

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΠΕ



Γ. ΒΙΣΚΑΔΟΥΡΟΣ
Ι. Φραγκιαδάκης – Φ. Μαυροματάκης

ΦΒ σύστημα

Ενεργειακοί υπολογισμοί

Τύποι συστημάτων

- Μη διασυνδεδεμένα (off-grid)
 - Αυτόνομα (αποθήκευση)
 - Υβριδικά (αποθήκευση)
- Διασυνδεδεμένα (on-grid)
 - Κεντρικά (centralized)
 - Κατακεντρωμένα (distributed)

3

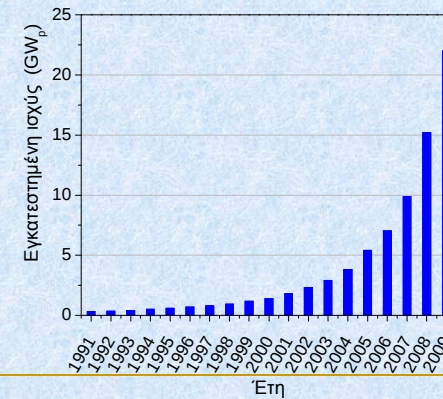
Πλεονεκτήματα των ΦΒ

- Δε ρυπαίνουν
- Αξιοπίστη λειτουργία για πολλά έτη (>30)
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης (O&M)
- Δεν έχουν κινούμενα τμήματα (εκτός από ιχνηλάτες)
- Μπορούν να συνδυαστούν με ευκολία σε μικρά ή μεγάλα συστήματα
- Μπορούν να τοποθετηθούν παντού, όπου φωτίζεται
- Ενσωματώνονται αρμονικά στο περιβάλλον χωρίς επίδραση στη λειτουργικότητα ή την αισθητική του χώρου (αρχαιολογικοί χώροι)
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δασικές ή σε δυσπρόσιτες περιοχές (πυροπροστασία δασών, ηλεκτροδότηση κτηνοτροφικών μονάδων, αναμεταδότες τηλεπικοινωνιών)
- Ηλεκτροδότηση θαλάσσιων εφαρμογών (φάροι, μαρίνες, σκάφη,...)
- Παράγουν κατά μέγιστο κατά τις ώρες αιχμής ζήτησης του δικτύου
- Συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας ισχύος στη μείωση των απωλειών μεταφοράς και στην αύξηση της αξιοπιστίας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο.

Μειονεκτήματα ΦΒ

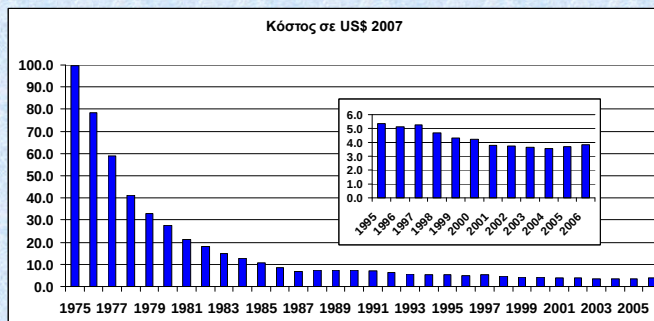
- Σχετικά υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης
- Χαμηλή πυκνότητα παραγόμενης ηλ. ισχύος (kWh/m² εγκατάστασης)

Χρονική εξέλιξη ισχύος αιχμής εγκατεστημένων ΦΒ συστημάτων, παγκοσμίως



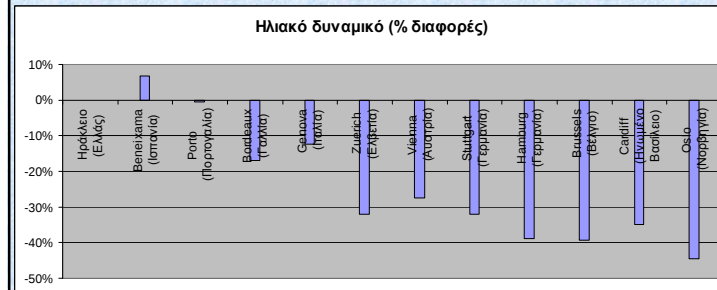
6

Κόστος ανά Watt (peak)



Πηγή : Worldwatch Institute 7

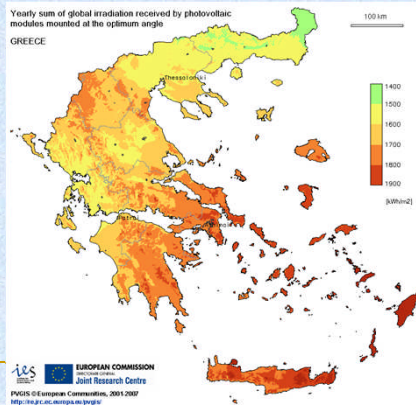
Ηλιακό Δυναμικό



Πηγή : PVGIS

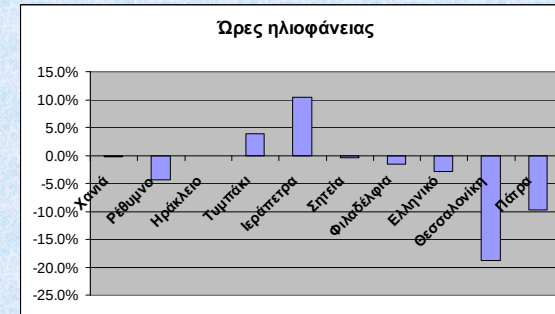
8

Ετήσια Ενεργειακή απολαβή σε κεκλιμένο επίπεδο



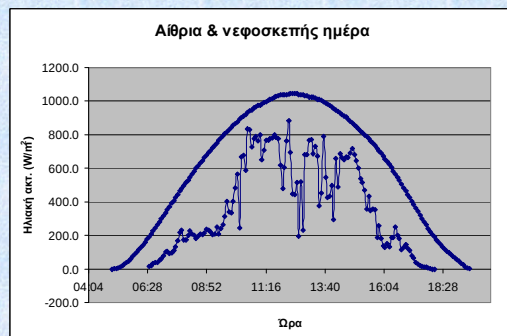
9

Σύγκριση σε σχέση με την ηλιοφάνεια



10

Ηλιακά δεδομένα



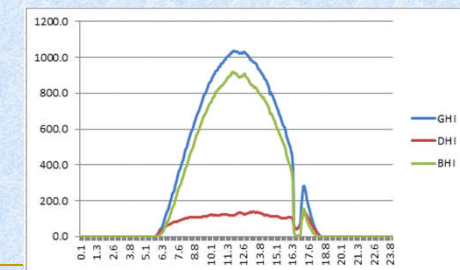
11

Ηλιακά δεδομένα

Μήνας : Μάιος
Μέρα : 2

ΑΙΘΡΙΑ ΜΕΡΑ

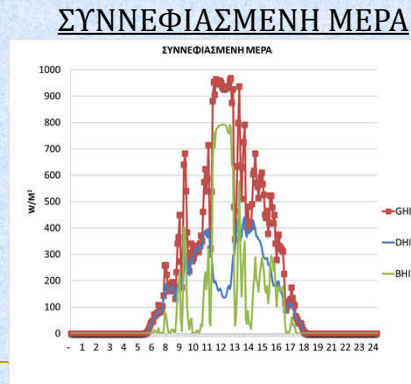
$BHI=80\%GHI$
 $DHI=20\%GHI$



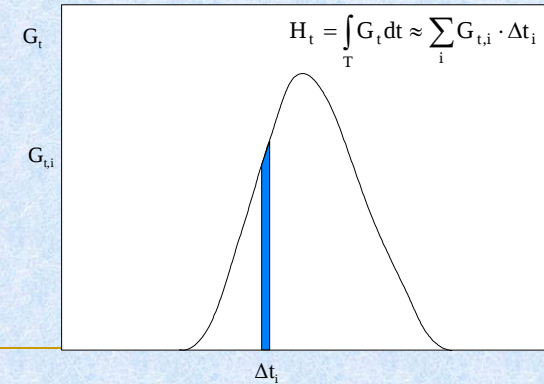
Ηλιακά δεδομένα

Μήνας : Μάιος
Μέρα : 3

$BHI=60\%GHI$
 $DHI=40\%GHI$

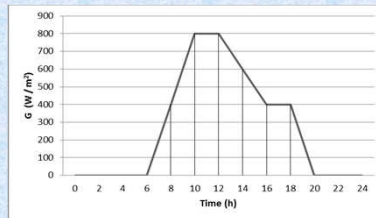


Ενεργειακή απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας, H_t (kWh/m²)



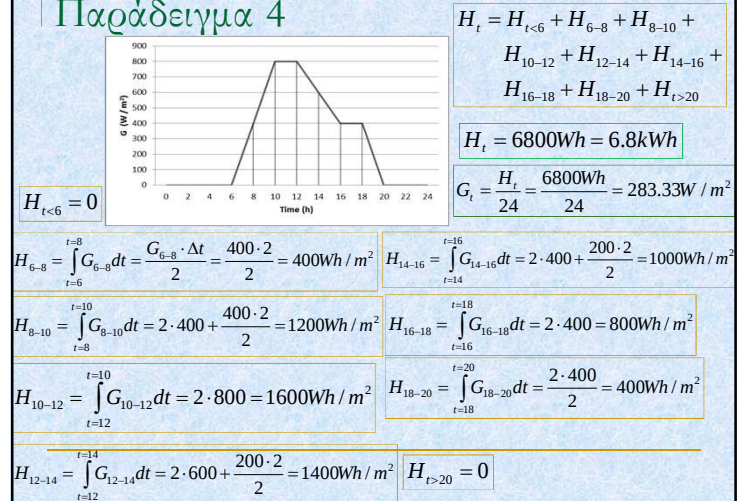
Παράδειγμα 4

- Η καμπύλη της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μιας ημέρας δίνεται στο παρακάτω σχήμα :



- Πόση είναι η ημερήσια ενεργειακή απολαβή σε kWh/m²;
- Πόση είναι η μέση πυκνότητα ισχύος σε ένα 24ώρο ;

Παράδειγμα 4



Τυπικές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ συστοιχία

Για φωτοβολταϊκή συστοιχία 1 kW_p και $H_t = 5,4 \text{ kWh/m}^2$ (Ηράκλειο Κρήτης) $\Rightarrow$

$$E_{\Phi B} = 4,3 \text{ kWh/d ή}$$

$$E_{\Phi B} = 1570 \text{ kWh/y}$$

Αποδοτικότητα $Y (\text{kWh/kW}_p)$ (Energy Yield) –
Συντελεστής χρησιμοποίησης CF (Capacity Factor)

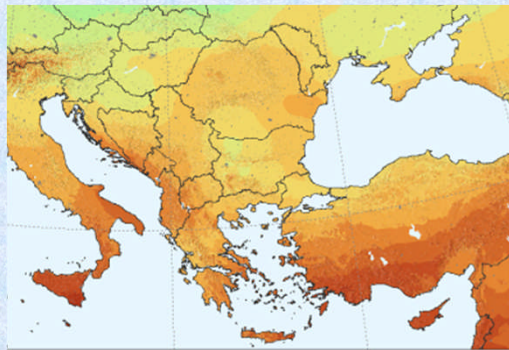
■ Αποδοτικότητα, Y

$$Y = \frac{E_{\Phi B}}{P_p} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kW}_p} \right)$$

■ Συντ. Χρησιμοποίησης

$$CF = \frac{Y}{T} (\%)$$

Κατανομή
ετήσιας
ενεργειακής
απολαβής
ηλιακής
ακτινοβολίας,
& της
αποδιδόμενης
ηλεκτρικής
ενέργειας ανά kW_p



$H (\text{kWh/m}^2 \cdot \text{a})$ <600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200>
 $Y (\text{kWh/kW}_p \cdot \text{a})$ <450 600 750 900 1050 1200 1350 1500 1650>

Παράδειγμα

- ΦΒ συστοιχία 3.5 kW απέδωσε 525000 Wh κατά τον μήνα Ιούλιο. Να υπολογιστεί ο συντελεστής χρησιμοποίησης.

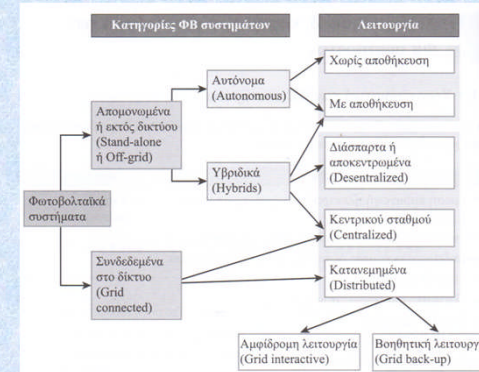
ΛΥΣΗ

$$CF = \frac{525 \text{ kWh}}{3.5 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} \cdot 31} = \frac{525 \text{ kWh}}{2604 \text{ kWh}} = 0.202 = 20.2\%$$

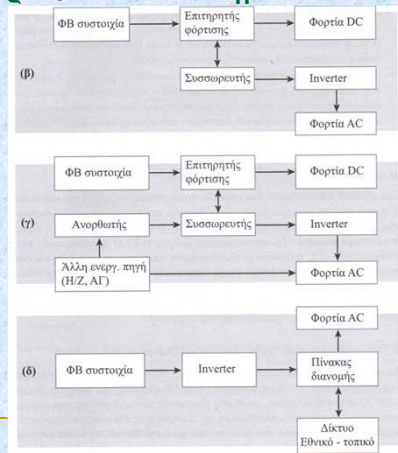
Εφαρμογές

- Οικιακή και βιομηχανική χρήση
- Φωτισμός
- Ψύξη
- Αντληση - άρδευση
- Επικοινωνίες
- Κίνηση

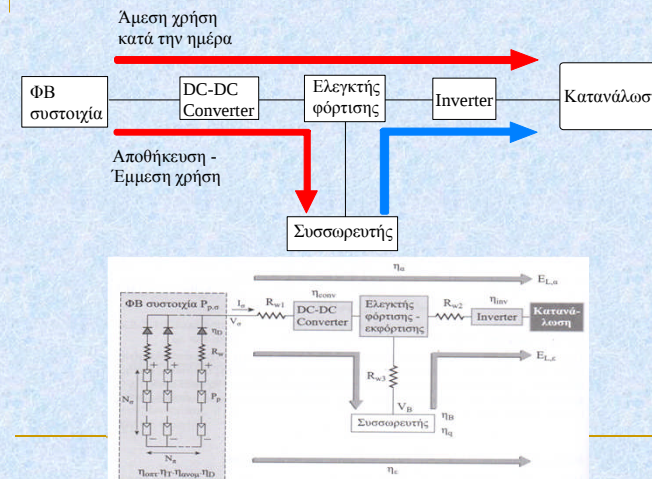
Κατηγορίες ΦΒ συστημάτων



Κατηγορίες ΦΒ συστημάτων

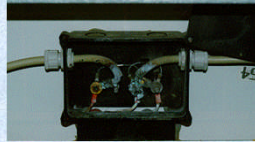


Μονογραμμικό διάγραμμα ΦΒ συστήματος



Απώλειες

- Σκίαση, σκόνη, φύλλα κ.λπ.
- Καλωδιώσεις (συνδέσεις, εκδορές, τρωκτικά !)



Πηγή : IEA PVPS



Πηγή : Εργ. ΦΒ Πάρκο

25

Συντελεστές Απωλειών

- Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας n_a (Άμεση Αξιοποίηση): απόδοση converter , απώλειες γραμμών μεταφοράς, απόδοση inverter

$$n_a = n_w \cdot n_{conv} \cdot n_{inv}$$

- Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας n_e (Έμμεση Αξιοποίηση): απόδοση διόδων, απόδοση συσσωρευτών απώλειες γραμμών μεταφοράς

$$n_e = n_D \cdot n_w \cdot n_E$$

ΦΒ συστοιχία	Διάταξη - τμήμα κυκλώματος	Σύμβολο	Ενδεικτική τιμή
η_{lm} c-Si 0,90	Γραμμές μεταφοράς	η_w	0,98
η_{lm} p-Si 0,90	Ηλεκτρονικά ισχύος	η_{inv}	0,94
η_D 0,99		η_{conv}	0,92
η_{anom} 0,98	Συσσωρευτής	$\eta_{D,B}$	0,80
η_{het} 0,90		η_E	0,85
η_w 0,98		η_a	0,90
Συντελεστής μεταφοράς από τη ΦΒ συστοιχία στο φορτίο κατανάλωσης			
$\eta_{het} = \eta_w \cdot \eta_{D,B} \cdot \eta_E$			0,68 - 0,98

Συντελεστές Απωλειών

- Συντελεστής απωλειών καλωδιώσεων : $n_{w,\sigma} = 0.98\%$
- Συντελεστής απωλειών διόδων : $n_D = 0.99\%$
- Απώλειες γραμμής μεταφοράς : $\frac{\Delta V}{V_\pi} = \frac{I(A)}{V_\pi(V)} \cdot \frac{R}{l} \cdot \left(\frac{\Omega}{km}\right) \cdot 2 \cdot L(km)$

Διατομές τυποποιημένων καλωδίων στο Αγγλοσαξονικό σύστημα (AWG)	Διατομές τυποποιημένων καλωδίων στο μετρικό σύστημα (mm ²)	R/l Μετρικό σύστημα (ρ _{Cu} (25 °C)=17,12 nΩm) (Ω/km)
18	1	17,12
16	1,5	11,41
14	2,5	6,85
12	4	4,28
10	6	2,85
8	10	1,71
6	15	1,14
4	25	0,68
3	35	0,49
2	50	0,34
1	70	0,24
0	105	0,16
00	125	0,14
000	150	0,11

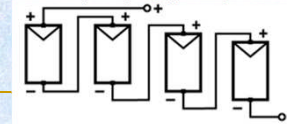
AWG: American Wire Gauge

Παράδειγμα

- Κατοικία τροφοδοτείται από ΦΒ σύστημα τεσσάρων ΦΒ πλαισίων με χαρακτηριστικά : $I_{SC}=4.5A$, $V_{OC}=21V$ και $I_{m,STC}=4.0A$, $V_{m,STC}=17V$
- α) Να προσδιορίσετε τον καταλληλότερο τρόπο σύνδεσης των πλαισίων σε συστοιχία για ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών στη γραμμή μεταφοράς που έχει μήκος 40m.
- β) Ποιο είναι το εμβαδόν της καταλληλότερης διατομής των καλωδίων της, ώστε οι απώλειες σε αυτή να είναι 2%.

ΛΥΣΗ

- α) Στόχος : Μικρότερο δυνατό μέγιστο ρεύμα → Ελαχιστοποίηση απωλειών γραμμής μεταφοράς
- Επομένως ο καταλληλότερος τρόπος σύνδεσης είναι και τα 4 πλαίσια σε σειρά



$$I_{m,STC}=4.0A$$

$$V_{m,STC}=4 \cdot 17V=68V$$

Παράδειγμα

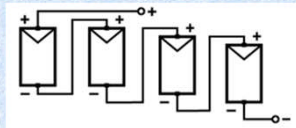
β) Τυπικό Ρεύμα Συστοιχίας : $I_{m,STC}=4.0A$

Τυπικό Ρεύμα Συστοιχίας : $V_{m,STC}=4 \cdot 17V=68V=V_{\pi}$

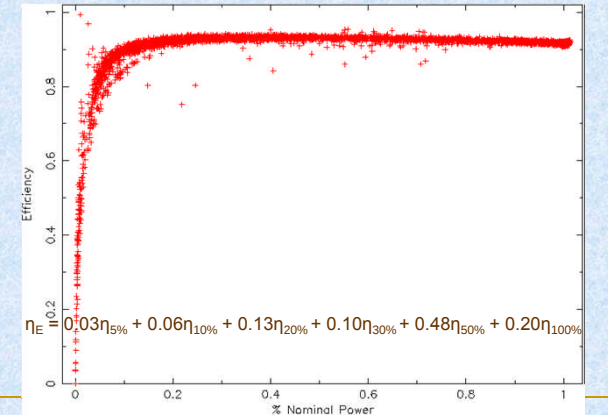
$$\frac{\Delta V}{V_{\pi}} = \frac{R}{l} \left(\frac{\Omega}{km} \right) \cdot \frac{I(A)}{V_{\pi}(V)} \cdot 2 \cdot L(km)$$

$$\frac{R}{l} \left(\frac{\Omega}{km} \right) = \frac{\Delta V}{V_{\pi}} \cdot \frac{V_{\pi}(V)}{I(A)} \cdot \frac{1}{2 \cdot L(km)} = 0.02 \cdot \frac{68V}{4A} \cdot \frac{1}{2 \cdot 40 \cdot 10^{-3} km} = 4.25 \frac{\Omega}{km}$$

Από τον πίνακα προκύπτει ότι η πλησιέστερη τιμή είναι $4mm^2$

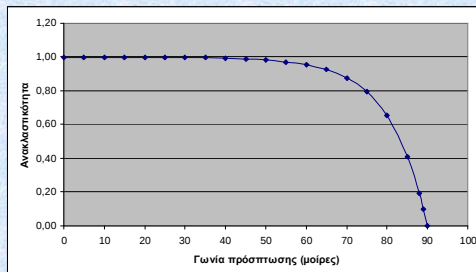


ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΤΑΣΗΣ



Ανακλαστικότητα

Συντελεστής απόκλισης λόγω ανακλαστικότητας



Στιγμιαία ισχύς, P_m και
ημερήσια ενέργεια, H_t

$$S \xrightarrow{P_{\Phi B}} E_{\Phi B} = P_p \cdot PR \cdot \frac{H_t}{G_{STC}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = \frac{P_m}{G_t \cdot S} \Rightarrow P_m = \eta \cdot G_t \cdot S \\ \eta_{STC} = \frac{P_p}{G_{STC} \cdot S} \Rightarrow P_p = \eta_{STC} \cdot G_{STC} \cdot S \end{array} \right\} \Rightarrow P_m = P_p \cdot \frac{\eta}{\eta_{STC}} \cdot \frac{G_t}{G_{STC}}$$

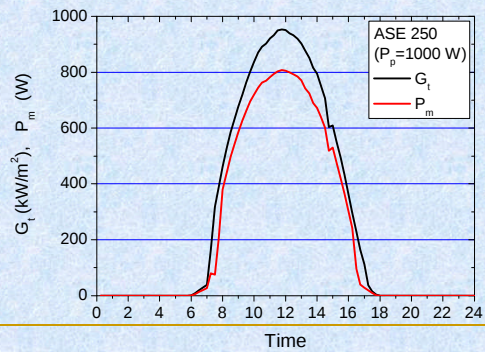
Αναφερόμενοι σε χρονικές
περιόδους μηνός ή έτους
χρησιμοποιούμε, αντί του H_t , τη
μέση τιμή, στην αντίστοιχη
περίοδο $\bar{H}_t$

$$\text{και} \Rightarrow E_{\Phi B} = \int_0^{24h} P_m dt \Rightarrow E_{\Phi B} = P_p \cdot PR \cdot \frac{H_t}{G_{STC}}$$

$$\text{οπου } PR = \frac{E_{\Phi B}(\eta, G_t)}{E_{\Phi B}(\eta_{STC}, G_t)}, \text{ ο λόγος επίδοσης.}$$

Λόγος Επίδοσης : πηλίκο της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας,
προς αυτή που μπορεί να αποδοθεί σε ιδανικές λειτουργίες

Πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, G_t
Μέγιστη ισχύς συστοιχίας, P_m



Παράδειγμα

- Διασυνδεδεμένο ΦΒ σύστημα παράγει 22kWh/day όπου η ενεργειακή απολαβή είναι 5.1kWh/m² στο επίπεδο των ΦΒ πλαισίων. Εάν ο λόγος επίδοσης είναι 0.79 να υπολογίσετε την ονομαστική αιχμή της συστοιχίας.

ΛΥΣΗ

$$E_{\Phi B} = P_{STC} \cdot PR \cdot \frac{H_t}{G_{STC}} \Rightarrow P_{STC} = \frac{E_{\Phi B}}{PR \cdot \frac{H_t}{G_{STC}}}$$

$$P_{STC} = \frac{22kWh}{0.79 \cdot \frac{5.1kWh / m^2}{1kW / m^2}} = 5.46kW$$

Υπολογισμοί

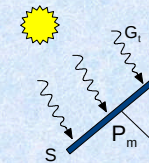
Μήνες	Ημέρες ανά μήνα	Ενεργειακή Απολαβή (H_t)	Λόγος Επίδοσης PR	Παραγωγή από 1 Kw $E_{\Phi B}$ (kWh)/day	Συνολική Παραγωγή $E_{\Phi B}$ (kWh)
Ιανουάριος	31	3,96	0,854		
Φεβρουάριος	28	4,41	0,845		
Μάρτιος	31	5,06	0,830		
Απρίλιος	30	5,93	0,806		
Μάιος	31	6,76	0,786		
Ιούνιος	30	6,58	0,787		
Ιούλιος	31	6,70	0,781		
Αύγουστος	31	6,68	0,795		
Σεπτέμβριος	30	6,21	0,820		
Οκτώβριος	31	4,90	0,840		
Νοέμβριος	30	3,84	0,855		
Δεκέμβριος	31	3,10	0,867		
				Σύνολο έτους	

Υπολογισμοί

Μήνες	Ημέρες ανά μήνα	Ενεργειακή Απολαβή (H_t)	Λόγος Επίδοσης PR	Παραγωγή από 1 Kw $E_{\Phi B}$ (kWh)/day	Συνολική Παραγωγή $E_{\Phi B}$ (kWh)
Ιανουάριος	31	3,96	0,854	3.38	
Φεβρουάριος	28	4,41	0,845	3.72	
Μάρτιος	31	5,06	0,830	4.2	
Απρίλιος	30	5,93	0,806	4.78	
Μάιος	31	6,76	0,786	5.32	
Ιούνιος	30	6,58	0,787	5.18	
Ιούλιος	31	6,70	0,781	5.24	
Αύγουστος	31	6,68	0,795	5.32	
Σεπτέμβριος	30	6,21	0,820	5.1	
Οκτώβριος	31	4,90	0,840	4.12	
Νοέμβριος	30	3,84	0,855	3.28	
Δεκέμβριος	31	3,10	0,867	2.68	
				Σύνολο έτους	

Υπολογισμοί

Μήνες	Ημέρες ανά μήνα	Ενεργειακή Απολαβή (H _t)	Λόγος Επίδοσης PR	Παραγωγή από 1 Kw E _{φB} (kWh)/day	Συνολική Παραγωγή E _{φB} (kWh)
Ιανουάριος	31	3,96	0,854	3.38	104.78
Φεβρουάριος	28	4,41	0,845	3.72	104.16
Μάρτιος	31	5,06	0,830	4.2	130.2
Απρίλιος	30	5,93	0,806	4.78	143.4
Μάιος	31	6,76	0,786	5.32	164.92
Ιούνιος	30	6,58	0,787	5.18	155.4
Ιούλιος	31	6,70	0,781	5.24	162.44
Αύγουστος	31	6,68	0,795	5.32	164.92
Σεπτέμβριος	30	6,21	0,820	5.1	153
Οκτώβριος	31	4,90	0,840	4.12	127.72
Νοέμβριος	30	3,84	0,855	3.28	98.4
Δεκέμβριος	31	3,10	0,867	2.68	83.08
				Σύνολο έτους	



Ενεργειακό ισοζύγιο σε ΦΒ σύστημα

$$\text{Ενεργειακό ισοζύγιο : } E_{\Phi B} = \frac{m \cdot E_L}{\eta_{\mu\epsilon\tau}}$$

$$\text{Λαμβάνοντας υπόψη ότι : } E_{\Phi B} = P_p \cdot PR \cdot \frac{\bar{H}_t}{G_{STC}}$$

$$\text{η σχέση ισοζυγίου γ γίνεται : } P_p \cdot PR \cdot \frac{\bar{H}_t}{G_{STC}} = \frac{m \cdot E_L}{\eta_{\mu\epsilon\tau}}$$

$$\text{και άρα έπεται : } P_p = \frac{1}{PR} \cdot \frac{G_{STC}}{\bar{H}_t} \cdot \frac{m \cdot E_L}{\eta_{\mu\epsilon\tau}}$$

Υπολογισμοί

m=1,15 η_μετ=0,84

Μήνες	Ημέρες ανά μήνα	Ενεργειακή απολαβή (kWh/m2)	Λόγος Επίδοσης	Ώρες λειτουργίας	Φορτίο (W)	Απαιτούμενη ισχύς σε kW
Ιανουάριος	31	3,96	0,854	12	240	
Φεβρουάριος	28	4,41	0,845	12	240	
Μάρτιος	31	5,06	0,830	11	220	
Απρίλιος	30	5,93	0,806	10	200	
Μάιος	31	6,76	0,786	9	180	
Ιούνιος	30	6,58	0,787	9	180	
Ιούλιος	31	6,70	0,781	9	180	
Αύγουστος	31	6,68	0,795	9	180	
Σεπτέμβριος	30	6,21	0,820	10	200	
Οκτώβριος	31	4,90	0,840	11	220	
Νοέμβριος	30	3,84	0,855	12	240	
Δεκέμβριος	31	3,10	0,867	12	240	

39

Υπολογισμοί

m=1,15 η_μετ=0,84

Μήνες	Ημέρες ανά μήνα	Ενεργειακή απολαβή (kWh/m2)	Λόγος Επίδοσης	Ώρες λειτουργίας	Φορτίο (W)	Απαιτούμενη ισχύς σε kW
Ιανουάριος	31	3,96	0,854	12	240	1.17
Φεβρουάριος	28	4,41	0,845	12	240	1.06
Μάρτιος	31	5,06	0,830	11	220	0.79
Απρίλιος	30	5,93	0,806	10	200	0.57
Μάιος	31	6,76	0,786	9	180	0.42
Ιούνιος	30	6,58	0,787	9	180	0.43
Ιούλιος	31	6,70	0,781	9	180	0.42
Αύγουστος	31	6,68	0,795	9	180	0.42
Σεπτέμβριος	30	6,21	0,820	10	200	0.54
Οκτώβριος	31	4,90	0,840	11	220	0.80
Νοέμβριος	30	3,84	0,855	12	240	1.20
Δεκέμβριος	31	3,10	0,867	12	240	1.47

40