

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Από την κα **Βίκυ Γαλανού**, Μηχ/γο Μηχανικό, Συνεργάτη της 4M A.E.

Η παρούσα μελέτη-παράδειγμα, αφορά στην τεchnο-οικονομική αξιολόγηση συστήματος Φωτοβολταϊκών Συλλεκτών διασυνδεδεμένων με το δίκτυο της ΔΕΗ. Πρόκειται ειδικότερα για εγκατάσταση Φωτοβολταϊκού Πάρκου σε περιοχή της Κρήτης με συνολική ισχύ 100 kW. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με το **Πρόγραμμα Φωτοβολταϊκών του Πακέτου Προγραμμάτων ADAPT της 4M.**

I. ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σύνταξη της Μελέτης βασίστηκε μεταξύ άλλων στα ακόλουθα βοηθήματα:

- Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις, Στ. Περδίο
- Εφαρμογές της Ηλιακής Ενέργειας, Ε. Βαζαίος
- German Solar Energy Society, 'Planning and installing Photovoltaic Systems: A Guide for installers, Architects and Engineers.' James and James / Earthscan, 2005

2. ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ & ΚΑΝΟΝΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

2.1. Υπολογισμός Ηλεκτρικής Ενέργειας Φ/Β Πλαισίου

Λαμβάνοντας υπόψιν τους συντελεστές μείωσης της απόδοσης, η μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια, που παράγουν N Φ/Β πλαίσια επί ένα χρονικό διάστημα, δίνεται από τη σχέση:

$$E_{m\eta} = E_{HA} \cdot N \cdot S_{\eta} \cdot \eta_{\eta} \cdot \sigma_a \cdot \sigma_k \cdot \sigma_{\mu}$$

όπου:

E_{HA} : ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

S_{η} : επιφάνεια Φ/Β πλαισίου

η_{η} : βαθμός απόδοσης Φ/Β πλαισίου

$$\eta_{\eta} = \eta_{STC} \cdot \sigma_{\gamma} \cdot \sigma_{\delta} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\rho}$$

η_{STC} : βαθμός απόδοσης Φ/Β πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC

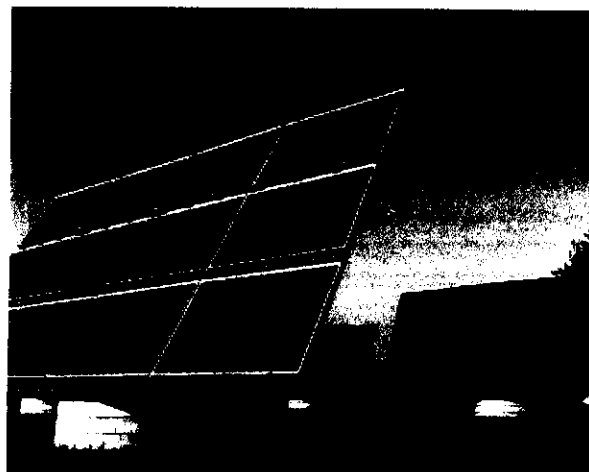
$\sigma_{\gamma} / \sigma_{\rho} / \sigma_{\theta} / \sigma_{\delta}$: συντελεστής γήρανσης /

ρύπανσης / θερμοκρασίας / διόδου

$\sigma_a / \sigma_k / \sigma_{\mu}$: συντελεστής ανομοιογένειας / καλωδιώσεων / απωλειών μεταφοράς ενέργειας

2.2. Επίδραση της θερμοκρασίας και της ρύπανσης

Η απόδοση των Φ/Β στοιχείων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Ο συντελεστής απόδοσης που δίνεται για τα ηλιακά στοιχεία ή για τα Φ/Β πλαίσια αντιστοιχεί σε μια συμβατική θερμοκρασία 20°C, που συχνά, τους θερινούς μήνες διαφέρει αξιόλογα από την πραγματική θερμοκρασία του στοιχείου. Έχει μετρηθεί ότι λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται αλλά και λόγω των ηλεκτρικών απωλειών που πραγματοποιούνται πάνω τους, στις αντιστάσεις σειράς, τα ηλιακά στοιχεία αποκτούν κατά τη λειτουργία τους θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος κατά 25 ως 30 °C, ανάλογα με την τα-



χύτητα του ανέμου. Για τη διόρθωση του παραπάνω σφάλματος χρησιμοποιείται ο αδιάστατος συντελεστής σ_{θ} που ορίζεται ως εξής:

$$\sigma_{\theta} = 1 - ((t_a + 30) - 25) \cdot 0,004$$

όπου:

t_a : η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα

2.3. Βαθμός Απόδοσης Φ/Β Πλαισίου

Το πηλίκο της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την προσπίπτουσα ισχύ της ηλιακής ακτινοβο-

Κλιματολογικά Δεδομένα - Στοιχεία Εγκατάστασης

ΟΝΟΜΑ ΠΟΛΗΣ: ΗΡΑΚΛΕΙΟ
ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΤΟΣ: 35.0°
ΚΛΙΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΗ: 30.0°

ΜΗΝΑΣ	ΗΜΕΡΕΣ	ΘΕΡΜ/ΣΙΑ ΑΕΡΑ (°C)	ΗΛ. ΑΚΤΙΝ. ΑΝΑ ΗΜΕΡΑ (kWh/m ²)	ΗΛ. ΑΚΤΙΝ. ΑΝΑ ΜΗΝΑ (kWh/m ²)
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	31	13.0	2.80	86.69
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	28	13.0	3.39	94.95
ΜΑΡΤΙΟΣ	31	15.0	4.44	137.55
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	30	17.0	5.19	155.72
ΜΑΙΟΣ	31	21.0	5.79	179.58
ΙΟΥΝΙΟΣ	30	26.0	6.22	186.75
ΙΟΥΛΙΟΣ	31	28.0	6.51	201.95
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	31	28.0	6.62	205.10
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	30	25.0	6.14	184.34
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	31	22.0	4.77	148.01
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	30	18.0	3.71	111.38
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	31	15.0	2.81	87.08
ΣΥΝΟΛΟ				1779.10

λίας, ονομάζεται **βαθμός απόδοσης** ηπ του Φ/Β πλαισίου

$$\eta = \frac{P_{m\eta}}{P_{HA}}$$

όπου:

$P_{m\eta}$: μέγιστη αποδοόμενη ηλεκτρική ισχύς Φ/Β πλαισίου (W)

P_{HA} : ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (W)

Αν η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας δίνεται ανά μονάδα επιφάνειας, δηλαδή σε $W m^2$, η σχέση του βαθμού απόδοσης γίνεται

$$\eta = \frac{P_{m\eta}}{P_{HA} S_{\eta}}$$

όπου:

$P_{m\eta}$: μέγιστη αποδοόμενη ηλεκτρική ισχύς Φ/Β πλαισίου

P_{HA} : ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

S_{η} : επιφάνεια Φ/Β πλαισίου (m^2)

Ο βαθμός απόδοσης ηπ του Φ/Β πλαισίου επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες:

• **Γήρανση**

Η απόδοση του Φ/Β πλαισίου μειώνεται λόγω της αλλοίωσης των υλικών κατασκευής των Φ/Β στοιχείων. Για τη διαχρονική μείωση της απόδοσης λαμβάνουμε το **συντελεστή γήρανσης** $\sigma_{\gamma} = 0,90$.

• **Ρύπανση επιφάνειας**

Η απόδοση του Φ/Β πλαισίου μειώνεται λόγω της ρύπανσης της επιφάνειάς του από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χι-

νιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων, ακαθαρσιών κλπ. Γι' αυτό λαμβάνουμε ένα συντελεστή ρύπανσης σ_{ρ} με τις ακόλουθες τιμές:

- $\sigma_{\rho} = 0,95$ για πλαίσια που καθαρίζονται συχνά
- 0,90 για πλαίσια ελαφρώς σκονισμένα
- 0,80 για πλαίσια οριζόντι και ακάθαρτα

• **Δίοδος αντεπιστροφής**

Η δίοδος αντεπιστροφής ΔΑ, που εμποδίζει την εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή διαμέσου του Φ/Β πλαισίου, όταν αυτό δε φωτίζεται, προκαλεί απώλειες ενέργειας της τάξης του 1%. Οι απώλειες αυτές λαμβάνονται υπόψιν με τον **συντελεστή απωλειών δίοδου** $\sigma_{\delta} = 0,99$.

Στους υπολογισμούς των Φ/Β συστημάτων, ο βαθμός απόδοσης ηπστc του Φ/Β πλαισίου, που δίνεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC, θα πρέπει να πολλαπλασιάζεται με το γινόμενο των συντελεστών μείωσης της απόδοσης ($\sigma_{\gamma} \cdot \sigma_{\rho} \cdot \sigma_{\delta}$).

3. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

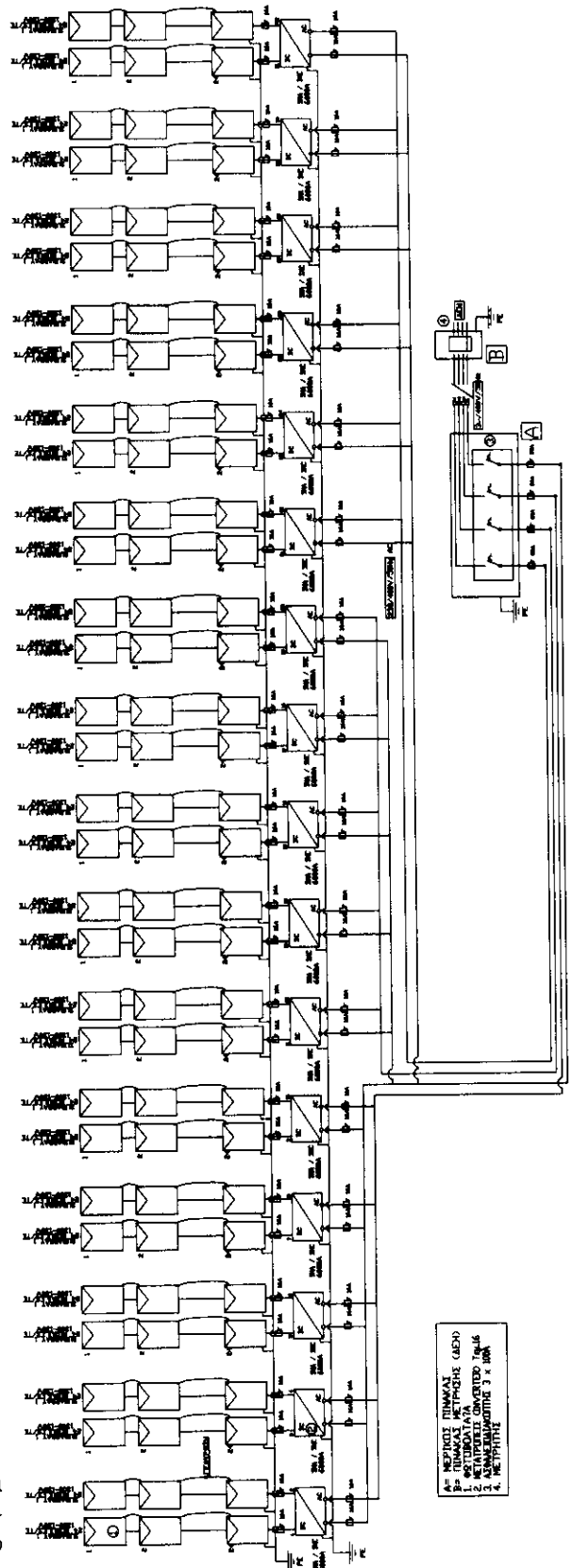
Η οικονομική αξιολόγηση της Φ/Β εγκατάστασης γίνεται με βάση τους εξής οικονομικούς συντελεστές

- α) τη καθαρά παρούσα αξία και,
- β) τον εσωτερικό συντελεστή απόδοσης της εγκατάστασης.

Η έντοκη περίοδος αποπληρωμής καθορίζει το έτος από το οποίο αρχίζει η επένδυση να χαρακτηρίζεται βιώσιμη.

II. ΜΕΛΕΤΗ (Φ/Β Συστήματος Διασυνδεδεμένου στο Δίκτυο της ΔΕΗ)

Το Φ/Β σύστημα που είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο περιλαμβάνει τη Φ/Β συστοιχία, το μετατροπέα τάσεως DC-AC (inverter) και δυο μετρητές για την εξερχόμενη και εισερχόμενη η-



Μονογραμμικό σχέδιο εγκατάστασης Φ/Β συστήματος διασυνδεδεμένου με την ΔΕΗ ισχύος 100 kW_p

1. ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΗ
2. ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΙΣΧ
3. ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΤΑΣΕΩΣ
4. ΜΕΤΡΗΤΗΣ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Λεκτρική ενέργεια.

1. Επιθυμητή ισχύς αιχμής Φ/Β συστοιχίας $P_{p\Sigma} = 100.00 \text{ kW}_p$.
2. Επιθυμητή επιφάνεια εγκατάστασης Φ/Β συστοιχίας $S_\Sigma : 1500.00 \text{ m}^2$
3. Γωνία κλίσης πλαισίων
Επιλέγεται γωνία κλίσης $\beta = 30.00^\circ$ και νότιος προσανατολισμός.
4. Αριθμός συλλεκτών
Επιλέγεται συλλέκτης τύπου STP175S με ισχύ αιχμής συλλέκτη $P_{p\eta} = 0.175 \text{ kW}_p$

$$N = \frac{P_{p\Sigma}}{P_{p\eta}} \quad N = 572 \text{ συλλέκτες}$$



5. Συνδεσμολογία Φ/Β συστοιχίας – Απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των συλλεκτών

Κατά την τοποθέτηση των Φ/Β πλαισίων της συστοιχίας απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, γιατί δεν πρέπει η μια σειρά πλαισίων να σκιάζει αισθητά την επόμενη.

Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δυο γειτονικών σειρών Φ/Β πλαισίων υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\varepsilon = a + \gamma \cdot \text{συν}\beta = 3.20 \text{ (m)}$$

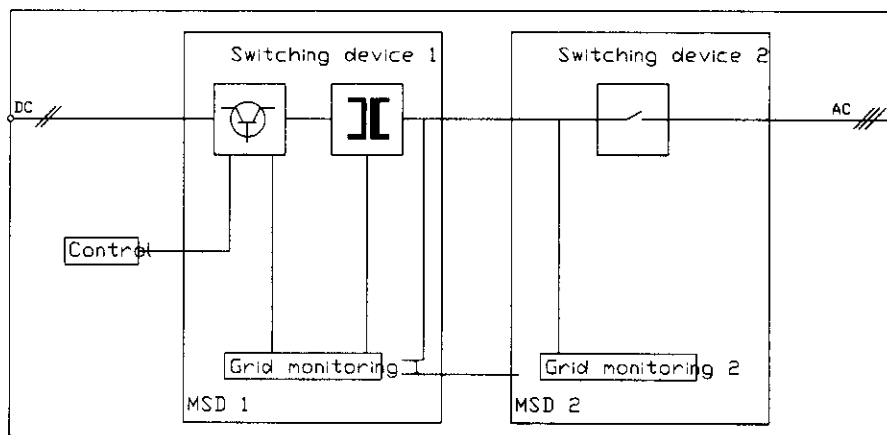
Η ελεύθερη απόσταση a προκύπτει από τον λόγο a/u , που υπολογίζεται από το διάγραμμα του σχήματος 1 με βάση το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής εγκατάστασης της Φ/Β συστοιχίας και ο υπολογισμός της επικάλυψης του ύψους της κατασκευής στήριξης γίνεται από τη σχέση:

$$u = \gamma \cdot \eta\mu\beta - \delta = 0.79 \text{ m}$$

όπου:

$\gamma = 1.58$: μήκος Φ/Β πλαισίων σε m

$\beta = 30.00^\circ$: γωνία κλίσης Φ/Β πλαισίων σε ($^\circ$)



Γερμανικό εστάνταρντ DIN VDE 0126 για την προστασία ENS αποφυγής απομονωμένης λειτουργίας

Μονογραμμικό σχέδιο εγκατάστασης Φ/Β συστήματος διασυνδεδεμένου με την ΔΕΗ ισχύος 100 kW_p

- δ: υψομετρική διαφορά ανάμεσα στα στηρίγματα δύο σειρών Φ/Β πλαισίων ($\delta = 0$ για στήριξη στο ίδιο επίπεδο) σε m

6. Εμβαδόν οριζόντιας έκτασης

Το εμβαδόν της οριζόντιας έκτασης που απαιτείται για την τοποθέτηση των Φ/Β πλαισίων ή συστοιχιών, δίνεται από τη σχέση:

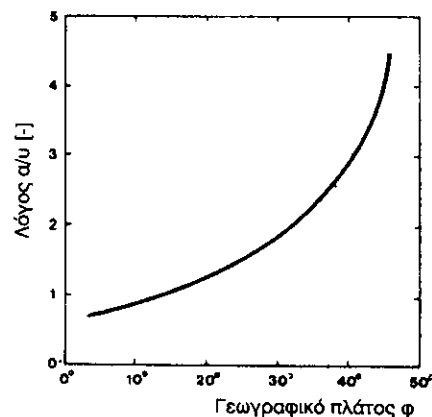
$$S_E = S_0 \frac{\varepsilon}{\gamma \cdot \text{συν}\beta} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$S_E = 1479.02 \text{ (m}^2\text{)}$$

S_0 : Εμβαδόν οριζόντιας προβολής όλων των Φ/Β πλαισίων σε m^2

$$S_0 = S_\eta \cdot N \cdot \text{συν}\beta$$

S_η : Εμβαδόν Φ/Β πλαισίου σε m^2



Σχήμα 1: Καμπύλη του λόγου της ελεύθερης απόστασης a μεταξύ δύο γειτονικών σειρών Φ/Β πλαισίων προς την επικάλυψη του ύψους u , σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου.

Υπολογισμός Ηλεκτρικών Φορτίων

ΜΗΝΑΣ	ΗΜΕΡΕΣ	ΗΛ. ΑΚΤΙΝ. ΑΝΑ ΜΗΝΑ (kWh/m ²)	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΗΛ. ΕΝΕΡΓΕΙΑ (kWh)	ΠΑΡΑΓ. ΗΛ. ΕΝΕΡΓ. / ΗΜΕΡΑ (kWh)
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	31	86.69	5705.92	184.06
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	28	94.95	6249.63	223.20
ΜΑΡΤΙΟΣ	31	137.55	8975.22	289.52
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	30	155.72	10072.52	335.75
ΜΑΙΟΣ	31	179.58	11412.12	368.13
ΙΟΥΝΙΟΣ	30	186.75	11602.44	386.75
ΙΟΥΛΙΟΣ	31	201.95	12432.43	401.05
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	31	205.10	12626.69	407.31
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	30	184.34	11505.35	383.51
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	31	148.01	9363.65	302.05
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	30	111.38	7172.48	239.08
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	31	87.08	5681.84	183.29
ΣΥΝΟΛΟ		1779.10	112800.29	

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

N: Αριθμός Φ/Β πλαισίων

E: ελάχιστη απόσταση μεταξύ δυο γειτονικών σειρών Φ/Β πλαισίων σε σε m

γ: μήκος Φ/Β πλαισίου σε σε m

β: γωνία κλίσης πλαισίων σε (°)

Παρατηρούμε ότι το απαιτούμενο εμβαδόν τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων καλύπτεται πλήρως από τα τετραγωνικά της επιθυμητής επιφάνειας εγκατάστασης.

7. Ισχύς αιχμής εγκατάστασης

Η υπολογιζόμενη ισχύς αιχμής της εγκατάστασης είναι το γινόμενο της ισχύος αιχμής συλλέκτη επί τον αριθμό συλλεκτών της εγκατάστασης:

$$P = 0.175 \cdot 572 = 100.10 \text{ kW}_p$$

Παρατηρούμε ότι η υπολογιζόμενη ισχύς αιχμής της εγκατάστασης υπερκαλύπτει την επιθυμητή ισχύ αιχμής των **100.00 kW_p**.

8. Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια

Η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για το 1^ο έτος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{m\sigma} = E_{HA} \cdot N \cdot P_{p\eta} \cdot \sigma_{\gamma} \cdot \sigma_{\rho} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\delta} \cdot \sigma_{\alpha} \cdot \sigma_{\kappa} \cdot \sigma_{\mu} \Rightarrow$$

$$E_{m\sigma} = 112800.29 \text{ kWh/έτος}$$

όπου:

$E_{HA} = 1779.10$: ετήσια ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (kWh/m² έτος)

$N = 572$: αριθμός Φ/Β πλαισίων

$P_{p\eta} = 0.175$: ισχύς αιχμής Φ/Β πλαισίου

Πίνακας 1.

Συνολικό κόστος αγοράς Φ/Β συλλεκτών	351.780.00	Ευρώ
Συνολικό κόστος εγκατάστασης συλλεκτών	54.340.00	Ευρώ
Κόστος inverter	2.500.00	Ευρώ
Κόστος συστήματος ελέγχου & προστασίας	1.000.00	Ευρώ
Κόστος μετρητή ΔΕΗ	500.00	Ευρώ
Κόστος γραμμής μεταφοράς προς το δίκτυο της ΔΕΗ	500.00	Ευρώ
Κόστος οικοπέδου	0.00	Ευρώ
Συνολικό κόστος εγκατάστασης	410.620.00	Ευρώ
Ποσοστό επιδότησης για την περιοχή	0.00	%
Ποσοστό επιδότησης για το είδος της επιχείρησης	0.00	%
Πληθωρισμός	5.25	%
Διάρκεια Δανείου	15	Έτη
Ετήσιο κόστος συντήρησης της εγκατάστασης	600.00	Ευρώ
Ετήσιο κόστος για φύλαξη χώρου	900.00	Ευρώ
Περίοδος χάριτος δανείου	0	Έτη
Τιμή αγοράς kWh από τη ΔΕΗ	0.55	Ευρώ
Ρυθμός αύξησης της τιμής αγοράς ρεύματος	0.00	%
Ετήσιο τραπεζικό επιτόκιο	1.50	%
Διάρκεια ζωής εγκατάστασης	25	Έτη

Από όλα τα παραπάνω στοιχεία υπολογίζονται τα ακόλουθα οικονομικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη βιωσιμότητα της Φ/Β εγκατάστασης:

ΚΑΘΑΡΑ ΠΑΡΟΥΣΑ ΑΞΙΑ

61,548.24 Ευρώ

ΑΠΟΣΒΕΣΗ

8 Έτη

ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

3.31

$\sigma_{\gamma} = 0.90$: συντελεστής γήρανσης

$\sigma_{\rho} = 0.90$: συντελεστής ρύπανσης για πλαίσια ελαφρώς σκονισμένα

$\sigma_{\delta} = 0.99$: συντελεστής απωλειών διόδου

$\sigma_{\theta} = 0.89$: συντελεστής θερμοκρασίας
 $\sigma_{\theta} = 1 - ((t_a + 30) - 25) \cdot 0.004$ (t_a μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα)

$\sigma_{\alpha} = 0.98$: συντελεστής ανομοιογένειας πλαισίων

$\sigma_{\kappa} = 0.98$: συντελεστής καλωδιώσεων σύνδεσης πλαισίων

$\sigma_{\mu} = 0.92$: συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας από την έξοδο της

Πίνακας Οικονομικών Δεικτών

Κ.Π.Α. (ΕΥΡΩ)	Ε.Σ.Α. (%)	Χ.Α. (ΕΤΗ)
------------------	---------------	---------------

Φ/Β συστοιχίας μέχρι την κατανάλωση.

III. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης του Φ/Β συστήματος γίνεται με βάση τα οικονομικά στοιχεία που παρουσιάζονται στον πίνακα 1.