιγμή που μας ενδιαφέρει.

- ▶ Η σκιά που ρίχνει το πάνελ έχει μήκος: $L_s=H/\tan(h)$
- ▶ Για να μην υπάρξει σκίαση, πρέπει: $D\geq L_s=H/\tan(h)$

Εφαρμογή για «ηλιακό μεσημέρι» χειμερινού ηλιοστασίου

Η χαμηλότερη γωνία του Ήλιου συμβαίνει στις **21 Δεκεμβρίου** (χειμερινό ηλιοστάσιο), επομένως εκεί υπολογίζουμε τη χειρότερη σκιά.

Η γωνία ύψους (solar elevation) στο ηλιακό μεσημέρι δίνεται από:

$$h = 90^\circ - |\varphi - \delta|$$

όπου

- ▶ φ : γεωγραφικό πλάτος,
- ▶ δ : ηλιακή απόκλιση (στις 21/12, $\delta = -23.45^\circ$).

Παράδειγμα: Λάρισα ($\varphi = 39.6^\circ$)

- ▶ $h = 90^\circ - |39.6 - (-23.45)| = 90^\circ - 63.05^\circ = 26.95^\circ$

Ας έχουμε πάνελ με μήκος $L = 1.6\text{m}$ και κλίση $\beta = 35^\circ$:

Άρα, για μη σκίαση στο ηλιακό μεσημέρι της 21/12,

- ▶ $D_{min} \approx 1.8\text{ m}$

Γενική εξίσωση για Σκίαση

- ▶ Για οποιαδήποτε τοποθεσία: $D_{min} = L \sin(\beta) / \tan(90^\circ - |\varphi - \delta|)$
- ▶ και συνιστώμενη απόσταση: $D_{design} = 1.1 D_{min}$

Όπου

φ = Γεωγραφικό Πλάτος, πχ Αθήνα = +37,98°

δ = Ηλιακή Απόκλιση

Είναι η γωνία ανάμεσα στις ακτίνες του Ήλιου και στο επίπεδο του ισημερινού.

Μεταβάλλεται καθώς η Γη γυρίζει γύρω από τον Ήλιο (λόγω της κλίσης του άξονα της Γης, 23.45°).

Καθορίζει σε ποιο γεωγραφικό πλάτος ο Ήλιος βρίσκεται κατακόρυφα κάθε μέρα του έτους.

Η δ αλλάζει με την ημέρα του έτους (n) περίπου σύμφωνα με τη σχέση:

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

όπου n = αριθμός ημερών του έτους (π.χ. 1 Ιανουαρίου → $n=1$, 21 Ιουνίου → $n \approx 172$).

Ενεργειακό ισοζύγιο απωλειών

Κύριες απώλειες:

- ▶ θερμοκρασίας,
- ▶ ρύπανσης/καθαρισμού,
- ▶ mismatch,
- ▶ καλωδίων DC/AC,
- ▶ inverter,
- ▶ μετασχηματιστών,
- ▶ διαθέσιμου χρόνου λειτουργίας (availability).

Στόχος: ελαχιστοποίηση και πρόβλεψη τους στον υπολογισμό παραγωγής.

Ηλιακό δυναμικό Ελλάδας

Πόλη	G_POA ετήσιο (kWh/m ²)	Παραγωγή (kWh/kWp)
Αθήνα	~1750	1450–1550
Λάρισα	~1700	1400–1500
Ηράκλειο	~1950	1650–1750
Φλώρινα	~1550	1300–1400

Πηγή: PVGIS/JRC

κεκλιμένη επιφάνεια, β≈πλάτος, νότιος προσανατολισμός.

Παράδειγμα Λάρισας: δεδομένα & υπόθεση

Θα εκτιμήσουμε την ετήσια παραγωγή για **5 kWp**, **PR=0.80**, **G_POA=1700 kWh/m²** ($\beta \approx 35^\circ$, νότιος προσανατολισμός).

Θα εφαρμοστούν και διορθώσεις για θερμοκρασία (χρήση β) και τυπικές απώλειες καλωδίων.

Υπολογισμός ετήσιας παραγωγής

- ▶ Θεωρητική παραγωγή χωρίς θερμικές απώλειες:

$$E_{th} = P_{nom} \cdot G_{POA} = 5 \text{ kWp} \cdot 1700 = 8500 \text{ kWh}$$

- ▶ Εφαρμογή PR:

$$E_0 = PR \cdot E_{th} = 0.80 \cdot 8500 = 6800 \text{ kWh}$$

- ▶ Εκτίμηση πρόσθετης απώλειας θερμοκρασίας (ήδη μερικώς ενσωματωμένη στο PR, αλλά δείχνουμε τη λογική):

Ας θεωρήσουμε μέση απώλεια 2-3% → **E ≈ 6.6-6.7 MWh.**

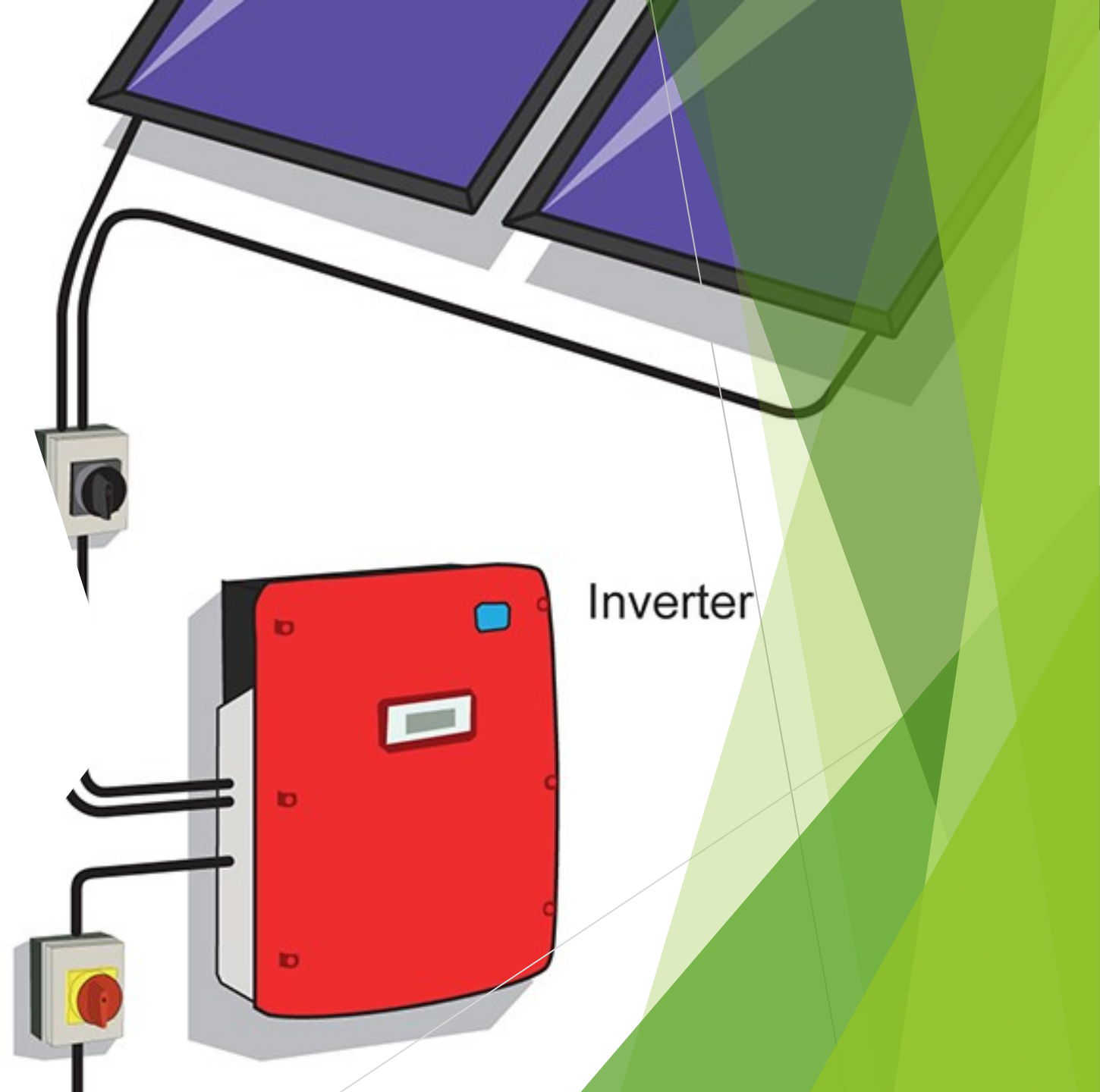
- ▶ Για απλοποίηση σε μάθημα, κρατάμε **E ≈ 6.8 MWh** όταν το PR έχει ήδη βαθμονομηθεί για τοπικές συνθήκες.

Inverter: ρόλος & απόδοση

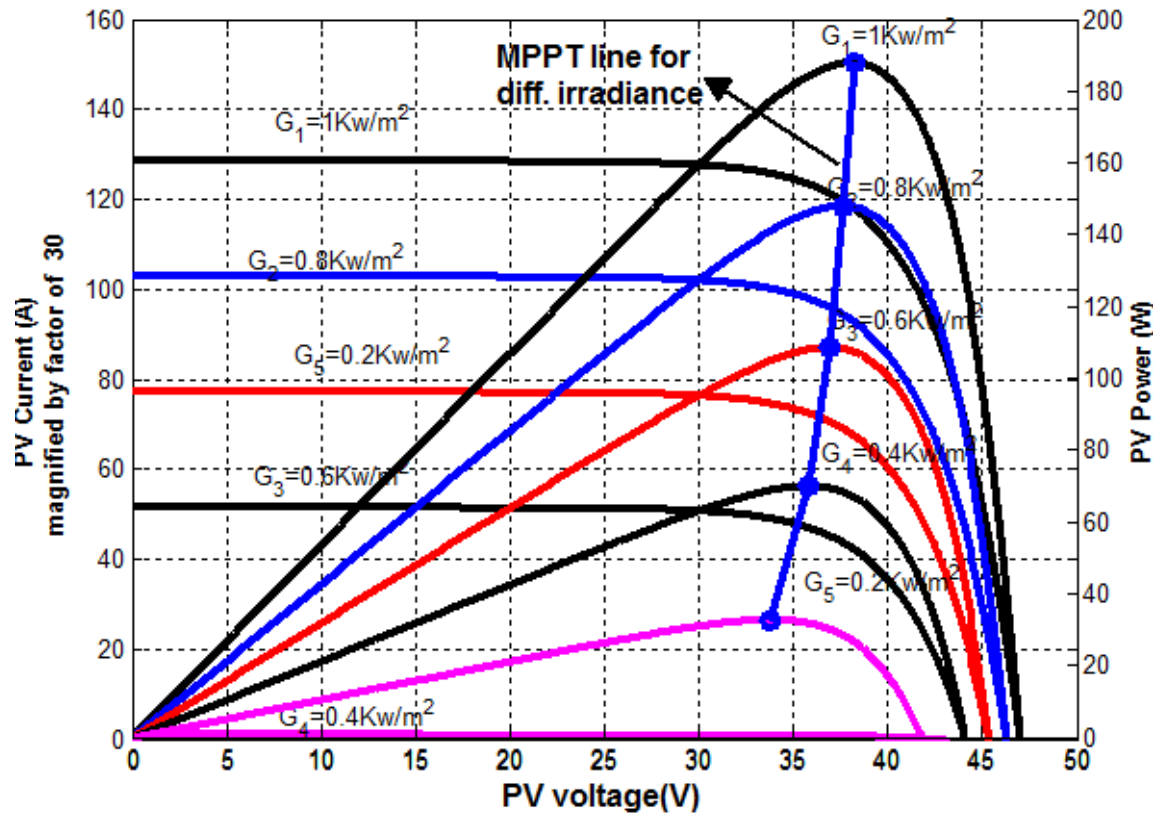
Ο inverter μετατρέπει DC→AC, εκτελεί **MPPT** (Maximum Power Point Tracker), συγχρονίζει με δίκτυο, παρέχει προστασίες.

Απόδοση $\eta_{inv} \approx 96-98\%$.

Η σωστή επιλογή ισχύος/εύρους τάσης MPP είναι κρίσιμη για να «πιάνονται» τα σημεία λειτουργίας όλων των strings.



MPPT και σημείο μέγιστης ισχύος



Ο MPPT (Maximum Power Point Tracker) σαρώνει την I-V ώστε να λειτουργεί στο (V_{mp} , I_{mp}).

Σε σκιάσεις ή με άνισα strings, πολλαπλά τοπικά MPP μπορεί να εμφανιστούν.

Σύγχρονοι αλγόριθμοι (Perturb & Observe, INC, Fuzzy, κ.ά.) επιλέγουν το σωστό.

Διασυνδεδεμένα συστήματα (Net Metering)

Στην Ελλάδα: συμψηφισμός παραγόμενης/καταναλισκόμενης ενέργειας (Net Metering).

- ▶ Μετρητής εισαγωγής/εξαγωγής,
- ▶ inverter με πιστοποίηση δικτύου,
- ▶ πίνακας προστασιών (RCD, MCB, SPD).

Αυτόνομα & υβριδικά (PV + μπαταρία)



Διάταξη: PV → ρυθμιστής φόρτισης/υβριδικός inverter → μπαταρία → φορτία.

Σχεδιασμός με βάση βάθος εκφόρτισης (DOD), SOC, κύκλους ζωής, C-rate.

Τεχνολογίες αποθήκευσης

- ▶ **Li-ion (NMC, LFP):** υψηλή πυκνότητα ενέργειας, απόδοση ~90-95%.
- ▶ **VRFB:** μεγάλη διάρκεια ζωής, ανεξάρτητη ισχύς/ενέργεια.

Παράμετροι: **DoD, round-trip efficiency, lifecycle cost.**

Στήριξη, κλίσεις και φορτία ανέμου

Σχεδιασμός βάσεων για στέγες/εδάφη: προφόρτιση, αντιδιαβρωτική προστασία, φορτία ανέμου/χιόνι.

Κανόνας πρακτικός: διατηρούμε κλίση εγκατάστασης κοντά στη βέλτιστη και αποφεύγουμε αλληλοσκιάσεις (ιδίως χειμώνα).

Συντήρηση & ρύπανση

Σκόνη/γύρη/αλμύρα μειώνουν την απόδοση.

Πρακτικά: καθαρισμός 2-4 φορές/έτος (πιο συχνά σε άνυδρες περιοχές ή κοντά στη θάλασσα).

Οπτικός έλεγχος συνδέσεων, θερμογραφία για εντοπισμό hot-spots.

Γήρανση (degradation) modules

Τυπικά 0.3-0.5%/έτος.

Μετά 25 έτη, ισχύς \approx 88-92% της αρχικής.

Αίτια: UV, θερμοί κύκλοι, υγρασία, PID.

Μέτρα: ποιοτικά encapsulants, σωστή γείωση/προστασία.

Οικονομικοί δείκτες (ενδεικτικά 2025)

- ▶ Κόστος οικιακών: ~900-1100 €/kWp,
- ▶ Κόστος εμπορικών: 700-900 €/kWp.

- ▶ LCOE: 0.06-0.10 €/kWh (ανά μέγεθος/χρηματοδότηση).

- ▶ Παράγοντες: επιτόκιο, ωφέλιμη ζωή, τυπική παραγωγή kWh/kWp.

Περιβαλλοντικό όφελος

- ▶ Συντελεστής αποφυγής CO₂ (Ελλάδα, μέσο μίγμα): ~0.8-0.9 kg/kWh.
- ▶ Σύστημα 5 kWp στη Λάρισα που αποδίδει ~6.6-6.8 MWh/έτος → 5.3-6.1 t CO₂/έτος αποφυγή.

Άσκηση

Δεδομένα:

Λάρισα,

$P_{nom}=5 \text{ kWp}$,

$PR=0.80$,

$\beta=35^\circ$,

νότιος προσανατολισμός,

$G_{POA}=1700 \text{ kWh/m}^2$,

$\beta \approx -0.45\%/^\circ\text{C}$,

$NOCT=45^\circ\text{C}$,

μέσο $T_{amb}=22^\circ\text{C}$ (ετήσιο) για οριζόντια επιφάνεια.

Ζητείται: E_{annual} (kWh) και αποφυγή CO_2 .

Λύση

Βήμα 1: θεωρητική παραγωγή

$$E_{th} = P_{nom} \cdot G_{POA} = 5 \cdot 1700 = 8500 \text{ kWh}$$

- ▶ P_{nom} (kWp): ονομαστική DC ισχύς, G_{POA} : ετήσια ακτινοβολία στο επίπεδο πάνελ.

Βήμα 2: εφαρμογή PR

$$E_0 = PR \cdot E_{th} = 0.80 \cdot 8500 = 6800 \text{ kWh}$$

Το PR συμπυκνώνει απώλειες θερμοκρασίας, inverter, καλωδίων, ρύπανσης, mismatch κ.λπ. Σε ελληνικές εγκαταστάσεις καλοσχεδιασμένες, **0.78-0.82** είναι τυπικό.

Βήμα 3: έλεγχος θερμοκρασίας με NOCT

Ελέγχουμε αν η θερμοκρασία θα οδηγούσε σε πρόσθετη διόρθωση:

$$T_c \approx T_{amb} + \frac{G}{800} (NOCT - 20)$$

Για τυπικό $G_{average} \sim 800 \text{ W/m}^2$ σε ώρες αιχμής:

- ▶ $T_c \approx 22 + 1 \cdot (45 - 20) = 47^\circ C$

Απώλεια ισχύος στιγμιαία:

- ▶ $\Delta P \approx \beta(T_c - 25) \approx -0.0045 \cdot 22 \approx -9.9\%$

Στην ετήσια ενέργεια μεγάλο μέρος αυτής ήδη περιλαμβάνεται στο PR. Δεν τροποποιούμε περαιτέρω το E_0 για να αποφύγουμε διπλομέτρηση.

Λύση

Βήμα 4: τελική παραγωγή & εύρος

Λαμβάνοντας υπόψη μικρές πρόσθετες απώλειες καθαρισμού/διαθεσιμότητας (1-2%) και ότι το PR είναι συντηρητικό:

$E_{\text{annual}} \approx 6.6\text{-}6.8 \text{ MWh}$.

Για ονομαστική τιμή στο μάθημα: $E_{\text{annual}} = 6,800 \text{ kWh/έτος}$.

Βήμα 5: αποφυγή CO₂

$$CO_2^{\text{avoided}} = E_{\text{annual}} \cdot EF$$

- ▶ Με $EF \approx 0.85 \text{ kg/kWh}$ (μέσος συντελεστής Ελλάδας):
 $= 6800 \cdot 0.85 \approx 5780 \text{ kgCO}_2/\text{yr} \approx 5.8 \text{ tCO}_2/\text{yr}$

Τεχνικό τμήμα (1/4): συνδεσμολογία strings

Σειρά: αυξάνει τάση, Παράλληλα: αυξάνει ρεύμα. Ο inverter έχει όρια **MPP** τάσης (π.χ. 250-850 V) και μέγιστο ρεύμα **MPPT**. Επιλογή **#modules** ανά string ώστε:

- ▶ $V_{oc,win} < V_{max_inv}$,
- ▶ $V_{mp,sum}$ να «πέφτει» μέσα στο παράθυρο **MPP**.

Τεχνικό τμήμα (2/4): επιλογή inverter

Κριτήρια:

- ▶ ονομαστική AC ισχύς,
- ▶ εύρος MPP,
- ▶ απόδοση,
- ▶ #MPPT ανεξάρτητα (για διαφορετικά πεδία),
- ▶ προστασίες (SPD, RCMU),
- ▶ πιστοποιήσεις δικτύου.

Αναλογία DC/AC (DC/AC ratio) συνήθως 1.05-1.25.

Τεχνικό τμήμα (3/4): καλώδια & πτώση τάσης

- ▶ Πτώση τάσης $\Delta V \leq 1-2\%$ ανά τμήμα (DC/AC).
- ▶ Επιλογή διατομής βάσει έντασης, μήκους, επιτρεπτής πτώσης και θερμικής κατηγορίας.
- ▶ Προστασία από UV για εξωτερικά runs,
- ▶ Σωστές διεισδύσεις στη στέγη.

Τεχνικό τμήμα (4/4): προστασίες & γειώσεις

- ▶ DC ασφάλειες ανά string (όταν απαιτείται),
- ▶ DC αποζεύκτης,
- ▶ SPD (DC & AC),
- ▶ RCD/MCB στον πίνακα,
- ▶ κανόνες γείωσης (equipotential bonding),
- ▶ σήμανση κινδύνου,
- ▶ προσβασιμότητα για συντήρηση.

Βιβλιογραφία

1. Duffie & Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley.
2. Kalogirou, *Solar Energy Engineering*, Elsevier.
3. Fraunhofer ISE, *Photovoltaics Report* (2023).
4. IEA PVPS, *Snapshot of Global PV Markets* (2024).
5. EU JRC, *PVGIS* (2023).
6. NREL, *Best Practices for PV System Design* (2023).
7. ΔΕΔΔΗΕ, *Τεχνικές Οδηγίες Διασύνδεσης Φ/Β* (2022).
8. SolarPower Europe, *Global Market Outlook 2025–2029*.
9. Green M.A. et al., *Prog. in Photovoltaics* (2021).
10. Boyle G., *Renewable Energy*, OUP.