

7. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων και πλαισίων

H. Boileau, Savoie University, FR

Μαθησιακά αποτελέσματα

Μετά από τη μελέτη αυτού του κεφαλαίου, ο αναγνώστης θα πρέπει να είναι σε θέση να:

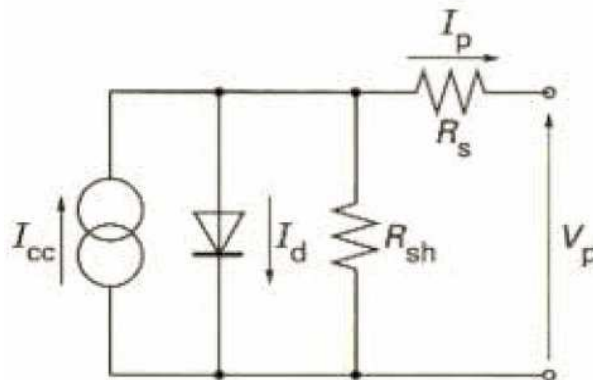
- Κατανοήσει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων και μονάδων
- Εκτελέσει μαθηματικούς υπολογισμούς για την αξιολόγηση μεγεθών όπως η τάση, το ρεύμα και η ισχύς του φωτοβολταϊκού στοιχείου ή μονάδας
- Καταλαβαίνει την έννοια της μέγιστης ισχύος και να είναι σε θέση να την εκτιμήσει μαθηματικά
- Καταλαβαίνει την έννοια του δείκτη πλήρωσης (Fill Factor), που είναι δείκτης ποιότητας των φωτοβολταϊκών στοιχείων
- Να είναι σε θέση να εκτιμήσει την έξοδο μιας μονάδας με βάση τα στοιχεία STC του κατασκευαστή
- Κατανοήσει την επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων
- Κατανοήσει τη διαδικασία γήρανσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι στην πραγματικότητα ένα πολύ γνωστό ηλεκτρονικό εξάρτημα που ονομάζεται "LED" (Light Emitting Diode), ένα εξάρτημα που επιτρέπει να περάσει το ηλεκτρικό ρεύμα σε μία κατεύθυνση (με πτώση τάσης περίπου 0.6 volt) και που εμποδίζει το πέρασμά του στην άλλη κατεύθυνση.

Στην περίπτωση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, προσπαθούμε να κρατήσουμε την επιφάνεια της επαφής όσο το δυνατόν ευρύτερη για να συλλεχθεί η μέγιστη ηλιακή ενέργεια.

Το απλοποιημένο ηλεκτρικό διάγραμμα ενός τέτοιου ηλιακού στοιχείου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικ. 1: Ηλεκτρικό διάγραμμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Αναγνωρίζει κανείς το σύμβολο της διόδου (διασχίζεται από το ρεύμα I_d), παράλληλα με την γεννήτρια του ρεύματος I_{CC} , η οποία αντιστοιχεί στην ροή των ηλεκτρονίων που δημιουργούνται από τη ροή των φωτονίων από το φως (ηλιακό ή άλλο) εντός της επαφής του διόδου. Επίσης παράλληλα με την διόδο υπάρχει η αντίσταση R_{sh} (αντίσταση διακλάδωσης), η οποία αντιστοιχεί στις άμεσες απώλειες μέσω της επαφής. Στη σειρά προς τη χρήση των V_p και I_p , είναι η αντίσταση R_s (αντίσταση σειράς) που αντιστοιχεί, μεταξύ άλλων, με τις απώλειες Joule στα σύρματα.

Στους δύο πόλους του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ηλεκτρική ενέργεια ανακτάται υπό την μορφή μίας τάσης και ενός ρεύματος V_p και I_p αντίστοιχα.

$$I_p = I_{CC} - I_s \left(e^{\frac{V_p + I_p R_s}{kT/q}} - 1 \right) - \frac{V_p + I_p R_s}{R_{sh}}$$

Όπου: I_{CC} = Μεταβλητό ρεύμα, εξαρτώμενο από την φωτεινή ακτινοβολία

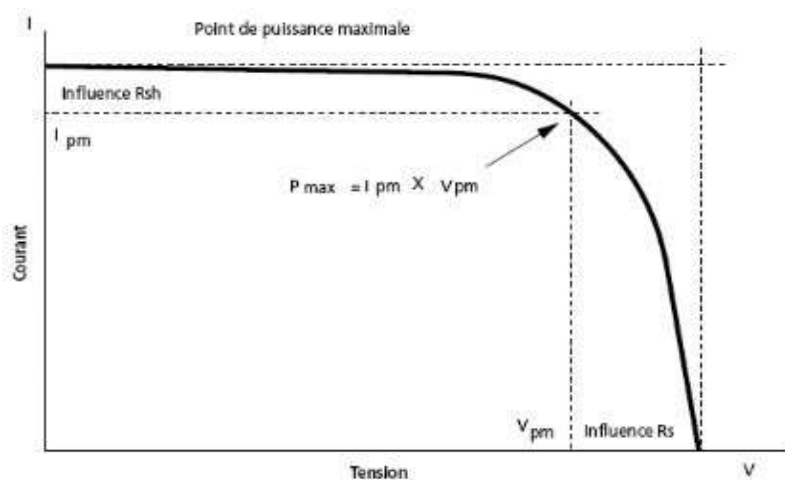
T = Θερμοκρασία σε K

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K (Σταθερά Boltzmann)

$q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C (φορτίο του ηλεκτρονίου)

I_s = κάποια nA (εγγενές χαρακτηριστικό της κάθε διόδου)

Η παρουσίαση της εξίσωσης $I_p = f(V_p)$ είναι περίπου:



Εικ. 2: Εξίσωση $I_p = f(V_p)$

Σε αυτή την καμπύλη μπορεί κανείς να αναγνωρίσει την καμπύλη της διόδου (προς τα κάτω, λόγω του συμβόλου - στην εξίσωση) και μετατοπίζεται προς την κορυφή της τιμής I_{CC} από το ρεύμα που παράγεται από φωτεινή ακτινοβολία.

Χαρακτηριστικά σημεία σε αυτή την καμπύλη για ένα στοιχείο κρυσταλλικού πυριτίου:

Τάση ανοιχτοκύκλωσης ($I_p = 0$ A) $V_{oc} = 0.6$ V (ισχύς $P = 0$ W)

Ρεύμα βραχυκύκλωσης ($V_p = 0$ V) I_{CC} (μεταβλητό ανάλογα με την ακτινοβολία, ισχύς $P = 0$ W)

Τάση φόρτισης $V_{pm} = 0.5$ V στο σημείο λειτουργίας όπου η ισχύς μεγιστοποιείται

Ρεύμα I_{pm} (μεταβλητό ανάλογα με την ακτινοβολία) στο σημείο λειτουργίας όπου η ισχύς μεγιστοποιείται

Μέγιστη ισχύς : $P_{max} = I_{pm} \times V_{pm}$

Αξίζει να σημειωθεί πως, μεταβάλλοντας την τάση V_{pm} από 0 ως V_{oc} (ή I_p από 0 έως I_{cc}), η ισχύς ξεκινά από 0W για να φτάσει το μέγιστο P_{max} , ενώ μετά κινείται πάλι προς τα 0W.

Η απόδοση της ενεργειακής μετατροπής της φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου με επιφάνεια S , που αποδίδει ισχύ P_{max} υπό φωτεινή ακτινοβολία I_{rrad} είναι η εξής:

$$R_{cell} = \frac{P_{max} (W) / S(m^2)}{I_{rrad} (W/m^2)}$$

Έτσι μπορεί να οριστεί και ένας δείκτης ποιότητας, ο δείκτης πλήρωσης (Fill Factor), που αντικατοπτρίζει την ποιότητα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου:

$$FF = \frac{V_{pm} \times I_{pm}}{V_{oc} \times I_{cc}}$$

Τυπικοί δείκτες για διάφορες φωτοβολταϊκές τεχνολογίες είναι οι εξής:

Κρυσταλλικό πυρίτιο (m-Si): $FF = 0.83$

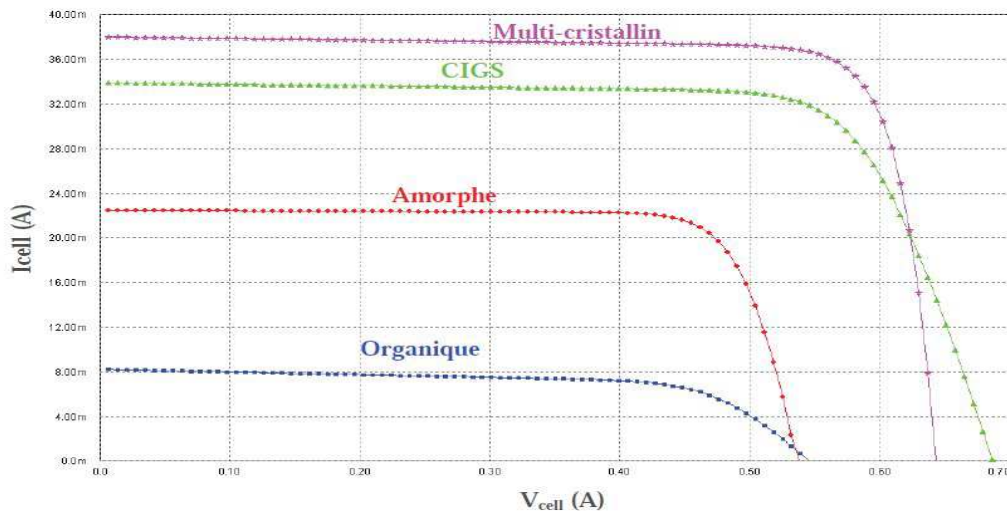
Άμορφο πυρίτιο a-Si : $FF = 0.7$

Κάδμιο τελλούριο (CdTe): $FF = 0.76$

Χαλκό ίνδιο σεληνίου: $FF = 0.78$

Σύμφωνα με φωτοβολταϊκές τεχνολογίες των στοιχείων, η διάταξη της εξίσωσης $I_p = f(V_p)$ διατηρεί την ίδια μορφή, αλλά οι τιμές της τάσης ανοιχτοκύκλωσης είναι ελαφρώς διαφορετικές και ειδικά, για την ίδια επιφάνεια, τα ρεύματα βραχυκυκλώματος είναι διαφορετικά, επειδή οι αποδόσεις μετατροπής εξόδου είναι διαφορετικές για κάθε τεχνολογία.

Η μορφή της εξίσωσης $I_p = f(V_p)$ για διάφορες φωτοβολταϊκές τεχνολογίες παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



(Source: INES RDI/CEA)

Εικ. 3: Μορφή της εξίσωσης $I_p = f(V_p)$ για διάφορες φωτοβολταϊκές τεχνολογίες

Παρακάτω αναφέρονται οι τυπικές αποδόσεις μετατροπής για διάφορες φωτοβολταϊκές τεχνολογίες:

Κρυσταλλικό πυρίτιο (m-Si): from 15 to 17%

Άμορφο πυρίτιο (a-Si): 6 to 8%

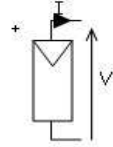
Κάδμιο τελλούριο (CdTe): 11 to 12%

Χαλκό ίνδιο σελήνιο: 12 to 13%

Οργανικά στοιχεία (ακόμη σε ερευνητικό επίπεδο): 5% (ρεκόρ στο 11%)

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μιας φωτοβολταϊκής μονάδας

Η τάση του 0.5 V που αποδίδεται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι πολύ αδύναμη για τις περισσότερες εφαρμογές. Για να αυξηθεί η τάση, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούνται από φωτοβολταϊκά στοιχεία συναρμολογημένα σε σειρά για την αύξηση της τάσης.



Το ηλεκτρικό σύμβολο ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου :

Ιστορικά, τα πρώτα φωτοβολταϊκά πλαίσια είχαν 36 φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά (0.5 V). Είχαν χρησιμοποιηθεί σε απομονωμένες περιοχές για να φορτίσουν μπαταρίες 12 Volt μολύβδου-οξέος και, γι' αυτό τον λόγο, οι μονάδες αυτές είναι γνωστές ως τύπου 12V. Η τάση των 18 Volt επιτρέπει την πλήρη φόρτιση μπαταριών 12V (τυπικά 14.8 volts στην μέγιστη φόρτιση), ακόμη και με ασθενή ακτινοβολία (όπου η τάση πέφτει ελαφρά).

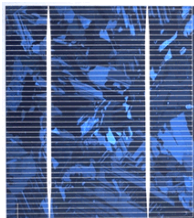
Επί του παρόντος, δεν υπάρχει αγορά για φορτιστές συσσωρευτών δεδομένου ότι οι περισσότερες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στον κόσμο συνδέονται στο δίκτυο, έτσι ο αριθμός των στοιχείων σε σειρά μπορεί να είναι υψηλότερος, σε γενικές γραμμές με 48, 54, 60, 72, 96 στοιχεία (πρότυπο 60 στοιχεία).

Εν ολίγοις, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συναρμολογούνται σε σειρά για να δημιουργήσουν φωτοβολταϊκά πλαίσια, και τα πλαίσια συναρμολογούνται σε σειρά και παράλληλα για να σχηματίσουν τα φωτοβολταϊκά πεδία.

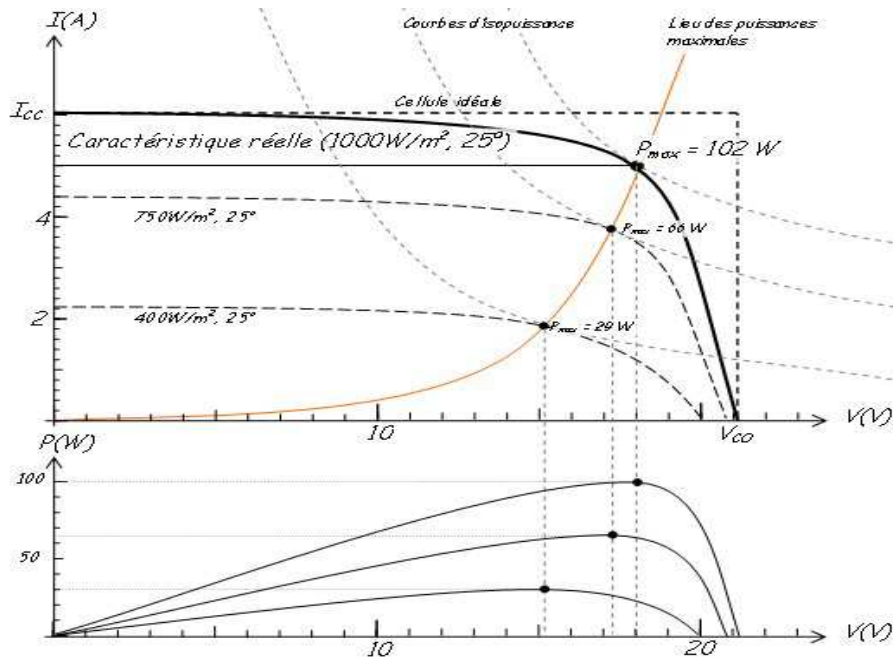
Φ/Β Στοιχείο

Φ/Β πλαίσιο

Φ/Β Πεδίο



Η χαρακτηριστική καμπύλη ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου (για διάφορες ακτινοβολίες) για το ρεύμα εξόδου και την ισχύ (δηλαδή προϊόν τάσεως-έντασης) σύμφωνα με την τάση εξόδου αναπαρίστανται στα ακόλουθα σχήματα για ένα 12V φωτοβολταϊκό πλαίσιο :



Εικ. 4: Καμπύλη έντασης προς τάση για φωτοβολταϊκό πλαίσιο 12V.

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων δίνονται για συνθήκες λειτουργίας που περιγράφονται υπό τον όρο STC (Standard Test Conditions - τυπικές συνθήκες δοκιμής), οι οποίες είναι:

- ηλιακή ακτινοβολία 1000 W/m^2
- ηλιακό φάσμα AM 1.5
- θερμοκρασία 25°C

- V_{oc} , τάση ανοιχτοκύκλωσης (ένταση = 0A) σε volt (21 volts στην καμπύλη)
- Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{cc} (τάση = 0V) σε A (6A στην καμπύλη)
- τυπική τάση λειτουργίας στο σημείο μέγιστης ισχύος V_{typ} σε volt (18 volts στην καμπύλη)
- τυπική ένταση λειτουργίας στο σημείο μέγιστης ισχύος I_{typ} σε A (5.6 A στην καμπύλη)
- το σημείο μέγιστης ισχύος, P_{max} σε W (102 W στην καμπύλη)

Στις συνθήκες STC (1000 W/m^2 , φάσμα AM1.5 και 25°C), το σημείο της καμπύλης ισχύος με την μεγαλύτερη τιμή ισχύος, αναφέρεται σαν μέγιστη ισχύς P_c του φωτοβολταϊκού πλαισίου, και εκφράζεται σε Watts Peak (W_p).

Σύμφωνα με τις καμπύλες που απεικονίζονται παραπάνω για διάφορες ακτινοβολίες (1000 , 750 και 400 W/m^2 , και μία θερμοκρασία επιφανείας φ/β στοιχείου 25°C), παρατηρεί κανείς ότι το βέλτιστο σημείο λειτουργίας ως προς την ισχύ ποικίλει ως προς το ρεύμα και την τάση. Αυτό σημαίνει πως το φορτίο που είναι συνδεδεμένο σε ένα φ/β πλαίσιο (ή ένα φωτοβολταϊκό πεδίο) για να λειτουργήσει σε αυτή τη βέλτιστη ισχύ, θα πρέπει η εγκατάσταση να περιλαμβάνει μια ηλεκτρονική συσκευή που θα ψάξει για αυτό το σημείο της μέγιστης ισχύος. Η συσκευή αυτή ονομάζεται MPPT (ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος - Maximum Power Point Tracking). Συνήθως, οι αντιστροφεείς περιλαμβάνουν αυτή τη λειτουργία.

Παρακάτω εξετάζεται η σχέση μεταξύ της επιφάνειας S (σε m^2), της απόδοσης της μετατροπής της φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια (R_{mod}) και της μέγιστης ισχύος του φωτοβολταϊκού πλαισίου (σε W_p).



Βάσει του τύπου, που αναφέρθηκε προηγουμένως, για την απόδοση ενός ϕ/β στοιχείου:

$R_{cell} = \frac{P_{max}(W)/S(m^2)}{I_{rrad}(W/m^2)}$ και δεδομένου ότι η μέγιστη ισχύς P_c ορίζεται στις συνθήκες STC, μπορούμε να γράψουμε:

$$P_c (in W_p) = S (en m^2) \times R_{module} \times 1000 W/m^2$$

ή

$$P_c (in kW_p) = S (en m^2) \times R_{module} \times 1 kW/m^2$$

Για παράδειγμα, ένα πλαίσιο δύο m^2 με απόδοση 0.15 (15%), έχει μέγιστη ισχύ:

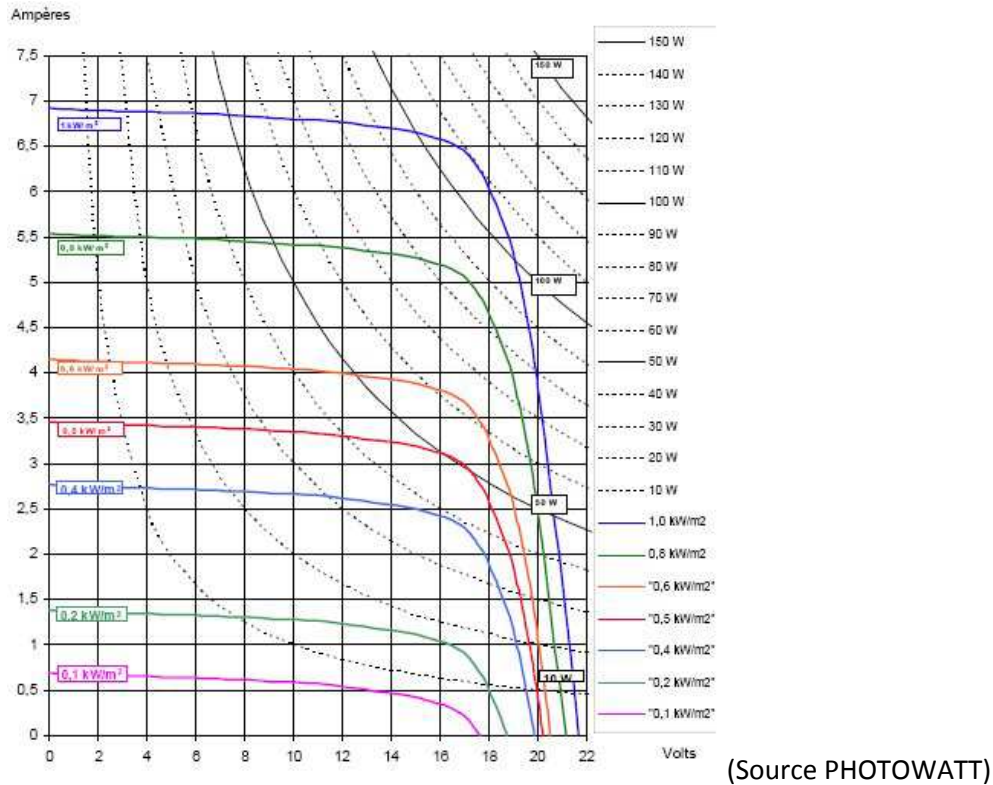
$$P_c (in W_p) = 2 m^2 \times 0.15 \times 1000 W/m^2 = 300 W_p$$

ή

$$P_c (in kW_p) = 2 m^2 \times 0.15 \times 1 kW/m^2 = 0.3 kW_p$$

Σημείωση: η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, γενικά είναι ελαφρώς χαμηλότερη από την απόδοση των ϕ/β στοιχείων από τα οποία κατασκευάζεται, επειδή η επιφάνεια μεταξύ των ϕ/β στοιχείων δεν συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή και για αυτό είναι απαραίτητο να μετρήσει κανείς την επιφάνεια του πλαισίου. Για παράδειγμα, ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο με απόδοση 12% μπορεί να περιέχει στοιχεία με ατομική απόδοση 14%.

Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στις καμπύλες τάσης-έντασης για ένα συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο:



Εικ. 5 : Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στις καμπύλες τάσης-έντασης για ένα συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Παράδειγμα από ένα πλαίσιο της εταιρείας Photowatt , τύπου PW6-110

Η ένταση είναι γραμμική συνάρτηση της ακτινοβολίας I (και της επιφάνειας των στοιχείων), η τάση είναι μια λογαριθμική συνάρτηση της ακτινοβολίας (καθώς και του αριθμού στοιχείων σε σειρά), αλλά σχετικά κοντά στην τιμή υπό συνθήκες STC.

Έτσι, κατά πρώτη προσέγγιση, μπορούμε να γράψουμε πως η ηλεκτρική ισχύς εξόδου είναι μια γραμμική συνάρτηση της ακτινοβολίας, η οποία καθιστά δυνατό τον υπολογισμό της ηλεκτρικής εξόδου (στο σημείο της μέγιστης ισχύος) για οποιαδήποτε ακτινοβολία.

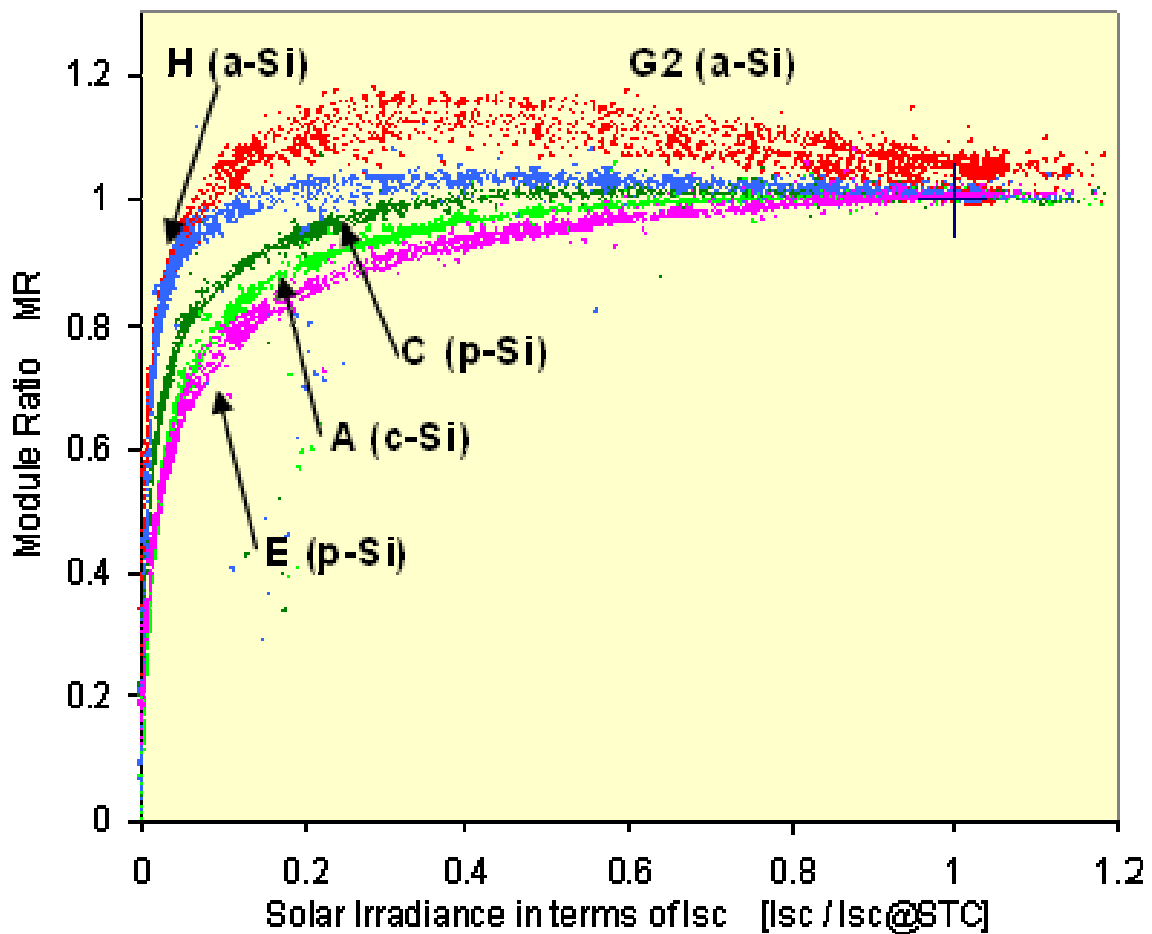
$$\text{Ηλεκτρική ισχύς εξόδου: } E_p \text{ (σε W)} = C_p \text{ (out of } W_p) \times I_{\text{rrad}} \text{ (σε kW/m}^2\text{)}$$

$$\text{ή } \text{Ηλεκτρική ισχύς εξόδου: } E_p \text{ (σε kW)} = C_p \text{ (in kW}_p) \times I_{\text{rrad}} \text{ (σε kW/m}^2\text{)}$$

Αυτοί οι τύποι δεν φαίνονται ομοιογενείς, αλλά θα πρέπει να υπενθυμίσουμε πως τα "Watt Peak" δεν είναι μονάδα SI και ότι εκφράζει την ηλεκτρική ισχύ που ανακτάται υπό μια φωτεινή ισχύ 1 kW/m².

Για παράδειγμα, ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο 300 W_p υπό ακτινοβολία 600 W / m² θα δημιουργήσει ηλεκτρική έξοδο $E_p = 300 W_p \times 0.6 \text{ kW} / \text{m}^2 = 180 \text{ W}$ (προσοχή, αυτό είναι μια πρώτη προσέγγιση).

Το παρακάτω γράφημα αναπαριστά την τυποποιημένη έξοδο σε συνθήκες STC (ως εκ τούτου με ακτινοβολία 1000 W / m^2) σε συνάρτηση με την ακτινοβολία και για διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πλαισίων.



Εικ. 6: Τυποποιημένη έξοδος σε συνθήκες STC (ακτινοβολία 1000 W / m^2) σε συνάρτηση με την ακτινοβολία και για διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πλαισίων.

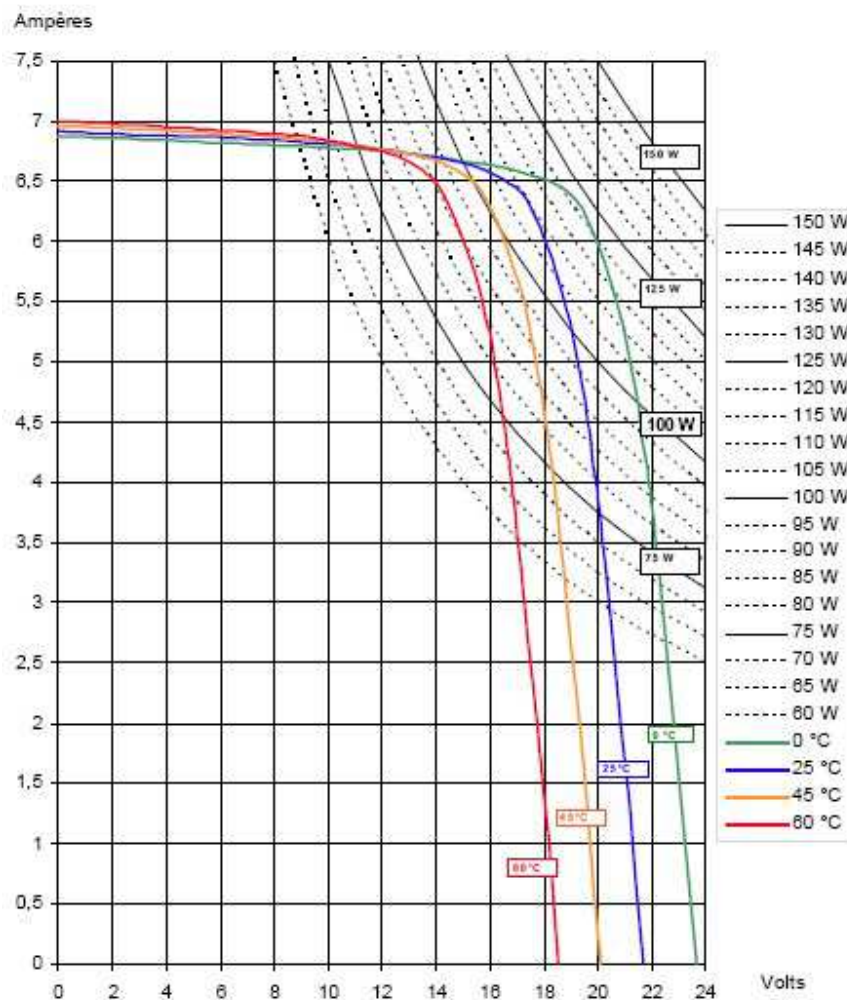
(Πηγή: INES RDI/CEA)

Βάσει των ανωτέρω καμπυλών, πρέπει να σημειωθεί ότι για την τεχνολογία άμορφου πυριτίου (a-Si, σε κόκκινο και μπλε), η έξοδος είναι ελαφρώς υψηλότερη από την τυποποιημένη έξοδο για τις περισσότερες ακτινοβολίες, αλλά κοντά 1, εκτός εάν η ακτινοβολία είναι χαμηλή όπου η έξοδος πέφτει. Για κρυσταλλικές τεχνολογίες (C-Si και P-Si, πράσινο και ροζ), η έξοδος είναι ελαφρώς χαμηλότερη από την τυποποιημένη έξοδο για τις περισσότερες ακτινοβολίες, αλλά κοντά στο 1, εκτός εάν η ακτινοβολία είναι χαμηλή, όπου πέφτει η έξοδος.

Αυτό δείχνει ότι ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου σύμφωνα με την ακτινοβολία είναι έγκυρος ως μία πρώτη προσέγγιση για ακτινοβολίες που κυμαίνονται μεταξύ 100 και 1000 W/m^2 . Λογισμικά για την προσομοίωση των φωτοβολταϊκών (όπως τα γνωστά PVsyst και PV-SOL) καθιστούν δυνατή την εκτέλεση ακριβέστερων υπολογισμών, διότι λαμβάνουν υπόψη όλες αυτές τις απώλειες υπολογιζοντάς τες.

Επίδραση της θερμοκρασίας επί των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών

Επίδραση της θερμοκρασίας στις καμπύλες τάσης-έντασης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου :



(Source PHOTOWATT)

Εικ 7: Επίδραση της θερμοκρασίας, π.χ. για ένα πλαίσιο της εταιρείας Photowatt, τύπου PW6-110

Από αυτές τις καμπύλες, σημειώνεται ότι η ένταση του ρεύματος αυξάνεται ελαφρώς ανάλογα με τη θερμοκρασία (+2 mA ανά °C, οπότε +0.028% ανά °C).

Παρατηρεί κανείς ότι η τάση μειώνεται σημαντικά ανάλογα με τη θερμοκρασία (-79 mV ανά °C, οπότε -0.47% ανά °C).

Κατά συνέπεια, η ισχύς στο σημείο της μέγιστης ισχύος μειώνεται κατά -0.43% ανά °C.

Για παράδειγμα, το παραπάνω φωτοβολταϊκό πλαίσιο των 110 W_p, υπό ακτινοβολία 800 W/m² και με θερμοκρασία στοιχείου 55 °C θα έχει μία ηλεκτρική ισχύ εξόδου P_e ίση με:

$$P_e = 110 \times 0.8 \times (1 - (55-25) \times 0.0043) = 88 \times 0.871 = 76.65 \text{ W}$$

Για να ορισθεί η θερμοκρασία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, χρησιμοποιείται το **TUC** (Temperature of use of cell - θερμοκρασία λειτουργίας στοιχείου) ή το **NOCT** (Nominal Operating Cell Temperature – ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας στοιχείου).

Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του πλαισίου PHOTOWATT Company PW1650 :

PW1650						
CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES						
Encapsulation	Verre / TPT ou PVDF					
Taille des cellules	125 X 125 mm					
Nombre de cellules	72					
Tension	24 V					
Diodes by-pass	4					
Tolérance électrique	0 / + 5 Wc					
Puissance typique	Wc	165	170	175	180	185
Tension à la puissance typique	V	34,4	34,7	35	35,3	35,6
Intensité à la puissance typique	A	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2
Tension en circuit ouvert	V	43,2	43,3	43,4	43,5	43,6
Intensité de court circuit	A	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5
Tension maximum du circuit	V	1000V DC				
Coefficient de température	α (Isc) = +0,034%/°C					
	β (Voc) = -0,36%/°C					
	δ (Pm) = -0,43 % /°C					
NOCT	47,1°C ± 2					
Spécifications de puissance en STC (Standard Test Conditions 1000 W/m ² ; 25°C ; AM 1,5)						

Εικ. 8: Χαρακτηριστικά του πλαισίου PHOTOWATT Company PW1650

Το NOCT αυτής της μονάδας είναι 47.1 °C

Το TUC ή το NOCT αντιπροσωπεύει την θερμοκρασία που επιτεύχθηκε από ένα στοιχείο ενθυλακωμένο σε ένα φ/β πλαίσιο, σε ανοικτό κύκλωμα, υπό ακτινοβολία 800W/m², θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C, γωνία 45° και ταχύτητα ανέμου 1 m/s.

Από τους αριθμούς TUC ή NOCT, είναι δυνατόν να υπολογιστεί κατά προσέγγιση η θερμοκρασία που έφθασε ένα στοιχείο σε ένα φ/β πλαίσιο (T_{cell}) σύμφωνα με την ηλιακή ακτινοβολία (I_{rrad}) και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}).

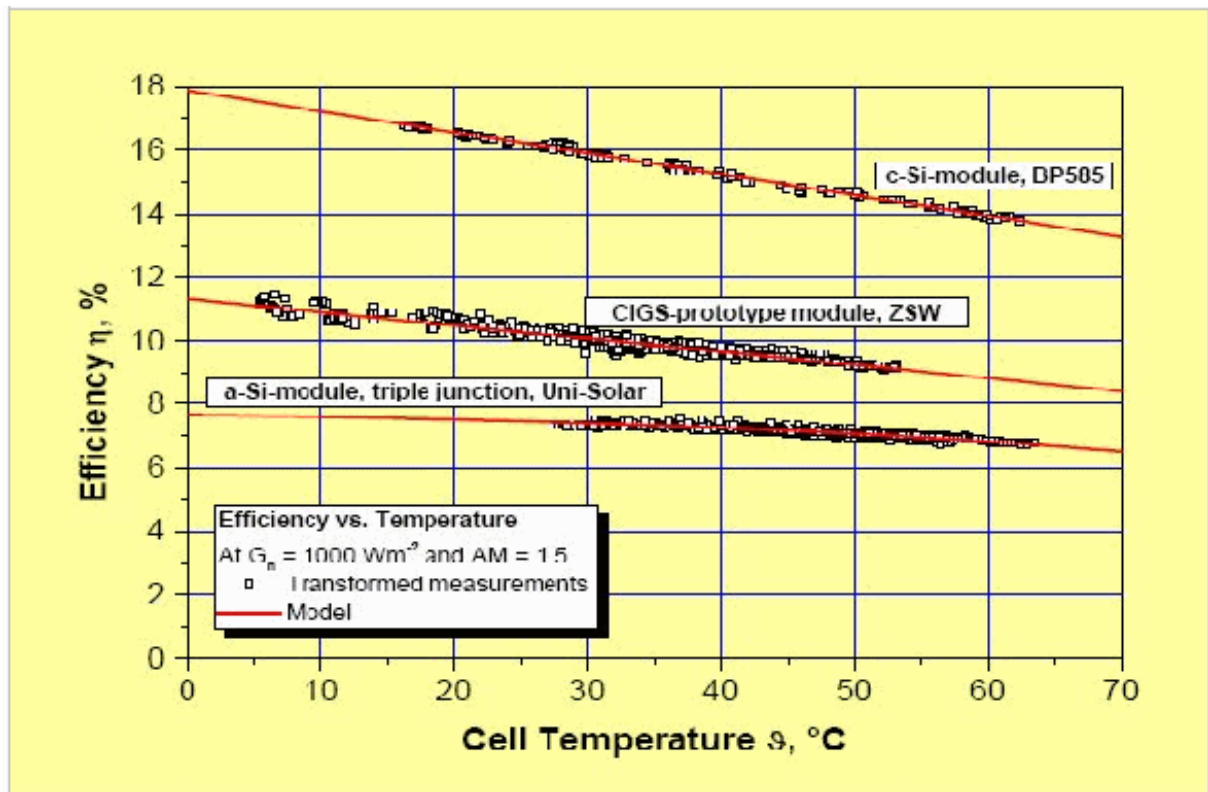
$$T_{cell} \text{ (en } ^\circ\text{C)} = T_{amb} \text{ (en } ^\circ\text{C)} \times (TUC \text{ (en } ^\circ\text{C)} - 20^\circ\text{C)} \times \frac{I_{rrad} \text{ (en } W/m^2)}{800 W/m^2}$$

Για παράδειγμα, ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο με TUC = 47°C, υπό ακτινοβολία I_{rrad} of 1000 W/m² και με θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a = 30°C, η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου θα είναι:

$$\text{Θερμοκρασία φ/β στοιχείου, } T_{cell} = 30 + (47-20) \times 1000/800 = 64^\circ\text{C}$$

Σημειώστε πως οι αριθμοί TUC και NOCT δίνονται για συνθήκες ελεύθερου πεδίου: για την ενσωμάτωση σε μια στέγη, η θερμοκρασία θα είναι υψηλότερη και δύσκολο να υπολογιστεί, ανάλογα με τον τύπο της ενσωμάτωσης.

Σο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξέλιξη του συντελεστή απόδοσης με την θερμοκρασία για διαφορετικές φ/β τεχνολογίες:



Εικ. 9: Επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση για διαφορετικές τεχνολογίες φ/β

Η επίδραση των συντελεστών θερμοκρασίας στην ισχύ για διάφορες φ/β τεχνολογίες είναι η εξής:

Τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου (C-Si): $-0,45\%/^{\circ}\text{C}$

Τεχνολογία χαλκού ινδίου σεληνίου: $-0,35\%/^{\circ}\text{C}$

Τεχνολογία άμορφου πυριτίου (a-Si): $-0,2\%/^{\circ}\text{C}$

Τεχνολογία καδμίου τελλουρίου (CdT): $-0,25\%/^{\circ}\text{C}$ (δεν παρουσιάζεται στο παραπάνω γράφημα)

Διαπιστώνεται ότι οι τεχνολογίες που έχουν σχετικά χαμηλή απόδοση έχουν επίσης χαμηλούς συντελεστές θερμοκρασίας και, ως εκ τούτου, μικρότερες απώλειες λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του πλαισίου υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι, θα έχουν χαμηλότερες απώλειες για την ίδια μέγιστη ισχύ με υψηλότερης αποδοτικότητας τεχνολογίες αλλά, από την άλλη, θα είναι απαραίτητη η εγκατάσταση μεγαλύτερης επιφάνειας, η οποία είναι ένα μειονέκτημα.

Ένα άλλο ζήτημα, παρά το χαμηλότερο δείκτη απωλειών για τις φτωχές σε απόδοση τεχνολογίες, σε μια θερμοκρασία 70°C, είναι πάντα η τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου που διατηρεί την καλύτερη απόδοση μετατροπής.

Υποβάθμιση των φωτοβολταϊκών πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου σε σχέση με τον χρόνο

Η μελέτη αυτή προέρχεται από την LEE TISO, εκτελέστηκε στην Ελβετία επί των 288 μονάδων ARCO Solar ASI 16-2.300 m-Si των 37 Wp το καθένα, εγκατεστημένες στις 13 Μαΐου 1982.



Τα αποτελέσματα ήταν:

Year	Measured plant power	N° of modules	Module mean power [W]
Nominal	10.7 kW	288	37.1 Δ = -8.4%
1983	9.8 kW	288	34.0
2002	8.3 kW	252	32.9
Δ module power _{2001_1983}			- 3.2%
détérioration de la puissance du module (depuis 1983)			- 0.2%

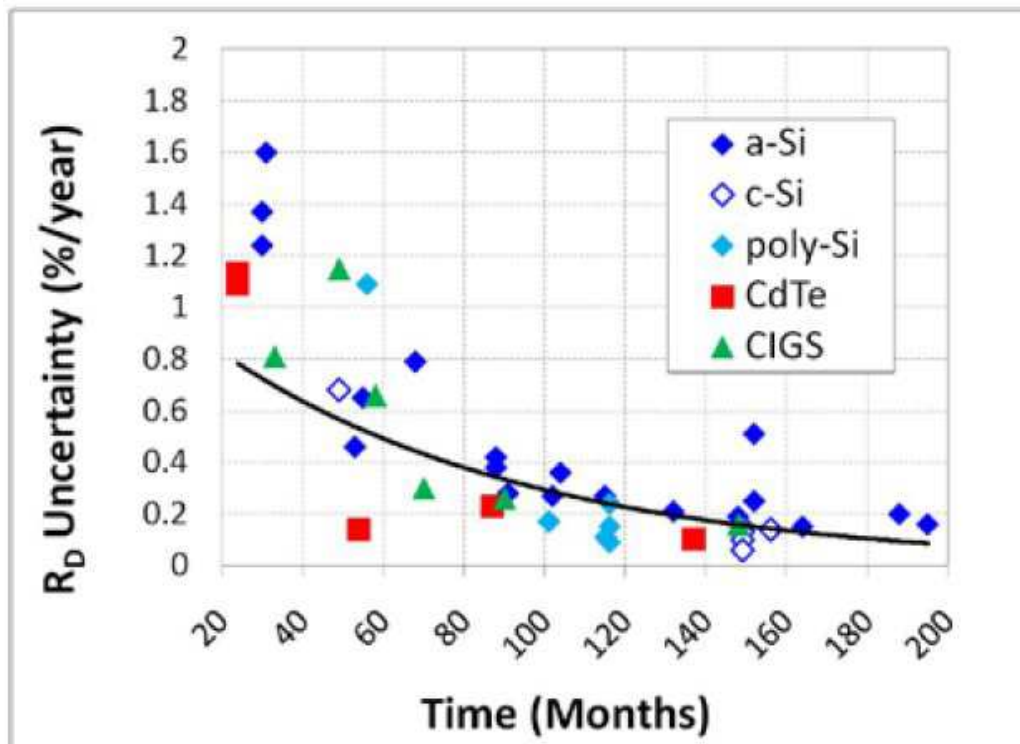
Εικ. 10: Επίδραση του χρόνου στις επιδόσεις μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Σημειώνεται ότι μεταξύ των 288 πλαισίων, 252 βρίσκονται ακόμη σε λειτουργία, η οποία αντιστοιχεί σε απώλεια 12.5% μετά από 20 χρόνια.

Επιπλέον, πάνω στα 252 λειτουργικά πλαίσια που απομένουν, η απώλεια της παραγωγής είναι 0.2% ετησίως, η οποία είναι πολύ χαμηλή.

Όπως φαίνεται, αυτά τα πλαίσια που κατασκευάστηκαν το 1983 αποδείχθηκαν αξιόπιστα.

Σύμφωνα με μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε από το US NREL, 'Outdoor PV degradation comparison' τον Ιούνιο του 2010, μελετώντας την αβεβαιότητα του ρυθμού υποβάθμισης συναρτήσει του χρόνου παρατήρησης για διαφορετικές φωτοβολταϊκές τεχνολογίες, τα αποτελέσματα ήταν αυτά που παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα :



(Source: www.nrel.gov/docs/fy11osti/47704.pdf and <http://www.nrel.gov/docs/fy11osti/47596.pdf>)

Εικ. 11: Ρυθμός αβεβαιότητας ως προς το χρόνο για διαφορετικές φωτοβολταϊκές τεχνολογίες.

Σημειώνεται ότι η απώλεια της παραγωγής στη φωτοβολταϊκή ενέργεια είναι κατά προσέγγιση ασήμαντη κατά τη διάρκεια των πρώτων ετών της χρήσης, ιδιαίτερα για τεχνολογίες άμορφου πυριτίου. Μετά από μερικά χρόνια, η ετήσια απώλεια στην παραγωγή των φωτοβολταϊκών έχει σταθεροποιηθεί σε 0.2% ετησίως, η οποία είναι πολύ χαμηλή. Σε σύγκριση, η εγγυημένη μέγιστη απώλεια 20% μετά από 20 χρόνια που δίδεται από την πλειονότητα των κατασκευαστών φωτοβολταϊκών πλαισίων, δηλαδή 1% ετησίως, είναι πολύ μεγαλύτερη από τα αποτελέσματα της έρευνας. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αξιόπιστες σε αυτό το σημείο.

Σύγκριση της παραγωγής μεταξύ διαφόρων τεχνολογιών

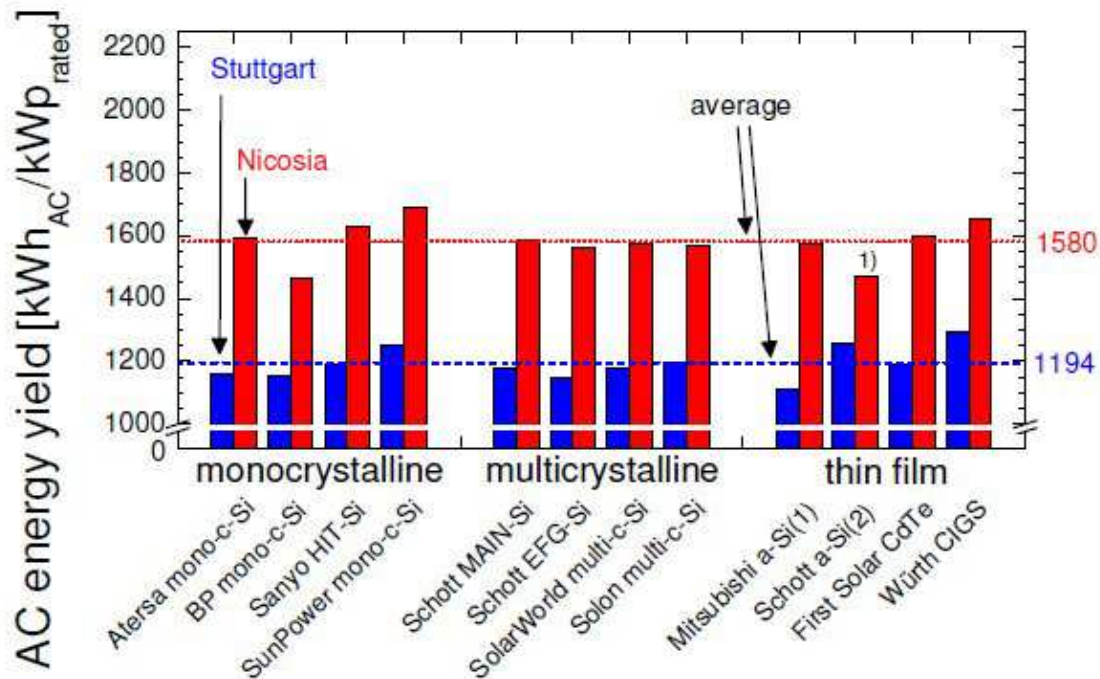
Μια μελέτη που διεξήχθη από το Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης για την παραγωγή ενέργειας από 13 τοποθεσίες στη Γερμανία και στη Κύπρο με τη χρήση διαφόρων τεχνολογιών.

ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 13 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΣΤΗ ΓΕΡΜΑΝΙΑ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ



module type	Stuttgart			Nicosia		
	AC-yield kWh/kW _{Prated}	PR %	T _{mod} °C	AC-yield kWh/kW _{Prated}	PR %	T _{mod} °C
A-170M 24V tracked	-	-	-	2039	76.9	25.8
A-170M 24V	1163	79.7	16.0	1593	79.8	23.8
BP7185S	1158	79.3	17.0	1463	73.3	24.2
HIP-205NHE1	1189	81.5	15.8	1630	81.7	24.0
STM 200 FW	1253	85.8	15.9	1692	84.7	23.9
ASE-165-GT-FT/MC 170	1180	80.9	15.9	1588	79.5	23.5
ASE-260-DG-FT 250	1147	78.5	15.9	1562	78.2	24.2
SW165 poly	1180	80.8	16.1	1573	78.8	24.4
P220/6+	1199	82.1	16.1	1567	78.5	24.3
MA100T2	1113	76.2	15.8	1573	78.8	23.3
ASIOPAK-30-SG	1257	86.1	16.1	1472	73.7	24.1
FS60	1193	81.7	16.4	1599	80.1	24.8
WS 11007/75	1292	88.5	16.7	1653	82.8	24.9
average without tracked	1194	81.8	16.1	1580	79.2	24.1

Εικ. 12: Σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών υπό διαφορετικές συνθήκες κλίματος.



Εικ. 13: Ενεργειακή απόδοση για διαφορετικές τεχνολογίες.

Από το παραπάνω γράφημα, παρατηρεί κανείς ότι καμία τεχνολογία δεν είναι ειλικρινά πιο συμφέρουσα από την άλλη (λέγεται ότι του άμορφου πυριτίου είναι καλύτερη σε χώρες με ισχυρή νέφωση, αλλά αυτό δεν έχει επιβεβαιωθεί), και ότι η διασπορά εντός της ίδιας τεχνολογίας φαίνεται μεγαλύτερη από ότι μεταξύ τεχνολογιών.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ηλιακών φωτοβολταϊκών

Πλεονεκτήματα:

- Δωρεάν πηγή ενέργειας με ένα τεράστιο δυναμικό που μοιράζεται στον πλανήτη
- Αποκεντρωμένο μέσο παραγωγής, αυτονομία
- Μεγάλη αξιοπιστία και ελάχιστη συντήρηση (χωρίς κινούμενα μέρη)
- Καμία ρύπανση κατά τη διάρκεια της χρήσης στο χώρο
- Μεγάλη ευελιξία παραγωγής, από milliWatt σε MegaWatt

Μειονεκτήματα:

- Υψηλό κόστος επένδυσης, ανάγκη για επιδοτήσεις, εξάρτηση από τις πολιτικές αποφάσεις και νομοθεσία
- Διαλείπουσα διαθεσιμότητα (χρειάζεται βοηθητικό ηλεκτρικό δίκτυο ή αποθήκευση)
- Διάχυτη πηγή, μεγάλη επιφάνεια, δυσκολία τοποθέτησης (κτίρια/τοπία)
- Υψηλή τεχνολογία κατασκευής, ενεργοβόρα, χρήση χημικών προϊόντων
- Δυσκολία ανακύκλωσης μερών που πρέπει να αντισταθούν περισσότερο από 20 χρόνια, ακόμη και σε κακές καιρικές συνθήκες

Βιβλιογραφία

Stuart R Wenham (Editor), Martin A Green (Editor), Muriel E Watt (Editor), Richard Corkish (Editor), "Applied Photovoltaics", Routledge, 2013.